

ブラウザを開いてデータベースにアクセスした後、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。

(1) データベースとしての利用

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、テーブルの全フィールドを対象とした検索と、特定のフィールドを指定した検索が可能となっている。データベースとして利用した場合の画面を第2図に示す。破面属性テーブルのタイトルや材料仕様等にキーワードを設定した。各項目のテキストボックスにキーワードを記入し、検索ボタンをクリックすることで、該当するデータを表示することが可能である。これだけでは、コメント内の検索ができないので、右上に全文検索用のテキストボックスも設けた。これを使うことで、観察者のコメントからの検索も可能となる。例えば破断面の特徴である“デンプル”や“ストライエーション”といった用語での検索が可能となる。また、表示形式も選択式とするためのチェックボックスを右に設けた。

第3図はデータベース内から、材料名をSUS316、破壊様式を「疲労」として検索を行った結果である。このような機能を持たせることで、多くの破断面に関する情報が集まった時にも効率的にデータを閲覧することが可能である。次に全フィールドを対象とした検索を行った場合の例を第4図に示す。コメント内に含まれる破断面の模様を表す言葉、例えば“ストライエーション”(疲労破面の特徴)とテキストボックスに記入し検索を押すと、“ストライエーション”を含むリストが表示される。

結果表示の例を第5図に示す。本図はSTS410の高サイクル疲労の例である。破断面の外観写真に巨視的様相を載せ、破断面写真には電子顕微鏡の高倍率における画像を示すことで、疲労破面は巨視的に観察した場合は平坦であり、微

ID	タイトル	材料仕様	破断属性	破壊様式	全文検索
FSDS0001	S45Cホルルの疲労破面(1)	JIS S45C	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0002	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点部)	STS410	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0003	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点から1mm)	STS410	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0005	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点から3mm)	STS410	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0006	STS410鋼延性破面	STS410	実験	延性破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0007	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3mm)	SUS316	実験	高サイクル疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0009	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)	SUS316	実験	高サイクル疲労	<input type="checkbox"/>
FSDS0008	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3mm)	SUS316	実験	高サイクル疲労	<input type="checkbox"/>
FSDS0010	厚板状材料FCD450の疲労破面	FCD450	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0011	アルミ鋼物の過剰変形破面	アルミ鋼物	実験	過剰変形破断	<input type="checkbox"/>

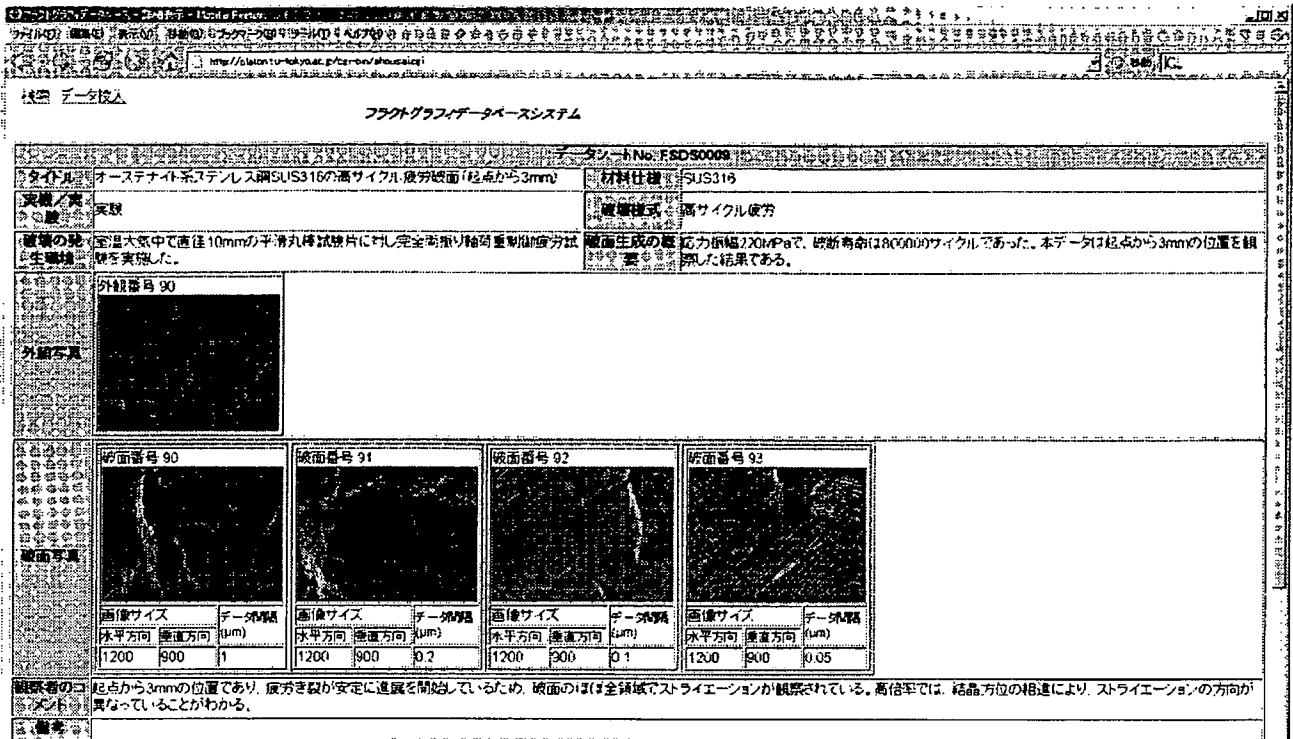
第2図 User Interface of Database

ID	タイトル	材料仕様	破断属性	破壊様式	全文検索
FSDS0007	オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316	SUS316	実験	高サイクル疲労破壊	<input checked="" type="checkbox"/>
FSDS0008	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3mm)	SUS316	実験	高サイクル疲労	<input checked="" type="checkbox"/>
FSDS0009	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)	SUS316	実験	高サイクル疲労	<input checked="" type="checkbox"/>

第3図 Example of Search Result(Keywords SUS316+Fatigue)

ID	タイトル	材料仕様	破断属性	破壊様式	全文検索
FSDS0001	S45Cホルルの疲労破面(1)	JIS S45C	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0002	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点部)	STS410	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0003	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点から1mm)	STS410	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0005	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点から3mm)	STS410	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0007	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3mm)	SUS316	実験	高サイクル疲労破壊	<input type="checkbox"/>
FSDS0009	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)	SUS316	実験	高サイクル疲労	<input type="checkbox"/>
FSDS0008	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3mm)	SUS316	実験	高サイクル疲労	<input type="checkbox"/>
FSDS0010	厚板状材料FCD450の疲労破面	FCD450	実験	疲労破壊	<input type="checkbox"/>

第4図 Example of Search Result (Full text search "Striation")



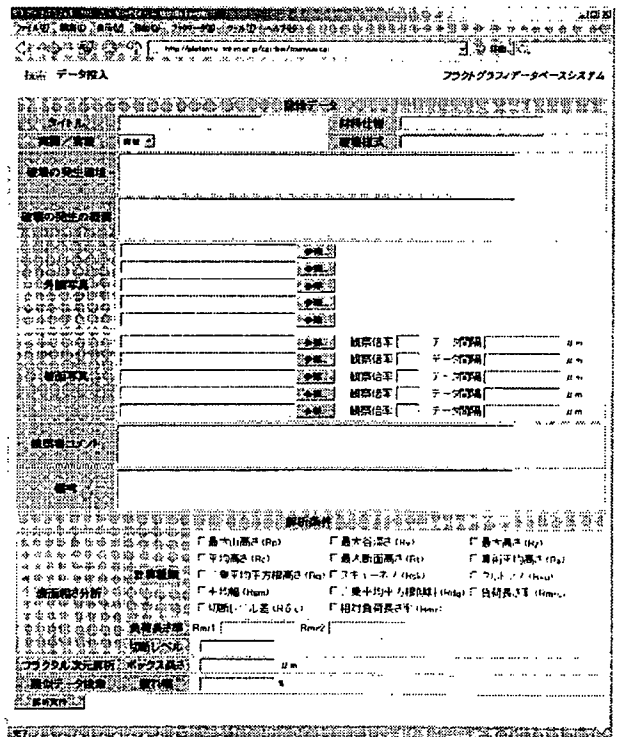
第5図 Example of Data Display

視的に観察した場合は「ストライエーション(縞状模様)」が観察されることが即座に理解できる。さらに、コメント欄にストライエーション間隔とき裂進展速度の関係について記述することで、両者には相関があることがわかる。解析初心者はこのコメントを読むことで、熟練者の知見を学ぶことができる。そして、先の全文検索を用いることで、他の材料におけるストライエーションの様子を見ることも可能である。

(2) 解析システムとしての利用

解析支援システムを選択した場合のユーザーインターフェースを第6図に示す。まず、ユーザーはデータベーステーブルのフィールドを埋めていく。破断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、観察者が破断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。



