

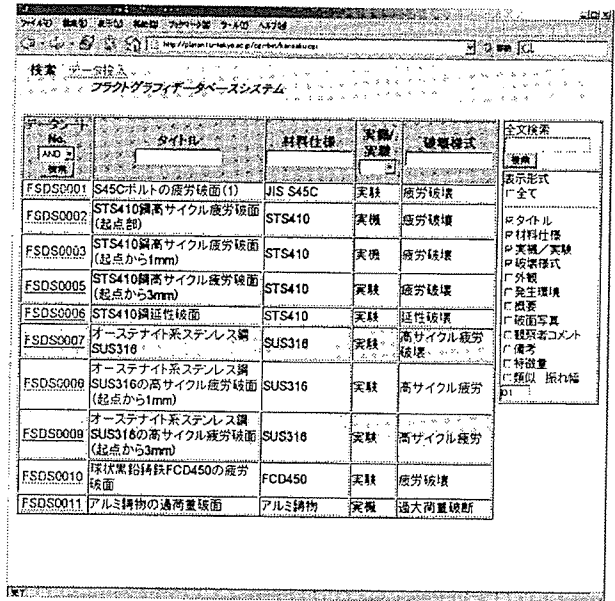
ブラウザを開いてデータベースにアクセスした後、まず、入口の画面でデータベースとして使用するか、解析支援システムとして使用するか、選択可能となっている。

(1) データベースとしての利用

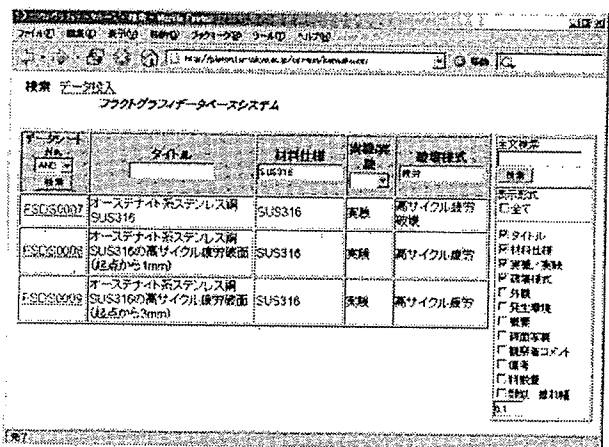
データベースとして使用する場合は、インターネット上でよく利用されている検索エンジンを利用する場合とほぼ同じで、テーブルの全フィールドを対象とした検索と、特定のフィールドを指定した検索が可能となっている。データベースとして利用した場合の画面を第2図に示す。破面属性テーブルのタイトルや材料仕様等にキーワードを設定した。各項目のテキストボックスにキーワードを記入し、検索ボタンをクリックすることで、該当するデータを表示することが可能である。これだけでは、コメント内の検索ができないので、右上に全文検索用のテキストボックスも設けた。これを使うことで、観察者のコメントからの検索も可能となる。例えば破断面の特徴である“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読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。

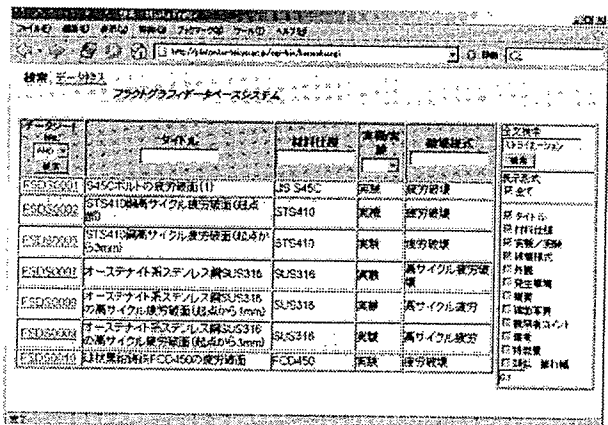
結果表示の例を第5図に示す。本図はSTS410の高サイクル疲労の例である。破断面の外観写真に巨視的様相を載せ、破断面写真には電子顕微鏡の高倍率における画像を示すことで、疲労破面は巨視的に観察した場合は平坦であり、微



