

# Fractal Analysis of Diffraction Image Data for Material Damage Evaluation using Imaging Plate.

森 俊 也

(Abstract)

Fractal analysis was applied to two-dimensional diffraction rings detected with Imaging Plate (IP) in order to evaluate fatigue damage of materials. The material used in the study was low alloy steel (A508-2). About one eighth image data in whole diffraction image data was analyzed to calculate fractal dimension. Four different parts of diffraction ring having different central angle were analyzed. It was found that fractal dimension shows a linear dependency on fatigue damage in case of sample to which plastic strain of 0.5% was applied.

## 1. まえがき

イメージングプレート (IP)<sup>1),2)</sup>は比較的新しい2次元X線検出器である。当初は医療用として開発され、X線フィルムに対してX線被ばく量の減少や、画像処理の容易さなどを特徴としていたが、その後、高感度、広いダイナミックレンジ、コンピュータ処理の容易さなどの点からタンパク質の構造解析への利用が増加した。また、吉岡らによりX線応力測定および細束X線解析への応用がおこなわれた<sup>3),4)</sup>。著者らによれば、二軸応力<sup>5)</sup>、応力勾配<sup>6)</sup>や微視的応力<sup>7)</sup>などの測定もIPにより高能率化が可能であることが判明している。

一方、回折環全体の強度分布や回折斑点の状態から副結晶粒寸法、misorientation、ひずみ、転位密度などを求める細束X線技術<sup>8),9)</sup>が発達しているが、この分野へのIPの適用の余地は大きいと思われる。そこで本研究では疲労損傷とIP回折像データの関係<sup>10),11)</sup>について検討した。IPの使用においては、回折像の入手は非常に簡単かつ短時間でおこなえるが、その後の回折像の定量化に関しては処理プログラムやアルゴリズムの面で今後の進展を待たねばならない面が多く残されている。本研究では、2次元フラクタル解析<sup>12)</sup>を適用し、フラクタル次元による疲労損傷評価の可能性を検討した。

## 2. フラクタル解析法

現在、一般的に考えられている「次元」は、たとえば点はゼロ次元、直線は1次元、平面は2次元、空間は3次元というように、それぞれの図形に存在する1点の座標を示す際の配列変数の数と一致する。この考え方は一見矛盾がないように思えるが、1890年に2次元

である正方形上の任意の点を一つの直線で表すことが可能であるという問題が提起された。ペアノ曲線がそれである。ペアノ曲線のような図形を考えると、正方形上の任意の点を示そうとすると独立変数の数が1個、つまり1次元となる。これは前述の次元の概念と矛盾する。このような矛盾を避けるために、次元という概念が根本から考え直された結果、種々の新しい次元の概念が提案された。これら新しい次元のうち、フラクタルの持つ複雑さを定量的に表す量がフラクタル次元である。フラクタル次元の実用的な定義方法は各種存在する。ここで注意すべきことは、各種定義方法によって同一の対象に対して同一の次元値を示すわけではないということである。フラクタル次元を求める方法は、粗視化の度合いを変えておこなうBox-Counting法など各種あるが、本研究で測定システムのアルゴリズムとして採用した方法は、スペクトルより求める方法である。

ここでフラクタル図形として代表的なギャスケット図形を例として、その手法および手順について説明する。まず原画像に対して2次元高速フーリエ変換(FFT)をおこない周波数変換する。周波数に変換された画像はその濃淡、つまり輝度値によってスペクトルを表示している。次に周波数変換された画像について、その中心である原点から周波数 $f$ とスペクトルを一定角度 $\theta$ ごとに0~360degまで読み込む。

ここで読み込んだ周波数 $f$ とスペクトルをそれぞれ横軸、縦軸にとり両対数線図上にプロットし、最小自乗近似より1次関数に近似する。この近似した直線の傾きを $\beta$ として(1)式を用いて次元Dを算出した。

$$D = (5 - (\beta + 1)) / 2 \quad (1)$$

この次元を便宜上スペクトル次元と称する。求めたスペクトル次元Dを360degすべて表示したものがfig.3である。本研究では得られた回折環から抽出した画像の全体的な形状認識をおこなうため、周波数変換画像における全方向のスペクトルを必要とした。従って算出したスペクトル次元Dの360度方向の平均を $D_{avg}$ として、本研究における回折図形の特徴量を表す指標とした。

### 3. 供試材

供試材としては圧力容器用低合金鋼A508-2を用いた。本研究ではこれらの供試材から疲労試験片を作製し、中断疲労試験を実施することによって疲労損傷材を得た。疲労試験は軸方向の引張圧縮による低サイクル疲労で、室温、大気中においてひずみ制御で三角波によっておこなった。試験では最初に試験片が破断する繰り返し数 $N_i$ を求め、その後は破断寿命以下の適当な繰り返し数で試験を中断し、それぞれ寿命比の異なる損傷材を作成した。

試験後の試験片からは並行部の中央より損傷剤をファインカッターにて切り出し、その断面を#1500程度まで湿式研磨したのち、目視で傷が見えなくなるまでアルミナペーストにてバフ研磨をおこなった。また、研磨による塑性加工層を除去するために試料表面を電解研磨により100 $\mu$ m以上除去して試料とした。

熱処理条件をTable.1に、機械的性質をTable.2に、実施した疲労試験の条件および結果をTable.3に示す。

Table.1 Conditions of heat treatment.

