

厚生労働科学研究研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

破断面から破断荷重を推定するための
定量解析システムの開発

平成18年度 総括研究報告書

主任研究者 山際 謙太

平成19（2007）年 4月

目 次

I. 総括研究報告

- 破断面から破断荷重を推定するための定量解析システムの開発 1
山際謙太

II. 分担研究報告

1. 延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法の開発と,
Ti 合金高温単軸引張り試験への応用5
山際謙太
2. 破面解析支援データベースの改善11
酒井信介

III. 研究成果の刊行に関する一覧表13

IV. 研究成果の刊行物・別刷14

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

破断面から破断荷重を推定するための定量解析システムの開発

主任研究者 山際謙太 独立行政法人産業安全研究所研究員

研究要旨 本研究は、破断面に数値解析を適用し、破断面から破壊の際の荷重を推定するための数値定量解析手法の開発と破断面データベースが融合した破断面解析システムを構築することを目的とする。平成18年度の実施項目は次のとおりである。1) 数値解析手法に関しては延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法について開発を行った。この手法を用いることで、高温機器などの破壊事故から延性破面が観察された場合、その箇所の温度を延性破面の特徴であるディンプルの電子顕微鏡画像から画像処理により推定することが可能となった。2) 破断面データベースに関しては、昨年度と今年度実施した破壊試験の破面について解析を実施し、データベースへの登録を行った。また、破断面データベースの表示インターフェイスの改善とメンテナンスシステムの構築を行った。

分担研究者氏名・所属機関名及び所属機関
における職名

酒井信介・東京大学工学部教授

ことが可能となる。

B. 研究方法

本研究は3年計画で独立行政法人産業安全研究所、東京大学工学部で実施する。初年度である平成18年度は、次に示す方法で研究を実施した。

まず産業安全研究所では、延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法に関して研究を行った。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、その結果破壊荷重の推定が可能になる。本研究ではディンプルの大きさを定量的に評価する手法の開発と検討を行った。そして、高温で破壊した構造物から延性破面が観察された場合、破断荷重が可能であることを示した。この手法を用いると、高温機器の破壊事故が起きた際、ディンプルから破壊温度と破断荷重の推定

A. 研究目的

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

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

が可能である。

次に、産安研と東京大学の共同で、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実施した。試験内容は、1) 衝撃試験、2) 高温単軸引張り試験を行った。これらの破面について解析を実施し、データベースへの登録を行った。

また、破断面データベースについて、データを表示させるインターフェイスの改善と、メンテナンスシステムの構築を行った。(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：延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法について

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。

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。その結果、温度に対応して LRE が大きくなる傾向が得られた。

2：破壊試験と破断面データベースの改善について

本研究では、まず破断面データベースに掲載するための破壊試験を行った。破壊試験は単軸引張り試験と、高温単軸引張り試験である。得られた破面は、前述の延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法の開発に利用した。次に、破断面データベースのインターフェイスの改善と、データの登録を行った。具体的には、1) データの登録・修正・削除を行うためのメンテナンス画面の構築、2) あらさやフラクタル次元を表示するための特徴量テーブルの効率的な表示方法の検討を行った。また、昨年度実験を行った疲労破壊試験と、今年度行った破壊試験の破面観察を行い、データを登録した。

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

D. 考察

1：延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法について

まず、ランレングスを計算するために検出したディンプルの輪郭について検討を行う。

本手法で検出した輪郭はディンプルのみを選択的に検出したわけではないので、ディンプル以外の輪郭も検出している。また、ディンプルの輪郭も必ずしも1周しているわけではなく、輪郭はつながっていない箇所もある。

ディンプルの輪郭が途切れるのはランを長くする影響があると考えられる。ディンプルの内側のすべり模様の輪郭はランを短くする影響がある。また、従って、輪郭画像からディンプルの直径をランレングスのみを用いて評価しようとした場合、特定の輪郭を抽出する必要がある、これを画像処理のみで行うのは困難である。

これに対し、高梨ら（高梨，山際，材料，Vol. 54, No. 11, pp. 1159-1165 (2005)）はランレングスの統計量は輪郭の検出精度に対して鈍感であると報告している。また本研究の目的は、人間の主観に頼らずに定量的に延性破面の特徴をとらえることであることから、主観的に輪郭の選択を行うのではなく、ランレングスから求められる統計量を用いて延性破面を評価することが適していると考えられる。

次に得られたLREについて検討を行う。同一の温度で縦横方向のLREの値にほとんど差が無かった。これは、ディンプルが等軸であることを反映している。せん断型の破壊の場合は楕円形の伸張ディンプルが観察されるため、LREの値は縦横方向で異なると考えられる。