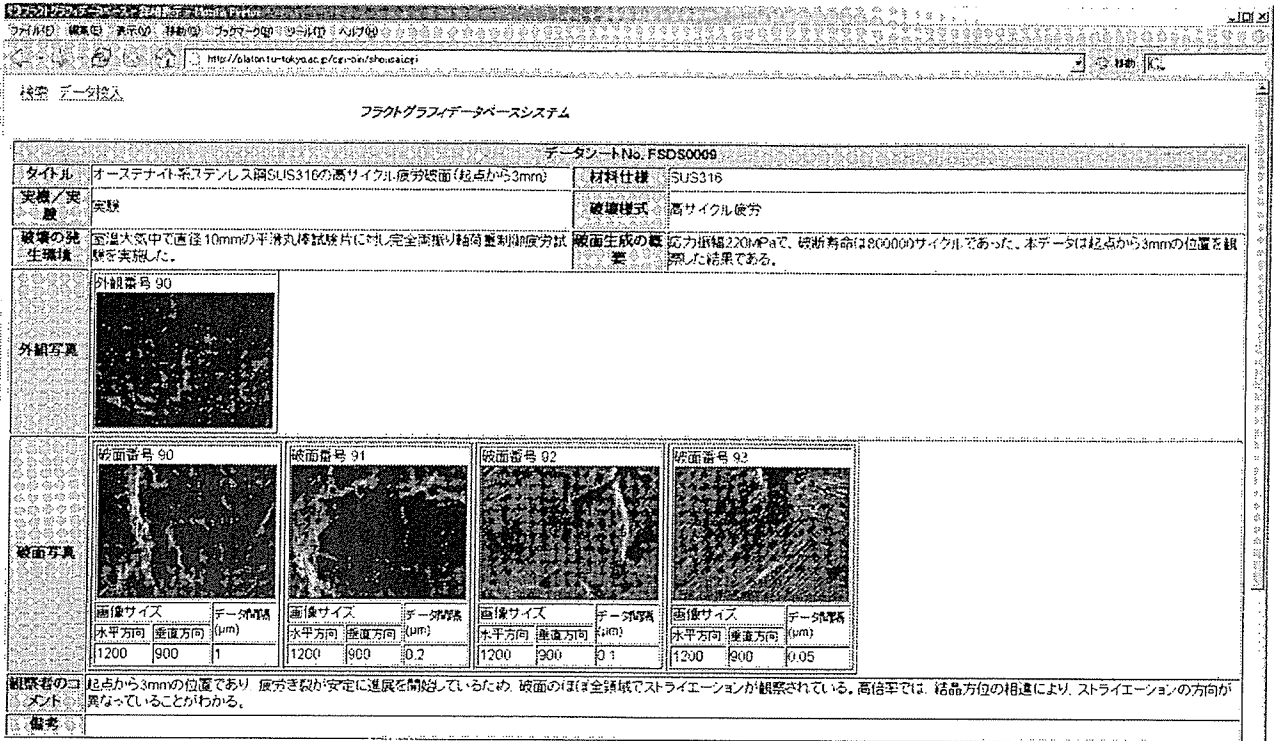
第2図 User Interface of Database



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



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



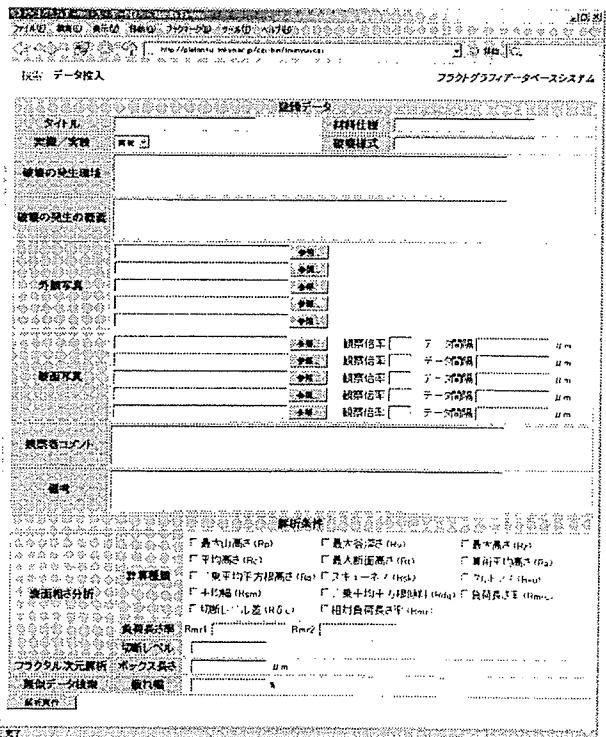
第5図 Example of Data Display

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。

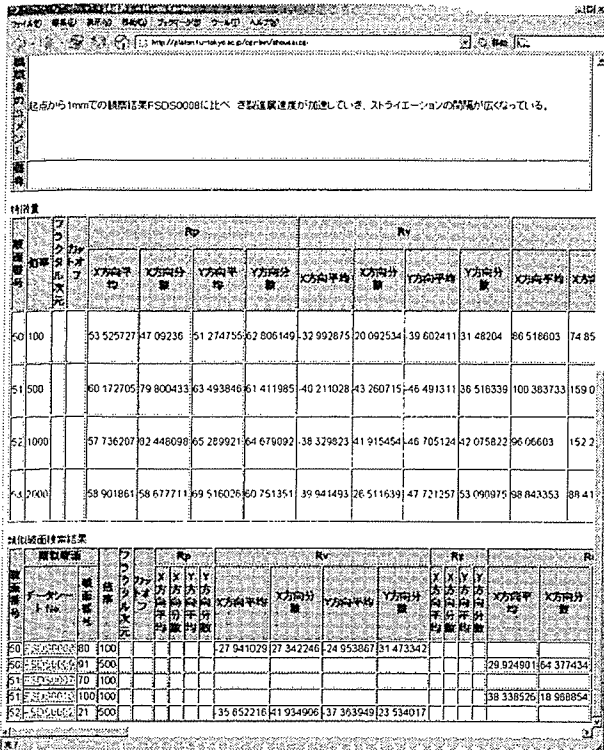
(2) 解析システムとしての利用

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。



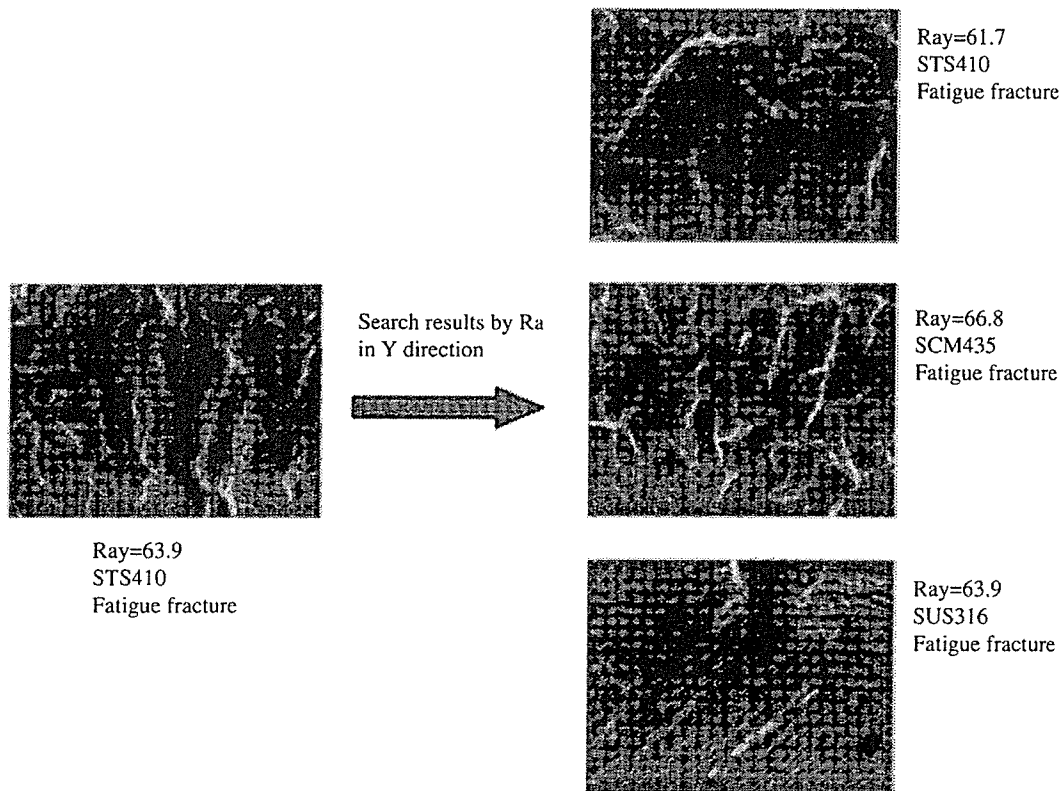
第6図 User Interface of Fracture Surface Analysis System



