画像処理フラクトグラフィ

駒井謙治郎*・箕島 弘二*

Application of image processing technique to fractography

Kenjiro KOMAI* and Kohji MINOSHIMA*

1. はじめに

フラクトグラフィとは破断面の調査から破壊の機構に関する知見や破壊・損傷事故の解析を行おうとするもので、肉眼や光学顕微鏡を用いた観察は古くから行われてきたものであるが、近年電子顕微鏡が破面観察に応用されるに伴って、従来よりもはるかに多くの精密な情報が得られるようになり、きわめて重要な位置を占めるに至った。フラクトグラフィは破壊事故原因の究明において、破壊が生じた現場の貴重な証拠を与えることは自明であるが、破壊の機構の研究に対しても、き裂進展を3次元的に把握する貴重な手段を提供する。種々の条件下における破面の特徴については相当な情報が蓄積されており¹⁾、定性的な検討は相当なされている。また、最近では画像処理技術を応用した定量的な解析、あるいは破面診断等がなされており、今後益々この方面の研究が進展するものと思われる。ここでは、画像処理フラクトグラフィ技術の現状と応用例を我々の研究室で行ってきた結果を中心に解説したい²⁾。

2. 画像処理ツール

画像処理システムとしては、①パーソナルコンピュータをベースとしたもの³⁾とメインフレームおよびベクトル計算機を用いたシステム⁴⁾がある。画像処理を行う場合は、ハードウェアとして画像入力デバイス、処理デバイス、画像表示デバイスが最小限必要である。SEMより画像を入力する場合、SEMの電子ビーム走査と同時に画像を量子化してRAM(ランダムアクセスメモリ)やMT(磁気テープ)にオンラインで取り込む方法と、いったんSEM画像を写真撮影し、焼付け写真あるいは

フィルムをあらためてA-D変換するオフライン入力法がある。前者は画像入力時のノイズの低減あるいはSEMで観察しながら処理が可能という利点を有するが、多数画面を高画素数で保存することが困難なことや、必ずしも画像のすべてが処理の対象とならないことから、後者のオフライン入力法が広く用いられている。処理デバイスとしては、パーソナルコンピュータも使用できるが、汎用の画像処理装置の使用が便利である。これはRS232C, GPIB等の規格化されたインターフェースを通してホストコンピュータよりコマンド列を送受信し、画像処理のための演算をパイプライン方式等により高速に処理するものである。

しかしすべての画像処理を汎用画像処理装置のみで行うことはできないので、ホストコンピュータで一部の処理を行うことが必要になる場合がある。画像処理の処理手順を開発するには、ある程度の試行錯誤を繰返す必要があるが、このとき種々の画像処理アルゴリズムを各研究者が自分でいちいちプログラミングするのは非現実的である。これに対しては、市販の画像処理ソフト、たとえば、電子技術総合研究所が中心になって開発した画像処理サブルーチンパッケージSPIDER⁵⁾(Subroutine Package for Image Data Enhancement and Recognition)を用いるのがよい。

3. 2次元画像処理

破面解析は、(1)2次元処理と(2)3次元処理に大別される。2次元処理はテクスチャー(模様)による破面性状の分類とそれによる領域分割(たとえば粒界・粒内割れ破面率の測定)、あるいはストライエーション間隔の測定などを、2次元投影平面上で評価するものである。

* 京都大学工学部(京都市)。Department of Mechanical Engineering, Kyoto University (Kyoto-shi, Kyoto)。

受理日:平成4年6月1日

9

3.1 ストライエーション間隔の自動測定

疲労破壊の代表的な機構であるストライエーション間隔の測定は事故解析等で重用されており、その間隔分布の統計的性質の検討は工学的にも有用性があるのみならず、微視的破壊機構解明に対しても威力を発揮する。ここではエッジ・線検出による方法⁶⁾とテクスチャー解析による手法⁷⁾について述べる。