Primary	Normarizing : (890~905 $^{\circ}$ C) $\times$ 12.3 hour $\rightarrow$ A.C. Tempering : (645~650 $^{\circ}$ C) $\times$ 12.3 hour $\rightarrow$ F.C.
Refining	Quenching : (870~890 $^{\circ}$ C) $\times$ 6.5 hour $\rightarrow$ W.Q. Tempering : (650~670 $^{\circ}$ C) $\times$ 6.5 hour $\rightarrow$ F.C.
Stress Rereiving	(608~670 $^{\circ}$ C) $\times$ 45.4 hour $\rightarrow$ F.C.

Table.2 Mechanical properties of sample.

Yield Stress, MPa	Tensile Strength, MPa	Elongation, %
468	622	28.5

Table.3 Conditions of fatigue test.

$\Delta\sigma$ , %	N, cycle	Life ratio	Symbol
0.5	4553	0.25	A 1
	9106	0.50	A 2
	13658	0.75	A 3
	18212( = N <sub>i</sub> )	1.00	A 4
1.0	771	0.25	B 1
	1543	0.50	B 2
	2314	0.75	B 3
	3086	1.00	B 4

## 4. 実験方法

### 4. 1 回折像の計測

作成した試験片について、その断面からX線回折像を得た。回折環の撮影には理学電機株式会社製のMSF-2Mを使用し、IPを格納するIPカセットジグを本装置に固定し、5 inch  $\times$  5 inchのIP上に記録した。X線回折条件についてTable.4に示す。なお一つの試験片に対して試料表面の異なる場所を5点測定し、各点1回測定をおこなった。

IP上に撮影された回折環データの読み取りには市販の装置を使用し、ワークステーションで制御をおこなった。本装置は回転ドラム上にIPを装着した状態で回転させながらレーザー光をあて、IPから発生する蛍光を計測してコンピュータに読み込む形式のものである。本実験では読み取り分解能は $100\mu\text{m}$ にておこなった。このようにして得られた回折環データを $1140\times 1140\text{pixel}$ の画素からなる画像データとしてワークステーション上に保存した。

Table.4 Conditions of X-ray analysis.

Characteristic X-ray	Cr-K $\alpha$
K filter	V foil
Diffraction plane	$\alpha$ 211
Tube voltage	30kV
Tube current	10mA
Collimater	$\phi$ 1 mm
Camera length	80mm
Exposure time	600sec

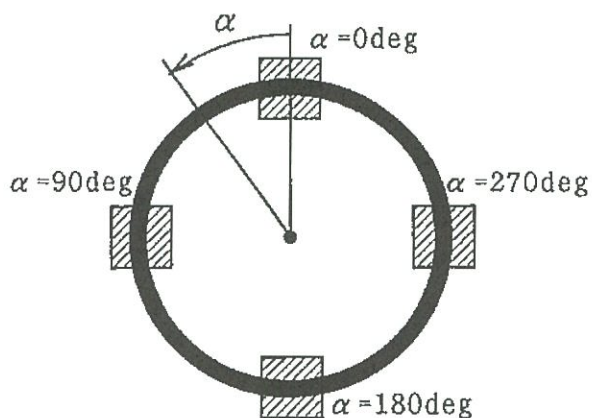


Fig. 1 Summary of image abstraction.

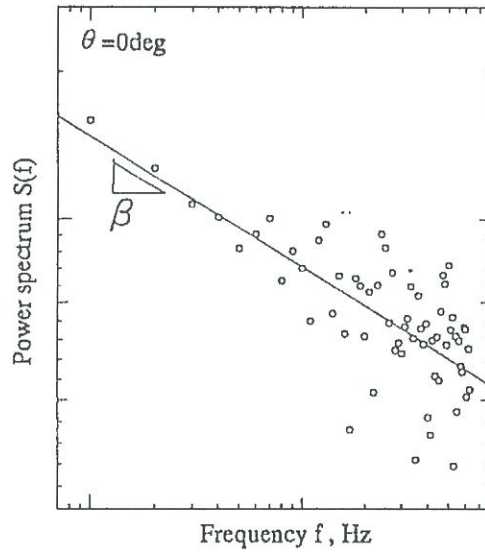


Fig.2 The relationship between frequency and power spectrum.

