卒業論文

フラクタル解析による
シャルピー衝撃破断面の解析
1p ～ 76p 完

平成 12 年 2 月 4 日 提出

指導教官　　酒井 信介 教授

80238　原　祥太郎

目次

図目次

表目次

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 従来の破面解析研究

材料、特に金属が破壊した表面、すなわち金属破断面には破壊の進行状況を示す特徴的な模様が多く残されている。それゆえに、対象とする金属材料の破壊機構の解明や破壊原因の推定は、その模様から情報を得ることによって行う事が多く、この手法をフラクトグラフィ(Fractgraphy) と言う。具体的にフラクトグラフィとは、肉眼や光学顕微鏡による破壊表面の観察、検査、さらに高倍率で観察を行う際には、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察、検査を行う学問のことをいう [15]。また、近年はコンピュータの発達により、金属破断面の写真に画像処理を行うことによる破壊機構の推定も盛んに行われている。ここで指摘しなければならないのは、特に観察に対して言えることとして、破面観察にはある程度熟練した技術が必要であると言う点である。従って、観察による破壊機構の推定は、観察者の主観による評価と言う定性的解析の域を脱することができないと指摘されている。また、破面観察の短所として、破面の模様は実際には 3 次元の立体形状であるにもかかわらず、破面観察による破壊機構の解明はあくまで写真や肉眼による 2 次元上における評価であり、立体形状のトポロジー情報が考慮されていないと言う点も指摘されている。そこで、近年、破面のトポロジー情報を数値的解析を行う事により破壊機構の特性化を行う、すなわち定量的に破面解析を行う手法の確立に対する研究が盛んに行われている。これまでの破断面定量解析の手法として、粗さ解析やスペクトル解析などが挙げられる。しかし、これらの手法は観察倍率による影響を受けやすいなど欠点を持っている。そこで、完全なフラクタル図形においては観察倍率の影響を全く受けない値であるフラクタル次元が注目されるようになった。新たな定量解析の手法としてフラクタル次元の破断面への適用が試みられている。

1.1.2 従来のフラクタル解析

2.3で述べるように、フラクタル解析とはフラクタル次元と呼ばれる値を用いて解析を行う手法である。フラクタル次元は自然界の連続で微分不可能な曲線を特徴づける概念として使われてきた。金属破断面においてもその複雑な形状からフラクタル幾何学が適用できるといわれ、フラクタル次元を用いて破壊機構の特性化を行う研究が行われている [4]。例として破壊の特徴量をフラクタル次元で表したり、破壊靭性値とフ

ラクタル次元の相関を求めるといったことが研究されている。しかし、現在までにフラクタル解析に対しては、はっきりとした解析手法が確立されていないというのが現状であるといえる。

1.1.3 従来のシャルピー衝撃試験による破断面解析

シャルピー衝撃試験は、古くから、材料の靭性評価の手段として広く用いられており、今なお製品製造時の重要な試験項目の一つとして実施されている [16]。シャルピー衝撃試験では、得られた破面から脆性破面率を求め、脆性延性遷移温度を求めることが多く行われる。しかしながら、脆性破面率を求める過程では、人の目によってあいまいに脆性部と延性部との境界決定が行われており (図 1.1)、その客観的手法はまだ確立されていないのが現状である。よって本研究では、フラクタル次元を用いて、脆性破面率を定量的に測定するための境界決定法の確立を試みる。

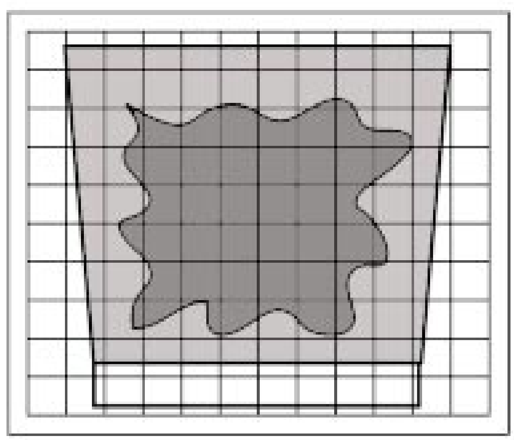


図 1.1: 従来の主観的な脆性破面率の求め方

1.2 本研究の目的

本研究の目的を以下に挙げる。

フラクタル解析を行うことにより、シャルピー衝撃破断面を定量的に評価する。特に以下の項目に注目することにする。

- 完全なフラクタル図形ではフラクタル次元は観察倍率に依存せずに一定の値をもつ、という特徴がある。逆に、特徴長さをもつものはフラクタル性がなく、フラクタル次元は観察倍率に依存する。そこで延性破面、脆性破面について観察倍率に対するフラクタル次元の挙動を調べることは両破面の特徴長さについての洞察が得られると考えられる。そこで、フラクタル次元の挙動から、両破面を定量的に特徴づける。また、その際、従来より用いられている粗さとの比較を行なうことによりフラクタル解析の有用性について検討する。
- 従来より、延性破壊部と脆性破壊部との境界は人の目によるあいまいなものであった。そこで延性破壊部、脆性破壊部の境界についてフラクタル解析を用いることでその境界を客観的に定量的に決定する。

1.3 本論文の構成

第 1 章 序論 では、本研究の背景と従来の研究について概説し、本研究の目的を示した。

第 2 章 基礎理論 では、従来より用いられている技術として、破面観察、フラクタル、粗さ、シャルピー衝撃試験について簡単に説明する。

第 3 章 解析手法 では、本研究で用いたフラクタル次元導出までの解析手法、境界部に関する解析手法について説明する。

第 4 章 破断面の観察・解析 では、観察倍率の違いによるフラクタル次元の挙動についてその結果を示す。また、延性破面、脆性破面の境界部の解析に関してフラクタル解析を行なった、その結果を示す。

第 5 章 考察 では、観察倍率の違いによるフラクタル次元の挙動についてその考察を示す。また、延性破面、脆性破面の境界部の解析に関する考察を示す。

第 6 章 結論 では、本研究を通して得られた結論を総括し、今後の課題について述べる。

第 2 章

基礎理論

2.1 緒言

本章では、本研究で用いた破断面の 3 次元形状測定、破面解析手法、ここでは特にフラクタル解析, 粗さ解析について、またシャルピー衝撃試験について、従来より用いられている理論について説明する。

2.2 破断面の３次元形状測定

2.2.1 走査型電子顕微鏡 (SEM) について

動作原理

SEM は、試料表面の形状をブラウン管 (以下 CRT と記す) 上に拡大して表示する装置である。試料表面を縦・横 880×1152 の方眼に分割し、$880 \times 1152 = 1.000.000$ 個の画素に分ける。

この画素を 1 画素ずつ電子線で照射し、試料表面から発生する二次電子量をブラウン管上の対応する画面に画素の明るさと位置を表示させる。

このようにして得られる像が SEM の二次電子像になる。

分解能

SEM の分解能は試料を照射する電子線の太さで決まる。仮に、5000 倍の拡大像を CRT 画面上の $100mm$ 四方に表示しているとする。

観察下にある試料表面の大きさは $100 \times 1/5000 = 20\mu m$ 四方となる。これを縦、横 880×1152 本に分割すると、1 画素の大きさは $20\mu m \times 1/1152 = 20nm$ となる。すなわち、5000 倍の鮮明な像を得るためには、試料表面からの二次電子発生領域の大きさは約 $20nm$ 四方でなければならない。この事は試料を照射する電子線の太さを $20nm$ 程度にすることにより達成される。

高倍率で高解像度の像を得るためには試料を照射する電子線を十分に細く絞ることが必要となる。CRT 画面上で、$100mm$ 四方を縦、横 880×1152 本に分割すると CRT 画面の 1 画素の大きさは $100 \times 1/1152 = 0.1mm$ 四方となる。

人間の目の分解能は 0.1～$0.2mm$ であるので、CRT 画面上の像は連続的な像として感じられ、モザイク画のようには見えなくなり、不自然さはなくなる。

二次電子像と反射電子像

二次電子とは入射電子により試料表面付近から出た低エネルギーの電子である。これを正の高電圧 (約 10KV) を有する検出器で集束させ、シンチレータ (電子線のエネルギーを光に変換する素子) を発光させる。この光を光電子増倍管で増幅し電気信号とする。この電気信号を CRT の制御電極に印加して CRT 画面上の輝度変化として、二

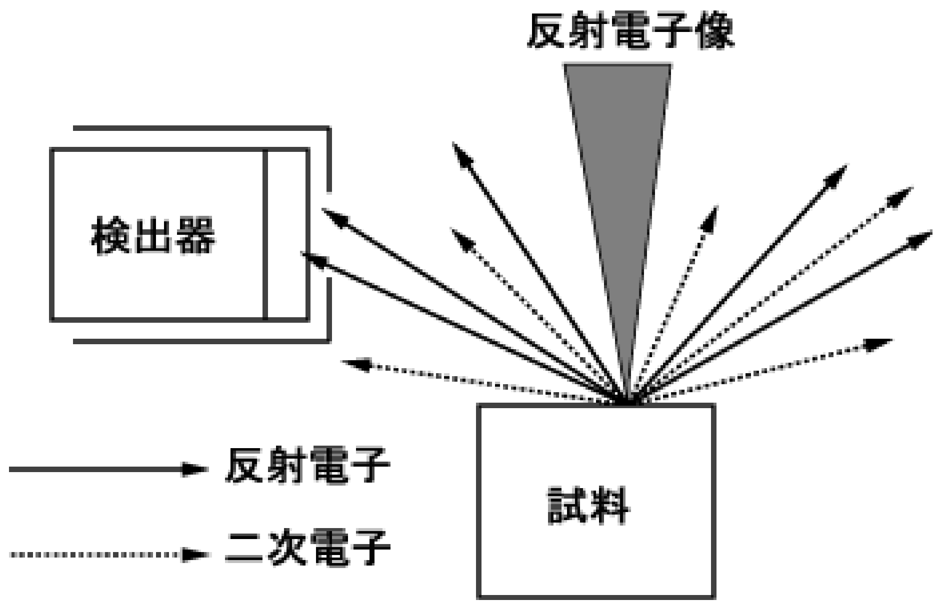


図 2.1: 反射電子像の照明効果

次電子量と対応させ像を得ている。

試料から放射される反射電子は照射エネルギーと同エネルギーを持つため、照射点から放射状に直進する。従って、検出器から見て試料の凹凸の陰にあたる部分で放射される電子は検出されないので、ちょうど検出器から証明された試料を電子プローブ方向から眺めたようなコントラストの像になる (図 2.1)。

これに対して二次電子像では試料を眺める方向は変わらないが、コントラストのつき具合いは変わってくる。二次電子はエネルギーが低く、そのまま検出器に入っても検出器に感じないので二次電子を集め、これを加速するための電位が与えられている。そこでプローブの照射点からあらゆる方向に放射される二次電子は一様に検出器に集まり、反射電子の時に見られたような照明効果はなく、単に放射量の変化に基づくコントラストのみを得る像となる (図 2.2)。

2.2.2 凹凸測定装置の動作原理

動作原理 1

試料面を電子線で照射した場合に発生する二次電子放出強度は、入射角の増大とともに、単調に増大する。また、その放出強度の角度分布も入射角度とともに変化し、そ

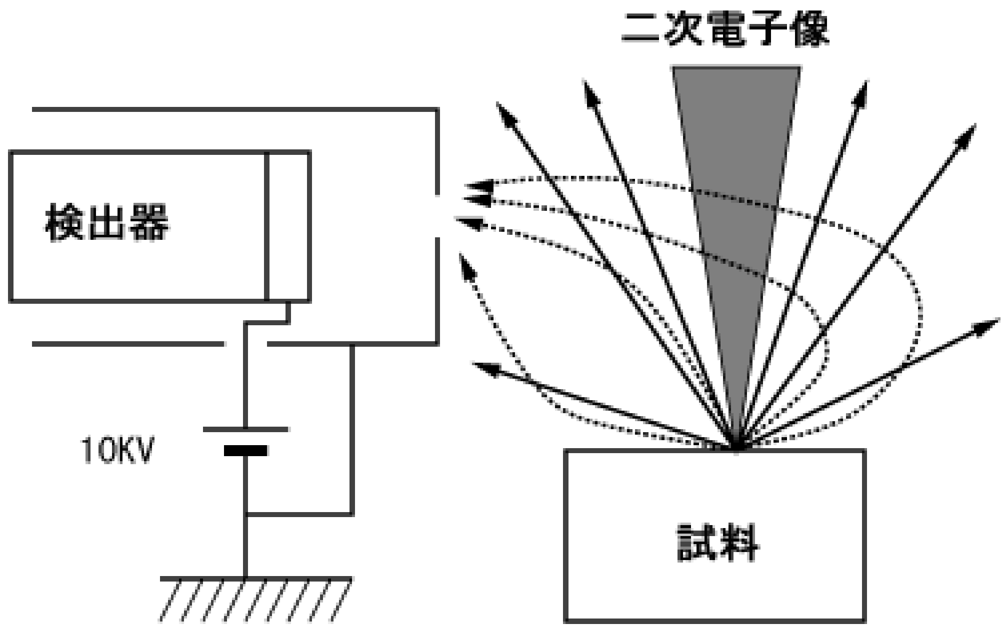


図 2.2: 二次電子像の照明効果

の表面形状計測を行うために差分信号が必要となるため A、B、一対の二次電子検出器を備えている。

入射角 θ における A、B 両検出器からの出力信号強度を a、b、垂直入射における出力信号強度をそれぞれ a_n、b_n、K は定数とすると 2.1で θ が 75 度以上の時に良い近似を示す。

$$\tan\theta = K \times \frac{a^2 - b^2}{(a_n + b_n)^2} \tag{2.1}$$

2.1は SEM の通常の動作条件 (加速電圧 1〜25KV) において、一般的に成り立つ。

動作原理 2

初期条件設定操作によって、なるべく等しい値に設定された a_n、b_n をあらかじめ電算機に取り込み、測定点における両検出器からの出力信号 a、b に対して演算を施せば、$x-z$ 平面内における入射角 θ が算出される。

このようにして求められた試料の傾斜を積分していくことにより、x 軸方向の表面形状を計測することができる。この測定原理を図 2.3に模式図的に示す。

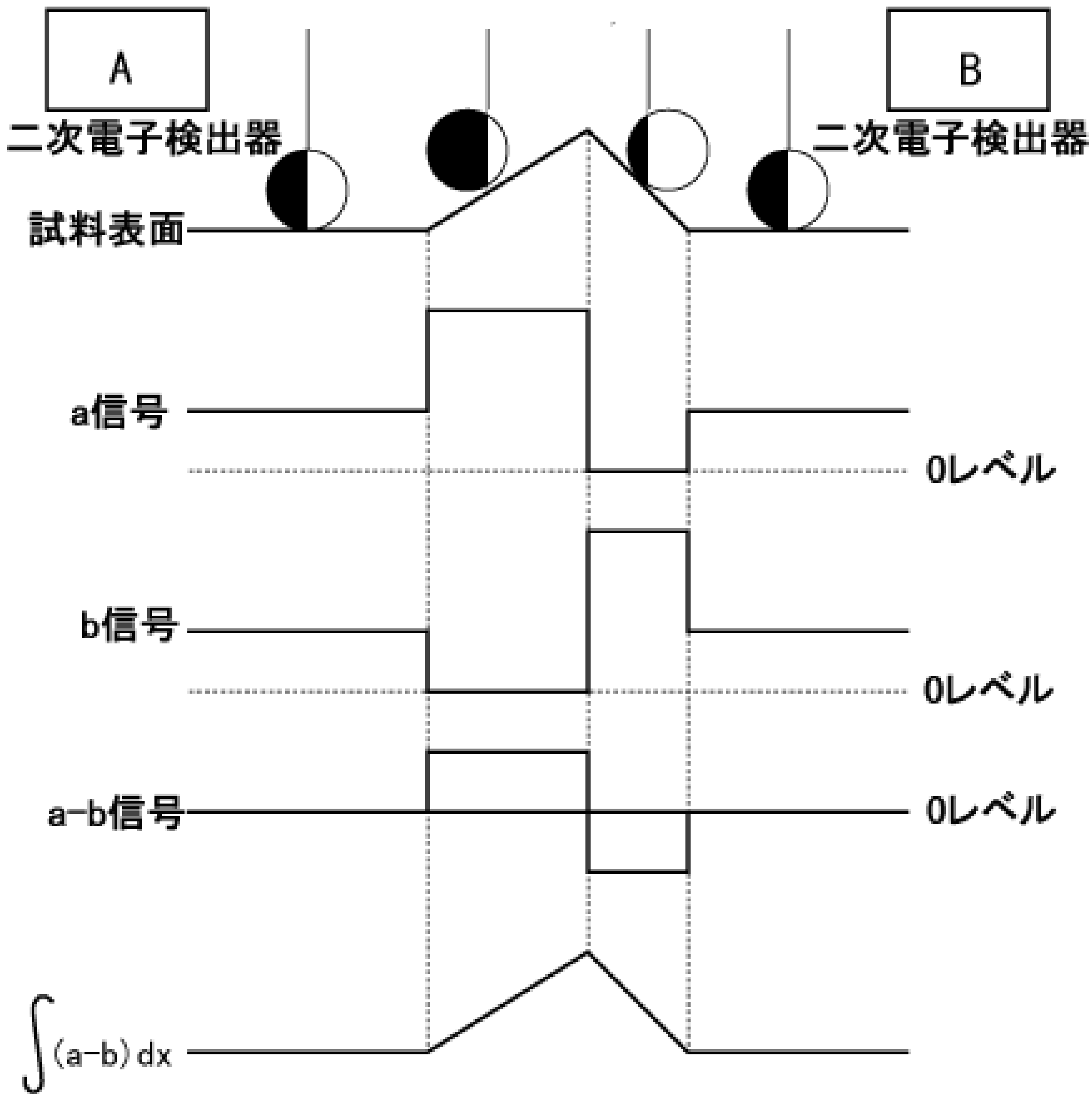


図 2.3: 測定原理

2.2.3 装置の構成

表面形態観察機能 (凹凸測定機能) 部の装置構成を図 2.4に示す。

2.2.4 SEM による 3 次元形状解析の際の問題点

まず、試料を試料室に収まる大きさに切断しなければならないという問題がある。

そして、SEM の性質上、中に入り組んだような形状のプロファイルがある破断面の場合、その入り組んだところまでは観察できないので、ただの穴としか認識されない。そうやって走査されたプロファイルのデータをフラクタル解析するため、どうしてもフラクタル次元の低下は避けることが出来ないものとなっている。