標準偏差については、高温になるにしたがい大きくなった。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の値の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。

以上のことから、LREを用いることで、

破壊時の温度推定は十分に可能である。したがって、ある破壊事故が起きた際に、同種の金属を用いて破壊試験を行い、温度とLREの関係を求めると、破壊時の温度が推定できる。さらに試験結果を用いることで破断荷重の推定が可能となる。

2：破壊試験と破断面のデータベースの改善について

破壊試験に関しては、1の延性破面から破断荷重を推定する手法を確立するために、温度を室温から400度まで100度きざみで変化させた条件のもとで、単軸引張り試験を行った。材料は高温機器に用いられるものをステンレス鋼、チタン合金から重点的に使用した。得られた破面の観察を電子顕微鏡で行ったところ、温度が高くなると、試験に用いた金属はディンプルが大きくなることを確認した。

昨年度開発した破断面データベースには、データベースの登録削除をインターネット経由で行うことができなかった。したがって、本年度はインターネット経由でデータの修正ができるためのメンテナンス画面を構築した。これにより簡単にデータの修正作業を行うことが可能になった。

次に、特徴量を表示するインターネットブラウザにおけるインターフェイスについて述べる。昨年度の開発段階では、破面データシート（ある特徴をもった破面についてまとめた破面画像・属性データの集合）内で、特徴量（あらさ・フラクタル次元など）を表示するテーブルを横一列にすべて表示していた。そのため、画面からはみ出すことが多く、見づらいという指摘が閲覧者からなされていた。したがって、今年度はこの点を改善するため、表示する特徴量を3種類にしぼって表示するインターフェイスを構築した。表示する3種類のインターフェイスはプルダウンメニューにより閲覧者が任意に選択できる仕組みとした。このインターフェイスを導入することで、破面画像の特徴量を閲覧者が任意に選択し、効率的に特徴量の比較を行うことが可能となった。また、破面画像と類似した破面のリストも表示しているが、これについても同様

に特徴量を選択的に表示する仕組みとした。その結果、データシートをより見やすい形式で表示することが可能となった。

E. 結論

平成18年度の研究により、以下の結論を得た。

延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法を提案した。この手法は、テクスチャ解析で使用されるランレングスの統計量であるLREを用いて、ディンプルの輪郭の間隔を評価する手法である。本研究では、温度の異なる単軸引張り試験を行い、得られた破面に適用した。その結果、温度が高くなるとディンプルが大きくなる傾向があるが、これを定量的に評価することが可能となった。その結果、破断荷重の推定が可能となった。次に、昨年度構築した破断面データベースに関してデータ表示の修正と登録修正を行うメンテナンス画面の構築を行った。また、得られた破面の破断面データベースへの登録を行った。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1.論文発表

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

2. 学会発表

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，“ランレング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，“ランレング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

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法の開発と、
Ti 合金高温単軸引張り試験への応用

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 本研究では、延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法について提案する。この手法では、ランレングスの統計量である LRE を利用して、ディンプルの大きさの定量評価が可能である。その結果、破壊温度と LRE の関係を得ることができるため、延性破面からの温度推定が実現した。その結果、破断荷重の客観的な推定を実現した。

A. 研究目的

破面の調査（フラクトグラフィ）は、機械構造物の損傷調査では、原因究明と再発防止の観点から必ず実行される。破面の観察と破壊要因の推定という定性的な評価が主に行われる。しかし、破面の判断には観察者の長年の経験と高度の技術が必要である。特に観察初心者が判断を誤ると、正しい原因究明ができなくなる。また、近年、解析熟練者は減少してきており、解析技術の伝承も問題となっている。これらの問題点の解決方法として、数値解析を用いて破面から定量的な値を導き、これを元に事故解析を行うことが求められている。

本研究では、延性破面の SEM 画像の特徴を定量的に評価することを目的とする。延性破面の観察されるディンプルの大きさは温度と対応していることが寺田らの研究で明らかになっている。しかし、数値解析を用いて定量的に評価する手法は確立されていない。本研究により、延性破面から定量的に破断荷重を推定する手法の検討を行う。