第6図 User Interface of Fracture Surface Analysis System

1mmから1mmでの観察結果FSOS00081に比べ 書記速度遅延が顕著であり、スライエーションの領域が広がっている。

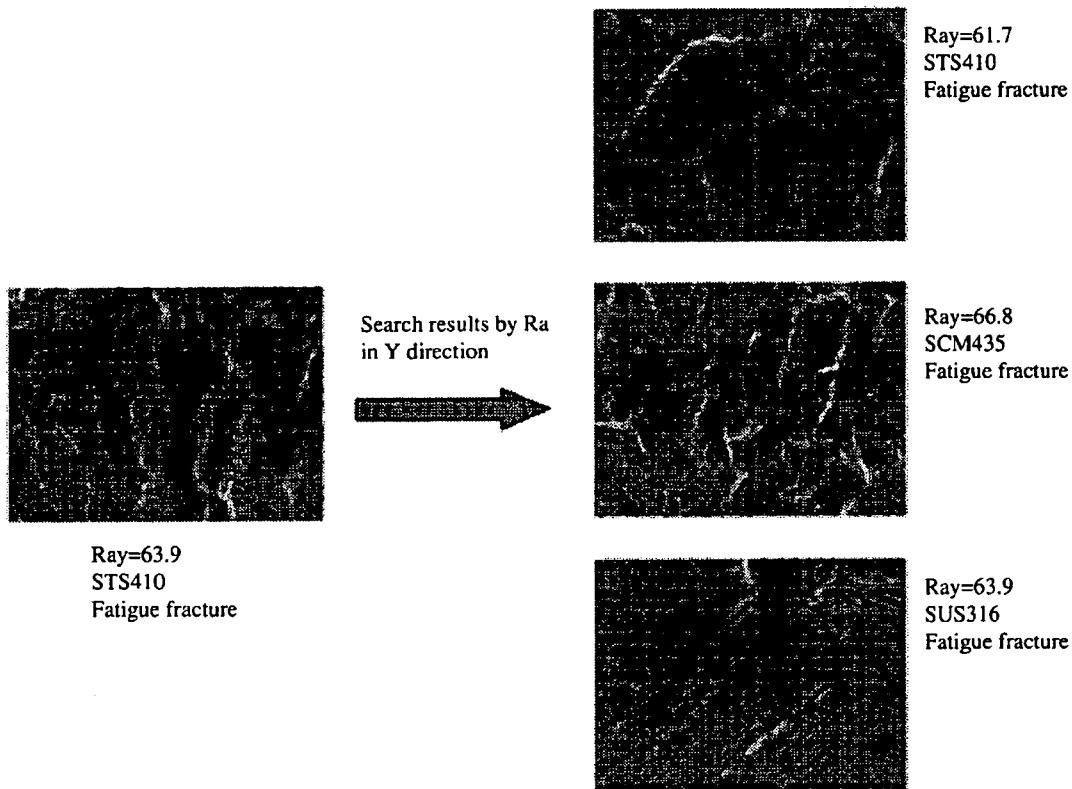
破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料
50	100	53 523727	47 09230	51 274755	62 806149	52 992875	20 092534	39 502411	31 48204	86 518603	74 85		
51	500	80 172705	79 800433	63 493848	61 411985	40 211028	43 260715	46 491311	36 518339	100 383733	159 0		
52	1000	57 736207	82 448098	85 289921	84 679092	38 329823	41 915454	46 705124	42 075822	96 06603	152 2		
53	2000	58 901861	78 677711	59 516026	60 751351	39 941493	26 511619	47 721257	53 090075	88 843353	88 41		

破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料	破断面	材料
50	100	80 100		27 941029	27 342240	24 953807	31 473342						
50	500	20 024901	64 377434										
51	70	100											
51	100	38 338526	18 968854										
52	21	500		35 852716	81 934906	37 353949	23 534017						

第7図 Example of Data Display (Characteristic Parameters)

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。データ表示結果を第5図に示す。画像データは256階調(8bit)のグレースケールビットマップ形式で保存されている。第7図は、計算した特徴量の画面である。第5図の「観察者のコメント」に続いて、画面下に特徴量の表が表示される。また、その下には特徴量が近い破断面のリストとデータへのリンクが表示されている。解析者は各画像の特徴量を簡単に比較することができる。そして、類似した特徴量を持った破断面を簡単に知ることができる。

第8図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である。同図左側のSTS410の疲労破断面を入力画像とし、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



第8図 Search Result of Similar Fracture Surface

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断面が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断面解析者を支援するための情報である。例えば算術平均粗さの平均が近ければ同様の破壊形式であるというのは間違っている。最終的な意思決定は解析者が行なうことになる。

◆おわりに

破断面解析の支援や解析技術の伝承を目的として、インターネット上で利用できる破断面解析支援データベースを試作した。本データベースには破断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断面の特徴量を計算するためのプログラムを搭載している。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。

現段階では、十分なデータ数では無いが、今後は、データ数を増やし、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、データベースの充実を図っていく予定である。

【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) 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 破断面と破壊情報解析、丸善(2000)
- (2) 西田新一監修著：“フラクトグラフィと破断面解析写真集”、総合技術センター(1998)

- (3) 森要・中村春夫：材料、47、pp.637-643(1998)
- (4) 高梨正祐・泉聡志・酒井信介：材料、53、pp.906-912、(2004)
- (5) 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)
- (6) 村上敬宜：“破壊破断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)
- (7) 高梨正祐・山際謙太・泉聡志・酒井信介：圧力技術、Vol.44、No.1、pp.3-11(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) 村尾見平：“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)

【筆者紹介】

山際謙太(昭和50年生・静岡県出身)

(独)労働安全衛生総合研究所 産業安全研究所
機械システム安全研究グループ

研究員(博士・工学)

〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

TEL:0424-91-4512 FAX:0424-91-7846

E-mail:yamagiwa@s.jniosh.go.jp

高梨正裕

石川島播磨重工業(株)

車両用過給機事業部 設計部

〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1

TEL:03-6204-7369 FAX:03-6204-8718

E-mail:masahiro_takanashi@ihi.co.jp

ICEFA-II

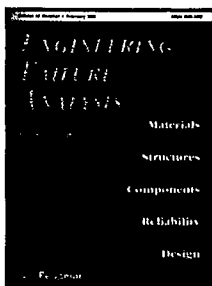
Second International Conference
on Engineering Failure Analysis

2006

September 12-15, 2006 • Toronto, Canada



DELEGATE MANUAL



Organized by



www.icefa.elsevier.com

ICEFA-II is organized and hosted by Elsevier. It is sponsored by *Engineering Failure Analysis*

In conclusion, this technique is going to contribute to the reliable power feeding in AT railway system.

Keywords: high impedance fault, AT feeding system, distance relay, least square error method

[P2.16]

Bending behaviour of chip scale package with underfills by four-point bending tests

B.I. Noh¹, S-B. Jung
Sungkyunkwan University, Korea

The density of integrated circuits (ICs) is increasing rapidly together with reliability and operating speed. This enables electronic product manufacturers to make smaller, lighter and more reliable products. Ball grid array (BGA) packages and chip scale package (CSP) are now widely used for many electronic applications including portable and telecommunication products. CSP provides excellent electrical performance, high input/output density, and high interconnection speed. In addition, it offers good manufacturability with high reliability.

The reliability of CSP in portable devices is questionable due to the mechanical stresses experienced during their service lifetime. These stresses are primarily generated due to impact, shock, vibration, mechanical bending, and thermally induced fatigue due to coefficient of thermal expansion (CTE) mismatch between the CSP and the printed circuit board (PCB). In reliability tests, thermal cycling is commonly used to accelerate creep damage in the CSP solder joints. As well as thermal reliability, mechanical reliability has also attracted serious concerns, such as reliability under bending, twisting, vibrating, key push, and impact.

When cured, the underfill can serve multiple functions. It reduces package stresses caused by mismatch in the CTE between the silicon, the solder alloy, and the organic substrate, it protects the silicon from the external environment, and it also provides mechanical strength to the whole package. As a result, the solder joint reliability and package service life are greatly improved by using the underfill.

Although the many studies have investigated CSP reliability, there is few reliability of bending fatigue failure about CSP with underfills. In this study, the bending behavior of CSP with underfills was evaluated by four-point bending cyclic test.

Keywords: chip scale package, underfill, four-point bending test, fatigue failure

[P2.17]

Development of fractography database system to support fracture surface analysis

K. Yamagiwa¹, M. Takanashi², S. Izumi³, S. Sakai³
¹National Institute of Industrial Safety, Japan;

²Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd, Japan, ³University of Tokyo, Japan

Since fracture processes remain on fracture surfaces, fractography methods are usually applied to failure analysis of actual components. In Japan, it becomes serious problem that aging skilled operators of fractography retire without handing down their techniques to next generation. Because number of engineers for failure analysis is decreasing, and many experiences and high technique of analysis are needed to investigate the fracture mechanics from fracture surfaces correctly. Moreover, result obtained only by observation depends on analyst's experience. Therefore, especially for result obtained by beginner's analysis, it remains lack of objectivity.

In order to solve these problems, it is considered that quantitative parameters, which characterize fracture surface, should be introduced to fractography. In this paper, therefore, we developed a fracture surface database system which can be easily used on the Internet to support unskilled engineers to analyze fracture surfaces.

There are two main faculties in this system. One is a characterization system. This system can run programs to compute characteristic parameters of fracture surfaces such as roughness parameters and fractal dimension. The other is a search engine system. The result of calculation and the comments for fracture surface are saved in the system. Analyst can search fracture surfaces in the database for key words like fracture mode, material, quantitative parameters, and so on. They can compare images and characteristic parameters. By saving these data which are provided especially by the skilled engineers, their techniques will be handed down to beginners. Moreover, it also helps document's management automatically that relays on engineers in charge currently and improves data reusability. By the cooperation of these faculties, it is realized to make decision on fracture surface analysis based on objective parameters.