3.1.1 エッジ・線検出による方法⁶⁾

図1に解析に用いたストライエーション写真の例を示す。図中の黒枠で囲んだ部分を100×200画素（濃度レベル8ビット（256階調））で入力した。図2に解析フローチャートを示す。ストライエーション縞に対応する線の検出法は、①局所的オペレータでエッジ・線の候補点（エッジ要素）を検出する処理、②①で得られた要素マップから滑らかな線出力を得る処理に大別できる。ここではエッジ・線要素の検出には、エッジ・線部分は画像濃度が急激に変化している部分に対応していることから、濃度変化率を取り出せる最も基本的な空間微分（Roberts オペレータ⁸⁾）による手法を用いた。

つぎにこのエッジ強度マップからストライエーション縞に対応したエッジ・線要素を結合する必要があるが、これにはストライエーションは、①中断したり、交差あるいは枝別れしない1本の連続線となる、②全体としてお互いに平行関係にあるといった知識を拘束条件として用いることにより抽出線を得た。図1の処理結果を図3に示すように十分な精度でストライエーションが抽出できた。また、図にはストライエーション縞の間隔の最小値と最大値を併せて示している。間隔の平均値は0.54 μm であり、従来の人手による結果0.54 μm と一致した。

図1 ストライエーションのSEM写真（アルミニウム合金， $da/dN=7.9 \times 10^{-7}$ m/cycle，矢印はき裂進展方向を示す）

以上は比較的明瞭なストライエーションの例であったが、不鮮明なストライエーションの場合は濃淡画像そのものをエッジ強度マップとして用いる⁶⁾か、あるいは次項で述べるテクスチャー解析による手法⁷⁾が適している。

3.1.2 テクスチャー解析による手法

腐食環境中のストライエーション観察，たとえば高温高圧水環境下のような場合には、破面上に強固な酸化物被膜が固着している。このため、破面性状の観察は脱膜処理を施して初めて可能となるが、きわめて不鮮明なストライエーション模様しか得られない（図4）。このような場合にはさきに述べたエッジ・線検出による方法ではストライエーション縞の抽出は困難であり、破面テクスチャーの周期性を調べる方法が有効である。

テクスチャーの周期性を調べる方法は種々報告されている⁹⁾が、この場合は2次元フーリエ変換を施した後、パワースペクトルの強度分布を調べる手法⁹⁾が有効であった。図5に図6の画像のパワースペクトルを求めた結果を示す。最も強い周期性は図中に示した距離 r であ

図2 ストライエーション間隔測定フローチャート

図3 図1のストライエーション縞抽出結果

図4 A533B 鋼の高温・高圧水（BWR 模擬環境）中におけるCF破面（白枠：解析範囲， $da/dN=1.0 \times 10^{-6}$ m/c）

図5 図4白枠内のパワースペクトル

り，これより計算される間隔は $s=0.8 \mu\text{m}$ である。これは巨視的き裂進展速度 $da/dN=1.0 \times 10^{-6}$ m/cycle(=1.0 $\mu\text{m}/\text{cycle}$) とほぼ一致することから，フーリエパワースペクトル面から得られる $0.81 \mu\text{m}$ の規則性はストライエーション間隔と見なせる。

このようにフーリエ変換によるストライエーション間隔測定は，広範囲の材料・環境の組合わせ下，とくに腐食環境のように不鮮明なストライエーションしか観察できない場合に威力を発揮する。ここで注意を要するのは，とくにフーリエ変換の場合は単に破面の規則性を調べているのみであり，これにより得られた値を解釈するにあたっては，他の情報をも含めて検討を要することである。

3.2 破面性状の自動判別

破面の2次元処理の大きな柱に，破面のテクスチャー

図6 粒界破面率自動測定フローチャート

解析による破面性状の自動判別や破面率計算があげられる。これに関しては，マクロ破面を用いたシャルピ衝撃破面におけるぜい性破面率計算^{10),11)}，破面単位の計算^{3),12)}，粒界・粒内混合破面の自動判別^{13),14)}，2次元フーリエ変換による疲労ストライエーション，ディンプル，粒界割れ，へき開割れ識別の試み¹⁵⁾などが報告されているが，いまだ研究報告も少なく今後の研究の発展が望まれる未開拓分野である。ここではとくに材料の環境破壊機構解明に際して大きな意義を有する粒界・粒内混合破面の自動判別¹³⁾について述べる。