この解決策としては、現在の観察では真上から観察しているが、これを試料ステージを傾けて様々な角度から観察してみるという手段が考えられる。

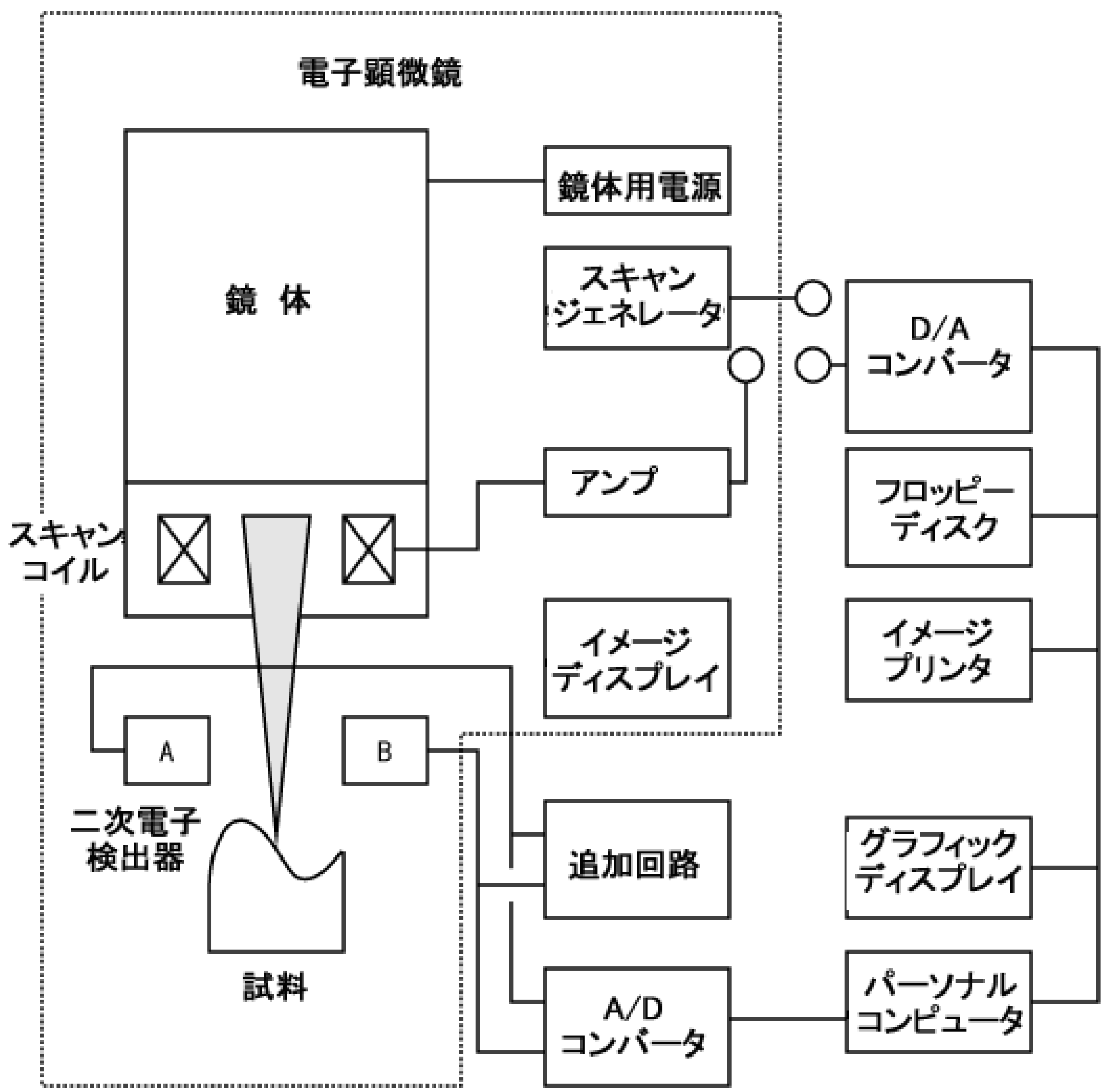

電子顕微鏡
鏡体用電源
鏡 体
スキャン
ジェネレータ
D/A
コンバータ
アンプ
フロッピー
ディスク
スキャン
コイル
イメージ
ディスプレイ
イメージ
プリンタ
A
B
二次電子
検出器
追加回路
グラフィック
ディスプレイ
試料
A/D
コンバータ
パーソナル
コンピュータ

図 2.4: 装置構成

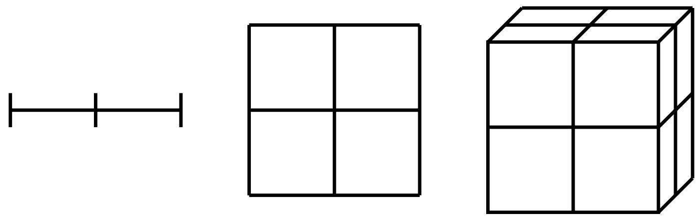


図 2.5: 線分、正方形、立方体の単位長さを半分に分割する

2.3 フラクタル

自然界に存在する形には、特徴的な長さを持つものと持たないものの 2 種類が存在する。前者の例としては、正方形や長方形、円や球などの幾何学的図形や、たばこ、自動車、建物などの人工的なものが挙げられる。一方、後者の例としては、雲の形やコッホ曲線 (図 2.6)、海岸線や山の起伏や川の形などが挙げられる。フラクタルとは、後者のような図形や構造、現象の総称である。そのフラクタルを定量的に表す量がフラクタル次元である [7]。

2.3.1 フラクタル次元

ある図形が全体を $1/a$ に縮小した相似図形 a^D 個によって構成されているとき、この指数 D が次元の意味を持つ。

もしも、ある図形が全体を $1/a$ に縮小した相似形 b 個によって成り立っているならば、

$$b = a^D \tag{2.2}$$

より、相似性次元 D は、

$$D = \frac{\log b}{\log a} \tag{2.3}$$

と、なる。

我々は点、直線、平面、空間の次元はそれぞれ、0、1、2、3 次元であることを経験的に知っている。ここで線分、正方形、立方体の次元を相似性に基づいて考えてみる。図 2.5のように各図形の辺を 2 等分する。当然ながら、線分は半分の長さの線分 2 個になる。正方形は一辺がもとの 1/2 の正方形 4 個になり、立方体の場合には 8 個になる。相似性次元はそれぞれ 1、2、3 となり経験的な次元と一致する。

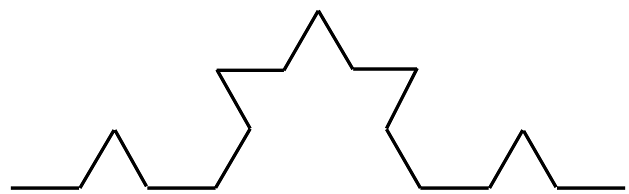


図 2.6: フラクタル図形 (コッホ曲線)

ここで、コッホ曲線 (図 2.6) を考えてみる。コッホ曲線は全体を 1/3 にした相似形 4 個によって全体が構成されている。したがってコッホ曲線の相似性次元は 2.3より、

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.2618..... \tag{2.4}$$

という、非整数の値になる。この非整数の値がコッホ曲線の複雑さを定量的に表現している。一般的に、異なる非整数の次元をもつフラクタル図形が 2 つあるときには、次元の高い図形の方が複雑である。

これらの非整数値を取りうる次元のことをまとめて、フラクタル次元と呼んでいる [7]。

2.3.2 フラクタルパワー則

自然の海岸線の長さを測ることを考える。2 点間の距離を求める時、その測るスケールによって長さは変わり、一般にスケールを小さくすると海岸線の長さは長くなっていく。ここには、

$$L = C\Delta^{1-d_f} \tag{2.5}$$

の関係が成り立つ。ここで、L は Δ で測ったときの海岸線の長さで、C と d_f は測定とは独立な定数である。ここで Δ_0 を使って記述すると、

$$\log \frac{L}{L_0} = (1 - d_f) \log \frac{\Delta}{\Delta_0} \tag{2.6}$$

ここで、d_f は海岸のフラクタル次元で、異なる海岸線であれば異なるフラクタル次元を持っている。$d_f = 1$ は幾何次元と呼ばれ、もし $d_f = 1$ ならば、直線は測る長さの影響を受けないということになる。この規則は、地理学だけでなく、機械、物理、科学の分野でも成り立つと言われている。このパワー則は、非整数を用いて

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\Delta}{\Delta_0}\right)^{d_T - d_f} \tag{2.7}$$

と書くことができる。ここで、P は Δ で測った大きさである。フラクタル次元 d_f は以下に示す範囲で変化する。

$0 \leq d_f < 1$　$d_T = 0$ で点のようなフラクタル図形の場合
$1 \leq d_f < 2$　$d_T = 1$ で線のようなフラクタル図形の場合
$2 \leq d_f < 3$　$d_T = 2$ で平面のようなフラクタル図形の場合
$3 \leq d_f < 4$　$d_T = 3$ で立体のようなフラクタル図形の場合

各範囲で最小の値は以前からの線、面、立体の次元に一致する。

2.3.3 金属の破断面のフラクタル解析方法

金属の破断面のフラクタル解析方法には

1. スリットアイランド法
2. プロファイルのフーリエ解析から求める方法
3. 垂直断面を解析して求める方法

の 3 つがある。

スリットアイランド法

破面を平行な平面でカットし、表れる島の形状の周囲の長さ P とその島の面積 S を両対数グラフにプロットしていく。このプロットした点を最小二乗近似し、その傾きを求める。フラクタル次元 d_f は

$$d_f = slope + 1 \tag{2.8}$$

から、求めることができる。一般にこの解析はベークライトなどでかたどりしたものを、小さな島が出てくるまで削り、その部分を写真などにとってイメージ処理して解析する。

プロファイルのフーリエ解析から求める方法

プロファイルについてフーリエ解析しそのスペクトル S と周波数 f の関係は

$$S(f) \propto f^{-\beta} \tag{2.9}$$

スペクトルがこのようにべきの形をしているときに、べきの指数 β とフラクタル次元 d_f の間には以下の関係がある。

$$\beta = 5 - 2d_f \tag{2.10}$$

したがって、スペクトルの傾きから、(2.10) を使ってフラクタル次元を求めることが出来る。

垂直断面を解析して求める方法

この方法は、プロファイルの長さと測定するスケールの関係を求めるものである。信頼できる値をもとめるためにいくつかの違った角度でプロファイルをとって解析をする。プロファイルの長さ L と測定スケールの ϵ の関係はフラクタルパワー則に従う。

$$L(\epsilon) = C_0\epsilon^{-(d_f-1)} \tag{2.11}$$

垂直断面曲線の解析法として有用なものにボックスカウンティング法がある。これは垂直断面曲線を正方形の桝目を覆いかぶせる。曲線が通る桝目の数と正方形の一辺の大きさの間にフラクタルパワー則が適用される。本研究でもボックスカウンティング法を用いており 3.4.2で詳しく説明することにする。

2.4 その他の破面解析法

2.4.1 粗さ解析

粗さ解析はフラクタル解析に比べるとその歴史は深い。破面に関して、粗さはその高さ分布を特徴づける重要なパラメータとなる。しかし、粗さには様々な定義が存在する。ここでは、種々の粗さの定義、また、高さ分布に対して一般に取り扱われているパラメータについて述べる。

算術平均粗さ R_a

算術平均粗さとは高さ曲線の長さ L_a を X 軸に投影した長さ L でわった値で定義される。

$$R_a = \frac{L_a}{L} \tag{2.12}$$

RMS 粗さ

RMS 粗さは統計学でいうところの標準偏差 σ を表している。つまり、高さ平均と高さデータとの差の二乗平均を平方したものであり、次式で定義される。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})^2}{n-1}} \tag{2.13}$$

最大粗さ Rt

最大粗さは高さデータの最大値 h_{max} と最小値 h_{min} との差で定義される。

$$Rt = h_{max} - h_{min} \tag{2.14}$$

これらは二次元パラメータであるが三次元パラメータに拡張して表面形状曲面の粗さ指標として用いられることも多い。

高さ分布のゆがみ R_{sk}

平均面を中心としたときの高さ曲線の対称性を表すもので、高さ分布の歪み度合を示す。

$$R_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})^3}{(n-1)RMS^3} \tag{2.15}$$

高さ分布のとがり R_{ku}

R_{ku} は高さ曲線の形状の鋭さの尺度で、高さ分布の広がりを特徴づけるもので次式で定義される。

$$R_{ku} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})^4}{(n-1)RMS^4} \tag{2.16}$$

以上のパラメータはすべて二次元パラメータであるが三次元パラメータに拡張して表面形状曲面の粗さ指標として用いられることも多い。

2.5　シャルピー衝撃試験

2.5.1　シャルピー衝撃試験の目的

シャルピー衝撃試験には主に以下のような 2 つの目的がある。[3]

1. 試験温度を変えて衝撃試験を行い、延性-脆性遷移温度を決定する。
2. 指定温度における材料の吸収エネルギーが設計規格、材料規格の要求を満たすかどうかを判定すること。

2.5.2　シャルピー衝撃破面の巨視的様式

シャルピー衝撃試験では、2 種類の異なった破面が形成される。すなわち、延性破面 (ductile fracture) と脆性破面 (brittle fracture) であるが、さらにこれらを詳細に検討すると、次の 3 種類の巨視的様式に区別することができる。

1. 平面繊維状様式
2. 平面放射状様式 (スポーク状様式)
3. せん断縁領域 (shear lip)

一般的なシャルピー衝撃破断面の様子を図 2.7に示す。平面繊維状様式は、き裂が発生した部分に、切り欠き部断面に平行に生じる。平面放射状様式は急速に割れが拡大した部分に生じ、本質的にへき開破壊であるため、へき開ファセット、リバーパターンが観察される。シャーリップの部分は切り欠き断面部に 45 度傾いた面に生じ、この領域ではせん断破断によって破壊が生じており、主として、ディンプルが観察される。

2.5.3　シャルピー特性値

本節では、シャルピー衝撃試験で得られる特性値の内、本研究と関係の深い、破面率、吸収エネルギー、遷移曲線について説明する。[1]