Keywords: failure analysis, fractography, database system, roughness

[P2.18]

Failure of metal matrix composite wires and double composites

I. Kientzl¹, J. Dobranszky², J. T. Blucher¹

¹*Budapest University of Technology and Economics, Hungary;*

²*Research Group for Metals Technology of the Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

The examined composite wires are ceramic and carbon fiber reinforced metal matrix composites (Fig. 1). When these composite wires are inserted into another metal matrix by casting, the product of this processing is composite wire reinforced metal matrix double composite structures. In the industry there are perspective applications for electric conductor cables as reinforcement core. The primary requirements for the power cables are the small sag and the great strength at high temperatures. Accordingly the composite wires have to possess these properties. Other possible application field is the reinforcing of the cast parts.

The metal matrix composite wires were produced by continuous processing. Ceramic and carbon fiber reinforced MMC-wires were fabricated with diameters from 1 to 2.5 mm and their fiber content is up to 60% v/o.

In this work these composite structures were characterized by tensile, bending, fatigue and impact tests. The composite wire was analyzed by the finite element method. A micromechanical model was created to examine the fiber reinforced composite wires.

The tensile strength of alumina fiber reinforced composite wires is about 1350 MPa. The composite wires have extremely small thermal expansion coefficient so the sag of the power cables is small. Thanks to the high velocity and short exposure time of the continuous process, the interface reactions are notably reduced. Consequently, the mechanical properties are not influenced by the formation of brittle phases. Outside the above mentioned mechanical testing methods the microstructural properties are characterized by optical and scanning electron microscopy, EDS-analysis and thermoelectric measurement.

Sandwich plates, proving rings, bending and tensile test specimens were investigated. These double composite structures were characterized by tensile, bending and loading tests. The failed specimens fracture surfaces were examined by optical and scanning electron microscopy.

The mechanical properties of the double composites influenced by the proportion and distribution of the composite wires.

Development of fractography database system to support fracture surface analysis

K. Yamagiwa¹, M. Takahashi², S. Izumi³, S. Sakai³

¹ National Institute for Occupational Safety and Health, Japan

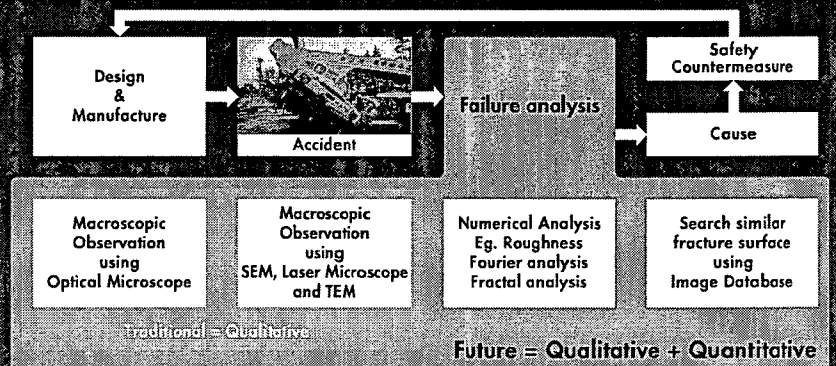
² Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd, Japan

³ University of Tokyo, Japan

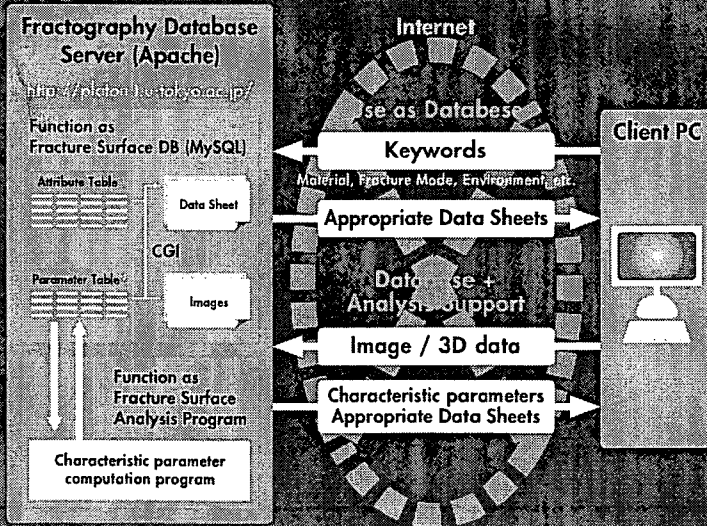
1: Aims

Since fracture processes remain on fracture surfaces, fractography methods are usually applied to failure analysis of actual components. In Japan, it becomes serious problem that aging skilled operators of fractography retire without handing down their techniques to next generation. Because number of engineers for failure analysis is decreasing, and many experiences and high technique of analysis are needed to investigate the fracture mechanics from fracture surfaces correctly. Moreover, result obtained only by observation depends on analyst's experience. Therefore, especially for result obtained by beginner's analysis, it remains lack of objectivity.

In order to solve these problems, it is considered that quantitative parameters, which characterize fracture surfaces, should be introduced to fractography. Here, we developed a fracture surface database system which can be easily used on the Internet to support unskilled engineers to analyze fracture surfaces.



2: System configuration of Fractography Database System



3: Table configuration

Table of Fracture Surface Attribute	
Name	Example
Title	Fatigue Fracture surface of Steel bolt
Material	S45C (JIS)
Experimental / Actual Component	Experimental
Fracture Mechanics	Fatigue Fracture
Environment	Room Temperature in Air
Abstract	The bolt size is M16. Average stress is ...
Comment	Striation is observed on fracture surface...
Link to Overview of Fracture surface (URL)	Http://*****
Link to SEM Photo of Fracture surface (URL)	Http://*****
Remark	

Table of Numerical Parameters		
Name		Example
Roughness	Ra	0.95
	Rt	0.48
	Rv	0.15
	Rz	0.97
	Etc...	
Fractal dimension		2.1
Fourier Analysis	(Link to image file which indicates power spectrum)	

4: Interface of Database System

Interface for search

Interface for data input

Datasheet of fracture surface attribute (Qualitative aspect of fractography)

Datasheet of fracture surface characteristic parameters (Quantitative aspect of fractography)

第 11 回

フラクトグラフィシンポジウム

前 刷 集



と き 平成18年11月30日(木)

と ころ 大阪科学技術センター 8F 小ホール

社団法人 日本材料学会

(7) ランレングスを用いたディンプル破面の定量評価手法とTi 高温引張試験破面への応用

労働安全衛生総合研究所 山際 謙太
石川島播磨重工業 高梨 正祐

1. 緒言

破面の調査(フラクグラフィ)は、機械構造物の破壊事故が発生した場合には、原因究明と再発防止の観点からも必ず実行される⁽¹⁾。しかしながら、現在のところ調査手法は、解析に熟練した職人が観察し、破面の調査をしていることが多く、つまり評価は定性的で客観性に乏しい。また、解析熟練者も高齢化から近年は減少してきており、解析技術の伝承も問題視されている。これらの問題点の一つの解決方法として、破面を数値解析により定量的に評価することが挙げられる⁽²⁾。

本研究では、画像処理技術を用いて、SEM濃淡画像からディンプルサイズの特異性手法について開発を行った。ディンプルの定量解析について、駒井ら⁽³⁾はSEM画像から3次元画像を確立し、ディンプルの半径や深さについて特性化する手法を提案した。ディンプルの半径は、画像処理によりSEM画像の輪郭線を抽出し、輪郭線間の間隔(ランレングス)を計測することにより求めることができる。しかし、破面画像の場合、析出物や、ディンプルとは関係の無い微細な模様を除去する必要があるが、これまでに提案された手法では、人手により除去を行っている。どの輪郭線を採用するかは、観察者の主観によるため定量性に乏しい。本研究では、この問題点に対しランレングスの統計量を導入して解決した。

2. SEM濃淡画像を用いたディンプルサイズの定量化手法

2.1 解析手法

本研究で行った破面解析のフローを図1に示す。

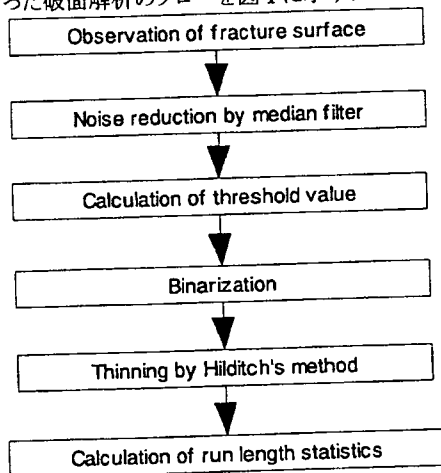


Fig. 1 Flowchart of dimple size characterization

SEMを用いてディンプル破面の濃淡画像を撮影した後、ノイズ除去のためにメディアンフィルタを使用する。次に、しきい値を決め、画像の二値化を行い、ディンプルの輪郭部(明部)とディンプル内側(暗部)の領域に画像を分類する。