図6¹³⁾に解析フローチャートを示す。一枚の画像中に粒界割れ・粒内割れが混在しているため，まず画像を小領域に分割して，各小領域のテクスチャーを共起行列¹⁶⁾を用いて解析した。共起行列 P とは，画像内濃度 i の点から一定の変位だけ離れた点の濃度が j である確率を，すべての濃度の組合わせ (i, j) について求めたものである。したがって行列 P は濃度レベル数を k とすると (k, k) 行列となる。画質の変化がおだやかな場合，共起行列は対角線上の値が大きくなり，一方きめが細くなるほど値が散らばる特性を有している。したがってこの行列の特徴を総合的に表わすパラメータを計算することによりテクスチャー解析を行うことができる。

ここでは，計算時間を短縮するため濃度レベルを8ビットから3ビットに再量子化したのち，各小領域の共起行列を求め，Angular second moment (F1)，Contrast (F2)，Variance (F4)，Inverse difference moment (F5)の計4種類の特徴量を計算した。つぎに，粒界割れ，粒内

9

(a) SCM435鋼の静 SCC 破面

(b) 300M 鋼の静 SCC 破面

図7 粒界割れ破面写真

割れを自動的に分離するため、各特微量の集合に対して、大津の判別分析法¹⁷⁾を用いて粒界割れの候補小領域マップを作成した。これを基に、各特微量ごとに粒界破面率 ψ_{Fi} ($i=1, 2, 4, 5$) を求め、この平均値 ψ に応じて各特微量の論理積・和を求めることにより、最終的に粒界割れ部分を決定した。

図7に解析に用いた破面の例を示す。黒枠部分を 5×10 個の小領域に分割して粒界破面率を求めた。図8¹³⁾に小領域を 64×64 画素としたときの粒界割れ分離結果を手による分離結果と併せて示す。分離ミスも見られるが粒界の性状を問わずばよい精度で粒界割れが分離できている。この場合のCPU所要時間は9.3秒であり、手作業による20分と比較して大幅な時間短縮が実現できた。

一方、高張力鋼 HT80のように強度レベルが比較的低い場合は、腐食環境中のき裂進展の空中疲労からの加速は、粒界割れと擬へき開割れに代表される粒内ぜい性割れ破面をたしあわせた破面率でよく整理されることが知られている。このような粒内延性割れと粒内ぜい性割れの判別に対しては、各小領域の方向性をフーリエ変換法で調べ、最も強い方向性を持つ共起行列の複数特微量から、比較的良好な精度で粒内割れの延性・ぜい性を判別することが可能である¹⁴⁾。

4. 3次元形状の再構築とその応用

3次元処理とは、ステレオ画像を用いて立体形状を再構築し、その立体形状を解析対象とするものである。3次元形状が定量的に測定できれば、鳥瞰図による破面等

図8 粒界割れ、粒内割れ抽出結果 (図中の数字は粒界割れ破面率)

- (a) 繰返し SCC (300M 鋼)
- (b) 静 SCC [300M 鋼, 図7(a)]
- (c) 静 SCC [SCM435鋼, 図7(b)]
- (d) 静 SCC (SNCM439鋼)

の直接観察が可能となるのみならず、従来はほとんど利用できなかった高さ方向の情報の迅速な量的処理を可能ならしめるので、今までにない破面解析手法をフラクトグラフィに提供するものである。

4.1 3次元形状の再構築

破面の立体像を観察するためには、まず試料をある角度 θ 回転させて2枚のステレオ写真を撮る。つぎに、この2枚の写真を並べステレオ眼鏡を用いて右側の写真は右側の眼で、また左側の写真は左の眼で眺め、2枚の写真の対応点が完全に1つの点としてしか感じられなくな