破面率

得られた試験片の観察から破面率は算出される。

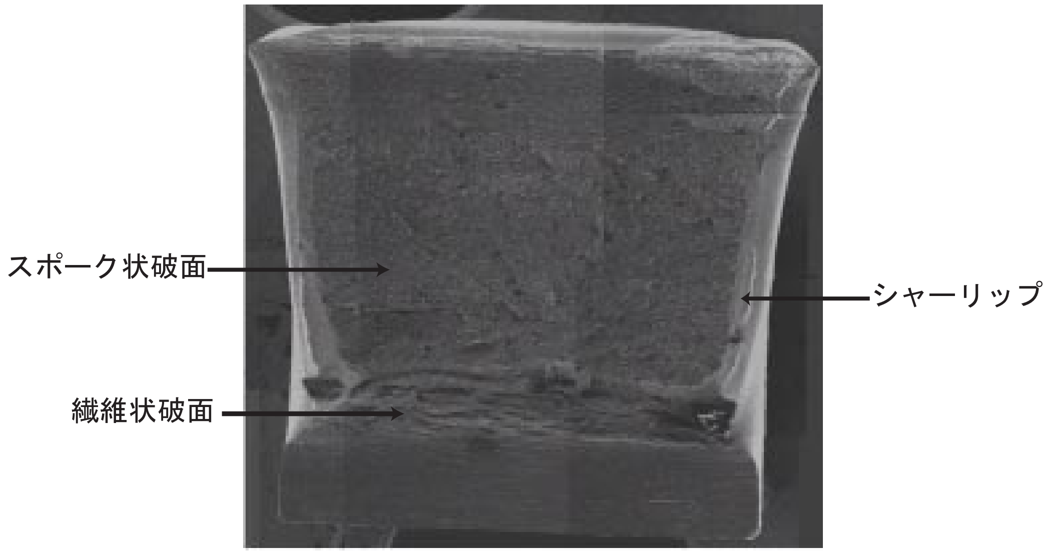


図 2.7: シャルピー衝撃破断面の巨視的様相

(1) 脆性破面率 B (%)
試験片の破面の全面積に対する脆性破面の面積の百分率で、次の式より求める。

$$B = \frac{C}{A}\times100 \tag{2.17}$$

ここで、C は脆性破面の面積、A は全破面の面積とする。

(2) 延性破面率 S (%) 試験片の破面の全面積に対する延性破面の面積の百分率である。

$$S = \frac{F}{A} = 100 - B \tag{2.18}$$

ここで、F は延性破面の面積とする。

吸収エネルギー

シャルピー吸収エネルギーとは、シャルピー衝撃試験機を用いて試験片を破断するのに要したエネルギー (J) のことをいう。ハンマが試験片を破断する前と破断後の位置エネルギーの差をして、次式から算出する。

$$E = WR(\cos\beta - \cos\alpha) - L \tag{2.19}$$

ここに、

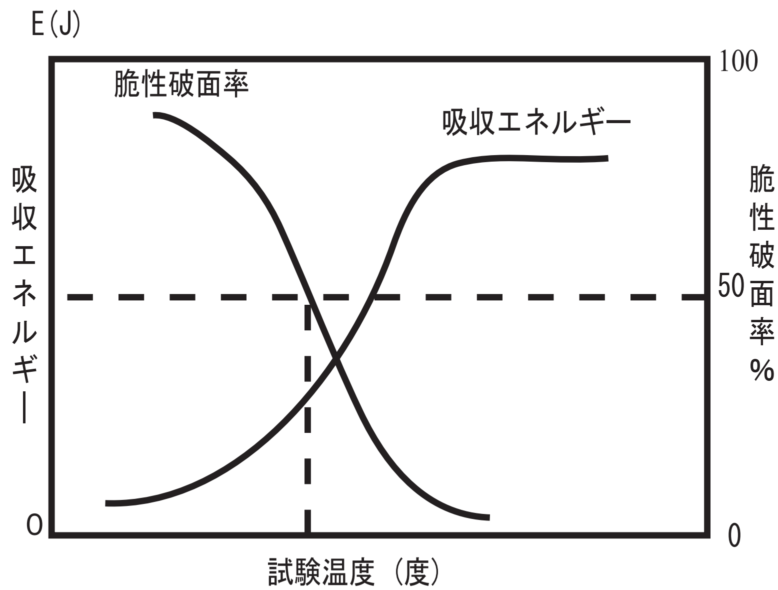


図 2.8: 吸収エネルギー及び脆性破面率と試験温度との関係

W : ハンマの重量 (N)
R : ハンマの回転軸中心線から重心までの距離 (m)
α : ハンマの持ちあげ角度
β : ハンマの振り上がり角度
L : エネルギー損失 (J)

とする。

遷移曲線

試験温度を横軸、吸収エネルギーもしくは脆性破面率を縦軸にとって描いたグラフを遷移曲線という (図 2.8)。低温から高温にかけて特性値の値が急激に変化していく温度範囲がある (遷移領域)。脆性破面率に関して言えば、温度の低下に伴い、脆性破面率は 0 %から 100 %に増大する。一般に脆性破面率 50 %となる点の温度を破面様相遷移温度と定めることが多い。これは吸収エネルギー遷移温度よりも正確に測定できるためである。一般的な遷移曲線の様子を以下に示す。

第 3 章

解析手法

3.1 緒言

本章ではまず初めに、フラクタル次元が算出されるまでの流れを示す。破面のフラクタル次元を導出するまでの一連の流れをフローチャートとともに示す (図 3.1)。3.2では試験片について、3.3では SEM での破面観察とデータ取りについて、3.4ではワークステーション上でのフラクタル次元算出手法について説明する。

また、本研究ではこのフラクタル次元算出手法にもとづいて、境界決定の手法を確立した。その手法について 3.5で説明する。

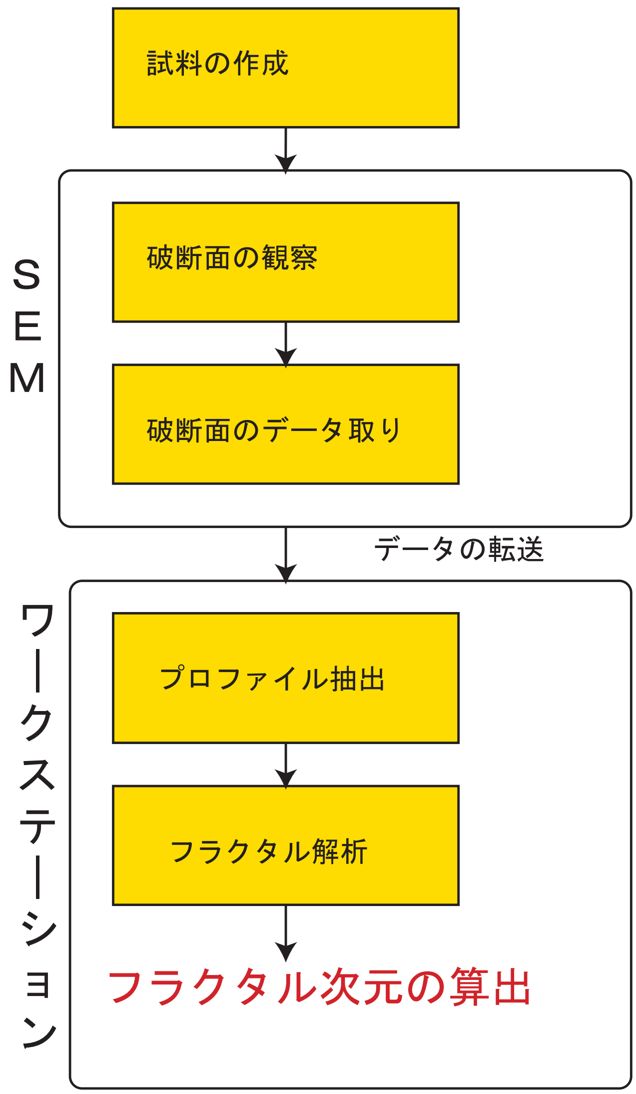


図 3.1: フラクタル次元導出までの流れ

3.2 試験片

本研究で使用する試験片の寸法および形状は、日本工業規格に規定されている金属材料試験片の 4 号試験片とした。参考のため、寸法および形状を図 3.2に示す。

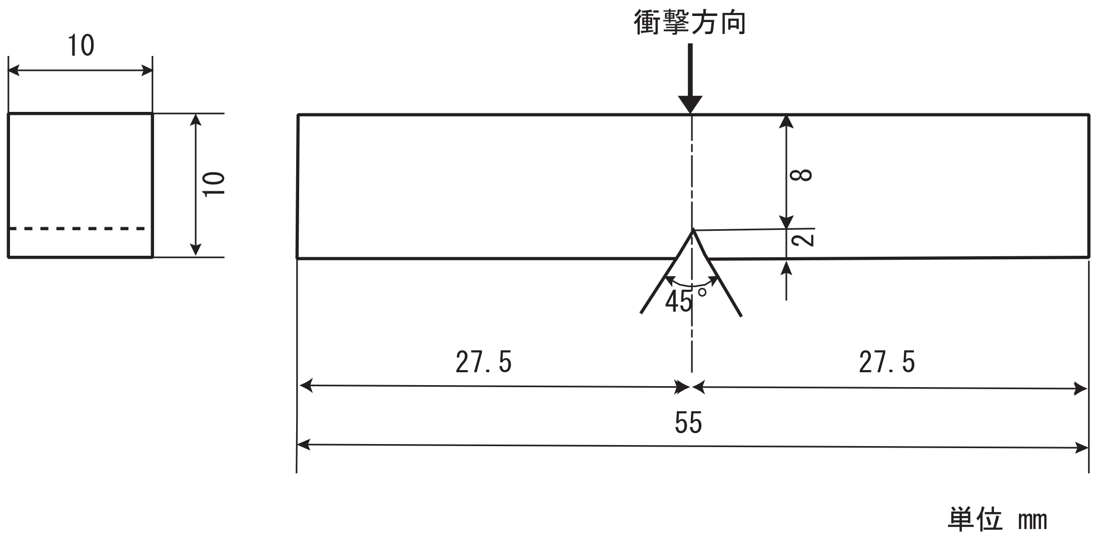


図 3.2: 金属材料試験片 (JIS Z 2202-1980) の 4 号試験片

また、材質は溶接構造用圧延鋼材の SM490B(SM50B) を用いた。用途としては建築、橋、船舶、車両、石油貯槽、容器構造物に使用され、熱間圧延鋼材であって、特に溶接性に優れたものについて規定される。

以下に SM490B の化学成分、機械的性質を表 3.1,3.2に示す。

表 3.1: 化学成分 (mass %)

C	Si	Mn	P	S
0.18	0.55	1.60	0.035	0.035

表 3.2: 機械的性質

耐力 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	伸び %
325	490-610	17

また、衝撃試験で得られた試験片のうち、本研究で用いた破面についての測定データ (表 3.3) と全体像 (図 3.3,3.4) を示す。

表 3.3: 測定データ

試験片	試験温度 $^{\circ}C$	吸収エネルギ J	衝撃値 kgf.m/cm^2	横膨出量 mm	脆性破面率 %
1	-48.1	30.5	3.1	0.65	68.8
2	-17.5	188.9	19.2	2.35	18.4

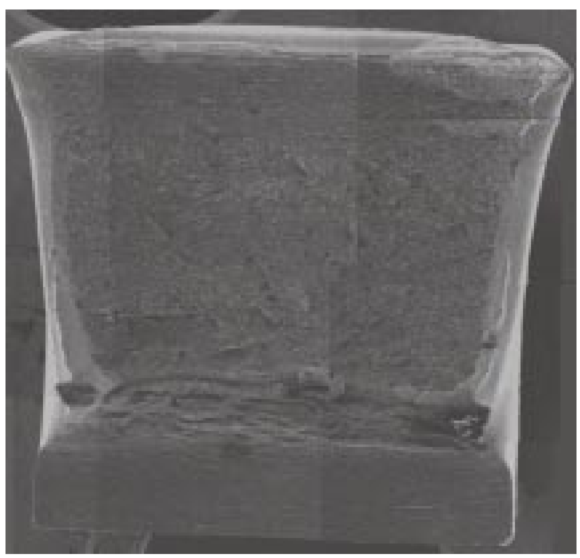


図 3.3: 試験片１の全体像

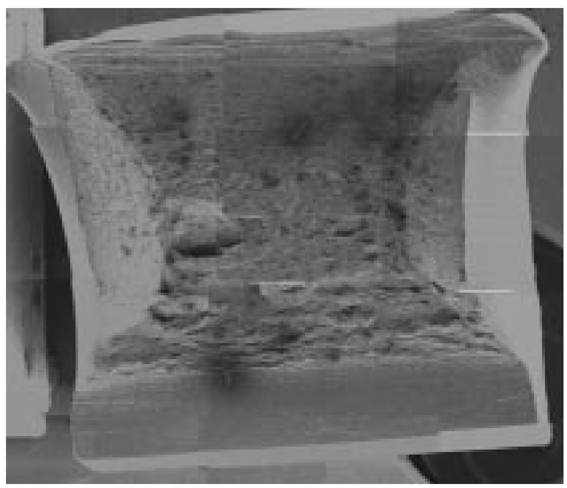


図 3.4: 試験片 2 の全体像

3.3 SEMでの破断面観察

フラクタル解析では、SEMから得た高さデータからプロファイルを抽出する。ここで、１本のプロファイルとは破面に垂直な平面で切った時に得られる、断面高さ曲線のことをいう。SEMでは１破面に対して、x方向、y方向の２方向に対するプロファイルがとれる。ここで、本研究ではき裂進展に垂直な方向をX方向、き裂進展方向をY方向とする (図3.5)。

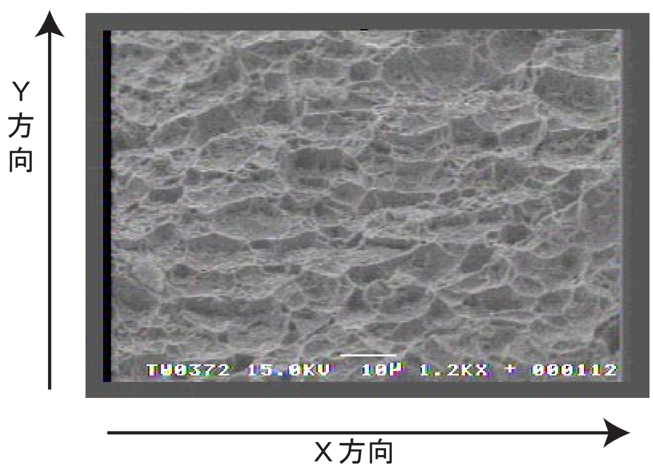


図3.5: SEMから得られる情報

また、X方向のスキャンに対しては420本、Y方向のスキャンに対しては560本のプロファイルを得ることができる。

3.4　フラクタル次元の導出

3.4.1　ボックスカウンティング法

本研究ではフラクタル解析を行うにあたり、ボックスカウンティング法を用いてフラクタル次元を導出する。

ここではボックスカウンティング法について簡単に説明する。

まず、SEM で得た、破面の高さ曲線に対して、図 3.6に示すように正方形の桝目を覆いかぶせる。つぎに、その曲線が含んでいる正方形の桝目の数 N を求める。

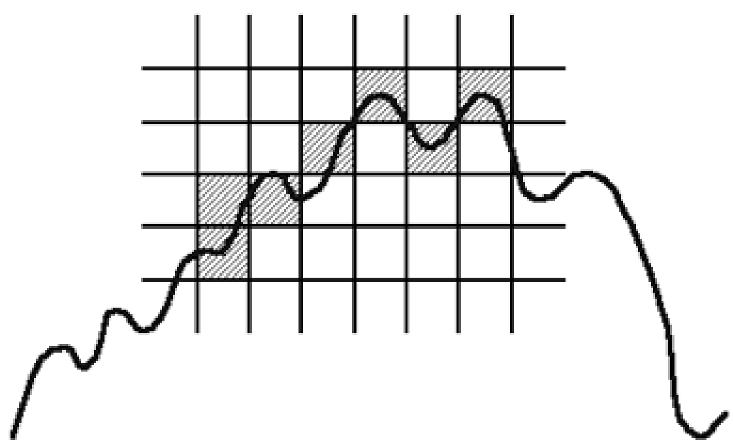


図 3.6: ボックスカウンティング法

この手順を正方形の一辺の長さ η を変えて行なうと関係式

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \tag{3.1}$$

が成り立つ。正方形の個数 N と正方形の一辺の長さ η をそれぞれ両対数グラフにプロットするとその傾きが $-D$ となる。この D がフラクタル次元である。

フラクタル次元の導出には 2.3.3 でも述べたようにいくつかの方法がある。しかしながら、ボックスカウンティング法には

- 高さ曲線に適用しやすく、視覚的にもとらえやすい。
- PC 上での解析に向いている。

といった利点がある。これらの理由から本研究ではボックスカウンティング法を用いることにする。

3.4.2 解析条件

最小二乗法の適用範囲について

フラクタル次元を求めるにあたってボックスカウンティング法を用いることはすでに 3.4.2で述べた。ボックスサイズ η とボックス数 N との関係はフラクタルパワー則に従う。両対数グラフに N と η をプロットすれば (図 3.7)、その傾きから求めることができる。

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \tag{3.2}$$

よって、フラクタル次元はボックスサイズ η とボックス数 N とを両対数グラフにプロットすることにより (図 3.7)、その傾きから求めることができる。

ここで、傾き $-D$ は最小二乗法により決定される。フラクタル性があるということは両対数グラフ上でボックスサイズとボックス数とが直線にのるということであり、最小二乗法は直線にのっている部分に適用するべきであると考えられる。そこで η の範囲について考察する。