ディンプル破面の画像は、ディンプルの輪郭とディンプル内部から構成される。そして、画素数の大部分がディンプルの内側の領域に相当する。したがって、全画素値(0~255)の平均は、輪郭部の画素値の平均と、内側の画素の平均との間にあると考えられる。このことから、全画素の平均値をしきい値として設定した。

次にHilditchの細線化手法を用いて幅が一画素の線のみが画像内に残るように処理を行う。最後にランレングスに関する統計量の計算を行う。

2.2 使用したランレングス統計量

階調nの画像内において、ある方向に連続する同濃度の要素をランとよび、その長さをランレングスとよぶ⁽⁴⁾。ある方向θに濃度iの画素がj個連続する頻度 $P_0(i,j)(i=0,1,\dots,n-1, j=1,2,\dots,l)$ を要素とする行列をランレングス行列とよぶ。ディンプル画像を観

察すると、ディンプル輪郭のランレングスは、それ以外の特徴の輪郭のランレングスと比較して長いことがわかる。したがって、本研究では長いランの発生頻度を示すLong Run Emphasis (LRE)をディンプルの特徴量として採用した。LREの計算式を次式に示す。P_{LRE}は画像内に長いランが多いほど大きな値となる。

$$P_{LRE}(\theta) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l j^2 P_0(i, j)}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l P_0(i, j)} \quad (1)$$

ここでP_{LRE}の単位は画素の平方である。SEM画像の場合、画素の単位長さは観察倍率と解像度に依存する。したがって、P_{LRE}もこれらに依存することから、電子顕微鏡の性能に依ることとなる。そこで本研究ではP_{LRE}に一画素が示す長さの平方(Δj)を乗じた値(FS_{LRE})を用いて破面画像の評価を行った。FS_{LRE}を式2に示す。FS_{LRE}は長さの単位である。これにより解像度の影響は無くなる。しかし、観察倍率を高倍率にすると、ディンプルの場合はその内部の微細な形状まで観察されるようになることから、これらの形状も輪郭として判断され、ランの計算に影響があることが考えられる。したがって、FS_{LRE}を用いて評価する場合は、観察倍率の検討が必要となる。

$$FS_{LRE}(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l (j \times \Delta j)^2 P_0(i, j)}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l P_0(i, j)}} \quad (2)$$

3. 解析用破面の作成と破面観察方法

3.1 供試材および試験方法

寺田ら⁽⁵⁾は、耐熱性チタニウム合金の引張り試験において、温度を室温から700°Cまで遷移させたとき、目視で計測したディンプルの半径が温度の上昇に応じて大きくなることを示している。そこで、本研究では供試材はTi-6Al-4V鋼として、温度条件を変えた引張り試験を行った。供試材の化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Al	V	Ti	Fe
0.01	6.32	4.42	Bal.	0.21

Table 2 Mechanical properties

Proof stress(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)
971.4	1062.5	17

試験片はΦ6mmの丸棒試験片を用いた。使用した温度は、室温(RT)、200、400、600°Cとした。各温度毎に3本の試験を行った。試験後の試験片外観を図2に示す。

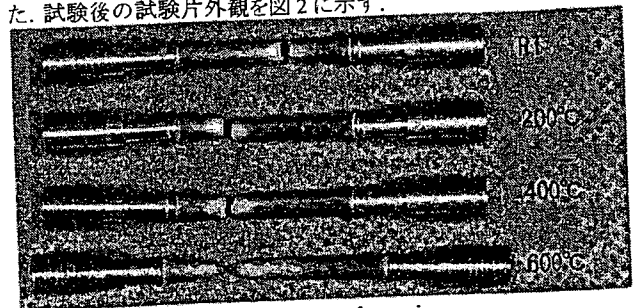


Fig. 2: Overview of test pieces.

3.2 破面の観察方法

破面観察は、高分解能走査型電子顕微鏡(エリオニクス社製 ERA-8800FE)を用いて行った。破面は中央部にデンプルが観察されている。周辺部はシェアリップが観察されている。観察箇所は丸棒試験片の中央付近を選択し、観察倍率は2000倍とした。画像の解像度は1200×900画素である。本研究で用いたSEMは広領域を観察するために、真空チャンバー内のステージを縦横方向に制御し、マトリクス状に最大64(8×8)枚の画像を取得する機能が追加されている。すなわち最大9600×7200画素の連続した領域の観察が可能である。2000倍で観察した場合、横480μm縦360μmの広い領域の観察が可能である。この機能を用いることで、効率的に破面の広領域を解析することができる。本研究では、各試験片ごとに64枚(合計192枚)の撮影を行い、各画像ごとに FS_{LRE} の計算を行った。

4. 解析結果

4.1 破面観察結果

破面観察を行った結果を図3～図6に示す。それぞれ試験温度は室温、200°C、400°C、600°Cである。観察箇所は破面の中心部である。全ての試験片にデンプルが観察され、延性破壊であることがわかる。また、温度の上昇に従い、デンプルの大きさが大きくなっていることもわかる。ただし、600°C(図6)については、デンプル中央部に穴が観察される。

これは、デンプルが形成された後、高温であることから、さらにデンプルが引き伸ばされ、形成された穴と考えられる。また、引き伸ばされる際に同心円状に輪郭が形成されている。したがって、600°Cの破面については、デンプルの輪郭を抽出することは困難であることと、図2に示すように絞りが大きくデンプル破面の領域が十分に無いことから、解析を行わなかった。

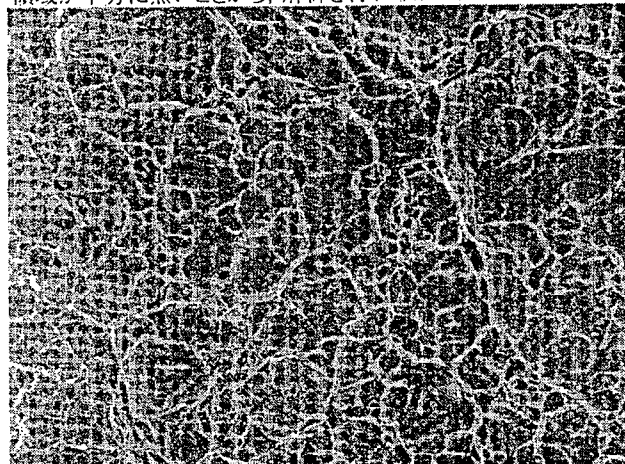


Fig. 3:SEM Image of fracture surface. Temperature is RT. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

4.2 破面観察とデンプル輪郭線の抽出結果

図1のフローに従いデンプルの輪郭を抽出した結果を図7(常温)、図8(200°C)図9(400°C)に示す。輪郭は破面写真の上の実線で示した。デンプル輪郭に沿って実線が描かれており、輪郭が検出されていることがわかる。

一方、デンプル以外の微細な構造の輪郭も検出されている。しかしながら、 FS_{LRE} は長いランを強調する値であるので、影響は抑えられると考えられる。

4.3 FS_{LRE} の計算結果

FS_{LRE} の計算は画像縦方向($x, \theta=0$)と横方向($y, \theta=90$)について行った。結果を図10に示す。横軸は試験温度、縦軸は FS_{LRE} の平均値と標準偏差である。温度の上昇とともに FS_{LRE} の平均値も大きくなっている。これは、破面観察時に温度が高いほどデンプルの径が大きくなるという定性的評価と一致している。

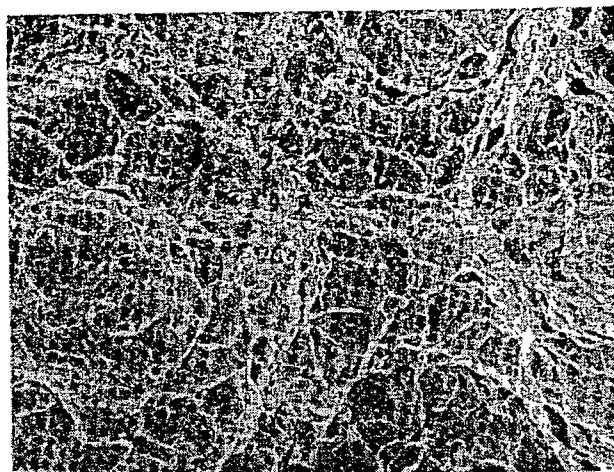


Fig. 4:SEM Image of fracture surface. Temperature is 200°C. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

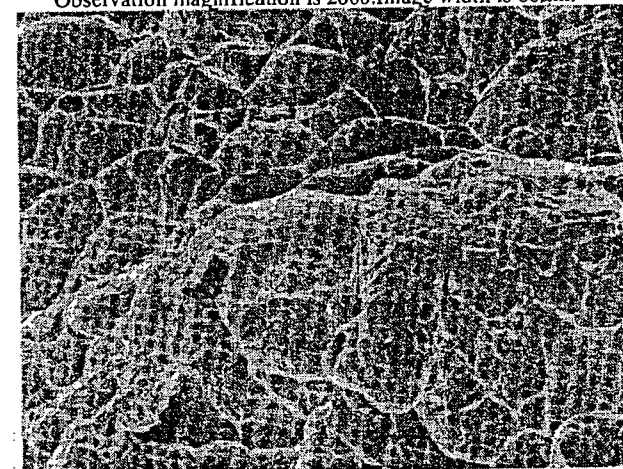


Fig. 5:SEM Image of fracture surface. Temperature is 400°C. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