B. 研究方法

本研究で行った破面解析のフローを Fig. 1 に示す。主にディンプルの輪郭を抽出することを目的としている。

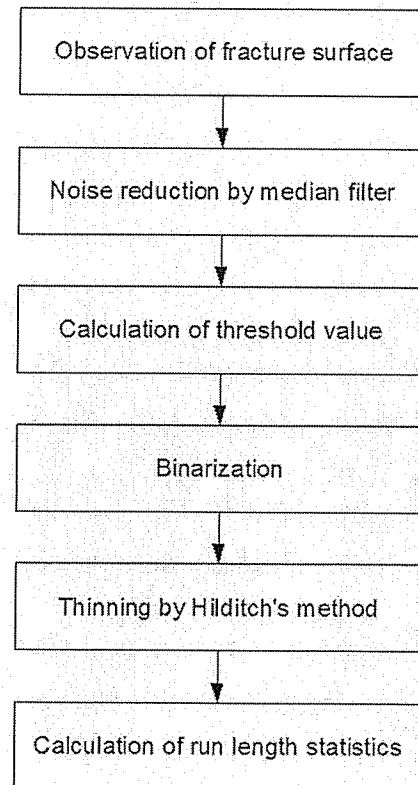


Fig. 1 延性破面から破壊温度と破断荷重を推定するための手法

まず、電子顕微鏡（SEM）を用いて延性破面の濃淡画像を撮影する。次に、ノイズ除去のためにメディアンフィルタを使用す

る。そして、しきい値を決め、画像の二値化を行い、輪郭部（明部）と、それ以外（暗部）の2領域に画像を分類する。ここで、しきい値は次のように決定した。延性破面の画像は、主に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。最後に暗部の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の統計量

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ぶ。その長さがランレングスである。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。延性破面を観察すると、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) を延性破面の特徴量として採用した。LRE の計算式を式 1 に示す。LRE は画像内に長いランが多いほど大きな値となる。

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

本手法では、人が判断する手順が無いことから、客観的な破面評価が可能である。ランレングスを用いた破面の評価方法として、高梨らはランレングスの統計量を球状黒鉛鉄の破壊靱性試験破面の SEM 画像に適用し、予き裂導入による疲労破面と急速破壊破面を分離している。この研究では、複数の SEM 画像を解析する際にコントラストの影響がでることから、SEM 画像を微分して得られる輪郭を

強調した画像（微分画像）を利用している。これに対し、本研究では、観察対象が延性破面であり、ディンプルの輪郭は SEM 画像では明瞭にでることから、コントラストの影響は少ないと考え、微分画像は利用しなかった。

C. 研究結果

本研究では供試材は Ti-6Al-4V 鋼として、温度条件を変えた単軸引張り試験を行った。試験片は $\phi 6\text{mm}$ の丸棒試験片を用いた。

使用した温度は、室温 (RT), 100, 200, 300, 400°C とした。各温度で 3 本の試験を行った。試験後の試験片外観 (RT, 200, 400°C) を Fig. 2 に示す。絞りはそれぞれ 44%, 51%, 55% であった。これは、高温になると延性が増す影響で、材料が伸びて先細りしている結果である。

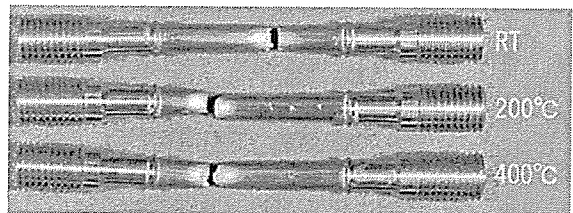


Fig. 2 引張り試験後の試験片

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。観察箇所は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、ステージを縦横方向に制御する機構がついている。これを用いると、マトリクス状に最大 $64(8 \times 8)$ 視野の画像を取得することができる。この機能を用いると、従来型の SEM よりも効率的に多くの視野の観察が可能となる。2000 倍で観察した場合、横 480 μm 縦 360 μm の視野を観察できる。本研究では試験片ごとに 64 視野（各温度 $3 \times 64 = 192$ 視野）の撮影を行い、視野ごとに LRE の計算を行った。

破面観察を行った結果を試験温度と共に Fig. 3 に示す。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。単軸引張り試験であるので、等軸ディンプルが観察される。また、