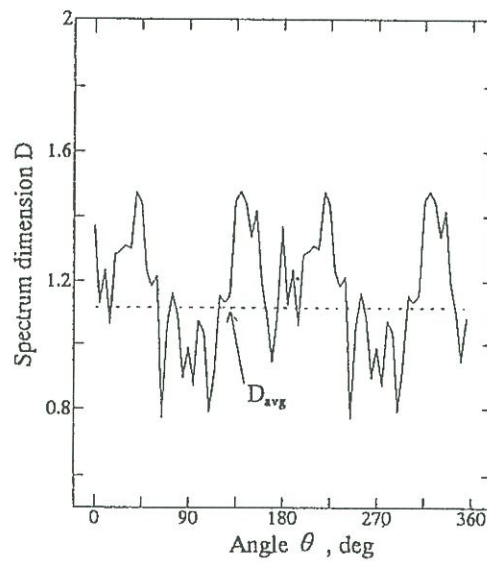


Fig.3 Spectrum dimension

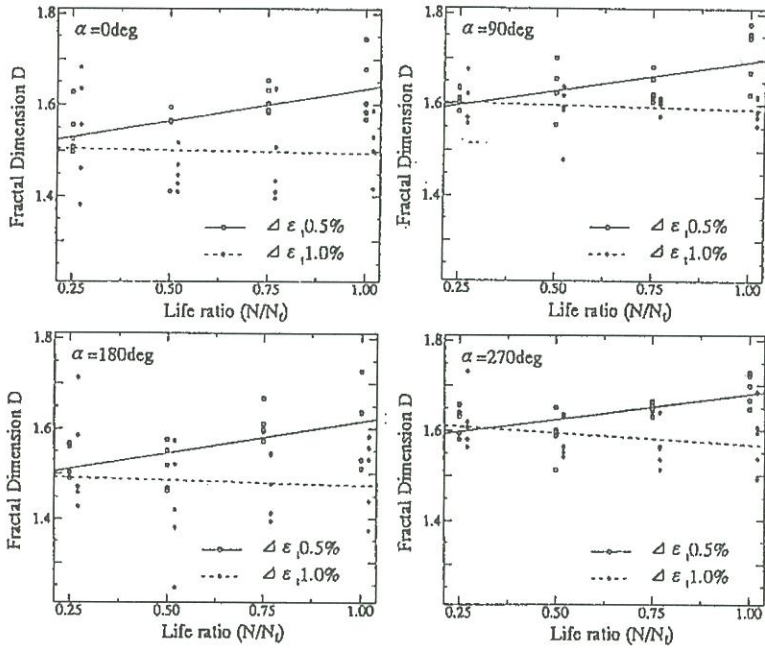


Fig. 4 Plot of life ratio vs. fractal dimension  $D$  relation

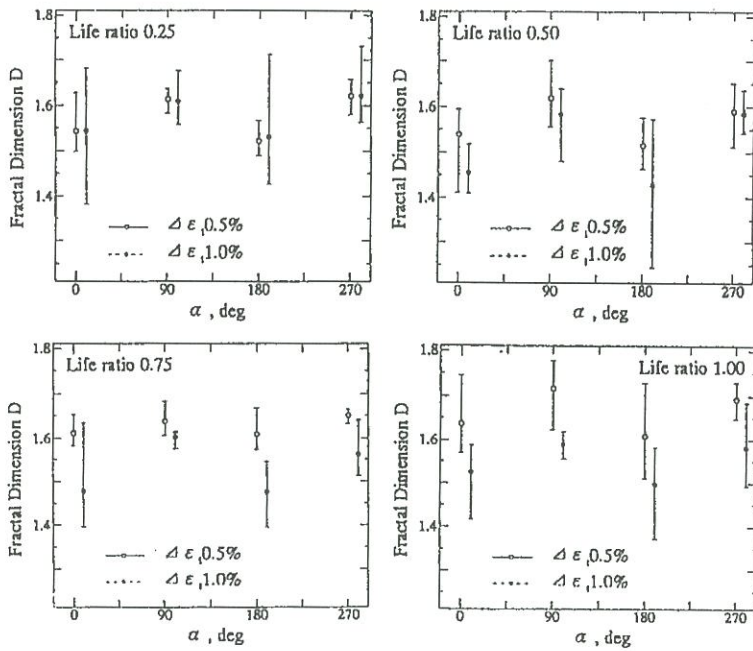


Fig. 5 Plot of  $\alpha$  vs. fractal dimension  $D$  relation

#### 4.2 回折像データ処理およびフラクタル解析

得られた回折環データをパソコンを用いて解析をおこなうためにワークステーション上で回折環の一部を抽出した。抽出の際にはUNIX Cで作成したプログラムを用いて回折環円周上 $\alpha=0,90,180,270\text{deg}$ の点を原点として $128 \times 128\text{pixel}$ の画像データを抽出した。この領域の大きさとしたのはパソコンのメモリの都合上である。抽出した画像データをMicrosoft Cで作成したプログラムを用いて、画像の読み込みおよび周波数変換、周波数変換データの $\theta$ 方向についての処理、フラクタル次元Dの算出の解析処理をパソコン上でおこなった。