ったときに立体感を得ることができる。2枚のステレオ写真の対応する同一点が決定できれば、幾何学的関係より、各点の基準点からの高さ h は $h = (l_2/\sin \theta) - (l_1/\tan \theta)$ により計算できる。ここで l_1, l_2 は基準画像、傾斜画像上で回転軸に直角にはかった基準点からの各点の距離、 θ :回転角である。図9に、3次元形状再構築フローチャートを示す¹⁸⁾。コンピュータ処理においても図に示すように、2枚の画像からなる一組のステレオ画像間の対応点探索処理と、その結果より得られる相対的な位置のずれより高さを計算する処理に大別される。

4.2 対応点の対策

一組のステレオ画像のうち、試料を傾けずに撮影したものを基準画像 (Standard image)、傾けて撮影したものを傾斜画像 (Oblique image) と呼ぶ (図10)。傾斜画像は基準画像に対して、図に示して直交座標系の y 軸と平行な軸を回転軸として試料を傾けたもの ($\theta=8^\circ$) である。

2枚の画像の対応点を探索するためには、基準画像中に窓領域 (Window area) を設定し、この窓領域より取り出したテンプレート (Templet) を傾斜画像中に重ね合わせ、最良の重ね合わせとなる領域を捜せばよい。この場合、傾斜画像中をくまなく探索するのは時間と計算コストがかかるため、傾斜画像中の対応点が存在すると予想される点を中心として、窓領域より大きい探索領域 (Search area) を設け、この中で最良点を探索する方法が効率的である。

この重ね合わせの評価には、SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm) 法^{19)~21)}、と相互相関係数^{19), 22)}がよく使われる。SSDA 法はテンプレートを傾斜画像に重ね合わせたときに、各画素の差の絶対値和 R_s をミスマッチングの測度とするものである。すなわ

ち、テンプレートを探索領域中で順次移動させたとき、 R_s が最小値をとる場所を対応点と見なすものである。一方、相互相関法は、ミスマッチングの測度として相互相関係数 R_c を用いるものである。 R_c は、重ね合わせた領域がまったく同一の場合は1.0となるが、ステレオ写真では試料を傾斜させるため、対応点間の R_c は必ずしも1.0とならないが、1.0に近い値 ($R_c \sim 0.8$) をとることが予想される。したがって、相互相関法では R_c が最大値をとるときを対応点と見なすことにする。SSDA 法は、両画像間の加減算のみにより計算でき、相互相関法に比べて処理速度が速いことが特徴である。3次元形状解析にあたっては、対応領域探索が処理時間の大部分を占め、しかも以後の高さ計算の精度を決定するため、計算コストと精度の兼ね合いより、SSDA 法と相互相関法のいずれかを選択する必要がある、種々の工夫がなされている²³⁾。

4.3 3次元形状の再構築例

以上述べた3次元形状再構築技術を用いることにより破面等の立体形状を得ることができるが、今日ではこの立体形状の解析は従来の投影面上の2次元解析と並んで、フラクトグラフィにならなくてはならない重要な手法となっている。たとえば、破面あらかの直接測定^{21), 22), 24)}、き裂閉ロシミュレーション^{20), 22)}、腐食ピット底からのき裂発生力の力学的条件の決定^{25)~27)}、シャルビファセット破面単位の定量評価^{3), 28)}、マッチング破面の閉ロシミュレーションによる破壊機構解明^{29), 30)}、破面のフラクト解析^{24), 31)~33)}、ディンプル模様とストレッチゾーン幅の3次元定量評価³⁴⁾等に応用されている。

