画像処理技術を用いたシャルピ衝撃破面の ファセット破面単位の定量解析*

箕 島 弘 二^{*1}, 長 崎 達 夫^{*2}, 駒 井 謙 治 郎^{*1}

Quantitative Analysis of Facet Sizes of Cleavage Failures in Sharpy Impact Tests Using a Computer Image Processing Techihique

Kohji MINOSHIMA, Tatsuo NAGASAKI, and Kenjiro KOMAI

A personal-computer based software, which enables the quantitative analysis of facet sizes of cleavage failures in Sharpy impact tests by calculating three-dimensional shapes, was developed. This software is based upon a computer image processing and pattern recognition technique consisting of two parts; one to reconstruct the three-dimensional fracture surface topography from a stereo-pair of scanning electron micrographs, and the other to determine facet boundaries from the topography. By using this software, it became possible to measure the facet sizes quickly and with sufficient precision.

Key Words: Fracture, Fractography, Sharpy Impact Test, Cleavage Failures, Facet Size, Reconstruction of Three-dimensional Shape, Image Processing

1. 緒 言

シャルピ衝撃試験は、材料の靱性を評価するためによく用いられる。この試験から得られる情報は、力学的測定により得られる吸収エネルギー、マクロ写真観察から得られる脆性破面率、および走査形電子顕微鏡によるミクロ写真観察から得られるへき開破面単位（ファセット破面単位）などがある。とくにファセット破面単位の測定は、主に熟練者の手作業により破面写真上でファセット境界をトレースし、その面積から決定されてきたが、測定に非常に時間がかかるうえに、熟練者間においても結果に大きな個人差があった。これは1枚の写真という二次元情報のみではファセット境界とリバーパターンなどの区別が付きにくいと考えられる。また、1枚の破面写真からは撮影方向への投影面積や投影長さしかわからない。図1は異なるファセット長さを持つ二つの破面の断面図を模式的に表したものであるが、二次元情報からは、垂直方向の情報は得られず、水平方向の情報しか得られないので、ファセット長さは(1)も(2)も同じと評価される。

一方、著者らはさきに、コンピュータ画像処理技術を用いることにより、破面の二次元⁽¹⁾⁽²⁾あるいは三次元定量解析が迅速にかつ精度よく行えることを示した。そこで、ここではさきに超大形スカラあるいはベクトル計算機用に開発した三次元形状再構築技術^{(3)~(5)}を応用・改良することにより、シャルピ衝撃破面のファセット破面単位を三次元的にかつ客観的に定量評価することを試みた。これにより、フラクトグラフィ解析技術の発展を計り、併せて破壊機構解明による機械・構造物の安全性確保、さらには新素材開発のための有用な手段を提供しようとするものである。

2. システム概要

図2に、用いた画像処理システムの全体図を示す。図2中のイメージプロセッサ NEXUS 6400 (KRC 製) は 256 階調、512×480 画素のデジタル画像を 4 枚記

図 1 異なるファセット長さを持つ破面の断面図

* 昭和 63 年 3 月 18 日 関西支部第 63 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 10 月 5 日。

^{*1} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 学生員、京都大学大学院。

憶できるメモリーを内蔵しており、画像入出力や各種の画像処理（画像強調、エッジ検出、二値化など）を、ホストコンピュータとして GPDB を介して接続されているパーソナルコンピュータ SORD M 685 からのコマンド列により迅速に行うことができるものである。入力画像および画像処理中、処理後の画像は CRT 上で逐次観察できる。画像は走査形電子顕微鏡写真（SEM 写真）を、ITV カメラ（IF 8500）を用いて入力した。また、位置合わせなどの NEXUS 6400 では行えない処理はホストコンピュータで行った。ホストコンピュータのプログラム開発には FORTRAN 77 を用い、画像処理ソフトウェアパッケージ SPIDER⁽⁶⁾を適宜使用した。

3. 解析手法

3.1 三次元画像再構築 ファセット破面単位の解析手順を図 3 のフローチャートに示す。まず、前処理としては、1 組のステレオ写真の双方に対して濃度ヒストグラムの平坦化による画像強調を行った。この処理により撮影時および現像時に生じる両画像間の全体的な濃淡差がある程度改善される。三次元形状を求める処理は、2 枚の写真からなる 1 組のステレオ写真の、すなわち基準画像と試料をある角度（8°）傾けた傾斜画像間の同一点をみつける同一点探索処理と、その結果から得られる相対的な位置のずれから高さを計算する処理からなる^{(3)~(5)}。高さを計算する処理は単純な計算であるから、三次元形状の精度、あるいは計算時間は同一点探索処理に依存する。この処理は、基準画像上に窓領域を設定し、傾斜画像内に窓領域より大きな探索領域を設定する処理と、探索領域の中で窓領域と同一領域を探索する位置合わせ処理からなる。