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R_{av}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) 大橋真：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)

【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

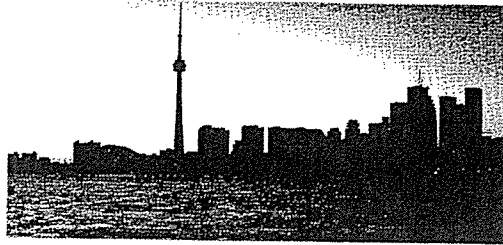
石川島播磨重工業(株)
車両用過給機事業部 設計部
〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1
TEL:03-6204-7369 FAX:03-6204-8718
E-mail:masahiro_takanashi@ihi.co.jp

ICEFA-II

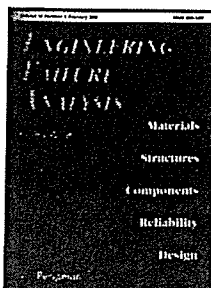
Second International Conference
on Engineering Failure Analysis

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 a serious problem that aging skilled operators of fractography retire without handing down their techniques to the next generation. Because the number of engineers for failure analysis is decreasing, and many experiences and high techniques are needed to investigate the fracture mechanics from fracture surfaces correctly. Moreover, the result obtained only by observation depends on the analyst's experience. Therefore, especially for the result obtained by a beginner's analysis, it remains a 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. Kientzi^{*1}, 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

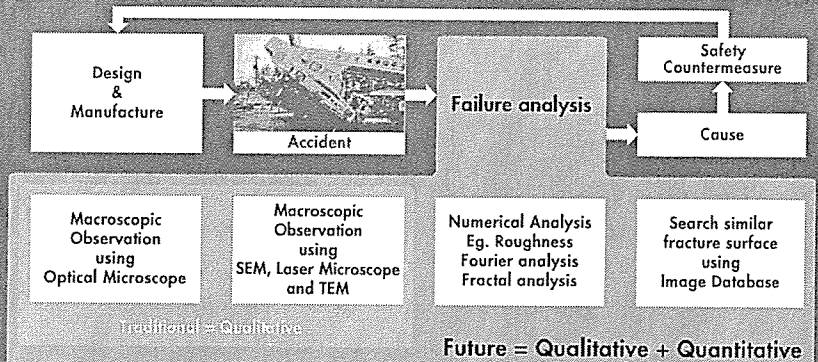
² Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd, Japan

³ University of Tokyo, Japan

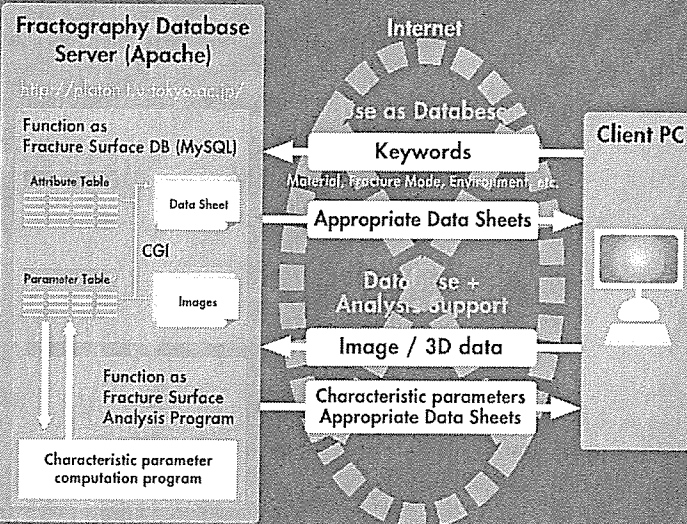
1: Aims

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 surface, 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
TiMs	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	Value
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

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(フラクトグラフィ)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性格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格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。

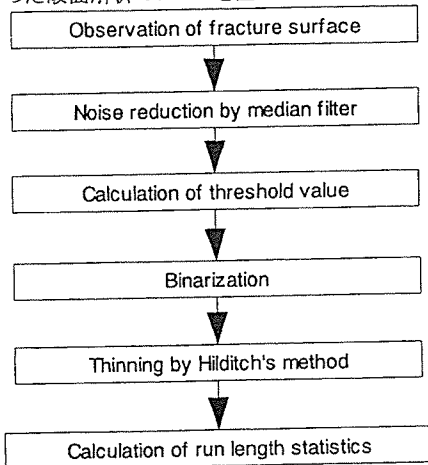


Fig. 1 Flowchart of dimple size characterization

SEMを用いてディンプル破面の濃淡画像を撮影した後に、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 $P_{\theta}(i, j)$ ($i=0, 1, \dots, n-1, j=1, 2, \dots, l$) を要素とする行列をランレングス行列とよぶ。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。

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

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。

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

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。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 $\Phi 6$ mm 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。

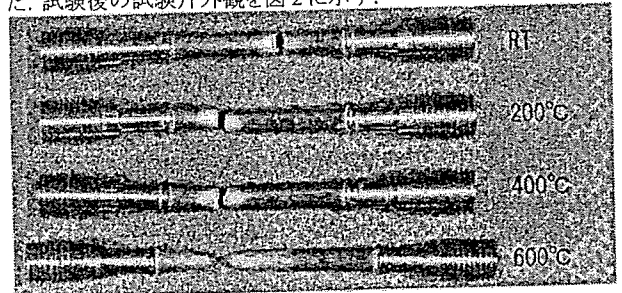


Fig. 2: Overview of test pieces.