以下に観察倍率 800 倍の 100 本目のラインから得られた N と η との関係を例に挙げる。

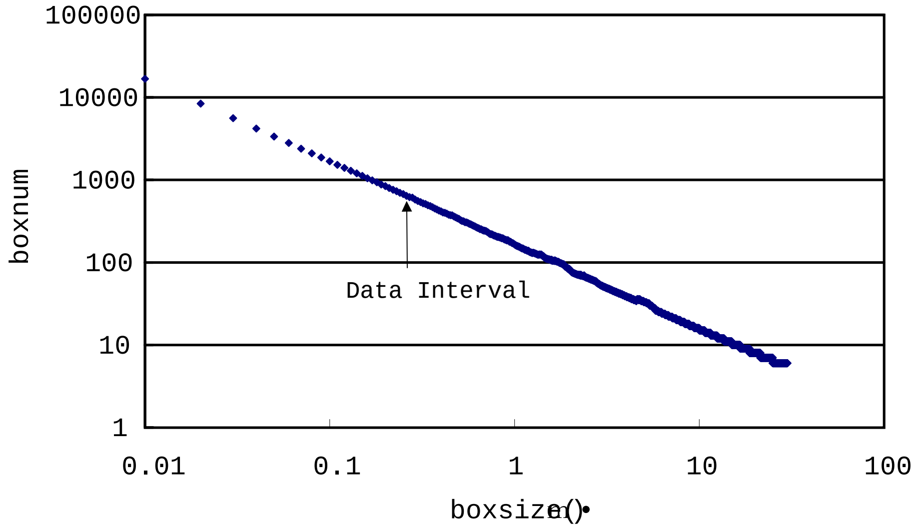


図 3.7: ボックス数とボックスサイズとの関係

まず、適用範囲の最小値についてであるが、これに関しては SEM で測定できるデータ間隔値を最小値と定めた。データ間隔値以下のボックスサイズでボックス数をカウントしてもプロファイルをたどるのと同じであり、ボックスカウンティング法として意味をなさないためである。

また、最大値の決定には決定係数を用いた。決定係数は 1 に近いほど直線関係が保たれていることを示す指標である。以下に, ボックスサイズの最大値/データ間隔に対する決定係数の変化を示す (表 3.4)。

表 3.4: 決定係数の変化

ボックスサイズ最大値/データ間隔	決定係数
5	0.999935
10	0.999751
15	0.999539
20	0.999341
30	0.998985
40	0.385618

これからデータ間隔の 30 倍を越えると決定係数が大きく変化することがわかる。また、10 倍を越えるとボックスサイズの変化に対してボックス数があまり変化しないことからデータ間隔の 10 倍を最小二乗法適用範囲の最大値とした。

一破面のフラクタル次元の定義

SEM では X 方向について 420 本、Y 方向について 560 本のプロファイルがとれる。そこで、SEM で得られた１視野の破面に対するフラクタル次元として以下のように定義する。

1. 各プロファイル１本ずつのフラクタル次元を求める。
2. その視野に含まれる全プロファイルのフラクタル次元の平均値を求め、その値をその視野のフラクタル次元とする。

3.5 脆性破面、延性破面の境界決定に用いた解析手法

本研究では研究目的の一つとして、脆性破面と延性破面の境界を客観的に評価する手法の確立を試みる。ここでは、図 3.1のような手法で導出されるフラクタル次元を、両破面の境界決定に適用する手法について説明する。

延性破面から脆性破面に遷移するような境界部を含む連続した 4 破面について観察、解析を行う。また、観察した遷移領域に対して X 方向解析と Y 方向解析の 2 通りの解析方法を用いる。X 方向解析とは、SEM で観察した破面について、X 方向スキャンでのフラクタル次元を求め、4 破面分、420×4 の計 1640 本について連続的に解析を行なう手法である。一方、Y 方向解析とは、図 3.8に示すように、一定の長さ分の Y 方向についてのフラクタル次元を求め、プロファイルをとる位置を連続的に変化させてゆく手法である。

以下にその解析方法について示す (図 3.8)。

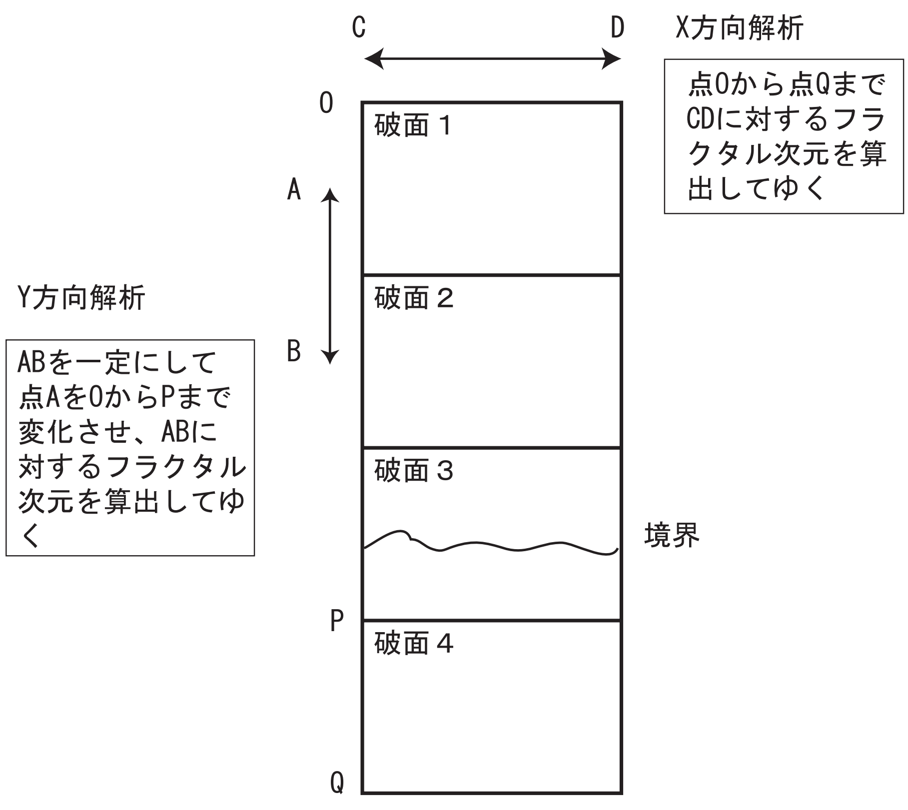


図 3.8: 境界部に対する解析方法

第 4 章以降では X 方向についての解析を X 方向解析、Y 方向についての解析を Y 方向解析と呼ぶことにする。

第 4 章

破断面のフラクタル解析結果

4.1　緒言

本章では第 3 章で述べた解析手法を用いて、フラクタル解析を行なった。その結果について示す。4.2では観察スケールに対するフラクタル次元の挙動についての結果を、4.3では延性破面、脆性破面の境界についてフラクタル次元を用いた解析結果を示す。

4.2 観察スケールに対するフラクタル次元の挙動

フラクタル次元は観察倍率に依存しないといわれる。コッホ曲線など完全なフラクタル図形の次元は観察倍率に依存しない。そしてこうした図形には特徴長さが存在しない。また逆に特徴長さが存在するものはフラクタル性がなく、その次元は観察倍率に依存する。シャルピー衝撃破断面上には巨視的な分類上、延性破面、脆性破面という異なる特徴を持つ破面が観察される。この両破面の観察スケールに対するフラクタル次元の挙動について調べることによって各破面についての特徴長さについての知見が得られると思われる。ここで特徴長さは破壊における結晶粒に相当する。そこで、観察倍率に対するフラクタル次元の挙動を特徴長さに対するフラクタル次元の挙動に結びつけることにする。

4.2.1 解析に用いた破面

本節ではまず、同一破面上に存在する、脆性破面、延性破面について、観察、解析を行った。これは延性破面、脆性破面をフラクタル次元を用いて比較する上で、試験条件を同じにするためである。ここでは、3.2で述べた試験片 1 を用いた。

また、シャルピー衝撃試験では形態の異なる延性破面が存在するがここではディンプルを含み、かつ比較的高低差の少ない延性破面を選んだ。これは SEM が入り組んだ部分のデータを正確に取れないため、その破面の特徴を正確にとらえることができないと考えたからである。以下実際に観察した破面の写真と 3D 表示を挙げる。