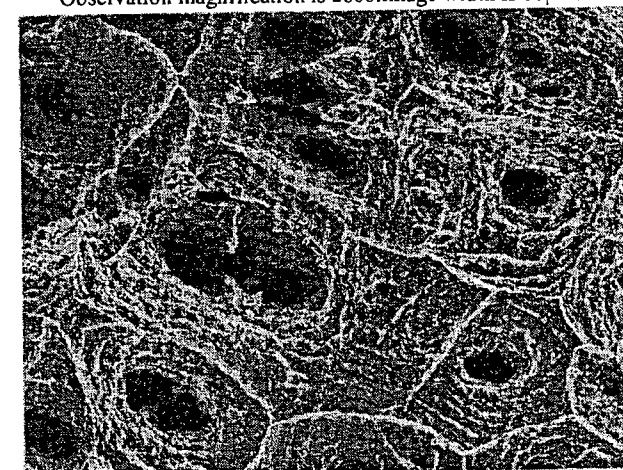


Fig. 6:SEM Image of fracture surface. Temperature is 600°C. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

5. 考察

5.1 破面性状とランレングス統計量の関係

図11において、 x, y の両方向の FS_{LRE} の値にほとんど差が無いのは、引っ張り試験であることから、デンプルは等軸であり、その結果を反映していると考えられる。

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ンプルが成長しやすくなる。また、破面にはデンプルの周辺に二次デンプルや介在物等のデンプル以外の領域もあり、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次デンプルの破面率が高ければ、

FS_{LRE} は大きくなるが、破面率が低ければ FS_{LRE} は小さくなる傾向がある。したがって、観察領域によって FS_{LRE} の値がばらつき、その結果標準偏差が大きくなる。すなわち、各視野の1次ディンプルの破面率の影響があると考えられる。

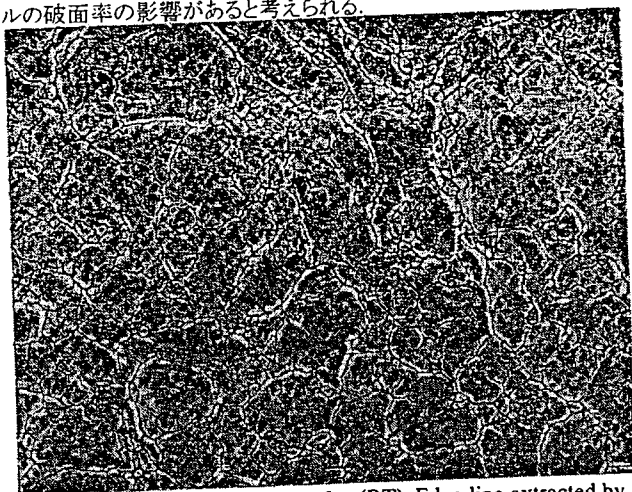


Fig. 7 SEM image of fracture surface (RT). Edge line extracted by the proposed method is emphasized. Image width is 60 μ m.

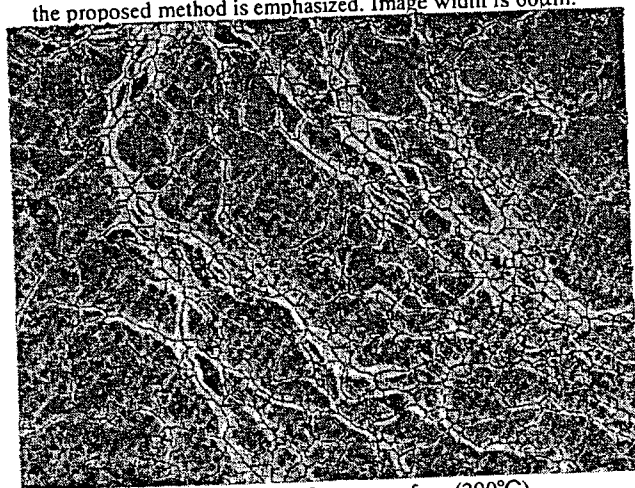


Fig. 8: SEM image of fracture surface (200°C).

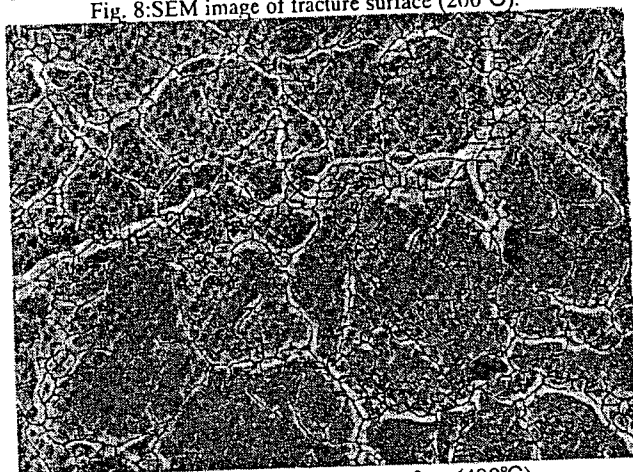


Fig. 9 SEM image of fracture surface (400°C)

5.2 観察倍率の影響に関する考察

次に、観察倍率と FS_{LRE} の関係について考察する。常温で破壊した試験片のある視野に関して、200倍～20000倍まで観察倍率を変化させ、 FS_{LRE} の計算を行った。結果を図11に示す。 FS_{LRE} は式2から長さの単位であるので、ディンプルの輪郭のみを抽出しているなら、倍率には依存しないで一定の値になるはずである。しかし、 FS_{LRE} は倍率に依存し、高倍率になるほど値は小さくなっている。また両対数グラフ上では200倍～10000倍の範囲で線

形の関係がある。

この原因として考えられるのは、観察倍率を上げるにつれ、ディンプル内部の様相がより詳細に観察されることから、内部の微細な輪郭も検出することとなる。その結果、ランがディンプルサイズより小さく切断されるため、 FS_{LRE} が小さくなると考えられる。低倍率の場合は、ランの切断の多くがディンプルの輪郭によって行われるが、高倍率になるにつれ、同サイズの視野で観察されるディンプルの数は減り、ディンプル以外の輪郭で切断される場合が増える。したがって、 FS_{LRE} は観察倍率に依存してしまう。 FS_{LRE} を用いてディンプル破面を特性化するためには、ディンプル以外の輪郭を除去する手法を図1に導入するか、図10、11を合わせた観察倍率、温度と FS_{LRE} の関係を示すマップを作成する必要があり、今後の課題である。

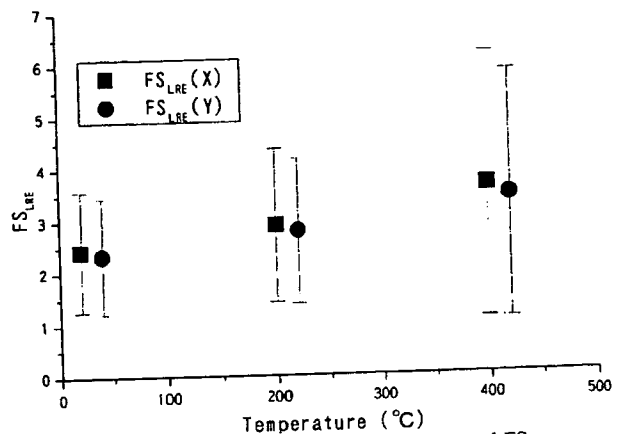


Fig. 10: Relationship between temperature and FS_{LRE} .

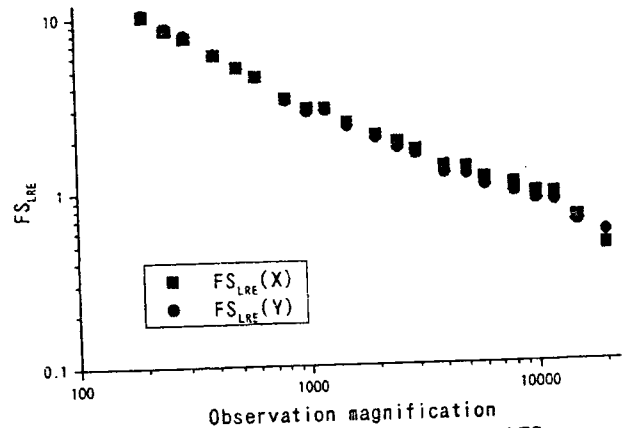


Fig. 11: Relationship between magnification and FS_{LRE} .