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℃、400℃、600℃である。観察箇所は破面の中心部である。全ての試験片にディンプルが観察され、延性破壊であることがわかる。また、温度の上昇に従い、ディ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℃(図6)については、ディンプル中央部に穴が観察される。

これは、ディンプルが形成された後、高温であることから、さらにディ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℃の破面については、ディ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ィ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。

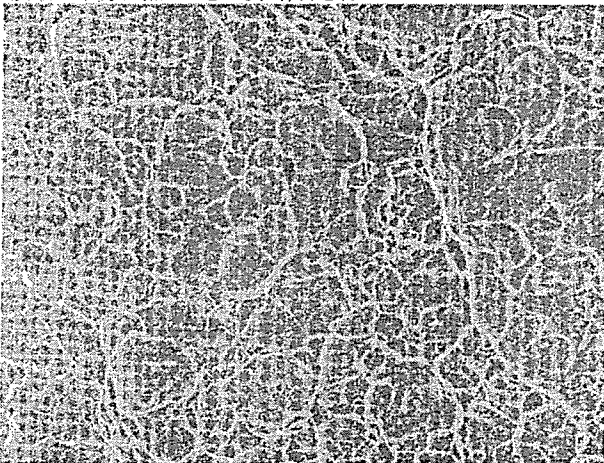


Fig. 3:SEM Image of fracture surface. Temperature is RT. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

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7(常温)、図8(200℃)図9(400℃)に示す。輪郭は破面写真の上の実線で示した。ディ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、ディ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,θ=0)と横方向(y,θ=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。

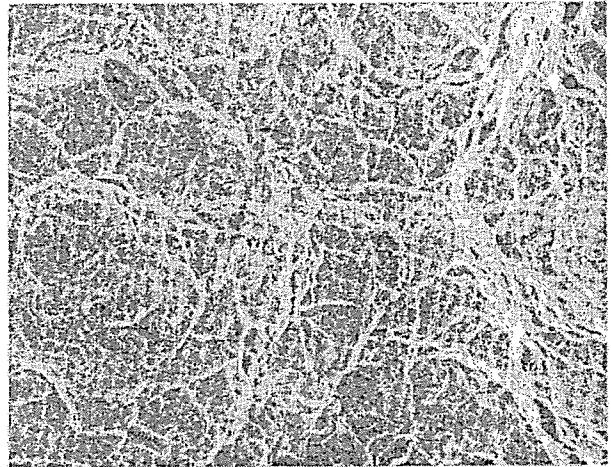


Fig. 4:SEM Image of fracture surface. Temperature is 200°C. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

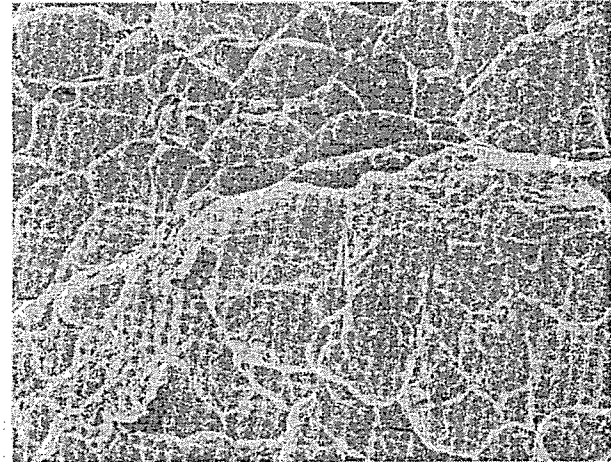


Fig. 5:SEM Image of fracture surface. Temperature is 400°C. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

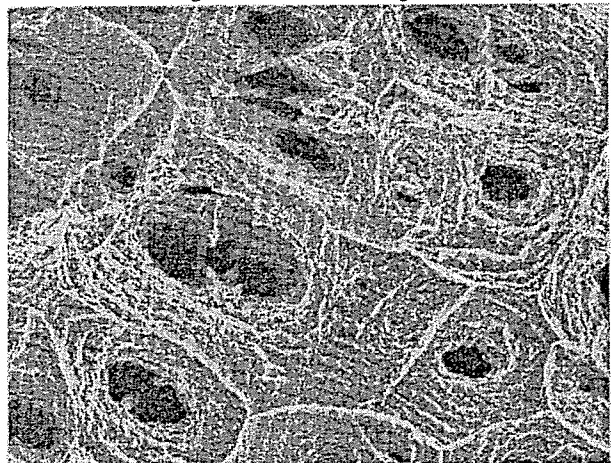


Fig. 6:SEM Image of fracture surface. Temperature is 600°C. Observation magnification is 2000. Image width is 60μm.

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。したが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、

FS_{LRF} 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_{LRF} 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。

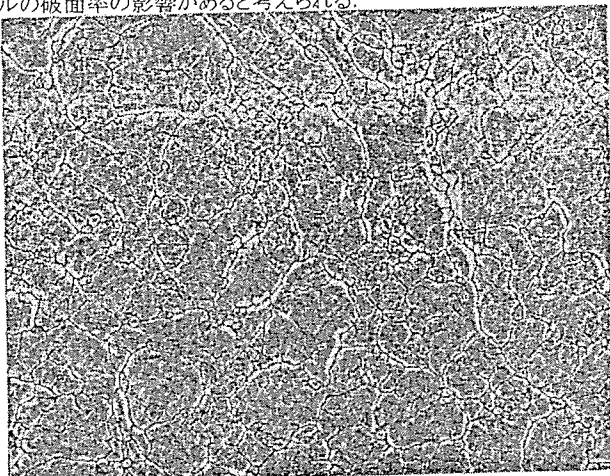


Fig. 7 SEM image of fracture surface(RT). Edge line extracted by the proposed method is emphasized. Image width is 60μm.