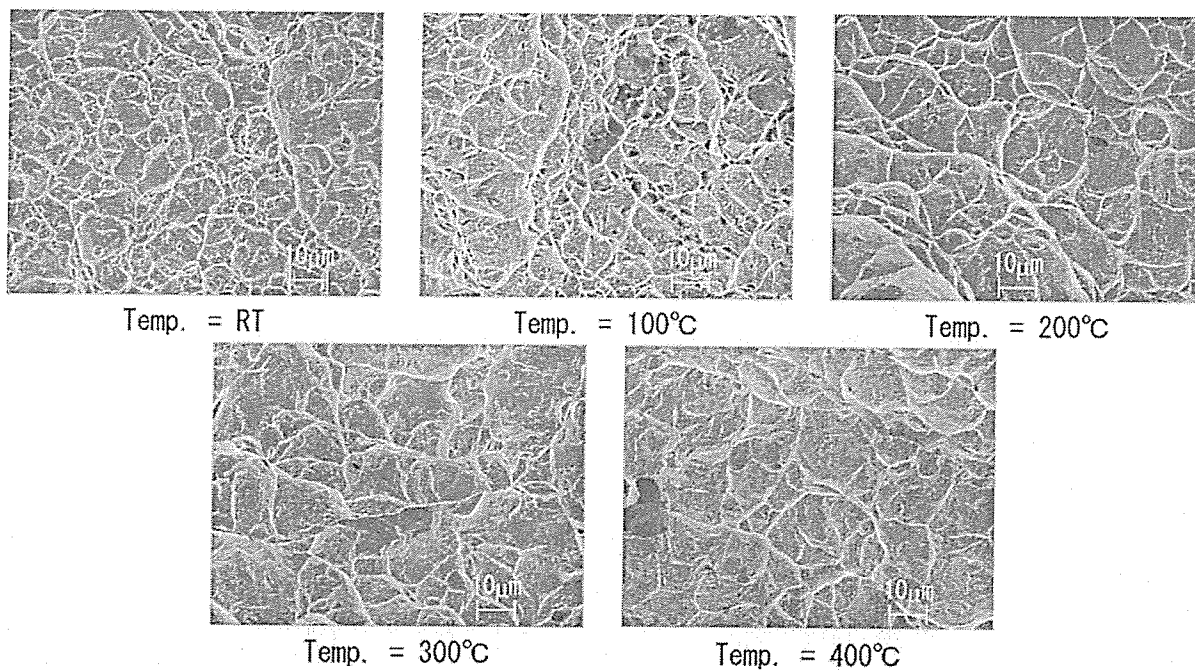


Fig. 3 各温度ごとの破断面電子顕微鏡写真

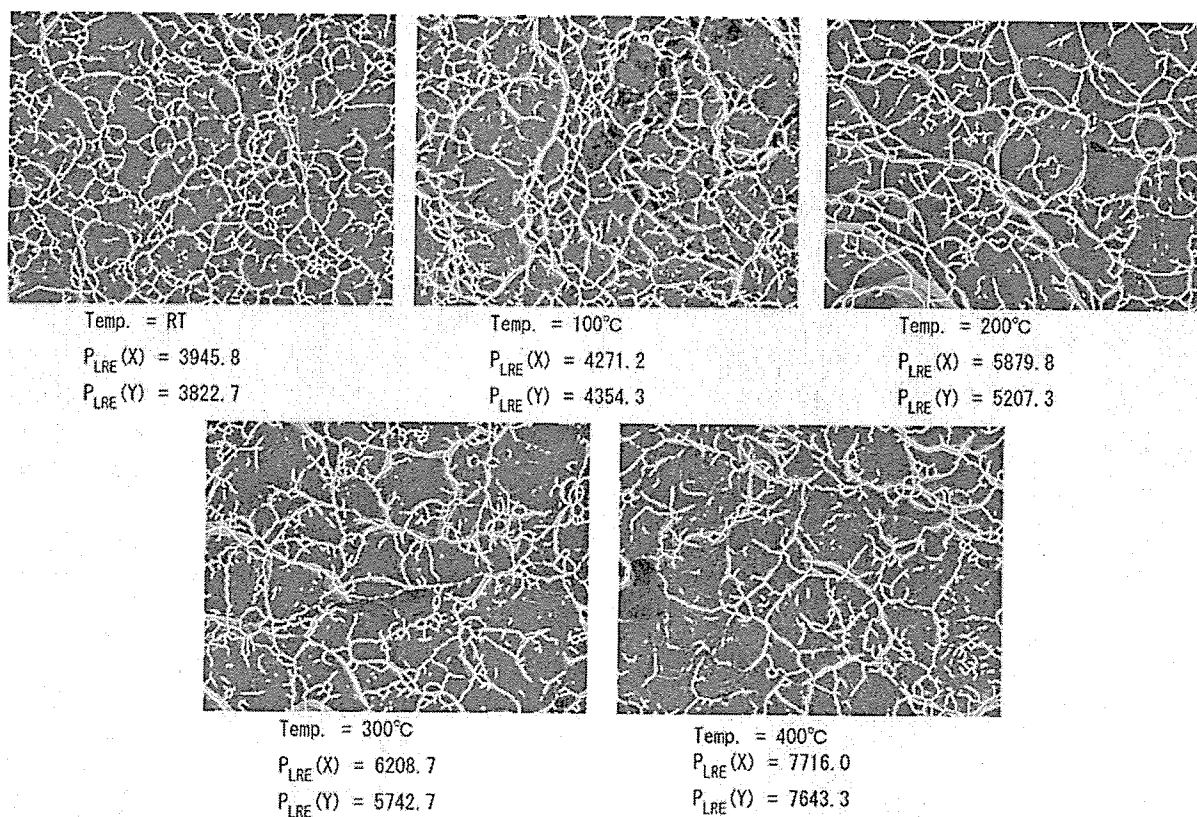


Fig. 4 本研究で提案する手法により検出した輪郭線. 背景に元の画像を重ねてある.

100℃単位ではわかりにくいですが、室温と 400℃を比較してみると、温度の上昇と共に、ディンプルの大きさが大きくなっている。

Fig. 1 のフローに従いディンプルの輪郭を抽出した結果を Fig. 4 に示す。輪郭は破面写真の上に白い実線で示した。画像はそれぞれ Fig. 3 の配置と対応している。また、本来 Fig. 1 のフローで得られる画像は背景が黒で輪郭が白い線幅 1 画素の画像であるが、印刷の仕上りを考慮して線の幅を太くし、破面との対応をみるために黒の部分が消去し、背景に元となる破面を表示してある。ディンプル輪郭に沿って実線が描かれている場所があり、輪郭が検出されていることがわかる。縦方向や横方向の輪郭の間隔は温度が高くなるにつれて広がる傾向があることがわかる。すなわちランレングスが長くなっているといえる。LRE の計算結果を各画像の下に示す。温度の上昇と共に LRE が大きくなっ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。たとえば、試験温度 200℃以上の破面では、2000 倍でもディンプルの内側にすべり模様が観察されており、この模様も輪郭として検出している場所がある。しかしながら、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。

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 Fig. 5 に示す。

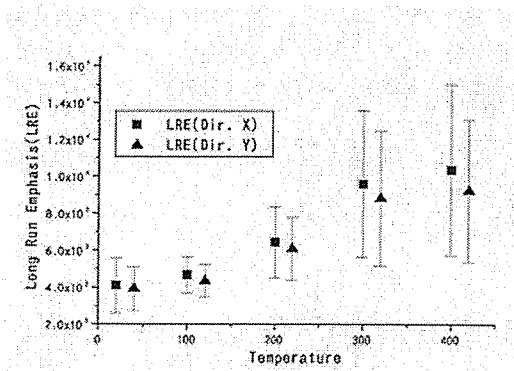


Fig. 5 温度と LRE の関係