### 5. 実験結果および考察

回折像は円周方向に関して若干の強度分布を有しているが、いずれも連続した回折環を構成している。これは低合金鋼の場合、熱処理の過程で結晶粒が微細化し、X線照射範囲内に回折条件を満たす結晶粒が多く存在するとともに、焼き入れ処理によって結晶格子中に多数の転移が導入されているためであると考えられる。損傷量による回折像の変化としては、回折環の円周方向に関してみられる強度分布が損傷量の増加とともに平均化するように見えるが、その変化は明確ではない。ひずみ範囲に関しても、全ひずみが0.5%の場合と1.0%の場合では、ほとんど差はみられなかった。

$\Delta\epsilon_t=0.5\%$ の試験片では、本研究の方法により求められたフラクタル次元では疲労寿命に対してほぼ線形の増加傾向を示した。また、その変化量は回折環の中心角を $90\text{deg}$ 間隔ずつ異なる回折環円弧においてそれぞれほぼ同様な傾向を示した。ただし同一の回折環においても中心角 $\alpha$ によってフラクタル次元が変化する傾向があるので、 $\alpha$ の範囲が小さい場合ほどフラクタル次元と疲労寿命との相関は明確になるが、 $\alpha$ 範囲を広くするとそれは不明瞭となる傾向がある。すなわち本実験条件下において回折環全体のフラクタル次元を使用した場合には、フラクタル次元と疲労損傷との相関は不明確になると予想される。 $\alpha$ を狭くすること(回折環の一部のみを解析すること)は、ディフラクトメータによる回折プロフィールに近づくことを意味するので、従来の評価方法の妥当性が以上の結論として導かれることになる。

一方、 $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ の試験片では、フラクタル次元は疲労寿命に対して変化せず、ほぼ一定値を示した。この原因には、フラクタル解析における画像データのフルスケールの設定に依存している可能性が考えられる。本研究では、今回得られた全画像中の最大強度をフルスケールに設定し、すべて共通とした。 $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ の試験片では塑性変形と共に回折像がブロード化しているため、回折強度が低下し、設定したフルスケールに対して比較的僅かな強度変化を示していることが、フラクタル次元の変化に影響している可能性が考えられる。今後、解析における、フルスケールとともに、バックグラウンド強度の扱い、

データ範囲(回折角の領域)などについて検討する必要があると考えられる。

## 6. まとめ

イメージングプレートで回折像を測定し、回折画像の2次元データのフラクタル次元を求める実験システムを製作し、疲労損傷の評価について検討した。本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- (1)  $\Delta\epsilon_t=0.5\%$ の試験片では疲労寿命に対してフラクタル次元が、ほぼ線形に増加する傾向を示した。
- (2)  $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ の試験片では疲労寿命に対してフラクタル次元は、ほぼ一定値を示した。
- (3) 本研究の解析条件では、2次元回折像のフラクタル解析は、解析する領域が狭いほうが疲労寿命の評価に有益である。

### 【参考文献】

- 1) 雨宮、神谷、宮原、応用物理、55,957(1986).
- 2) Amemiya, Y., Kamiya, N. and Satow, Y., Nucl. Instr. And Meth. A246,572(1986).
- 3) 吉岡、大谷、新開、非破壊検査、39,8,666(1990).
- 4) 吉岡、大谷、古川、第29回X線材料強度評価に関するシンポジウム講演論文集、167(1993).
- 5) 佐々木、廣瀬、日本機械学会論文集、61,590,180(1995).
- 6) 佐々木、廣瀬、日本非破壊検査協会平成7年度秋季大会講演概要集、447(1995).
- 7) 廣瀬、佐々木、鷹合、第32回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集、143(1996).
- 8) 平、林、日本機械学会論文集、32,235,389(1966).
- 9) 田中、秋庭、西沢、金多、材料、35-394,712(1986).
- 10) 遊佐、吉岡、第32回X線材料強度に関する討論会講演論文集、29(1995).
- 11) 遊佐、富士、吉岡、第114回X線材料強度部門委員会研究討論会資料、16(1995).
- 12) 黒瀬、津田、佐々木、廣瀬、吉岡、材料、43-494,1489(1995).