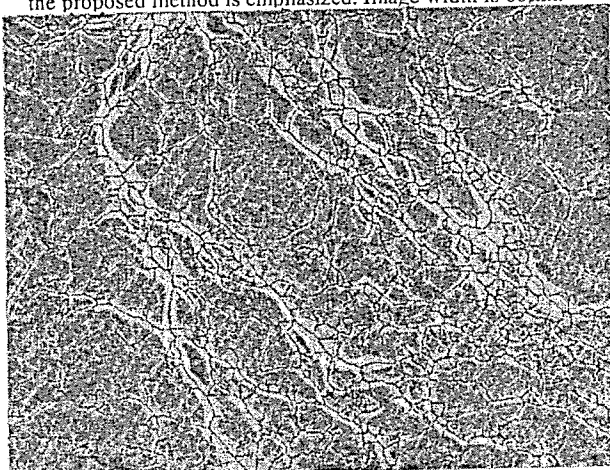


Fig. 8:SEM image of fracture surface (200°C).

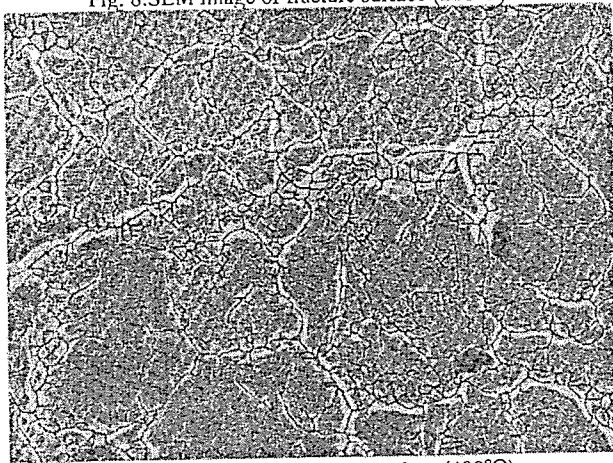


Fig. 9 SEM image of fracture surface (400°C)

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る、今後の課題である。

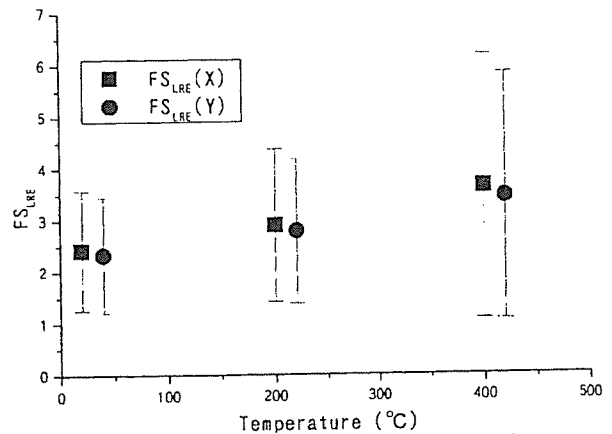


Fig. 10:Relationship between temperature and FS_{LRE} .

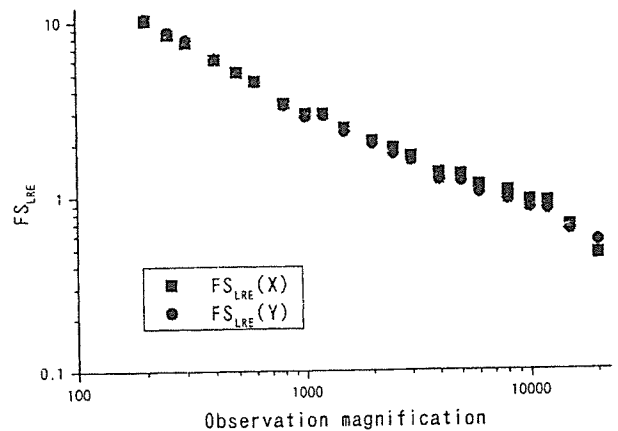


Fig. 11:Relationship between magnification and FS_{LRE} .

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鋼の高温引っ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(フラクトグラフィ)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。

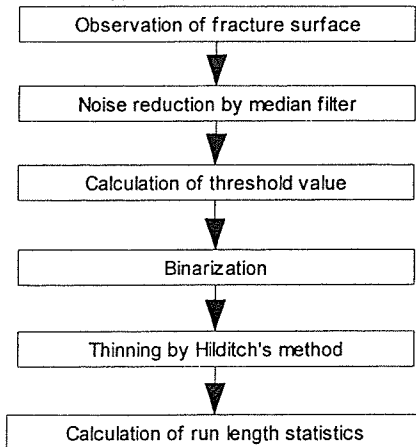


Fig. 1 Flowchart of dimple size characterization

SEMを用いてディンプル破面の濃淡画像を撮影した後に、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。

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

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。

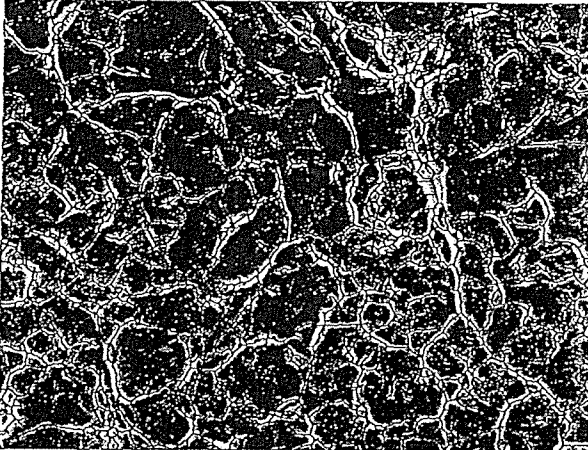


Fig. 2 SEM image of fracture surface(RT). Edge line extracted by the proposed method is emphasized. Image width is 60 μ m.