2D 表示

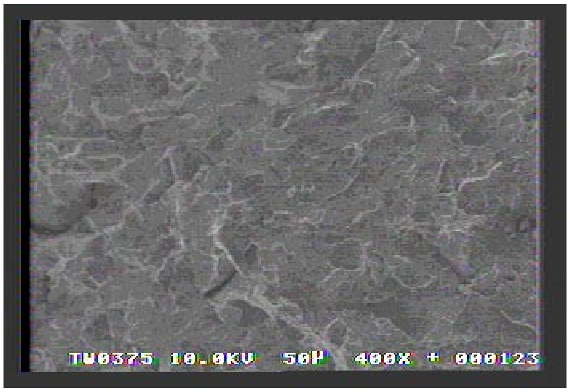


図 4.1: 観察倍率 400 倍の脆性破面

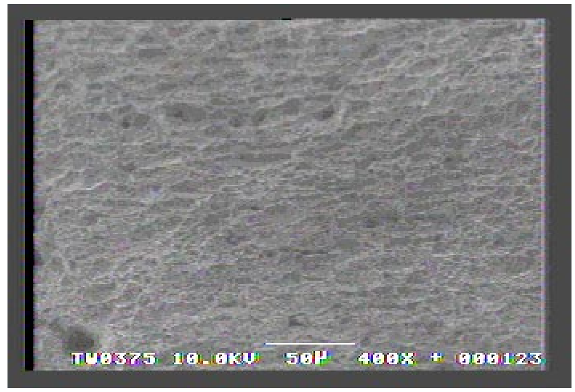


図 4.2: 観察倍率 400 倍の延性破面

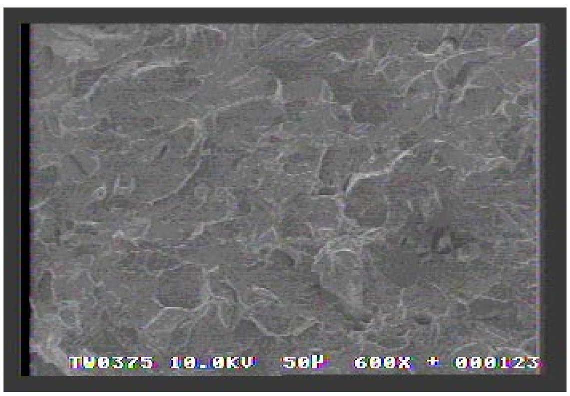


図 4.3: 観察倍率 600 倍の脆性破面

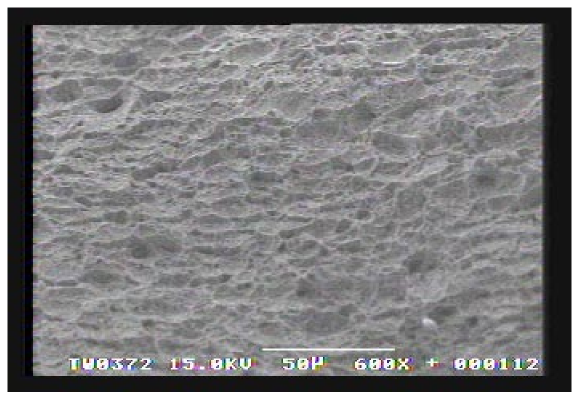


図 4.4: 観察倍率 600 倍の延性破面

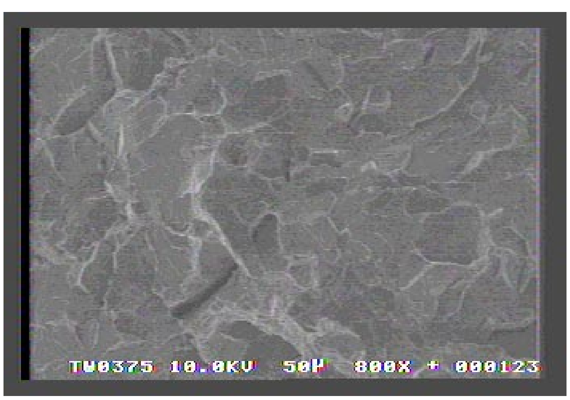


図 4.5: 観察倍率 800 倍の脆性破面

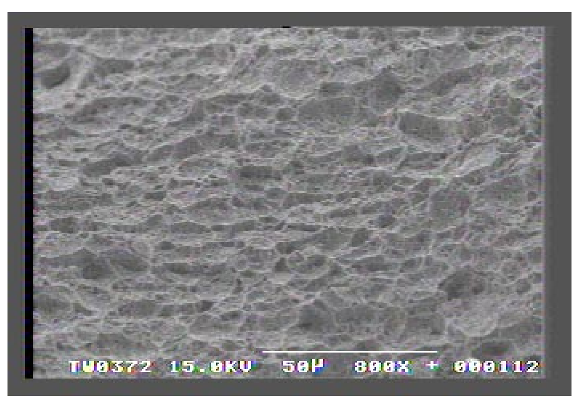


図 4.6: 観察倍率 800 倍の延性破面

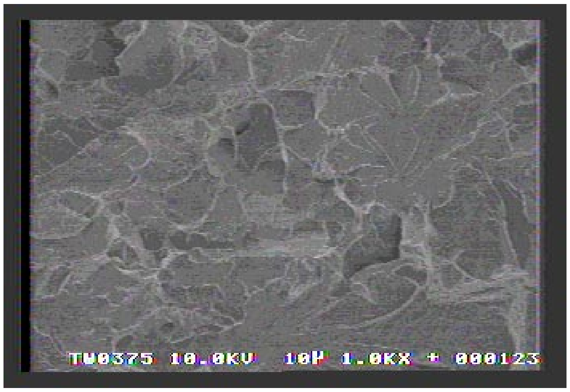


図 4.7: 観察倍率 1000 倍の脆性破面

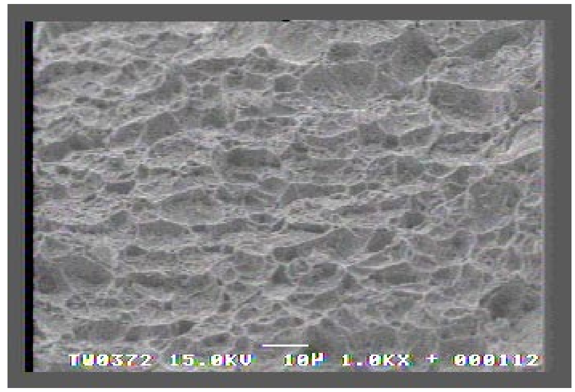


図 4.8: 観察倍率 1000 倍の延性破面

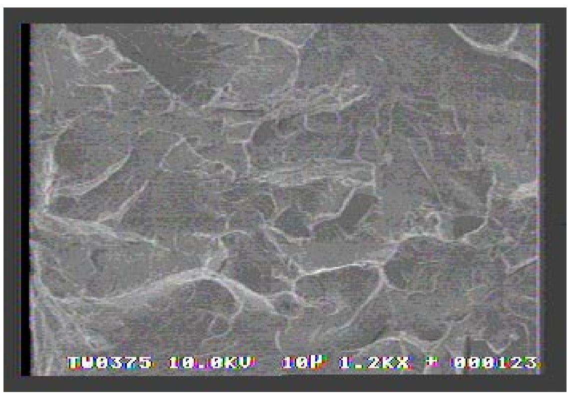


図 4.9: 観察倍率 1200 倍の脆性破面

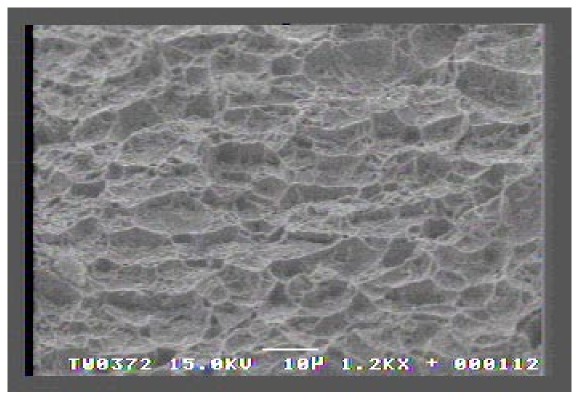


図 4.10: 観察倍率 1200 倍の延性破面

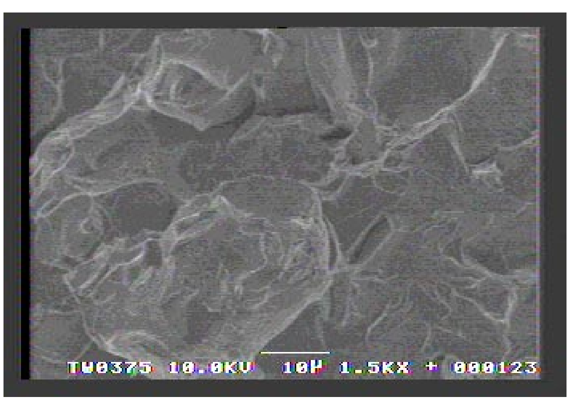


図 4.11: 観察倍率 1500 倍の脆性破面

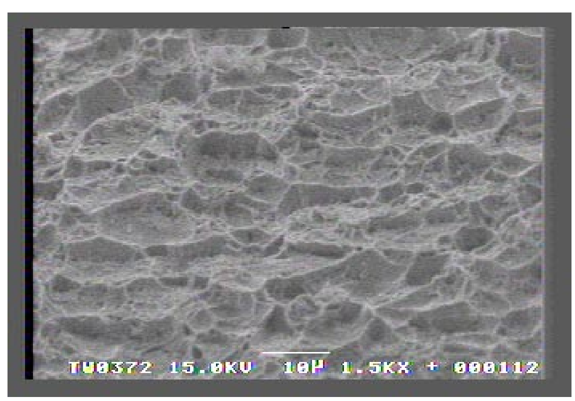


図 4.12: 観察倍率 1500 倍の延性破面

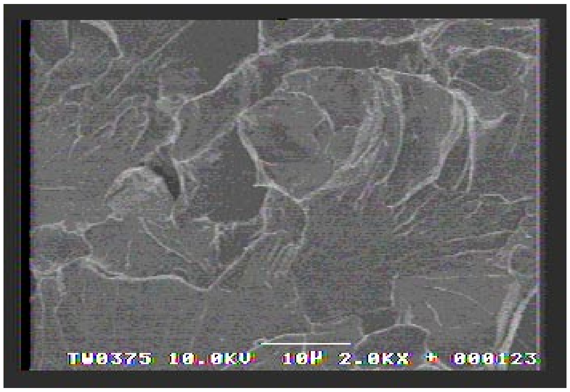


図 4.13: 観察倍率 2000 倍の脆性破面

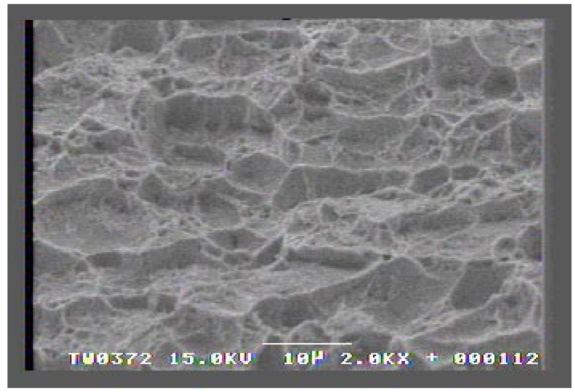


図 4.14: 観察倍率 2000 倍の延性破面

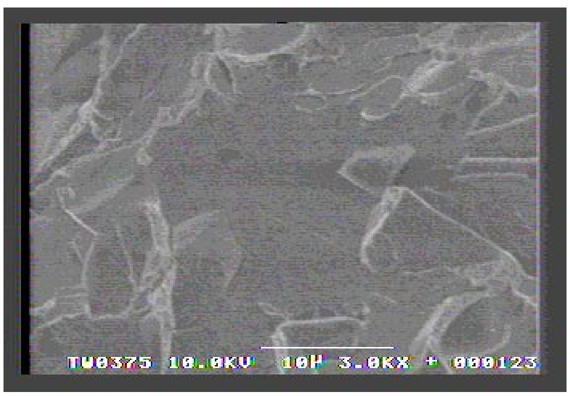


図 4.15: 観察倍率 3000 倍の脆性破面

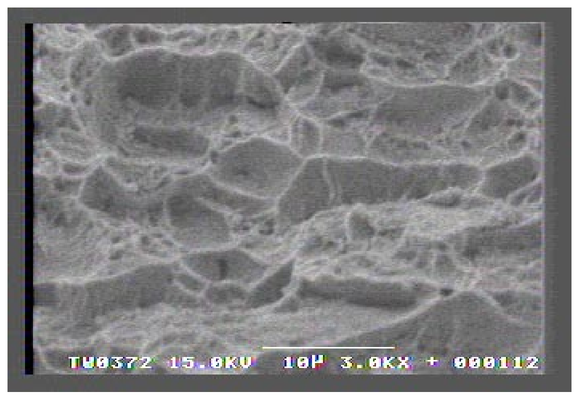


図 4.16: 観察倍率 3000 倍の延性破面

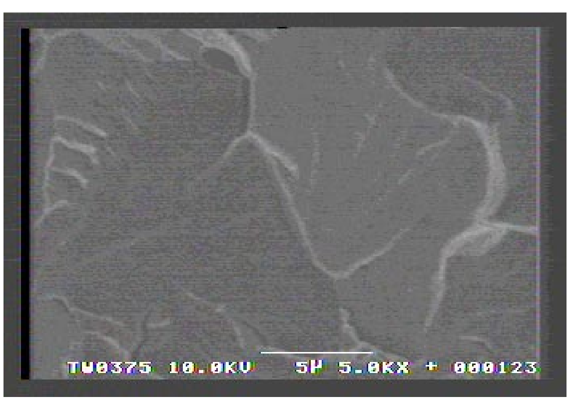


図 4.17: 観察倍率 5000 倍の脆性破面

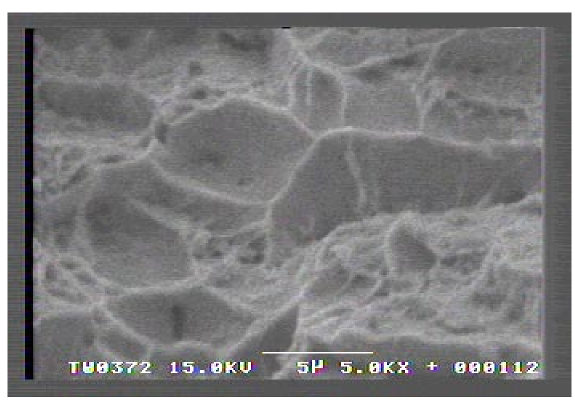


図 4.18: 観察倍率 5000 倍の延性破面

3D 表示

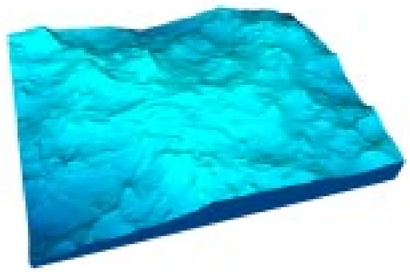


図 4.19: 観察倍率 400 倍の脆性破面

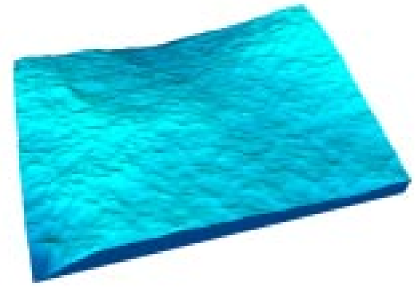


図 4.20: 観察倍率 400 倍の延性破面

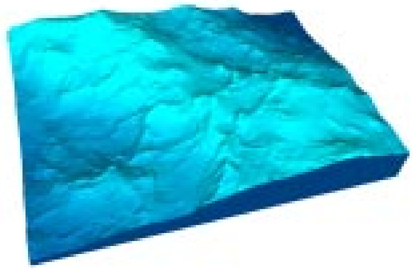


図 4.21: 観察倍率 600 倍の脆性破面

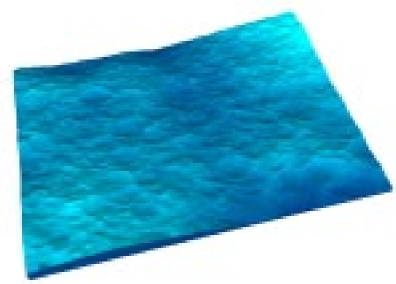


図 4.22: 観察倍率 600 倍の延性破面

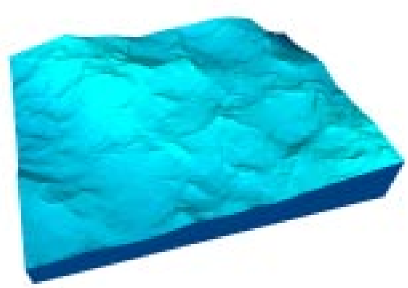


図 4.23: 観察倍率 800 倍の脆性破面

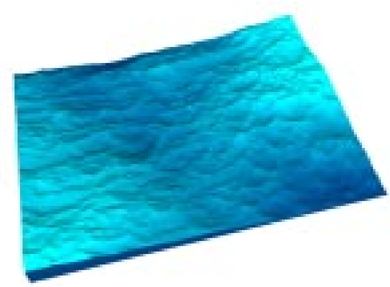


図 4.24: 観察倍率 800 倍の延性破面

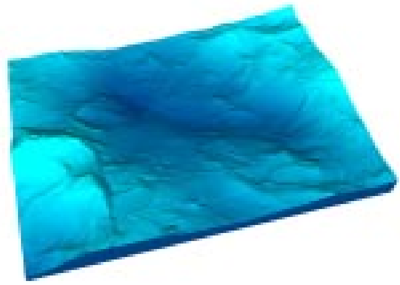


図 4.25: 観察倍率 1000 倍の脆性破面

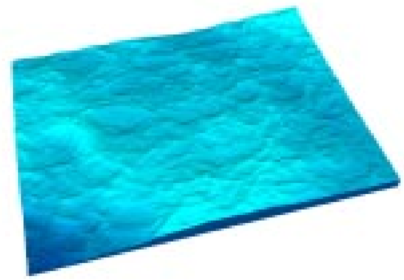


図 4.26: 観察倍率 1000 倍の延性破面

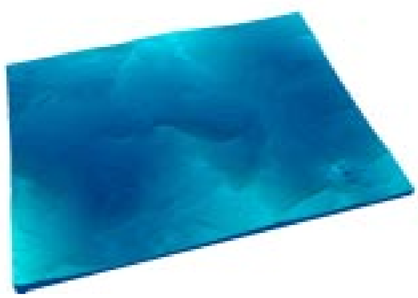


図 4.27: 観察倍率 1200 倍の脆性破面

図 4.28: 観察倍率 1200 倍の延性破面

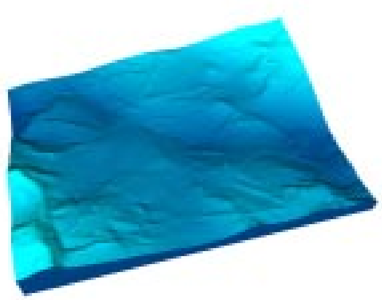


図 4.29: 観察倍率 1500 倍の脆性破面

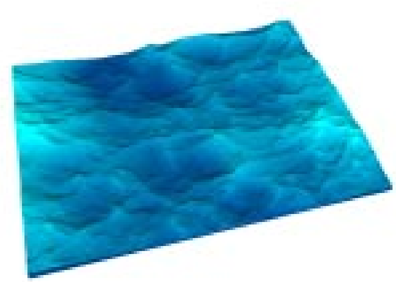


図 4.30: 観察倍率 1500 倍の延性破面

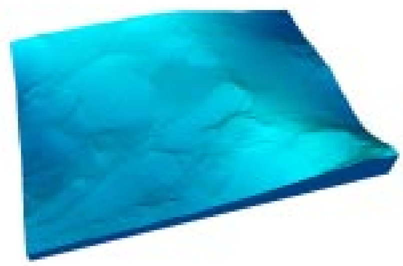


図 4.31: 観察倍率 2000 倍の脆性破面

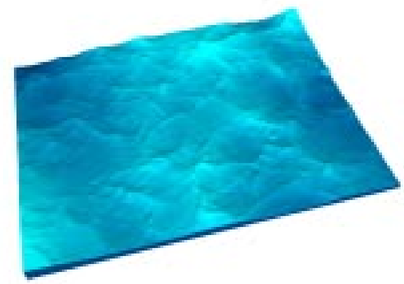


図 4.32: 観察倍率 2000 倍の延性破面

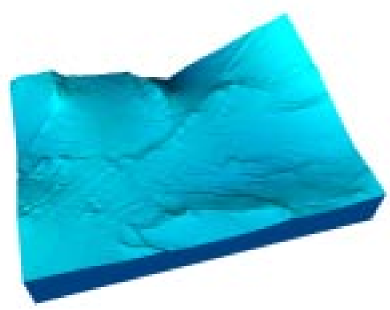


図 4.33: 観察倍率 3000 倍の脆性破面

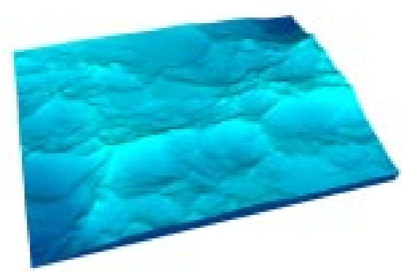


図 4.34: 観察倍率 3000 倍の延性破面

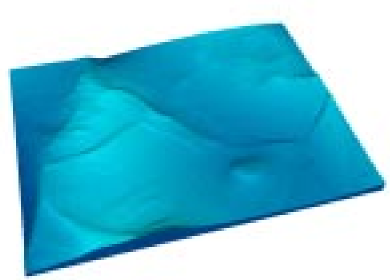


図 4.35: 観察倍率 5000 倍の脆性破面

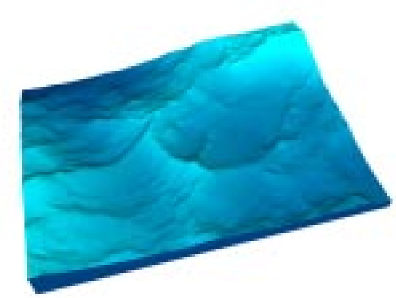


図 4.36: 観察倍率 5000 倍の延性破面

4.2.2 解析結果

観察倍率は 400 倍から 5000 倍まで測定し、延性破面、脆性破面共に各倍率に対して、5 点ずつ計 90 点を X 方向について解析を行った。各破面のフラクタル次元をプロファイル 420 本の平均として求め、各倍率に対して 5 点分の平均と標準偏差を求めた。横軸に観察倍率、縦軸にフラクタル次元としたグラフにし、次元の推移を求めた。以下にその結果を示す。