6. 結言

本研究では、 FS_{LRE} を用いてディンプルを特性化する手法を提案した。手法をTi-6Al-4V鋼の高温引張り試験の破面解析に適用した結果、温度とディンプルの大きさの関係を特性化することができた。しかし、 FS_{LRE} はディンプル以外の影響も受けてしまうことから、自動的にディンプルのみの輪郭を抽出する精度を向上させる必要がある。

謝辞

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

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, (2000), 丸善
- (2) 駒井 他, 材料, Vol.39, No.444, pp.1311-1316
- (3) 尾崎 他, 画像処理, (1983) 共立出版, p.160
- (4) 寺田 他, 第30回構造強度に関する講演会, pp.102-105

4018 ランレングスを用いたディンプル破面の定量評価手法 Method for Quantitative Evaluation of Dimple Fracture Surface using Run Length

○正 山際 謙太(労働安全衛生総合研究所) 正 高梨 正祐(石川島播磨重工業)

Kenta Yamagiwa, National Institute for Occupational Safety and Health Japan, 1-4-6 Umezono, Kiyoseshi, Tokyo
Masahiro Takanashi, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd, 3-1-1, Toyosu, Kotoku, Tokyo

Fractography is the essential method for failure analysis. Diameter, depth and direction of dimples observed on ductile fracture surface is related deeply to the ductility and the crack propagation direction. In this paper, we propose one of numerical methods for fractography to characterize dimple's diameter. Long Run Emphasis(LRE) which is the statistic value of texture analysis and relates directly to the diameter of dimple, is calculated. The method is applied to the fracture surfaces of Titanium alloy which were formed by the high-temperature tensile test. In the result, the relationship between the temperature and LRE was obtained. Therefore, we could estimate the temperature from the dimple by the method.

Key Words: Fractography, Dimple, Ductile Fracture, Image Analysis

1. 緒言

破面の調査(フラクグラフィ)は、機械構造物の破壊事故が発生した場合には、原因究明と再発防止の観点からも必ず実行される⁽¹⁾。しかしながら、現在のところ調査手法は、解析に熟練した職人が観察し、破面の調査をしていることが多く、つまり評価は定性的で客観性に乏しい。また、解析熟練者も高齢化から近年は減少してきており、解析技術の伝承も問題視されている。これらの問題点を解決するためには、破面を数値解析により定量的に評価することが必要である⁽²⁾。

本研究では、画像処理技術を用いて、SEM濃淡画像からディンプルサイズの特性化手法について開発を行った。ディンプルの定量解析について、駒井ら⁽³⁾はSEM画像から3次元画像を確立し、ディンプルの半径や深さについて特性化する手法を提案した。ディンプルの半径は、画像処理によりSEM画像の輪郭線を抽出し、輪郭線間の間隔(ランレングス)を計測することにより求めることができる。しかし、破面画像の場合、析出物や、ディンプルとは関係の無い微細な模様を除去する必要があるが、これまでに提案された手法では、人手により除去を行っている。どの輪郭線を採用するかは、観察者の主観によるため定量的に乏しい。本研究では、この問題点に対しランレングスの統計量を導入して解決した。

2. SEM濃淡画像を用いたディンプルサイズの定量化手法

2.1 解析手法

本研究で行った破面解析のフローを図1に示す。

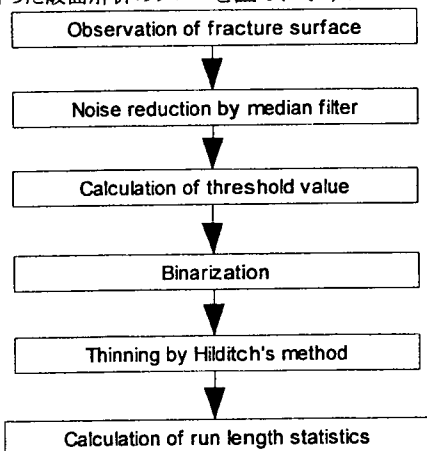


Fig. 1 Flowchart of dimple size characterization

SEMを用いてディンプル破面の濃淡画像を撮影した後、ノイズ除去のためにメディアンフィルタを使用する。次に、しきい値を決め、画像の二値化を行い、ディンプルの輪郭部(明部)とディンプル内側(暗部)の領域に画像を分類する。また、画像内の画素数のうち大部分がディンプルの内側の領域に相当することから、

全画素値(0~255)の平均は、輪郭部の画素値の平均と、内側の画素の平均との間にあると考えられる。従って、全画素の平均値をしきい値として設定した。

次にHilditchの細線化手法を用いて幅が一画素の線のみが画像内に残るように処理を行う。最後にランレングスに関する統計量の計算を行う。

2.2 使用したランレングス統計量

階調nの画像内において、ある方向に連続する同濃度の要素をランとよび、その長さをランレングスとよぶ⁽⁴⁾。ある方向θに濃度iの画素がj個連続する頻度 $P_0(i,j)(i=0,1,\dots,n-1, j=1,2,\dots,l)$ を要素とする行列をランレングス行列とよぶ。ディンプル画像を観察すると、ディンプル輪郭のランレングスは、それ以外の特徴の輪郭のランレングスと比較して長いことがわかる。従って、本研究では長いランの発生頻度を示すLong Run Emphasis (LRE)をディンプルの特徴量として採用した。LREの計算式を次式に示す。

P_{LRE} は画像内に長いランが多いほど大きな値となる。

$$P_{LRE}(\theta) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l j^2 P_0(i,j)}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l P_0(i,j)} \quad (1)$$

3. 解析用破面の作成と破面観察方法

3.1 供試材および試験方法

寺田ら⁽⁵⁾は、耐熱性チタニウム合金の引っ張り試験において、温度を室温から700°Cまで遷移させたとき、目視で計測したディンプルの半径が温度の上昇に応じて大きくなることを示している。そこで、本研究では供試材はTi-6Al-4V鋼として、温度条件を変えた引っ張り試験を行った。そして、破面のSEM画像から提案手法を用いて P_{LRE} を計算し、温度と P_{LRE} の関係を検討する。試験片はΦ6mmの丸棒試験片を用いた。使用した温度は、室温(RT)・200・400°Cとした。各温度毎に3本の試験を行った。

3.2 破面の観察方法

破面観察は、高分解能走査型電子顕微鏡(エリオニクス社製ERA-8800FE)を用いて行った。破面は中央部にディンプルが観察されている。周辺部はシェアリップが観察されている。観察箇所は丸棒試験片の中央付近を選択し、観察倍率は2000倍とした。画像の解像度は1200×900画素である。本研究で用いたSEMは広領域を観察するために、真空チャンバー内のステージを縦横方向に制御し、マトリクス状に最大64(8×8)枚の画像を取得する機能が追加されている。すなわち最大9600×7200画素の連続した領域の観察が可能である。2000倍で観察した場合、横480μm縦360μmの広い領域の観察が可能である。この機能を用いることで、効率的に破面の広領域を解析することができる。本研究では、各試験片ごとに64枚(合計192枚)の撮影を行い、各画像ごとに P_{LRE} の計算を行った。

4. 解析結果

4.1 破面観察とディンプル輪郭線の抽出結果

図1のフローに従いディンプルの輪郭を抽出した結果を図2(常温), 図3(400°C)に示す。高温になるに従い, ディンプルのサイズは大きくなっていることがわかる。

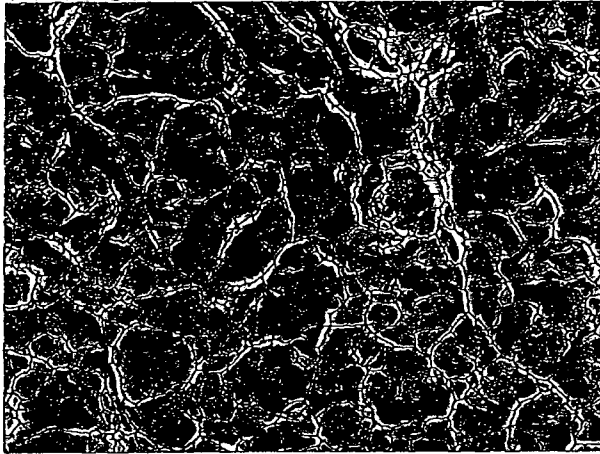


Fig. 2 SEM image of fracture surface(RT). Edge line extracted by the proposed method is emphasized. Image width is 60μm.

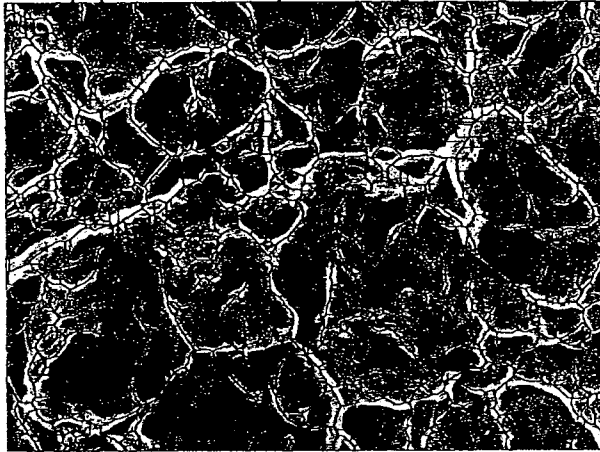


Fig. 3 SEM image of fracture surface (400°C)

またディンプル輪郭が検出されていることがわかる。ディンプル以外の微細な輪郭も検出されているが, P_{LRE} は長いランを強調することから, 影響は抑えられると考えられる。

4.2 P_{LRE} の計算結果

P_{LRE} の計算は画像縦方向($x, \theta=0$)と横方向($y, \theta=90$)について行った。結果を図4に示す。横軸は試験温度, 縦軸は P_{LRE} の平均値と標準偏差である。温度の上昇とともに P_{LRE} も大きくなっている。これは, 破面観察時に温度が高いほどディンプルの径が大きくなるという定性的評価と一致している。