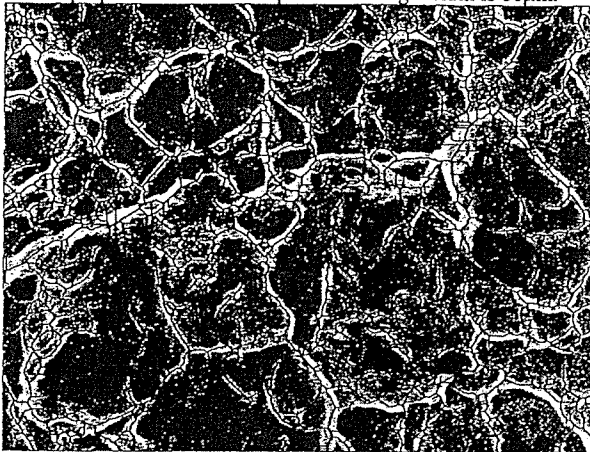


Fig. 3 SEM image of fracture surface (400°C)

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り, 今後の課題である。

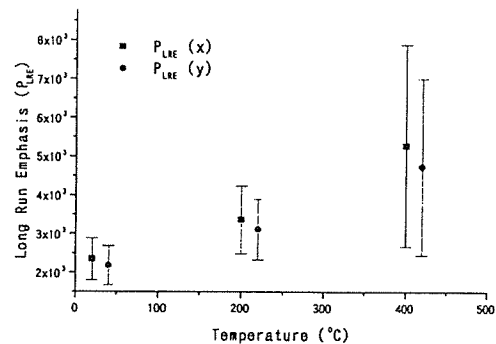


Fig. 4 Relationship between temperature and long run emphasis.

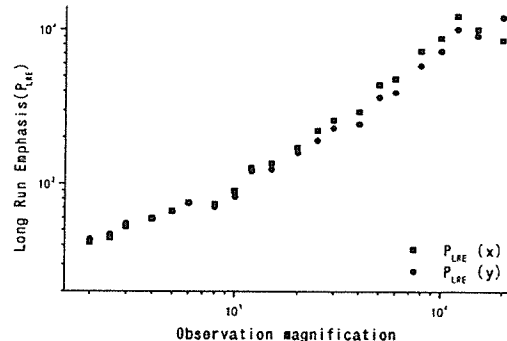


Fig. 5 Relationship between magnification observation and P_{LRE}

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

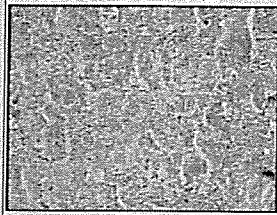
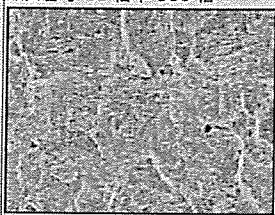
本研究の一部は厚生労働科学技術研究費(労働安全衛生総合研究事業)を用いて行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 日本材料学会フラクグラフィ部門委員会編, フラクグラフィ, (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

| データシートNo. FSDS0001

タイトル	S45Cボルトの疲労破面 (1)	材料仕様	JIS S45C
実機/実験	実験	破壊様式	疲労破壊
破壊の発生環境	室温大気中にて疲労試験を実施	破面生成の概要	M16のボルトにナットを付け、平均応力191MPa、応力振幅127MPaにて試験を実施した。破断寿命 7.3×10 ⁴ サイクルであった。破断部は、座面から数えて第一ねじ底であった。
外観写真			

破面写真	破面番号 10 倍率 500 倍			破面番号 11 倍率 500 倍		
						
	画像サイズ		データ間隔	画像サイズ		データ間隔
	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)
800	600	0.3	800	600	0.3	

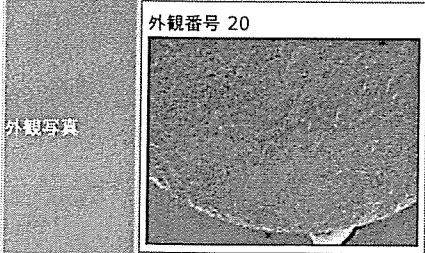
観察者のコメント 本撮影位置は疲労き裂の起点から2mmの位置である。この位置では疲労き裂が安定に進展していき、疲労破面に特有のストライエーション(縞状模様)が観察されている。

特徴量

破面番号	倍率	フラクタル次元	カットオフ	Rp				Rv				Rz				FFT変換結果
				X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	
10	500	2.056311		5.59*10 ¹	6.03*10 ¹	5.66*10 ¹	3.87*10 ¹	-3.84*10 ¹	3.18*10 ¹	-4.18*10 ¹	4.02*10 ¹	9.43*10 ¹	1.08*10 ²	9.84*10 ¹	9.63*10 ¹	画像表示
11	500	1.973175		5.36*10 ¹	5.14*10 ¹	5.48*10 ¹	2.98*10 ¹	-3.55*10 ¹	2.84*10 ¹	-3.95*10 ¹	2.80*10 ¹	8.91*10 ¹	9.35*10 ¹	9.43*10 ¹	6.70*10 ¹	画像表示

| データシートNo. FS00002

タイトル	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点部)	材料仕様	STS410
実験/実験	実機	破壊様式	疲労破壊
破壊の発生環境	室温大気中で直径8mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸荷重制御疲労試験を実施した	破面生成の概要	応力振幅250MPaで、破断寿命は72000サイクルであった。本データはその起点部を観察した結果である。



破面番号 20 倍率 100 倍	破面番号 21 倍率 500 倍	破面番号 22 倍率 1000 倍	破面番号 23 倍率 2000 倍
画像サイズ 水平方向 垂直方向 1200 900	データ間隔 (μm) 1	画像サイズ 水平方向 垂直方向 1200 900	データ間隔 (μm) 0.2
画像サイズ 水平方向 垂直方向 1200 900	データ間隔 (μm) 0.1	画像サイズ 水平方向 垂直方向 1200 900	データ間隔 (μm) 0.05