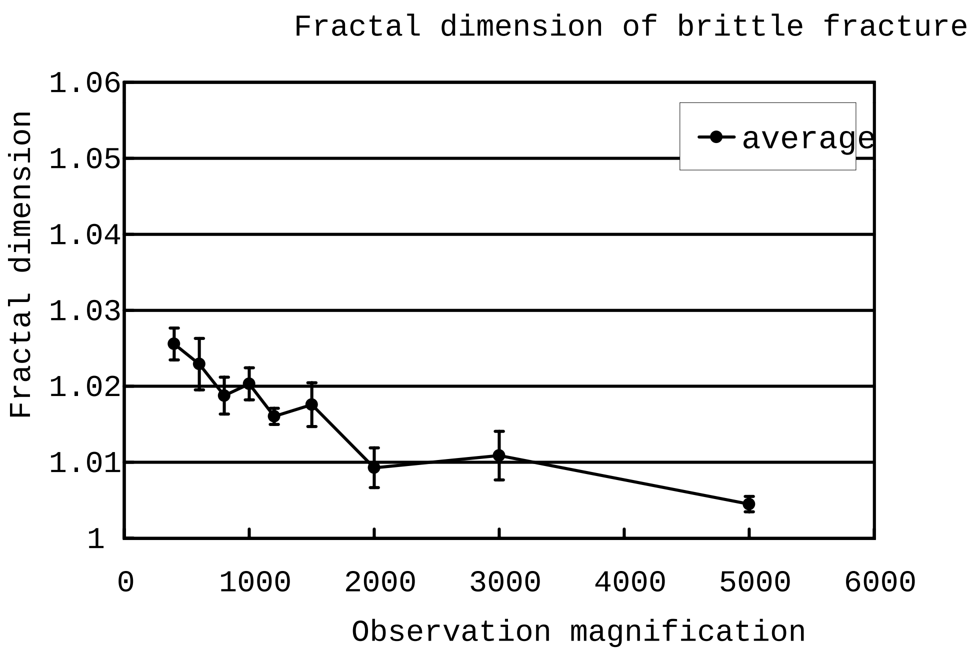


図 4.37: 観察倍率による脆性破面のフラクタル次元の挙動

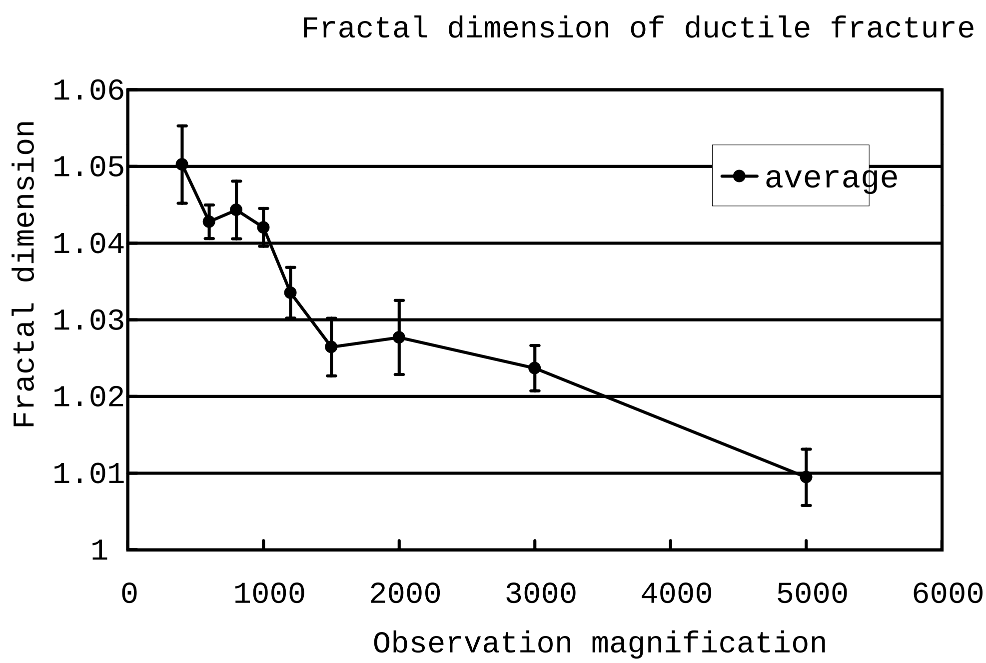


図 4.38: 観察倍率による延性破面のフラクタル次元の挙動

- 全倍率を通して、延性破面の方がフラクタル次元が大きくなった。
- 延性破面の方がばらつきが大きくなった。

また、観察倍率に対するフラクタル次元の挙動は特徴長さの有無、もしくは大小に関係することから、両破面の特徴長さとの関係からとらえてみる。

ここで脆性破面ではファセット、延性破面ではディンプルの大きさに注目することにする。脆性破壊には特徴長さが存在するといわれており [7]、それはファセットの大きさに相当すると考えられている。この試験条件でのファセットの大きさを SEM での観察結果からおよそ 12μm とした。

一方、延性破壊では、大小様々なディンプルが存在し、各破面に対して、固有のサイズのディンプルを定義することが非常にむつかしい。本来ならば、1 破面に存在するディンプルの分布を考えるべきであるが、その測定もむつかしいため、ここでは最大観察倍率 5000 倍で観測出来ている 6μm のディンプル、つまり、最小のディンプルを基準サイズとした。

そこで、観察視野の X 軸長に含まれるファセットとディンプルの数を横軸に、縦軸にフラクタル次元としたグラフを作成した。

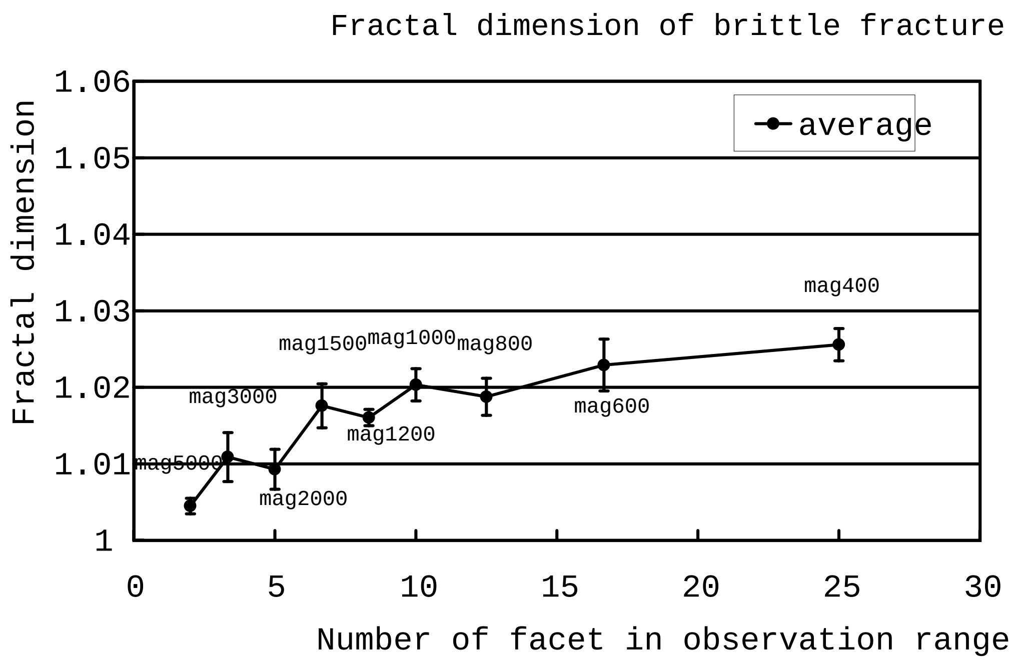


図 4.39: 脆性破面のファセットの数に対するフラクタル次元の挙動

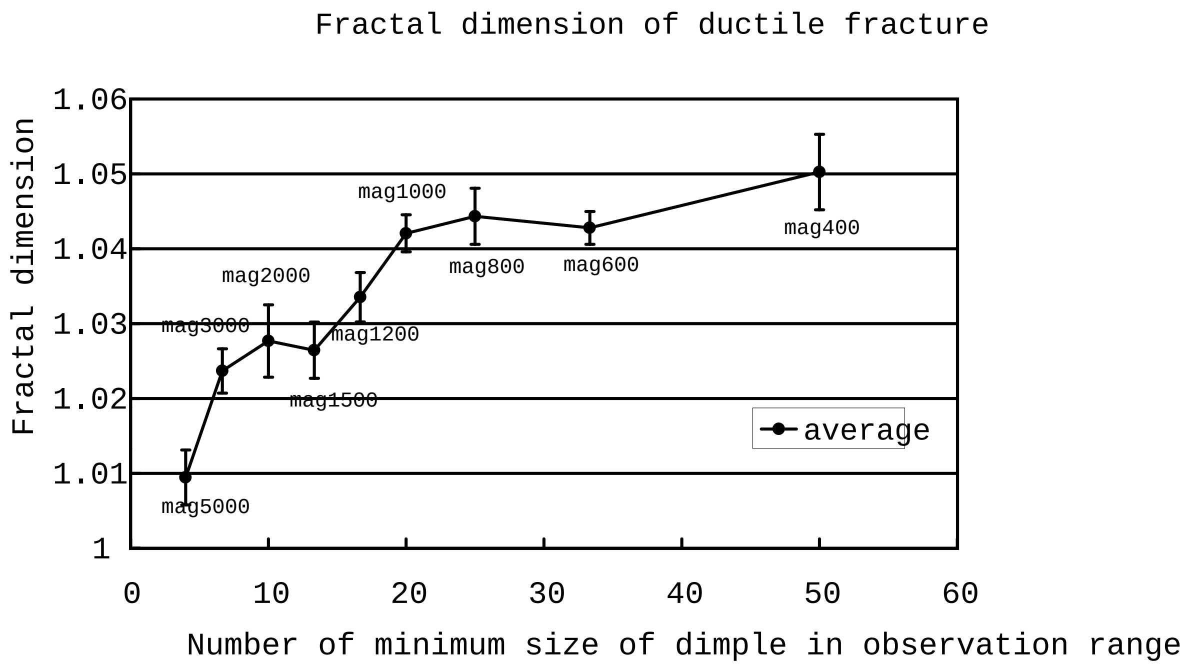


図 4.40: 延性破面のディンプルの数に対するフラクタル次元の挙動

- 400 倍から 1000 倍にかけて、延性破面のフラクタル次元に変化の少ない部分がでた。
- 脆性破面については倍率が大きくなるにつれフラクタル次元が小さくなった。

4.3 境界決定の定量的手法の確立

シャルピー衝撃試験では、脆性破面率から脆性延性遷移温度を求めることが多く行われ、そこで得られる遷移温度 (FATT) は金属の欠陥評価等において非常に重要な指標となる [16]。しかしながら、脆性破面率を求める過程では、人の目によってあいまいに脆性部と延性部との境界決定が行われており、その客観的手法はまだ確立されていない。4.2ではフラクタル次元が延性破面、脆性破面を特徴づける指標となることを示した。そこで、延性破壊、脆性破壊の境界決定を定量的なものにするため、境界部に対して観察、フラクタル解析を行った。

4.3.1 解析に用いた破面

解析に用いた破面として、試験片 1 から 2ヶ所 (倍率 800 倍と倍率 1200 倍)、試験片 2 から 1ヶ所を選んだ。3ヶ所とも、延性破面から脆性破面に遷移する境界部を含むような連続した 4 破面について観察、解析を行った。また、それぞれについて 3.5で述べたような X 方向解析と Y 方向解析の 2 通りの解析方法を用いた。Y 方向解析については各破面につき 560 本のプロファイル中、100 本目、250 本目、400 本目の計 3 本のラインについて解析を行った。

4.3.2 解析結果

試験片 1 で観察される境界部の解析結果 (800 倍)

試験片 2 を 800 倍で観察した 112.5 µm × 150 µm の破面を 4 視野分連続的に解析した。

X 方向解析結果

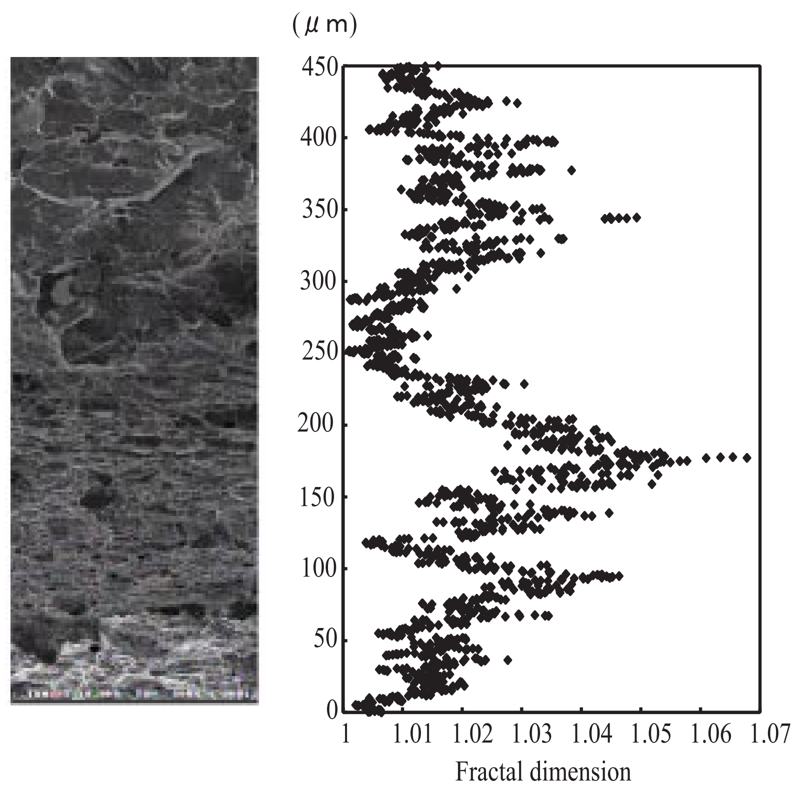


図 4.41: 境界部の X 方向に対する観察、解析 1

境界部でフラクタル次元が変化していることはわかるが、明確な変化としてフラクタル次元に違いはでていない。

Y 方向解析結果

AB=112.5(μm) は一定で OA=Y(μm) として 100 本目、250 本目、400 本目について解析を行った。横軸を Y(μm)、縦軸をフラクタル次元として脆性破面から延性破面にかけての次元の推移を示す。

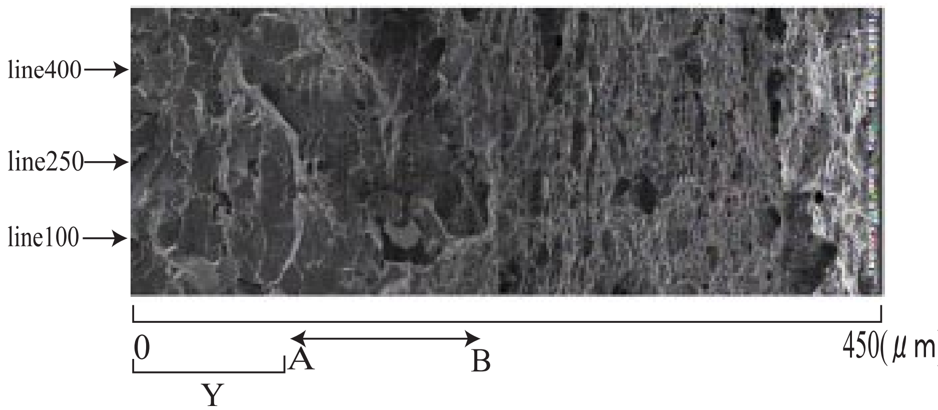


図 4.42: 境界部の Y 方向に対する観察、解析 1

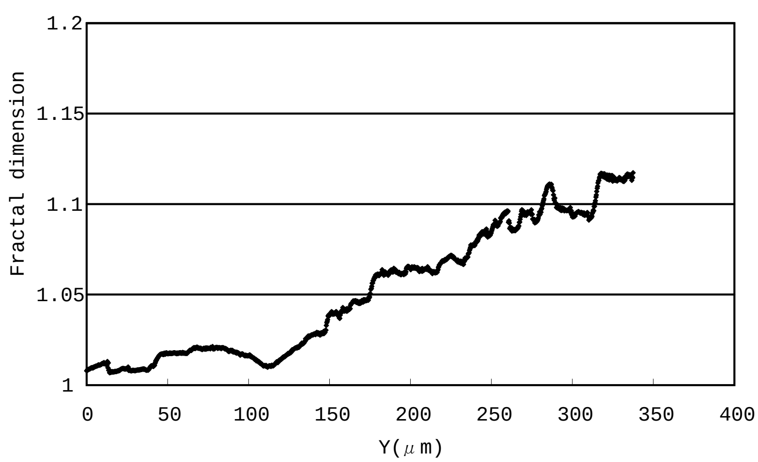


図 4.43: line100 の解析結果 1

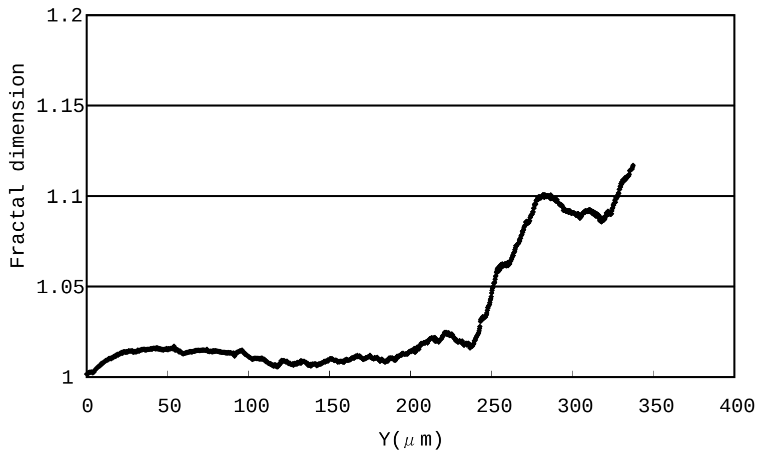


図 4.44: line250 の境界の解析結果 1

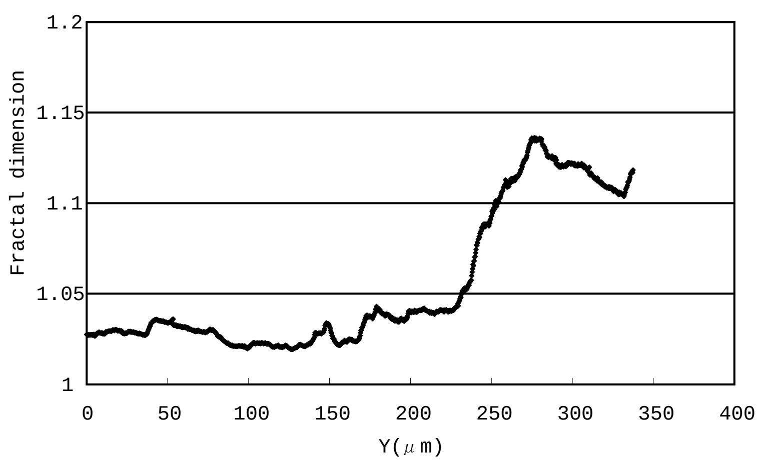


図 4.45: line400 の解析結果 1

3 本すべてのラインについて、脆性破面から延性破面に変化するに従い 1~1.03 のフラクタル次元が 1.1~1.2 に増加しており、境界の存在が明確になった。

試験片 1 で観察される境界部の解析結果 (1200 倍)