以下では、代表的応用例として著者らが行った腐食疲労き裂の閉ロシミュレーションとディンプル破面解析について述べる。

4.3.1 腐食疲労き裂の閉ロシミュレーション

腐食疲労き裂進展においてはき裂内に生じた腐食生成物が荷重分担をして、き裂閉口荷重を上昇させるくさび効果が重要である。このくさび効果を破面の3次元形状

図9 3次元形状再構築フローチャート

図10 対応点探索方法

図11 HT80鋼の人工海水中における腐食疲労マッチング写真（腐食生成物付着面）

から眺めると以下のようなものである²²⁾。

図11に高張力鋼 HT80の人工海水中での自然腐食条件下で行った腐食疲労破面のマッチング写真を、また、図12にその3次元形状を示す。この上下破面の3次元形状を用いて、マッチング上下破面の位置合わせ、平行度出しを行った後、上下破面を平行に近づけていきき裂閉口再現シミュレーションを行った。このシミュレーションにおいて、上下破面がある一点で初めて接触したときを $D=0.0\mu\text{m}$ とし、さらに $D=5\mu\text{m}$ 接近させたときの破面接触の状況を図13に示す。図11において、腐食生成物の破面への付着があまり見られない A-A 断面と、腐食生成物が顕著に付着している B-B 断面の破面接触の様子を示したものであり、腐食生成物が付着している部分には網をかけてある。これより、腐食生成物が付着している B-B 断面においてまず破面接触、すなわち最初のき裂閉口が生じていることがわかる。

4.3.2 ディンプル破面、ストレッチゾーン破面の定量評価

シャルピ試験片が延性破壊するときにはディンプル破面

図12 図11の3次元鳥瞰図 [(a)の鳥瞰図の凹凸出力は比較しやすいように、他方の鳥瞰図(b)と同方向にとってある]

図13 図12のマッチング破面を用いたき裂閉口シミュレーション

を呈するが、材料の延性とディンプル直径の間には一般的な関係はなく、ディンプル深さが延性と関係するとされている。また、破壊じん性値はストレッチゾーン幅から評価できるとされているが、この場合もストレッチゾーン高さが破壊じん性値のより直接的な評価量となるものと考えられる。したがって、いずれの場合も破面の3次元的な評価が必要となる。

解析を行ったディンプル破面は、HT80鋼、SGV42

(a) SEM 写真

(b) (a)の鳥瞰図

(c) ディンプルの底と稜

(d) ディンプルの2次元輪郭

図14 シャルピ衝撃試験による HT80鋼のディンプル破面

鋼, SS41鋼のそれぞれについて試験温度を変えて行ったシャルピ衝撃破面であり, HT80鋼についての解析例を図14³⁴⁾に示す。図(a)にSEM画像を, 図(b)に再構築した3次元形状を, また, 図(c)に入力画像上に3次元処理により求めた各ディンプルの底とその稜線の位置を重ね合わせた画像を示す。図(d)は2次元処理により求めたディンプルの輪郭線の画像である。図(b)を三角形要素で面張りして求めた実表面積を, 破面の投影面積で除した値を表面積比(H)として, 表面積比(H)とシャルピ試験温度の関係を求めた。結果を図15に示すように, 同一鋼種で比較した場合, 等軸型, 伸長型ディンプルを問わずいずれの鋼種においても, 試験温度が高く吸収エネルギーが大きいほうが, H は大きくなる。一方, ディンプル平均直径と試験温度の間には一般的な関係は見られない。

ストレッチゾーン破面については, HT50鋼について, BS5762に準じたCTOD試験によって得た破面を解

図15 HT80鋼, SGV42鋼, SS41鋼の種々の温度下における破面表面積比

析した。図16(a), (b)にそれぞれSEM原画像と再構築した3次元形状を示す。図16(b)の断面曲線を直線近似することにより自動的に評価されたストレッチゾーン高

9

(a) SEM 写真

(b) (a)の鳥瞰図

図16 CTOD 試験による HT80鋼のストレッチゾーン破面

さは0.077 mm と得られた。

5. おわりに

フラクトグラフィに関連した学問、技術の進歩には目ざましいものがあり、走査型電子顕微鏡の高分解能化、超音波顕微鏡、走査型トンネル顕微鏡の登場、破面解析に対する画像処理・パターン認識、さらにはフラクタル理論の応用と枚挙に暇がない。とくに、画像処理フラクトグラフィは目視観察では判読できない破面情報をも解読する手段として、また、破面観察に客観性と定量性を与える解析手段として大きな期待を集めている。将来的には、知識工学手法を取り入れることにより、破面自動診断システムへと発展する可能性を秘めており、今後の大きな発展が期待される。