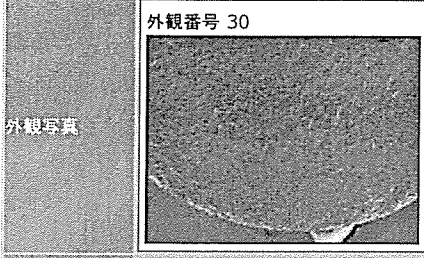
観察者のコメント 破面の放射状マークから疲労き裂の起点を特定した。両振り試験をしているため、破面の一部はつぶれているが、所々にストライエーションが観察されている。

特徴量

破面番号	倍率	フラクタル次元	カットオフ	Rp				Rv				Rz				FFT変換結果
				X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	
20	100			2.80*10 ¹	6.26*10 ¹	3.62*10 ¹	7.59*10 ¹	-1.89*10 ¹	3.74*10 ¹	-2.37*10 ¹	9.59*10 ⁰	4.68*10 ¹	1.72*10 ²	5.99*10 ¹	9.72*10 ¹	画像表示
21	500			4.44*10 ¹	5.96*10 ¹	4.99*10 ¹	7.64*10 ¹	-3.57*10 ¹	4.19*10 ¹	-3.74*10 ¹	2.35*10 ¹	8.00*10 ¹	1.52*10 ²	8.72*10 ¹	1.40*10 ²	画像表示
22	1000			4.89*10 ¹	6.06*10 ¹	5.21*10 ¹	6.40*10 ¹	-3.84*10 ¹	2.09*10 ¹	-3.93*10 ¹	4.21*10 ¹	8.73*10 ¹	9.97*10 ¹	9.14*10 ¹	1.33*10 ²	画像表示
23	2000			5.67*10 ¹	1.09*10 ²	5.96*10 ¹	1.28*10 ²	-4.70*10 ¹	4.16*10 ¹	-4.92*10 ¹	5.63*10 ¹	1.04*10 ²	2.12*10 ²	1.09*10 ²	2.70*10 ²	画像表示

！ データシートNo. FSDS0003

タイトル	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点から1mm)	材料仕様	STS410
実機/実験	実機	破壊様式	疲労破壊
破壊の発生経緯	室温大気中で直径8mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸荷重制御疲労試験を実施した。	破面生成の経緯	応力振幅250MPaで、破断寿命は72000サイクルであった。本データはその起点から1mmの位置をを観察した結果である。



破面写真	破面番号 30 倍率 100 倍	破面番号 31 倍率 500 倍	破面番号 32 倍率 1000 倍	破面番号 33 倍率 2000 倍							
	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔			
	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向
1200	900	1	1200	900	0.2	1200	900	0.1	1200	900	0.05

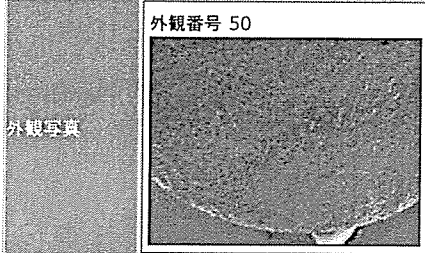
観察者のコメント
備考

特徴量

破面番号	倍率	フラクタル次元	カットオフ	Rp				Rv				Rz				FFT変換結果
				X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	
30	100			4.59*10 ¹	3.18*10 ¹	4.96*10 ¹	4.54*10 ¹	-3.36*10 ¹	1.33*10 ¹	-3.48*10 ¹	1.54*10 ¹	7.94*10 ¹	5.49*10 ¹	8.44*10 ¹	6.78*10 ¹	画像表示
31	500			6.38*10 ¹	4.94*10 ¹	6.30*10 ¹	7.66*10 ¹	-4.46*10 ¹	1.85*10 ¹	-4.57*10 ¹	2.94*10 ¹	1.08*10 ²	7.61*10 ¹	1.09*10 ²	1.36*10 ²	画像表示
32	1000			6.93*10 ¹	5.16*10 ¹	6.26*10 ¹	9.15*10 ¹	-4.62*10 ¹	2.04*10 ¹	-4.63*10 ¹	4.38*10 ¹	1.16*10 ²	7.74*10 ¹	1.09*10 ²	1.85*10 ²	画像表示
33	2000			7.10*10 ¹	6.14*10 ¹	6.05*10 ¹	8.49*10 ¹	-5.09*10 ¹	2.88*10 ¹	-4.96*10 ¹	5.18*10 ¹	1.22*10 ²	9.83*10 ¹	1.10*10 ²	1.89*10 ²	画像表示

| データシートNo. FSDS0005

タイトル	STS410鋼高サイクル疲労破面(起点から3mm)	材料仕様	STS410
実験/実験	実験	破壊様式	疲労破壊
破壊の発生環境	室温大気中で直径8mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸荷重制御疲労試験を実施した。	破面生成の観察	応力振幅250MPaで、破断寿命は72000サイクルであった。本データはその起点から3mmの位置をを観察した結果である。



破面番号 50 倍率 100 倍	破面番号 51 倍率 500 倍	破面番号 52 倍率 1000 倍	破面番号 53 倍率 2000 倍											
画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔							
水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)
1200	900	1	1200	900	0.2	1200	900	0.1	1200	900	0.05	1200	900	0.05