従来、窓領域は高さを求める横断線上に当間隔に設定した^{(3)~(5)}。しかし、本研究のようにファセット破面単位を求める場合、高さ情報の必要な部分は、ファセット境界の部分のみであるため、この必要な部分の高さのみを求めることとした。しかし、二次元画像処理のみによりファセット境界を抽出することは不可能であるので、ここでは基準画像上のファセット境界、リバーパターンなどからなるエッジを抽出し、このエッジ曲線と高さを求めようとする横断線との交点の部分に窓領域を設定し高さを順次計算したファセット境界は、この高さ情報を基に後述する方法により抽出した。

また、エッジの部分は濃淡変化が大きいため、対応点探索にあたっての測度として計算速度の速い修正 SSDA 法 (Sequential Similarity Detection Algorithm)

m) を用いることができる利点を有しており⁽⁶⁾、しかも不要部分の高さ計算を省略することにより、従来スーパーコンピュータが必要であった三次元画像再構築がパーソナルコンピュータによっても可能となった。

なお、エッジの抽出は、 3×3 の一次微分オペレータによりエッジ強度を求めた後、二値化、細線化を施して求めた。また対応点探索にあたっての窓領域は 30×30 画素、探索領域は、 34 (試料回転軸と平行) $\times 72$ (試料回転軸に対して直角方向) 画素とした。

3.2 ファセット境界の同定 高さを求めた結果の模式図を図 4 ①に示す。この断面図はエッジ部の高さを求めたものであり、これはファセット境界だけでなく、リバーパターンなども含まれている。そこで、これらの中からファセット境界のみを判断して抽出しなければならない。抽出にあたっての基本的な考え方は、(1)ファセットはある長さ以上を有する、(2)ファセット境界ではある値以上の角度変化があるということである。図 4 ①~④で具体的な手順を示すと、つぎのようである。

Process A (①→②)：図 4 ①の断面図の隣り合う 2 点間の距離 l が、しきい値 $TH1$ より小さい場合、その片側の点を削除する。

図 2 システム全体図

図 3 フローチャート

Process B (②→③) : 図 4 ②の断面図の各点の前後の直線のなす角度 α が、しきい値 TH 2 より小さい場合、その点を削除する。

Process C (③→④) : 図 4 ③の断面図の隣り合う 2 点間の距離 l が、しきい値 TH 3 より小さい場合、その片側の点を削除する。

後述するしきい値固定法の場合は図 4 ④が、また、しきい値自動決定法の場合は図 4 ③が、コンピュータにより自動的にファセット境界と判断されたものである。

3.3 しきい値の決定法 しきい値の与え方は、あらかじめ人間が設定するしきい値固定法と、コンピュータにより自動的に決定するしきい値自動決定法の 2 とおりで行った。

3.3.1 しきい値固定法 TH 1~TH 3 の決定方法は以下のである。

TH 1: ステレオ写真より、手作業でファセット境界のみの高さを求めた断面図からファセット長さ l の累積分布を求めて、それより適当な値をあらかじめ与える。

TH 2: 人手によりステレオ写真からファセット境界を判断する場合、角度については約 10° 以上の変化があればファセット境界と判断したので TH 2 = 10° を採用した。

TH 3: 図 4 ③において、あまりにも小さな l が残ってしまった場合にそなえて、適当な値をあらかじめ与える。

3.3.2 しきい値自動決定法 TH 1, TH 2 の決定方法は以下のである。

TH 1: 1 破面について図 4 ①のような断面図を、36 箇所求め、すべての隣り合う 2 点間の距離 l の累積分布を求め、小さいほうから 1/3 の値を TH 1 とした。

TH 2: しきい値固定法と同じ考えにより 10° とした。

4. ファセット境界図からの人手によるファセット破面単位の決定

当画像処理により測定されたファセット破面単位が正しいかどうか判断するために、人手によりステレオ写真を用いて、破面を立体視して作成したファセット境界図(水平投影図)から、ファセット破面単位をつぎの 2 手法により決定した。

(1) 面積法 すべてのファセット面積の平均値を求め、ファセット形状を円と仮定して直径を求め、それをファセット破面単位とする。

(2) 横断線法 ファセット境界図に 70 本の横断線を引き、ファセット境界によって切断された部分の長さの平均値を求める。なお、この方法では、横断線が必ずしもファセットの最大幅の所を通らないので、(1)の面積法で求めた値よりも小さくなる。