5. 考察

5.1 破面性状とランレングス統計量の関係

図4において, x, y の両方向の P_{LRE} の値にほとんど差が無いのは, 引っぱり試験であることから, ディンプルは等軸であり, その結果を反映していると考えられる。

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, 破面にはディンプルの周辺に二次ディンプルや介在物等のディンプル以外の領域もあり, これらの影響でランは短くなる。従って特に高温の場合は, 1次ディンプルの破面率が高ければ, P_{LRE} は大きくなるが, 破面率が低ければ P_{LRE} は小さくなる傾向がある。したがって, 観察領域によって P_{LRE} の値がばらつき, その結果標準偏差が大きくなる。すなわち, 各視野の1次ディンプルの破面率の影響があると考えられる。

5.2 観察倍率の影響に関する考察

次に, 観察倍率と P_{LRE} の関係について考察する。常温で破壊した試験片のある視野に関して, 200倍~20000倍まで観察倍率を変化させ, P_{LRE} の計算を行った。結果を図5に示す。 P_{LRE} は式1から画素単位の二乗の次元であることから, ディンプルの輪郭のみを抽出しているなら, 倍率が二倍であれば P_{LRE} は四倍になる。しかし, 図5では四倍にはならなかった。この原因として考えられるのは, 観察倍率を上げるにつれ, ディンプル内部の様相がより詳細に観察されることから, 内部の微細な輪郭も検出してしまい, その結果 P_{LRE} が小さく計算されていると考えられる。しかし, 観察倍率を上げると P_{LRE} も大きくなることから, ディンプルの特徴は反映されているといえる。従って, P_{LRE} を用いてディンプルを特性化する場合には, 図4, 図5を合わせた観察倍率, 温度と P_{LRE} の関係を示すマップを作成する必要がある, 今後の課題である。

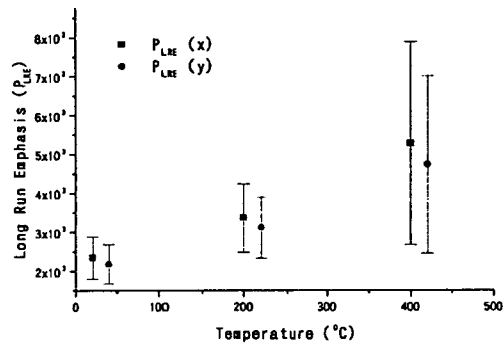


Fig. 4 Relationship between temperature and long run emphasis.

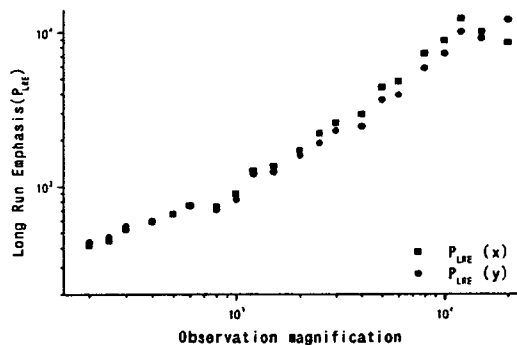


Fig. 5 Relationship between magnification observation and P_{LRE}

6. 結言

本研究では, P_{LRE} を用いてディンプルを特性化する手法を提案した。手法をTi-6Al-4V鋼の高温引張り試験の破面解析に適用した結果, 温度とディンプルの大きさの関係を特性化することができた。しかし, P_{LRE} はディンプル以外の影響も受けてしまうことから, 自動的にディンプルのみの輪郭を抽出する精度を向上させることで, 破面画像から事故温度の定量的な推定が可能となることが期待される。

謝辞

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

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, (2000), 丸善
- (2) 駒井 他, 材料, Vol.39, No.444, pp.1311-1316
- (3) 尾崎 他, 画像処理, (1983) 共立出版, p.160
- (4) 寺田 他, 第30回構造強度に関する講演会, pp.102-105

ボイラ研究

Journal of Japan Boiler Association

第 343 号

No. 343

平成 19 年 6 月

June 2007

目次 CONTENTS

ぐらびあ 湧水	1	
会長就任にあたって	池田五男	4
会長退任にあたって	露木 保	5

論 説 Essay

公害防止に係る環境管理の在り方	溝呂木 昇	7
Management of Pollution Control	by Noboru Mizorogi	

解 説 Explanation

三重効用高効率ガス吸収冷温水機用高温再生器の開発	牧田和志	11
Development of High-temperature Generator applied to High-efficiency Triple-effect Absorption Chiller-heater	by Kazuyuki Makita	
破断面解析支援データベースの試作	山際謙太, 高梨正祐	16
Development of Fractography Database System to Support Fracture Surface Analysis	by Kenta Yamagiwa, Masahiro Takanashi	
ボイラーの余寿命診断法の実践	寺本憲宗	33
An Implementation of Boiler Life Expectancy Method	by Kenshu Teramoto	
油焚きおよびガス焚きボイラー燃焼設備の安全基準	矢原 仁	42
Safety Guide Principles for Combustion Systems of Oil and Gas Firing	by Hitoshi Yahara	

Q & A JIS B 8223「ボイラの給水及びボイラ水の水質」の改訂版(2006年版)の変更点について ～低圧ボイラーについて～	53
---	----

情報 平成18年度特級ボイラー技士試験問題	56
お知らせ 平成19年度全国安全週間実施要綱	63
第4回安全衛生フォトコンクール募集要領について	67
第35回(平成19年度)労働安全・労働衛生コンサルタント試験のお知らせ(予定)	69
機関誌掲載論文等の募集について	70

カラーページ

interview (会員事業場訪問) 富士フィルム(株)神奈川工場	25
ボイラーおもしろ学 バイオマス(新エネルギー)ってなに?	29

破断面解析支援データベースの試作

(独)労働安全衛生総合研究所
山 際 謙 太
石川県播磨重工業㈱
高 梨 正 祐

Development of Fractography Database System to Support Fracture Surface Analysis

by Kenta Yamagiwa, Masahiro Takanashi

1. はじめに

機械構造物が破壊事故を起こした場合の原因調査の過程において、必ず破断面の調査(フラクトグラフィ)が実施される。(独)労働安全衛生総合研究所では、労働災害の事故調査を行っており、機械構造物の破壊に関する事故調査では、必ず破断面の調査を行う。フラクトグラフィは調査の重要な項目のひとつである。対象とする構造物は多岐にわたり、その中にボイラーと圧力容器も含まれる。また、最近では金属以外のたとえばFRPのような複合材を構成部材とする機械も増えてきたが、調査する材料は金属が主である。

破断面の調査には様々な方法があるが、まず大切なのは肉眼と顕微鏡(光学顕微鏡・電子顕微鏡)を用いた観察である。これを定性的破断面解析と呼ぶ。ここでは、過去の損傷事例や実験室で得られた破断面と実機破断面との比較を行い、損傷原因を推定する¹⁾。しかし、観察だけでは、結果が解析者の熟練度に依存してしまうという問題が残る。仮に解析初心者が破断面の判断を誤った場合、事故原因が誤って推定され、その結果正しい再発防止策を打ち出すことは難しくなる。また近年は、2007年問題と呼ばれるように、解析熟練者の高齢化や現場からの離脱にともなう技術伝承不足も問題視されている²⁾。こうした問題点を解決すべく、観察者の経験に依存しない評価方法として、破断面の電子顕微鏡画像と立体的な三次元形状から、数値解析を用いて例えば応力などを推定する定量破断面解析法も提案されている³⁾。

また別な問題点として、データの管理方法が挙げられる。破断面の解析は、損傷調査と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。よって破断面のデータは、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。しかし、定性的な破断面解析では類似破断面との比較が高い重要性を持つにも関わらず、破断面データそのものを保存し、条件により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、破断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。近年、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検索可能となった。破断面についても同様なデータベースを導入することで、効率的に類似破断面の検索が可能である。

以上のような背景から、著者らは破断面を定量的に評価し、かつ解析技術の伝承に貢献する仕組みとして、インターネット上で利用できる破断面のデータベースを試作したり、これを「破断面解析支援データベース」と呼ぶ。本システムは、各種モードで破壊した破断面を参照することができるに加え、表面粗さなど定量的に破断面を特性化するためのプログラムを搭載した。こうした特徴量の一つの目安としながら、定量的に破断面の比較と解析支援を行なえるのが、本システムの特徴である。本稿では、このデータベースについて紹介する。

2. 破断面解析支援データベースシステムの概要

2.1 システムの構成

破断面解析支援データベースシステムの構成を図1に示す。このデータベースは、パソコンから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、「破断面属性テーブル」と「破断面特徴量テーブル」の2テーブルで構成される。属性テーブルには、破断面に関連する情報(タイトル、材料名、破断面生成状況など)が格納されている。特徴量テーブルには電子顕微鏡画像のファイル名と観察倍率、破断面から計算された特徴量など、破面の電子顕微鏡画像や立体形状に関する情報が保存されている。

次に、本システムはデータベースと別に特徴量計算を行う機能を持っている。特徴量は破断面の電子顕微鏡画像と三次元形状の両者から計算することが可能であり、計算はデータ入力時に行われる。新しい特徴量が提案された場合は、それを計算するプログラムを導入することで、従来の破断面画像から新しく入力するデータまですべて新しい特徴量の計算を行い、特徴量テーブルに情報を入力することができる。この仕組みを用いることで、新しい特徴量が提案された際にも、過去の破断面のデータも効率的に再計算を行うことが可能であるため、過去の破断面の資産を有効利用でき