横軸は試験温度、縦軸は画像ごとに得られた LRE の平均値と標準偏差である。なお同じ温度において y (▲) の計算結果を右にずらして

表示している。温度の上昇とともに LRE の平均値も大きくなっている。これは、高温になるとディンプルの大きさが大きくなるため、画像内に長いランが多くなるためである。すなわち、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。

D. 考察

輪郭線の抽出精度について述べる。観察結果から、ディンプルは温度の上昇と共に大きくなっているため、ディンプルの輪郭のみを確実に抽出できれば、ディンプルと温度の関係を精度良く特性化することが可能である。しかし、Fig. 4 から明らかなように、本手法で検出された輪郭は必ずしもディンプルの輪郭のみではない。また、ディンプルの輪郭も必ずしも 1 周しているわけではなく、輪郭はつながっていない箇所もある。

ディンプルの輪郭が途切れるのはランを長くする影響があると考えられる。ディンプルの内側のすべり模様の輪郭はランを短くする影響がある。また、従って、輪郭画像からディンプルの直径をランレングスのみを用いて評価しようとした場合、特定の輪郭を抽出する必要があり、これを画像処理のみで行うのは困難である。

これに対し、高梨らはランレングスの統計量は輪郭の検出精度に対して鈍感であると報告している。また本研究の目的は、人間の主観に頼らずに定量的に延性破面の特徴をとらえることであることから、主観的に輪郭の選択を行うのではなく、ランレングスから求められる統計量を用いて延性破面を評価することが適していると考えられる。

次に、破面性状とランレングス統計量の関係について述べる。Fig. 5 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。最後にこれらの統計量と 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。Fig. 6 と Fig. 7 にそれぞれ温度と SRE, RLU の関係を示す。