試験片 1 を 1200 倍で観察した 75 µm × 100 µm の破面を 4 視野分連続的に解析した。
X 方向解析結果

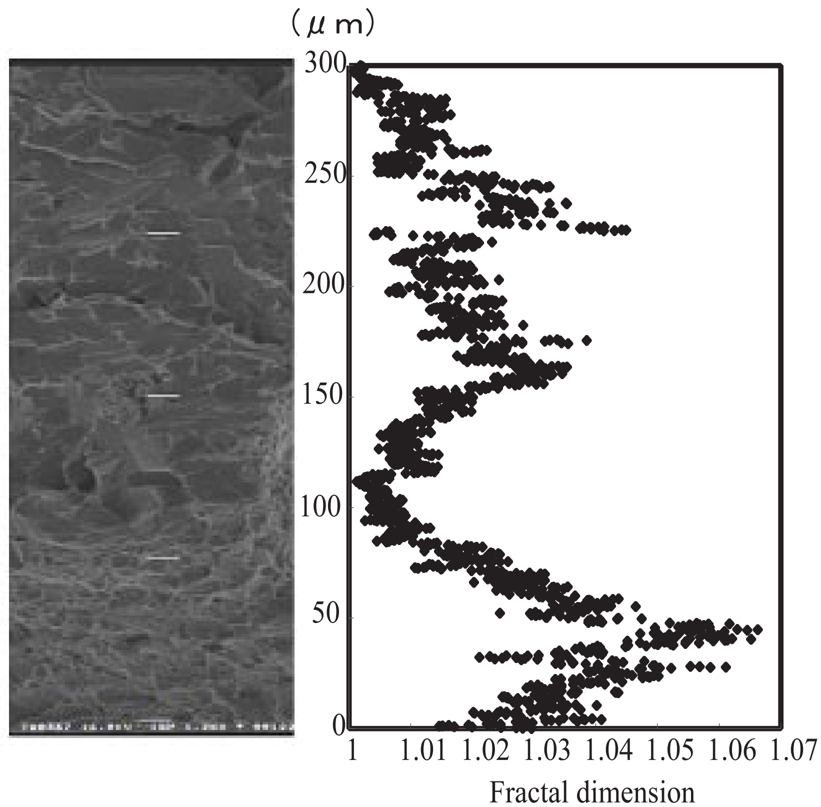


図 4.46: 境界部の X 方向に対する観察、解析 1

800 倍の場合と同じく境界の存在する 50 から 100 µm でフラクタル次元が落ちこんでいることがわかる。しかし 0 から 50 µm にかけて次元が小さくなっておりフラクタル次元のみからの境界決定は難しい。

Y 方向解析結果

AB=75(μm) は一定で OA=Y(μm) として 100 本目、250 本目、400 本目について解析を行った。横軸を Y(μm)、縦軸をフラクタル次元として脆性破面から延性破面にかけての次元の推移を示す。

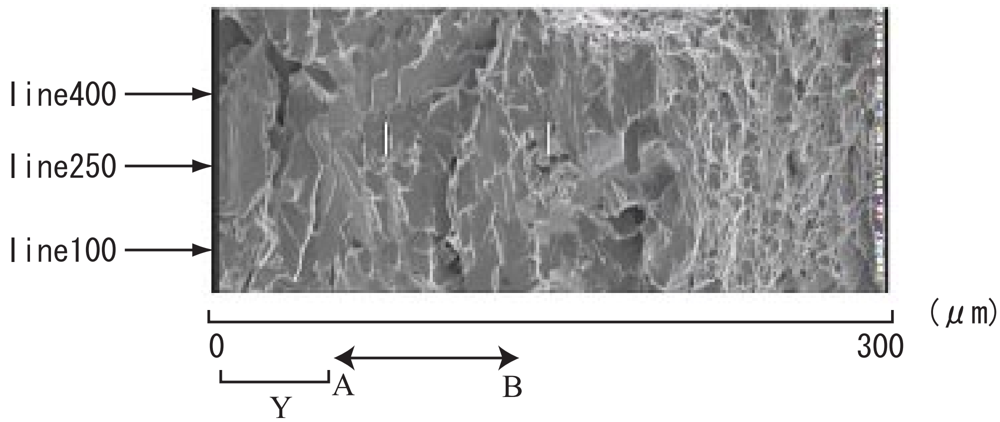


図 4.47: 境界部の Y 方向に対する観察、解析 2

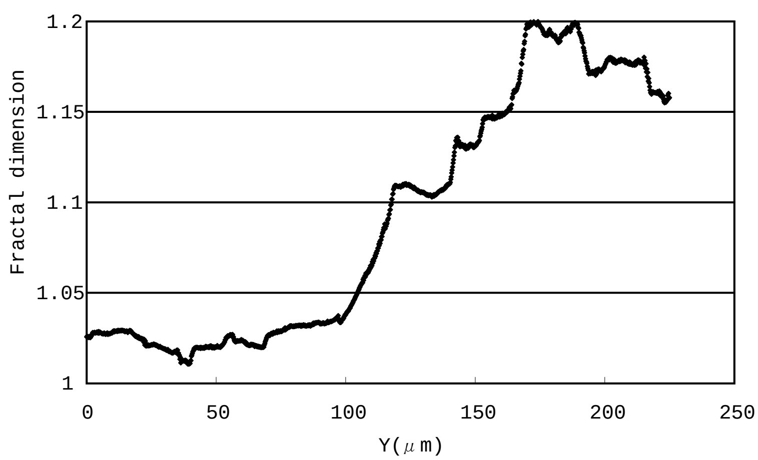


図 4.48: line100 の解析結果 2

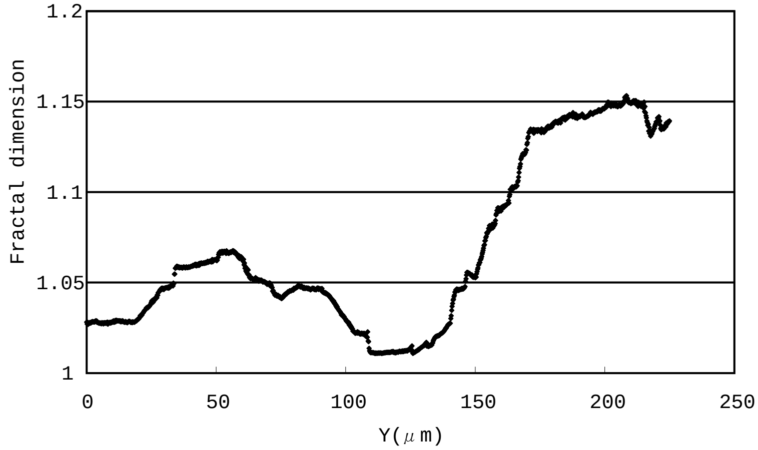


図 4.49: line250 の解析結果 2

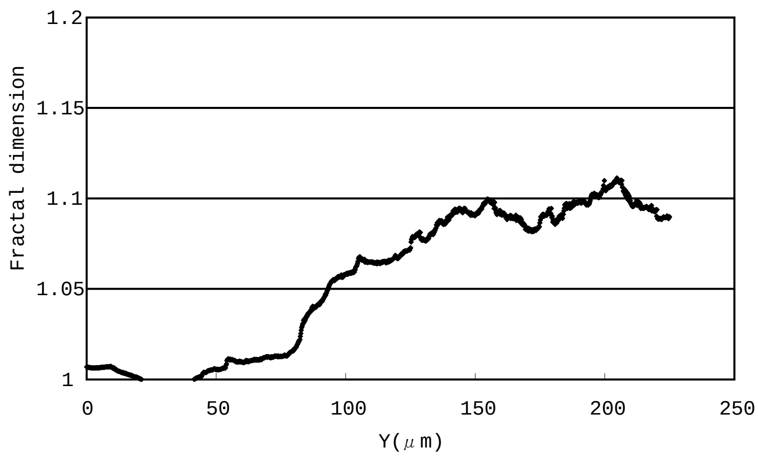


図 4.50: line400 の解析結果 2

800 倍の時と同様、3 本すべてのラインについて、脆性破面から延性破面に変化するに従い 1~1.03 のフラクタル次元が 1.1~1.2 に増加している。

試験片 2 で観察される境界部の解析結果 (800 倍)

試験片 1 ではディンプルの存在する延性破壊部から脆性破壊部への遷移部を解析した。試験片 2 のように脆性破面率の低い破面にはその上部に, ディンプルを含まないような延性破壊部と脆性破壊部との遷移部が存在する。その部分についても同様に解析を行った。

ここでは 800 倍で観察した $112.5\,\mu m \times 150\,\mu m$ の破面を 4 視野分連続的に解析した。

X 方向解析結果

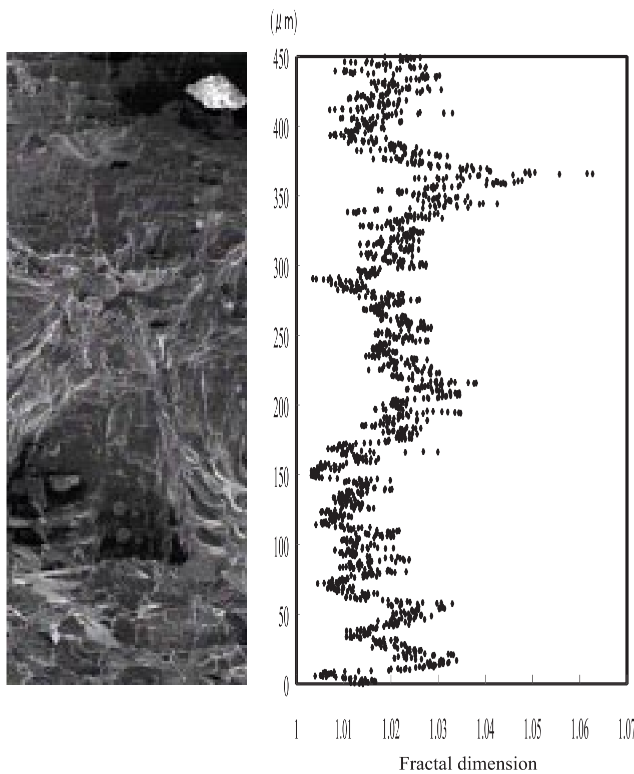


図 4.51: 境界部の X 方向に対する観察、解析 1

フラクタル次元に大きな変化がなく境界部の決定はできない。

Y 方向解析結果

解析破面 1 と同様、AB=112.5(μm) は一定で OA=Y(μm) として 100 本目、250 本目、400 本目について解析を行った。

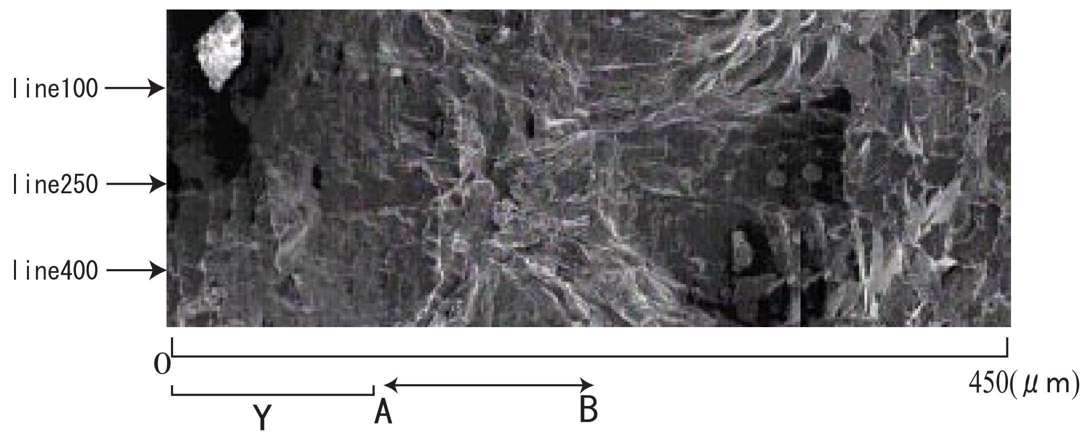


図 4.52: 境界部の Y 方向に対する観察、解析 3

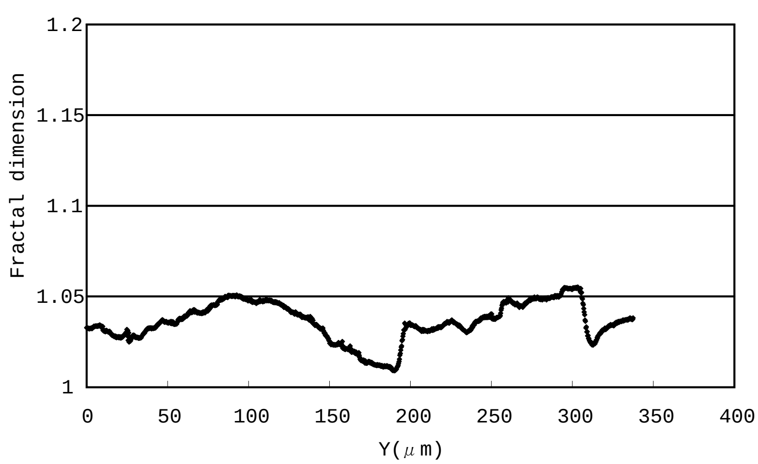


図 4.53: line100 の解析結果 3

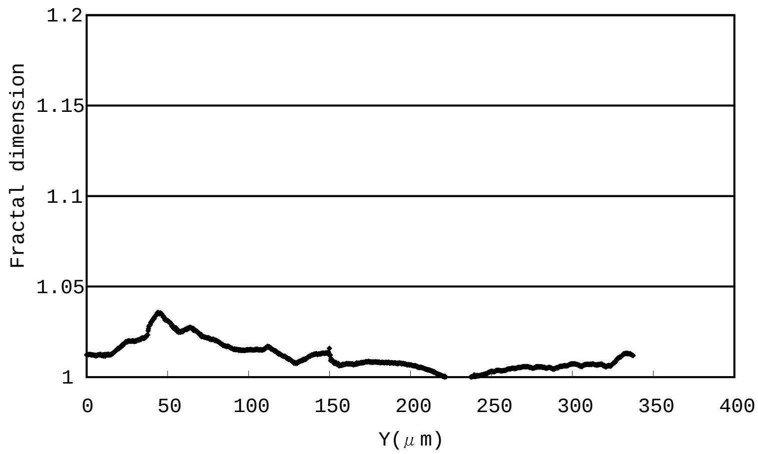


図 4.54: line250 の解析結果 3

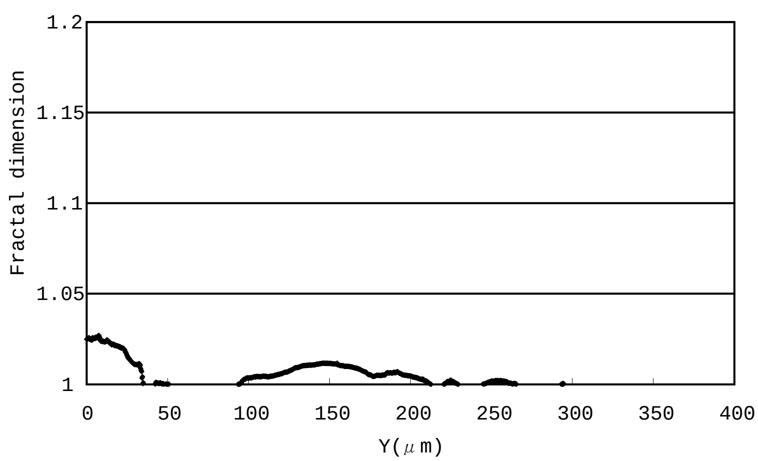


図 4.55: line400 の解析結果 3

Y 方向解析についても X 方向解析と同様、3 本すべてのラインについて延性破面から脆性破面にかけてフラクタル次元に変化がみられなかった。

第 5 章

考察

5.1 観察スケールに対するフラクタル次元の挙動に関する考察

図 4.37,4.38から、まず、脆性破面、延性破面ともに観察スケールによってフラクタル次元が変動していることがわかる。これから両破面ともコッホ曲線のような完全な自己相似性をもつ破面ではないことがわかる。完全に自己相似でないものには必ず特徴長さが存在する。SEM での観察写真からもうかがえるが、ここでの特徴長さとは、脆性破面についてはファセットの大きさ、延性破面についてはディンプルの大きさに相当すると考えられる。共に特徴長さをもつ破面であっても、観察スケールに対するフラクタル次元の挙動、またフラクタル次元の値が両破面で異なっているという結果がみられる。これは脆性破壊、延性破壊の破壊形態の違いに因る結果であると思われる。そこで、本研究で用いた脆性破面、延性破面の破壊形態の特徴を [3] を参考に簡単に説明する。