参 考 文 献

- Metals Handbooks, 9th Edition, "Fractography", Vol. 9, ASM, (1987)
- 駒井謙治郎, 箕島弘二: 機械の研究, **40** (1988), 553, 660, 763.
- 箕島弘二, 長崎達夫, 駒井謙治郎: 機械学会論文集 A, **54** (1988), 1559.
- 飯田記子, 寺嶋広次: 京都大学大型計算センター広報, **20** (1987), 159.
- 田村秀行, 坂根茂幸, 富田文明, 横矢直和, 金子正秀, 坂上勝彦: 情報処理学会論文集, **23** (1982), 321.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 菊地 純, 西出 裕: 材料, **33** (1984), 1431.
- 駒井謙治郎, 木下 定, 菊地 純: 材料, **34** (1985), 1223.
- 電子技術研究所彙報: 特集: 画像処理アルゴリズム, **44-7**, 8 (1980).
- 長尾 真: 画像認識論, コロナ社 (1983).
- 柳沢 満, 古君 修: 画像処理による材料組織解析の現状, 日本鉄鋼協会, (1986), 109.
- 箕島弘二, 森田充弘, 駒井謙治郎: 機械学会講演概要集, No. 884-1 (1988-3), 132.
- 古君 修, 今中 誠, 伊藤 庸, 柳沢 満: 鉄と鋼, **71** (1985), 1655.
- 箕島弘二, 尾嶋正樹, 駒井謙治郎: 機械学会論文集 A, **54** (1988), 670.
- 箕島弘二, 長崎達夫, 駒井謙治郎: 機械学会論文集 A, **56** (1990), 1318.
- R. W. Gould and R. H. McSwain: ASTM STP 948, (1987), 263.
- R. M. Haralick, K. Shanmugam and I. Dinstein: IEEE Trans. System Man Cybernetics, SMC-3-6 (1973), 610.
- N. Otsu: Ibid., SMC-9-1 (1979), 62.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 菊地 純, 野口昌利, 金貴植: 機械学会論文集 A, **53** (1987), 1961.
- 小堀哲雄, 河野隆之, 篠崎志郎: 日経メカニカル, 1980. 9. 15 (1980), 82.
- 駒井謙治郎, 菊地 純: 材料, **34** (1985), 648.
- D. I. Barner and H. F. Silverman: IEEE Trans. Computer, C-21-2 (1972), 179.
- 駒井謙治郎, 野口昌利: 鉄と鋼, **72** (1986), 2125.
- 酒井信介, 森田英明, 岡村弘之, 高野太刀雄: 機械学会論文集 A, **54** (1988), 2061.
- K. Banerji and E. E. Underwood: Advances in Fracture Research, Proc. 6th Intern. Conf. Fracture, **2** (1984), 1371.
- K. Komai and K. Minoshima: Role of Fracture Mechanics in Modern Technology, Ed. by G. C. Sih et al., Elsevier Science Publishers B.V., (1987), 423.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 金 貴植: 材料, **36** (1987), 141.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 藤戸敏弘: 金属学会誌, **48** (1984), 307.
- 住吉英志, 高野太刀雄, 増田千利: 鉄と鋼, **77**

(1991),

29) T. Kobayashi and D. A. Shockey, Fracture: Interactions of Microstructure, Mechanisms and Mechanics, Metallurg. Soc. AIME, (1984), 447.

30) D. A. Shockey, D. R. Curran and L. Seaman: Development of Improved Dynamic Failure Models, Final Technical Report for U. S. Army Research Office, Contract No. DAAG-29-81-K-0123 (1985).

31) B. B. Mandelbrot, D. E. Passoja and A. J. Paullay: Nature, **308** (1984), 721.

32) E. E. Underwood and K. Banerji: Mater. Sci., **80** (1986), 1.

33) 住吉英志, 高野太刀雄, 石川圭介, 二瓶正俊: 機械学会論文集 A, **57** (1991), 2237.

34) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 森田宏光: 材料, **39** (1990), 1311.