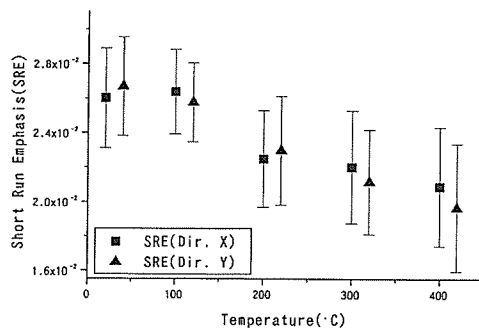


Fig. 6 温度と SRE の関係

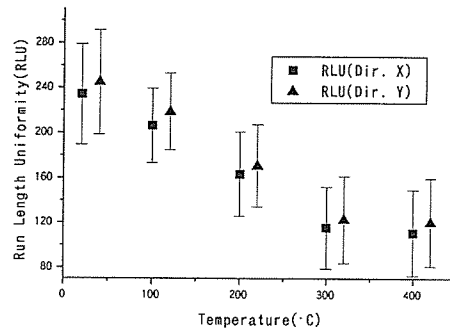


Fig. 7 温度と RLU の関係

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。

E. 結論

本研究では, 延性破面の温度による特徴の差を定量的に評価する手法を提案した。本研究により得られた結論をまとめると以下の通りである。

- 1) 画像処理に用いられるランレングスの統計量 (LRE) を用いて延性破面の SEM 画像を特性化する手法を提案した。
- 2) 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, ディンプルの輪郭を抽出することが可能となった。また, 温度が上昇すると長いランレ

ガスが増えることから P_{LRE} が大きくなる。
これは延性破面の特徴であるディンプルの
大きさが大きくなることに起因していると
考えられる。

以上のことから、LRE を用いることで、
破壊時の温度推定は十分に可能である。し
たがって、ある破壊事故が起きた際に、同
種の金属を用いて破壊試験を行い、温度と
LRE の関係を求めると、破壊時の温度が推
定できる。さらに試験結果を用いることで
破断荷重の推定が可能となる。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

無し

2. 学会発表

山際謙太，高梨正祐，“ランレングスを用
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，“ランレングスを用
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

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含 む）

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

破面解析支援データベースの改善

分担研究者 酒井信介 東京大学工学部教授

研究要旨 本研究では、延性破面から破断荷重を推定する手法のための高温破壊試験を行った。また、昨年度行った破壊試験の破断面も含め解析を行い、破断面データベースへ登録を行った。破断面データベースに関しては、データ表示インターフェイスの改善と、メンテナンスを容易にするためのシステムの構築を行った。

A. 研究目的

現在の破断面解析が抱える問題点として、
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。3) 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、という項目が挙げられている。この問題に対し、本研究では破断面データベースを構築し、解析に関する知見を保存することを目的とする。

B. 研究方法

昨年度構築した破断面データベースに、本年度は以下の作業を実施した。

1. 昨年度実施した破壊試験破面の解析とデータ登録
2. データ登録・修正などをインターネット経由で行うためのメンテナンスインターフェイスの構築
3. データ表示インターフェイスの改善
また、破断面データベースに載せるデータを作ることと、延性破面から破断荷重を推定する手法を構築するために高温単軸引張り試験を行った。

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

C. 研究結果

本研究では、まず破断面データベースに

掲載するための破壊試験を行った。破壊試験は単軸引張り試験と、高温単軸引張り試験である。破壊試験破面の登録は、主に以下の破面に関して行った。

1. シャルピー衝撃試験破面 (S45C, SM490A, SCM440)
2. 単軸引張り試験破面 (SCM435, FC300, S45C, SM490A, A5083)
3. 高温単軸引張り試験破面 (Ti-6Al-4V)
4. 疲労破壊破面 (S45C, SM490A, A5083)

得られた破面の中で特に高温単軸引張り試験破面は、前述の延性破面から破壊温度と破断荷重を推定する手法の開発に利用した。

次に、破断面データベースのインターフェイスの改善と、データの登録を行った。具体的には、以下の項目について行った。

1. データの登録・修正・削除を行うためのメンテナンス画面の構築
2. あらさやフラクタル次元を表示するための特徴量テーブルの効率的な表示方法の検討

データ登録・修正のインターフェイスに関しては、インターネットブラウザから入力し、データの削除・修正を簡単に行えるようにプログラムの開発を行った。この結果、データの更新が容易に行うことができる。

これらのインターフェイスやデータ表示画面に関しては“研究成果の刊行物・別冊”に示す。

D. 考察

破壊試験に関しては、1の延性破面から破断荷重を推定する手法を確立するために、温度を室温から400度まで100度きざみで変化させた条件のもとで、単軸引張り試験を行った。材料は高温機器に用いられるものをステンレス鋼、チタン合金から重点的に使用した。得られた破面の観察を電子顕微鏡で行ったところ、温度が高くなると、試験に用いた金属はディンプルが大きくなることを確認した。