- 巨視的な脆性破壊は微視的な分類におけるへき開破壊に対応する。へき開 (cleavage) は、ほとんど塑性変形を伴わず原子間の結合がきれて、引張分離するものである (図 5.1)。また、破面は結晶粒の大きさにほぼ対応するファセット (facet) と呼ばれる小寸法の面を単位として構成されている。へき開破壊の大きな特徴として、特徴長さの存在が挙げられる。

- 巨視的な延性破壊は微視的なレベルでの空孔 (void) 合体に対応する。延性を有する材料が大きな塑性変形を受ける場合に材料中の介在物や析出物などの第 2 相粒子を核として、微少空洞が発生し、やがてそれらが成長合体し破壊に至る (図 5.2)。破面には至るところにディンプル (dimple) と呼ばれる穴が観察でき、その底には第 2 相粒子が存在することがある。また、ディンプルの寸法は第 2 相粒子の寸法と分布に依存する。しかし一般的にはこうした第 2 相粒子の寸法と分布は不規則であるため、ディンプルの寸法はかなりの変動を示すことになる。

図 4.37,4.38では全倍率を通して延性破面のフラクタル次元が脆性破面のそれよりも大きくなった。フラクタル次元は複雑さを表す指標でありその定義から延性破面の方が脆性破面よりも複雑であるといえる。延性破面のフラクタル次元の方が大きくなるのは脆性破面のファセットが一定の寸法で存在しているのに対して、延性破面のディンプルが、その最大寸法をファセットと同程度の大きさとして大小様々な大きさで存在するためであると考えられる。図 4.37,4.38で延性破面の方が 5 破面のフラクタル次

元のばらつきが大きくなったこともディンプルの大きさの不規則性を反映しているものと思われる。フラクタル次元の大きさに影響を及ぼす要因としてディンプルの深さが考えられる。しかしながら、シャルピー衝撃試験ではひずみ速度が非常に大きく、深いディンプルが形成されにくい。そういう点では引っ張り試験の方が、より明確に延性破面と脆性破面の特徴をフラクタル次元を用いてとらえられると思われる。

図 4.39のグラフより、脆性破面のフラクタル次元は X 方向測定長に入り得るファセットの数に比例し、その数が少なくなるにつれてフラクタル次元も単調的に減少した。これは脆性破壊ではファセットの大きさがこの試験条件での固有の量となっているためであり、フラクタル次元の挙動を調べることによって脆性破面が特徴長さをもつフラクタル性のない破面であると特徴づけることができた。

一方、図 4.40の延性破壊のグラフ脆性破壊のそれとは異なりは観察倍率が 400 倍から 1000 倍にかけてフラクタル次元に変化の小さな部分があらわれ、それ以上の観察倍率でフラクタル次元が大きく減少している。延性破壊では自己相似性が強いことを示す倍率範囲が存在し、ディンプルサイズの不規則性が延性破面の複雑さと自己相似性の強さという形でフラクタル次元の挙動にあらわれているということができる。

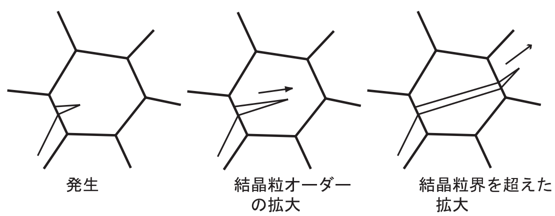


図 5.1: へき開破壊の過程

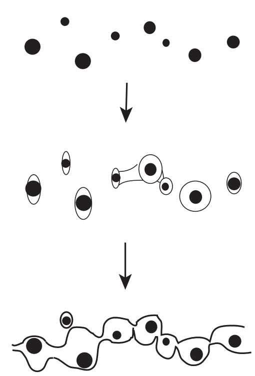


図 5.2: 空孔の合体、成長

粗さとの比較

フラクタル解析の有用性を考察するため、従来より破面解析に用いられてきた指標である粗さとの比較を試みた。2.4.1で挙げた指標のうち、ここでは R_a 粗さと RMS 粗さを用いた。RMS 粗さは高さデータのばらつきであり、μm という単位をもつため直接延性破面と脆性破面の RMS 粗さを比較をすることができない。そこで、高さデータ h_i に対して

$$h' = \frac{h_i - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} \tag{5.1}$$

として、無次元化を行った。そして、フラクタル解析同様、各倍率 5 点ずつの R_a 粗さ、無次元化した RMS 粗さの平均、標準偏差を求めた。以下に観察倍率を横軸,R_a 粗さ、無次元化した RMS 粗さを縦軸にしたグラフを示す。

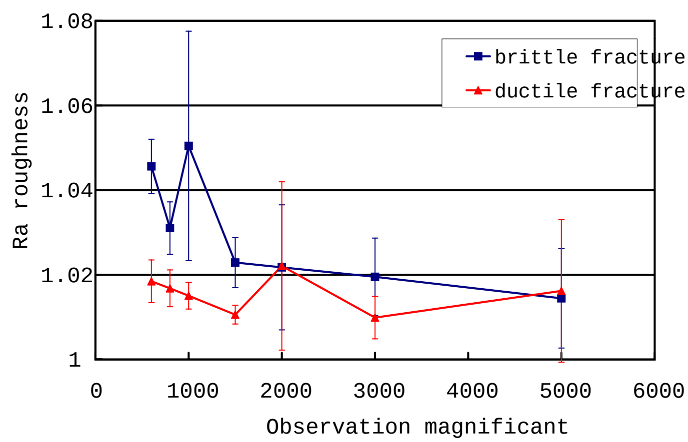


図 5.3: 観察倍率に対する R_a 粗さの挙動

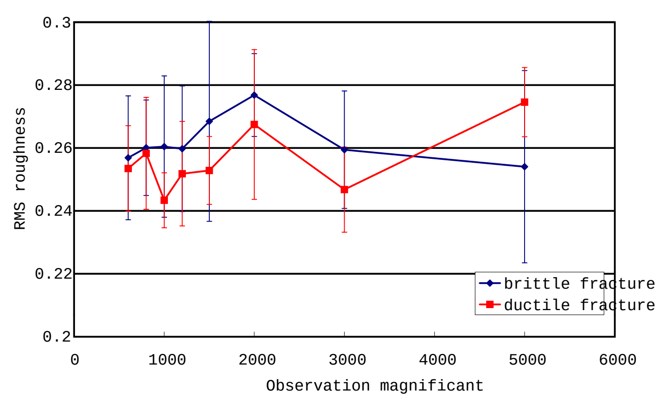


図 5.4: 観察倍率に対する無次元化した RMS 粗さの挙動

これからわかることは R_a 粗さ、無次元化した RMS 粗さともに

- 延性破面、脆性破面を明確に特徴づける指標とならない
- フラクタル次元との間に相関がない

ということである。
粗さはその定義上、

- 高さデータのみを定量化する指標にすぎない
- 隣り合う高さデータ同士の相関がない

という性質をもつ。一方フラクタル次元は自己相似性に対する指標である。つまり、もとの図形の一部分を拡大したとき、もとと同じになることを表す指標であり、隣り合う高さデータ同士に大きな相関があるといえる。そういう点でフラクタル次元の方がより破面という 3 次元形状ををうまく特徴づける指標になりえていると考えられることができる。

5.2 境界決定の定量的手法の確立に関する考察

試験片 1 では脆性破面とディンプルを有する延性破面との境界解析を行った。その結果、Y 方向解析において、フラクタル次元の変化に明らかな特徴をつかむことができた。完全脆性破面部ではフラクタル次元が 1~1.03 の間で一定値を保ち、完全延性破面部ではフラクタル次元が 1.1~1.2 の間で一定値を保つ。それにより、フラクタル次元が単調的に増加している部分において境界が存在していると判断できる。本研究では、境界位置でのフラクタル次元を完全脆性破面でのフラクタル次元と完全延性破面でのフラクタル次元の平均値として定めることにする。これによって、Y 方向解析を用いることによって、脆性破面とディンプルを有する延性破面との境界を定量的に決定することができたといえる。

シャルピー衝撃破面には試験片 2 の境界部のように、破面にディンプルを多く含まない延性破壊部が、切り欠きから離れた部分に存在する。これは衝撃によるエネルギーが大きいため、ディンプルが形成される前に折れてしまうことからこのような形になる。このような境界についてはフラクタル次元の変化がほとんどなく、フラクタル次元を用いた境界の定量評価はできなかった。しかしながら、この境界部に関しては目視レベルでもその境界を決定することが難しいような部分であり、フラクタル次元に明確な差がでなかったことで、フラクタル次元での定量評価の有効性が低くなったわけではないといえる。

第 6 章

結論

6.1 結論

本研究で得られた結論について以下にまとめる。

1. シャルピー衝撃試験で観察される延性破面、脆性破面について、観察スケールに対するフラクタル次元の挙動を調べることによって、フラクタル次元が両破面を特徴づける指標となることが明らかになった。

   (a) 脆性破面では高倍率になるにつれ、フラクタル次元は単調に減少した。これは脆性破壊がファセットという結晶粒サイズに依存した破壊であるためであり、脆性破面は自己相似性の無い破面としてとらえることができた。

   (b) 延性破面では脆性破壊のフラクタル次元と比較して、全倍率を通してフラクタル次元が大きくなり、またばらつきも大きくなった。さらにディンプルサイズを特定できない観察スケール領域では、次元の変化がわずかであった。次元の大きさやばらつきの大きさはディンプルの寸法の不規則性によるものだと考えられ、延性破面は脆性破面と比較して自己相似性が強く複雑な形状をもつ破面であるととらえることができた。

   (c) R_a 粗さと RMS 粗さという指標との比較を行なうことでフラクタル次元が隣あう高さデータ同士に相関をもつ指標であることがわかり、破面の形状をとらえるのにより適した指標であることがわかった。

2. シャルピー衝撃試験の破断面において、特に脆性破面とディンプルを有する延性破面との境界について、定量的にその境界を決定できる解析手法を確立した。

   (a) 完全脆性破面部ではフラクタル次元は 1∼1.03 を示し、完全延性破面部ではフラクタル次元は 1.1∼1.2 を示した。さらに境界を含む部分では次元が単調に増加した。よって、その部分で境界が存在することが明確になった。

   (b) ディンプルをほとんど含まないような延性破面もシャルピー衝撃破面には存在し、そのような破面との境界部ではフラクタル次元に明確な差があらわれなかったが、SEM による観察でも認識しにくい部分であり、この結果だけではフラクタル次元が客観的な境界決定の指標にならないとは言い切れない。

6.2 今後の課題

- もっと広範囲にわたって観察、解析を行なうことにより破面の特徴をより定量的に評価できると思われる。

- SEM では入り組んだ部分の高さデータを的確に拾えないという欠点がある。破面をフラクタル次元により正確に特徴づけるにはシャルピー衝撃破面よりも引っ張り試験によって形成されたディンプル破面を解析すべきだと思われる。

- 本研究では異なる破面に対してフラクタル次元を用いて比較をするという形をとった。ひとつの破面についてカ学的パラメータをかえてみてフラクタル次元との相関をみる必要性があると思われる。

- 境界決定に関して、さらに明確な定量評価をするためには、得られたフラクタル次元の推移曲線から、ある Y 値での局所的なフラクタル次元を求める手法を提案するべきであると思われる。

あとがき

謝辞

本研究は東京大学工学部 酒井信介教授のご指導のもとに進められました。研究の方針をなかなか明確にできずにいきづまっていた僕に、先生は適切なアドバイスをしてくださいました。先生の適切な助言がなければ本研究をこのようなしっかりしたものにはできなかったと思います。本当にありがとうございました。

助手の高野さんには地下での実験中に大変お世話になりました。本当に初歩的なことばかりお聞きしてしまいましたが、嫌な顔一つせず、巧みな話術で丁寧に教えて頂きました。本当にありがとうございます。

技官の浅川さんには何気ない会話を本当にたくさんして頂きました。ありがとうございました。ボーリングまたやりましょう。

助手の泉さんには幾度となく研究方針のアドバイスをしていただきました。その的確さにはおどろくばかりで、この研究を通して研究の基礎、論理の進め方など 4 年生として新たに多くのことを学ぶことができました。本当にありがとうございました。

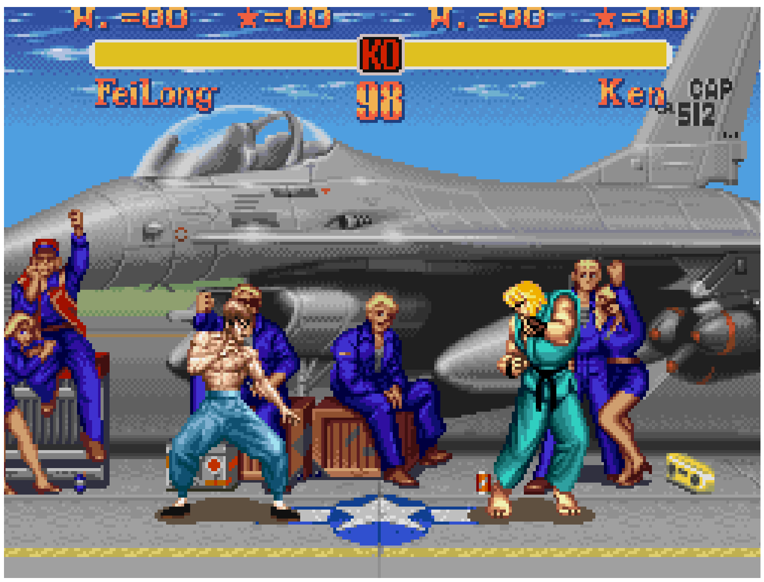
ドクターコースのアジムさん、ジャンさん、ジャックサニーさんとは研究室内で楽しい会話をさせて頂きました。ジャックサニーさんのタイ料理おいしかったです。ありがとうございました。

修士２年の丹野さん、そのさすらいのような研究生活にはかなり驚かされましたが、いろいろ教わることも多かったです。ありがとうございました。

修士１年の小野さん、学部４年の山口くん、瀬川君、柴田さんには研究室での生活を通じて非常にお世話になりました。特に４年生の皆さんとは仲良くさせてもらい、楽しい研究生活をおくることができました。

そして、僕が最もお世話になったのが修士２年の山際さんと修士１年の橘鷹さんです。山際さんには、最初から最後までずっとお世話になりつづけました。研究テーマのみならず、ワークステーションの管理者としても、山際さんからは多くのことを教わることができました。そして、僕の研究がこ

著者近影



参考文献

[1] 機械工学実験編集委員会. 機械工学実験. 東京大学機械工学. 東京大学出版会, 1994.

[2] 株式会社エリオニクス. Era-4000 電子線三次元粗さ解析装置 取扱説明書.

[3] 小林英男. 破壊力学. 共立出版, 1993.

[4] A.J.Paullay B.B.Mandelbrot, D.E.Passoja. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, Vol. 1308, pp. 721–722, 1984.

[5] 池田政隆. 金属破断面トポロジーの解析手法の開発および金属破断面の特性化への応用. Master's thesis, 東京大学, 1998.

[6] 高安美佐子高安秀樹. フラクタルって何だろう. ダイヤモンド社, 1988.

[7] 高安秀樹. フラクタル. 朝倉書店, 1986.

[8] 高安秀樹. フラクタル科学. 朝倉書店, 1987.

[9] 幸田成康西山善次. 金属の電子顕微鏡写真と解説. 丸善株式会社, 1975.

[10] 吉田享. 金属破断面の見方. 日刊工業新聞社, 1970.

[11] 友田陽黒木剛司郎. 金属の強度と破壊. 森北出版株式会社, 第 2 版, 1986.

[12] 池庄司敏孝. 材料の破壊における延性脆性遷移と破面のフラクタル性の関係についての研究. PhD thesis, 東京大学, 1998.

[13] 東京大学教養学部統計学教室. 統計学入門. 基礎統計学 I. 東京大学出版会, 1991.

[14] 広中平祐訳 Benoit B.Mandelbrot 著. フラクタル幾何学. 日経サイエンス社, 1985.

[15] 加納誠 菊地正紀 町田賢司訳 C.R.Brooks. 金属の疲労と破壊-破面観察と破損解析. 内田老鶴圃, 1999.

[16] 発電設備技術検査協会. 溶接部等熱影響信頼性実証試験に関する調査報告書.

以上

1～ 76 ページ　完

卒業論文

平成 11 年　2 月 4 日　提出

80238　　原　祥太郎