る。また、新しい特徴量を開発する際にも、様々な破断面に対し適用することが可能であるから、提案する特徴量の適用範囲の検討にも有効である。

2.2 破断面属性テーブル

破断面属性テーブルは、主に以下の項目で構成されている。

1. タイトル (例: S45Cボルトの疲労破断面)
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. 破面外観画像へのリンク (URL)
9. 破面電子顕微鏡画像へのリンク (URL)
10. 備考

これらの情報をデータベースに収める目的は、熟練観察者の破断面に対する知見を蓄積することである。特に観察者のコメントに、熟練観察者が破断面を分析していくプロセスを記入することで、観察初心者は熟練者の知見を学ぶことができる。

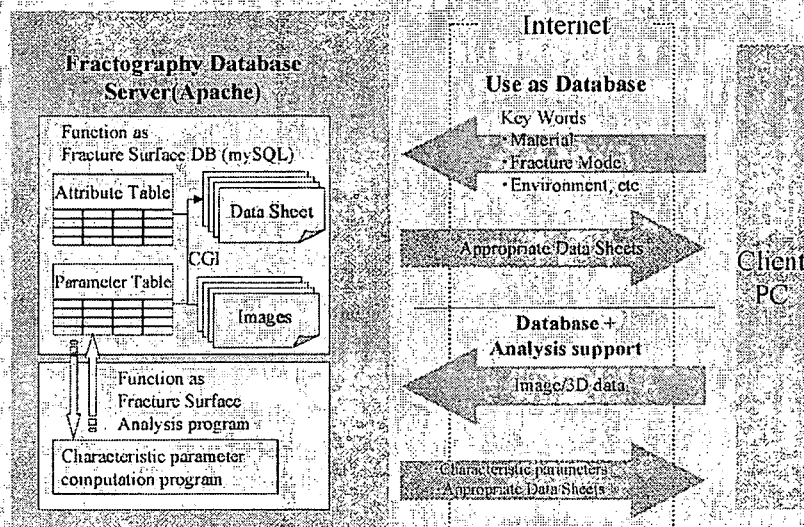


図1 破断面解析支援データベースシステムの構成

また、破断面の観察の基本はマクロ（巨視的）観察とミクロ（微視的）観察の両方である。どちらが欠けても中途半端な解析となり、正しい解釈は得られない。このことを考慮して、属性テーブルの要素として、破断面の外観写真と電子顕微鏡写真の両方のURLを導入した。画像自身はサーバ内に存在しており、テーブルにはURLのテキストデータのみが保存される。

そして、この属性テーブルに関するフリーキーワードによる検索（例えばS45C AND疲労）を導入した。検索機能を用いることで、観察者は調査すべき破断面のキーワードを入力することで、簡単かつ早急に類似した破断面の情報を引き出すことが可能となる。

2.3 破断面特徴量計算プログラム

破断面属性テーブルは、フラクタルグラフィックにおける定性的な解析を支援するための仕組みである。これに対し、定量的な破断面解析を支援するため、本データベースシステムには破断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、電子顕微鏡画像データ（256階調濃淡データ）と三次元形状（数値化された破断面の高さ情報）の両方に対して実施できるシステムとなっている。以下、現在計算可能な特徴量について述べる。

・表面性状（粗さ）パラメータ

表面粗さは、破断面形状を数値化する指標であることから、破断面の定量解析によく用いられてきた⁹⁾。代表的な例としては、算術平均粗さ（Ra）を用いて破断面の性状の分離を行った例がある¹⁰⁾。

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）にしたがって、表面粗さを求めるプログラムを作成した¹¹⁾。JIS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、破断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

Mandelbrot¹²⁾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。破断面の複雑さは表面エネルギーとの関連があるために、特にフラクタル次元と破壊靱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、複雑さを表わす一つの手法として、フラクタル次元も特徴量として採用した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。周波数分析を行なうことで、例えば疲労破面に観察されるストライエーション（縞模様）の幅の測定などに利用することができる。

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. 破断面データベースシステムのねらい

3.1 数値指標の導入による解析支援

第1章でも述べたとおり、現段階での損傷解析の主流は、損傷した破断面と破断面集などに記載されている破断面との比較を観察者が行うことが最初のプロセスである。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、破断面集から類似破断面を探し出し、定性的に破壊原因の推定が行われる。よって破断の定量解析は、破断面の比較のための指標を与えることで、解析作業を支援できるという位置づけである。

破断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¹⁵⁾。破断面においては、例えばディンプル（延性破壊）、リバーパターン（脆性破壊）、ストライエーション（疲労）といった典型的な模様が存在し、定性的にも見分けることができる。したがって、従来の破断面解析によく用いられてきた。そこで、定量的に類似画像をデータベースから抽出するために、局所的なパターン情報だけでなく、周期性やフラクタル次元などに基づいた破断面の特徴量とその統計的性質を積極的に活用することとした。数値的な指標の導入により、ユーザが破断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断面解析の精度向上と客観性の付与に貢献できる。定性的な破断面特徴を十分に読み取ることができ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と考えられる。

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、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、破断面データベース機能のみの使用である。ユーザが破壊機構、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、項目を指定しない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、例えば項目指定検索では、同一の破壊様式のデータを閲覧することが可能となる。また、ある破壊様式のデータを閲覧した際に、破断面の特徴的な模様（ストライエーション、ディンプル等）が記述されていれば、次にフリーキーワードによる検索で類似破断面の閲覧が可能である。特に経験の浅い技術者は、この機能を用いることで、熟練観察者の知見を効率的に学ぶことができ、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、データベースと特徴量計算

プログラムの連携である。ユーザが、電子顕微鏡画像あるいは破断面の三次元形状を投入すると、特徴量を計算する。次に、この計算結果に基づき、類似画像を含む破断面属性と特徴量を返してくれるシステムである。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。したがって、破断面画像と特徴量の二つのデータを客観的かつ体系的に管理することが可能となる。

破断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断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、多くの定量的破断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断面に対してのみ行われており、解析対象とする破断面のデータ量が不足している。そのため、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、特徴量と破断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、破断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方法について述べる。ブラウザを開いてデータベースにアクセスした後、最初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。

4. 1 データベースとしての利用

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、テーブルの全フィールドを対象とした検索と、特定のフィールドを指定した検索が可能となっている。データベースとして利用した場合の画面を図2に示す。破断面属性テーブルのタイトルや材料仕様等にキーワードを設

ID	破断面	材料名	破断モード	破断位置
ST000001	ST520001	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000002	ST520002	ステンレス鋼 (SUS316)	脆性破断	中央部
ST000003	ST520003	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000004	ST520004	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000005	ST520005	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000006	ST520006	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000007	ST520007	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000008	ST520008	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000009	ST520009	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000010	ST520010	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部

図2 データベースとして利用した場合の画面

定した。各項目のテキストボックスにキーワードを記入し、検索ボタンをクリックすることで、該当するデータを表示することが可能である。これだけでは、コメント内の検索ができないので、右上に全文検索用のテキストボックスも設けた。これを使うことで、観察者のコメントからの検索も可能となる。例えば、破断面の特徴である“ディンプル”や“ストライエーション”といった用語での検索が可能となる。また、表示形式も選択式とするためのチェックボックスを右に設けた。

図3はデータベース内から、材料名をSUS316、破壊様式を「疲労」として検索を行った結果である。このような機能を持たせることで、多くの破断面に関する情報が集まった時にも効率的にデータを観閲することが可能である。次に全フィールドを対象とした検索をおこなった場合の例を図4に示す。コメント内に含まれる破断面の模様を表す言葉、例えば“ストライエーション”（疲労破面の特徴）とテキストボックスに記入し検索を押すと、“ストライエーション”を含むリストが表示される。

結果表示の例を図5に示す。本図はSTS410の高サイクル疲労の例である。破断面の外観写真に

ID	破断面	材料名	破断モード	破断位置
ST000001	ST520001	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000002	ST520002	ステンレス鋼 (SUS316)	脆性破断	中央部
ST000003	ST520003	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000004	ST520004	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000005	ST520005	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000006	ST520006	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000007	ST520007	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000008	ST520008	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000009	ST520009	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000010	ST520010	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部

図3 データベース内から用語で検索した例 (キーワード: SUS316)

ID	破断面	材料名	破断モード	破断位置
ST000001	ST520001	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000002	ST520002	ステンレス鋼 (SUS316)	脆性破断	中央部
ST000003	ST520003	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000004	ST520004	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000005	ST520005	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000006	ST520006	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000007	ST520007	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000008	ST520008	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000009	ST520009	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部
ST000010	ST520010	ステンレス鋼 (SUS316)	延性破断	中央部

図4 全フィールドを対象に検索した例 (キーワード: ストライエーション)

巨視的様相を載せ、破断面写真には電子顕微鏡の高倍率における画像を示すことで、疲労破面は巨視的に観察した場合は平坦であり、微視的に観察した場合は「ストライエーション (縞状模様)」が観察されることが即座に理解できる。さらに、コメント欄にストライエーション間隔とき裂進展速度の関係について記述することで、両者には相関があることがわかる。解析初心者はこのコメン