次に、特徴量を表示するインターネットブラウザにおけるインターフェイスについて述べる。昨年度の開発段階では、破面データシート（ある特徴をもった破面についてまとめた破面画像・属性データの集合）内で、特徴量（あらさ・フラクタル次元など）を表示するテーブルを横一列にすべて表示していた。そのため、画面からはみ出すことが多く、見づらいという指摘が閲覧者からなされていた。したがって、今年度はこの点を改善するため、表示する特徴量を3種類にしばって表示するインターフェイスを構築した。表示する3種類のインターフェイスはプルダウンメニューにより閲覧者が任意に選択できる仕組みとした。このインターフェイスを導入することで、破面画像の特徴量を閲覧者が任意に選択し、効率的に特徴量の比較を行うことが可能となった。また、破面画像と類似した破面のリストも表示しているが、これについても同様に特徴量を選択的に表示する仕組みとした。その結果、データシートをより見やすい形式で表示することが可能となった。

E. 結論

本研究では、破断面データベースに登録するデータを作成するための破壊試験を行った。次に、データベースのインターフェイス（メンテナンス、データ表示）に関して、閲覧者からの意見をもとに改善を行った。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

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

2. 学会発表

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

I. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

研究成果の刊行に関する一覧表

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
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

CONTENTS

解説

1・破断面解析支援 データベースの試作

／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

9・回転機への 能動診断技術の適用

／東芝 渡部 幸夫

15・リスク曲線を用いた 最大事故損害規模の予測

／長岡技術科学大学 福田 隆文
横浜国立大学大学院 笠井 尚哉・橘川 重郎
関根 和喜

20・落雷被害増加の現状と 対策

／フランクリン・ジャパン 今村 益子

技術トピックス

●航空・宇宙

25・H-II Aロケット打上げの 安全

／宇宙航空研究開発機構 鳥井 義弘

●交通

32・地下鉄銀座線トンネルの 健康診断

／東京地下鉄 山本 努

12月号

検査技術

●セキュリティ

37・水中セキュリティソーナー システムの開発

／東京大学生産技術研究所 浅田 昭

●エネルギー

42・加圧水型原子力発電所の 重要機器の保全技術

／関西電力 伊藤 肇

54・原子力発電所の長期安定 運転に向けた取組み

／日立製作所 坂下 元昭・久恒 眞一
佐々木 典・井坂 克己

60・顧客敷地内埋設ガス管の 防食診断装置

／大阪ガス 木下 明

シリーズ ●磁性と転位

65・磁性と転位 はじめに

／岩手大学 高橋 正氣

68・第1章 磁気弾性相互作用の 磁化過程への影響

／岩手大学 高橋 正氣

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
石川島播磨重工業(株) 高梨 正祐

◆はじめに

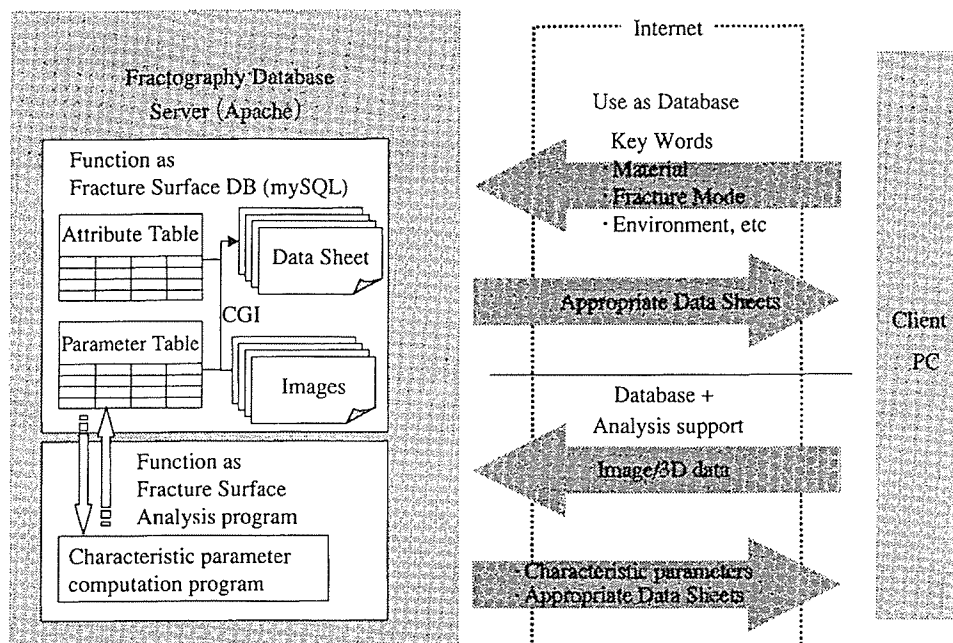
構造物や機械が破壊事故を起こした場合、原因究明と再発防止策を打ち出すプロセスの中で、必ず破断面の調査（フラクトグラフィ）が実施される。