観察者のコメント 起点から1mmでの観察結果FSDS0008に比べ、き裂進展速度が加速していき、ストライエーションの間隔が広がっている。

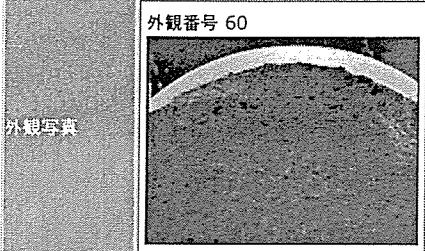
備考

特徴量

破面番号	倍率	フラクタル次元	カットオフ	Rp				Rv				Rz				FFT変換結果
				X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	
50	100			5.35*10 ¹	4.71*10 ¹	5.13*10 ¹	6.28*10 ¹	-3.30*10 ¹	2.01*10 ¹	-3.96*10 ¹	3.15*10 ¹	8.65*10 ¹	7.49*10 ¹	9.09*10 ¹	1.25*10 ²	画像表示
51	500			6.02*10 ¹	7.98*10 ¹	6.35*10 ¹	6.14*10 ¹	-4.02*10 ¹	4.33*10 ¹	-4.65*10 ¹	3.65*10 ¹	1.00*10 ²	1.59*10 ²	1.10*10 ²	1.20*10 ²	画像表示
52	1000			5.77*10 ¹	8.24*10 ¹	6.53*10 ¹	6.47*10 ¹	-3.83*10 ¹	4.19*10 ¹	-4.67*10 ¹	4.21*10 ¹	9.61*10 ¹	1.52*10 ²	1.12*10 ²	1.07*10 ²	画像表示
53	2000			5.89*10 ¹	5.87*10 ¹	6.95*10 ¹	6.08*10 ¹	-3.99*10 ¹	2.65*10 ¹	-4.77*10 ¹	5.31*10 ¹	9.88*10 ¹	8.84*10 ¹	1.17*10 ²	1.44*10 ²	画像表示

| データシートNo. FSDS0006

タイトル	STS410鋼延性破面	材料仕様	STS410
装置/実験	実験	破壊様式	延性破壊
破壊の発生環境	室温大気中で直径8mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸荷重制御疲労試験を実施した。	破面生成の概要	応力振幅250MPaで、破断寿命は72000サイクルであった。本データは最終破断部を観察した結果である。



破面写真	破面番号 60 倍率 100 倍	破面番号 61 倍率 500 倍	破面番号 62 倍率 1000 倍	破面番号 63 倍率 2000 倍										
	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔						
	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向
1200	900	1	1200	900	0.2	1200	900	0.1	1200	900	0.05	1200	900	0.05

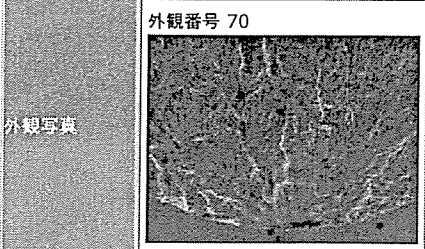
観察者のコメント 疲労試験においてき裂が進展していき、試験部の残留断面積が少なくなると不安定破壊に遷移する。シェアリップが形成され、伸長ディンプルが観察されている。

特徴量

破面番号	倍率	フラクタル次元	カットオフ	Rp				Rv				Rz				FFT変換結果
				X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	
60	100			2.76×10^1	8.27×10^1	3.32×10^1	3.76×10^1	-2.09×10^1	7.32×10^1	-2.28×10^1	2.07×10^1	4.85×10^1	2.83×10^2	5.61×10^1	8.60×10^1	画像表示
61	500			5.22×10^1	6.42×10^1	6.13×10^1	1.10×10^2	-3.86×10^1	3.81×10^1	-4.34×10^1	3.56×10^1	9.09×10^1	1.21×10^2	1.05×10^2	1.53×10^2	画像表示
62	1000			5.71×10^1	8.91×10^1	6.39×10^1	9.20×10^1	-4.10×10^1	3.98×10^1	-4.51×10^1	4.81×10^1	9.80×10^1	1.80×10^2	1.09×10^2	1.86×10^2	画像表示
63	2000			6.47×10^1	6.00×10^1	6.99×10^1	1.26×10^2	-4.27×10^1	3.18×10^1	-4.36×10^1	4.04×10^1	1.07×10^2	1.17×10^2	1.14×10^2	1.94×10^2	画像表示

データシートNo. FSDS0007

タイトル	オーステナイト系ステンレス鋼SUS316	材料仕様	SUS316
実験/実験	実験	破壊様式	高サイクル疲労破壊
破壊の発生環境	室温大気中で直径8mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸荷重制御疲労試験を実施した。	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。本データは起点部を観察した結果である。



破面番号 70 倍率 100 倍	破面番号 71 倍率 500 倍	破面番号 72 倍率 1000 倍	破面番号 73 倍率 2000 倍											
画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔	画像サイズ	データ間隔							
水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)	水平方向	垂直方向	(μm)
1200	900	1	1200	900	0.2	1200	900	0.1	1200	900	0.05	1200	900	0.05

観察者のコメント 起点部を観察したものであり、すべり変形の寄与によるストライエーション状模様が観察されている。

特徴量

破面番号	倍率	フラクタル次元	カットオフ	Rp				Rv				Rz				FFT変換結果
				X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	X方向平均	X方向分散	Y方向平均	Y方向分散	
70	100			3.55×10^1	8.77×10^1	3.58×10^1	4.28×10^1	-2.31×10^1	1.85×10^1	-2.19×10^1	9.60×10^0	5.86×10^1	1.38×10^2	5.77×10^1	6.07×10^1	画像表示
71	500			5.09×10^1	8.41×10^1	5.20×10^1	1.35×10^2	-3.26×10^1	2.05×10^1	-3.36×10^1	4.05×10^1	8.35×10^1	1.43×10^2	8.56×10^1	2.57×10^2	画像表示
72	1000			5.25×10^1	9.50×10^1	4.75×10^1	1.95×10^2	-3.41×10^1	3.30×10^1	-3.41×10^1	4.79×10^1	8.66×10^1	1.96×10^2	8.16×10^1	3.68×10^2	画像表示
73	2000			6.37×10^1	7.08×10^1	4.69×10^1	1.30×10^2	-4.24×10^1	3.19×10^1	-3.79×10^1	5.55×10^1	1.06×10^2	1.10×10^2	8.49×10^1	2.89×10^2	画像表示