実際の損傷解析現場においては、観察に熟練した人間が破断面の解析を行っており、これを定性的破断面解析と呼ぶ。定性的破断面解析では、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⁾⁽²⁾。しかし、この解析の問題点は、解析した結果が、解析者の熟練度に依存してしまうことである。仮に解析初心者が破断面の判断を誤った場合、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伴う技術伝承不足も問題視されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。こうした問題点を解決すべく、三次元像構築手法や定量的な破面解析法がいくつか提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

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、損傷調査や破壊メカニズムの研究の一環として行われることが多い。よって破断面のデータは、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。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・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たどり着けるようになった。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構築した⁽⁷⁾。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ことに加え、表面粗さやフラクタル次元など、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。こうした特徴量を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。



第1図 System Configuration of Fracture Surface Database System

◆破断面解析支援データベースシステムについて

(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第1図に示す。このデータベースは、インターネット（Web）を介して利用することができる。

データベースは、「破断面属性テーブル」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、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、破断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、一つの破断面を複数の倍率で観察した結果や破断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ユーザに提示したり、管理したりするようになっている。

(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。

次に、フリーキーワードによる検索（例えばS45C+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。

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。

(3) 破断面解析プログラム

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、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、それぞれのパラメータについて述べる。

●表面性状（粗さ）パラメータ

表面粗さは、破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⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本データベースにおいても、表面の凹凸形状を数値として示す表面粗さを特徴量の一つに選んだ。日本工業規格JIS B0601：2001表面製品の幾何特性仕様（GPS）にしたがって、表面粗さを求めるプログラムを作成した⁽¹⁰⁾。JIS B0601に記載されている14種類すべての粗さパラメータを計算し、ユーザが選択した任意のパラメータを表示できるシステムとなっている。なお、表面粗さは1次元に対して定義されるから、画面の水平方向および垂直方向に対して、すべての走査線上で粗さを計測して、計測方向別の平均値と分散を示した。平均値と分散値を用いることにより、破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

Mandelbrot⁽¹¹⁾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じん性との相関が指摘されている。フラクタル次元が等しいからといって、破壊のメカニズムが必ずしも同じという訳ではないが、複雑さを表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⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

●二次元周波数分析

画像の周期性とその方向性を明らかにするために、高速フーリエ変換を実施し、パワースペクトルをビットマップで表示するようにした。なお、本データベースシステムは、東京大学大学院工学系研究科 酒井・泉研究室のWebサーバ（<http://platon.t.u-tokyo.ac.jp/>）上で試験的に公開中である。

◆破断面データベースシステムの狙い

(1) 数値指標の導入による解析支援

第1章でも述べた通り、現段階での損傷解析の主流は、損傷した破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なうことにより実施されている。ちょうど野山で摘み取った植物などを図鑑で調べるようにして、破断面集から類似破断面を探し出し、破壊原因の推定が行われる。よって破断面を定量的に評価し、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考え、本データベースに破断面画像から特徴量を抽出する解析プログラムを実装した。

破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。類似画像の抽出する際にはこうした局所的な特徴を頼りに画像を検索する例は多い⁽¹⁴⁾。だが、破断面のように

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、破断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、従来の破断面解析によく用いられてきた。ところが後者のような破断面全体の特徴は、数値的な指標でなければ表現することが困難となる。ゆえに前節で述べた解析プログラムを導入した。数値的な指標の導入により、ユーザが破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出来ない経験の浅い技術者にとっては、類似性の判断を支援することが可能となる。

(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、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) データベースと数値解析の融合による体系的なデータ管理

もう一つの機能は、データベースと破断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断面の三次元形状を投入すると、破断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。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、本システムでは破断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、破断面画像とともにその画像に関する特徴量も保存でき、データの客観的かつ体系的な管理が可能となる。

破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いる。解析対象とする破断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。

◆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
後、
用す
選択
(1
テ
ーネ
を利
イー
ドを
バー
す。
にキ
ック
リッ
こと
のキ
観
え
ト
能
の

SU
つ
と
に
る
た
れ
イ
ボ
ー

の
真
微
破