5. 解析例

解析試料は HT 80, SGV 42, SS 41 の 3 種類で、一つの試料について 2 組のステレオ写真を解析した。表 1 に試料番号、材料名、試験温度、吸収エネルギーを示す。各材料の破面写真および入手により作製したファセット境界図を図 5~7 に示す。手作業でファセット境界のみの高さを求めた断面図を各破断面につき約 10 図求め、その断面図からファセット長さ l の累積分布を求めた結果を図 8 に示す。簡単のため HT 80 の破面を HT, SGV 42 の破面を SG, SS 41 の破面を SS と呼ぶこととする。

しきい値固定法の、しきい値 TH 1, TH 3 の値はつぎのように設定した。TH 1 は、しきい値固定法の場合ファセット長さ l の累積分布よりいずれの破面とも $l = 10$ 画素以下のものはないので 10 画素とし、TH 3 は HT と、SG, SS とは l の累積分布の急増点がかなり異なり、HT に対して TH 3 = 13 画素、SG, SS に対しては TH 3 = 20 画素が適していると予想して、TH 3 = 13 画素と、TH 3 = 20 画素の 2 とおりとした。

つぎに、実際にステレオ写真から、断面図を求め、

表 1 解析試料

Species	Material	Temperature	Absorbed Energy
HT1 HT2	HT80	-100 °C	15.7 N·m
SG1 SG2	SGV42	-100 °C	8.8 N·m
SS1 SS2	SS41	-196 °C	2.9 N·m

図 4 ファセット境界の同定

ファセット境界を判断した例を図9に示す。図9中の○印は図6(a)上のある断面について、自動的に位置合わせを行い高さを求めたものであり、この曲線にはファセット境界だけでなく、リバーパターンなども含まれている。また●印はステレオ写真より手作業でファセット境界のみの高さを求めた断面図であるが、両者の形状は比較的良好一致しており、画像処理手法により正しく高さを算出が行われていることがわかる。

また、図9中△印、▲印、□印はしきい値固定法により、断面図○印から自動的にファセット境界を判断

していったようすを示す。△印はTH1により、▲印はTH2により、また□印はTH3によりおのおの点が削除され、最終的にファセット境界と判断されたものである。手作業による●印と処理結果である□印を比べると、両者のファセット境界は比較的良好一致しており、ファセット境界が正しく判断されていることがわかる。

ファセット破面単位は、図9に示した1横断線についての処理を、一つの破面につき36横断線について行い、すべてのファセット長さの平均値を採用した。

(a)

(b)

図5 HTの破面写真と
ファセット境界図

(a)

(b)

図6 SSの破面写真と
ファセット境界図

(a)

(b)

図7 SGの破面写真と
ファセット境界図

(a) HT

(b) SS

(c) SG

図8 ファセット長さの累積分布

表 2 ファセット破面単位の測定結果 (単位 = μm)

		Manual Analysis				Image Processing					
		Calculation from Area		Calculation from Length		Fixed Threshold Method			Automatically Determined Threshold Method		
						TH1=10pixel TH2=10°			TH2=10°		
						TH3=20pixel		TH3=13pixel			
HT	HT1	13.7 ①	14.2 ①	11.0 ①	11.1 ①	18.4 ②	17.1 ①	14.7 ③	13.5 ①	12.8 (10pixel) ②	12.0 ①
	HT2	14.8 ②		11.1 ②		15.8 ①		12.3 ①		11.1 (10pixel) ①	
SS	SS1	19.2 ④	19.4 ③	15.4 ③	15.5 ②	18.6 ④	19.1 ③	15.0 ④	16.0 ③	16.5 (14pixel) ④	17.1 ②
	SS2	19.7 ⑤		15.6 ⑤		19.5 ⑥		17.1 ⑥		17.7 (14pixel) ⑤	
SG	SG1	20.2 ⑥	18.8 ②	15.7 ⑥	15.6 ③	18.8 ⑤	18.7 ②	14.6 ②	15.6 ②	16.0 (14pixel) ③	17.7 ③
	SG2	17.4 ③		15.4 ③		18.5 ③		16.5 ⑤		19.4 (17pixel) ⑥	

表 2 に、ファセット破面単位を、コンピュータが自動決定した結果を、人手により面積法、横断線法で求めた結果とともに示す。なお、しきい値自動決定法における TH 1 の値を表 2 中に併せて示す。また、ファセットサイズの小さいものから順に①, ②, ..., ⑥と番号を付している。しきい値は画素数で示し、10 画素 $\approx$ 3 μm , 13 画素 $\approx$ 4 μm , 20 画素 $\approx$ 6 μm に相当する。

なお、処理時間は、同一点探索処理が 20 s/1 点であり、36 横断線の処理を施す場合は、約 180 min/1 破面であり、スーパーコンピュータ (VP 200) を用いた場合に比べて⁽⁹⁾6 000 倍の処理時間となった。

6. 考 察

まず、しきい値固定法についてみると、表 2 に示したように人手により求めた結果では、HT と SG, SS の値にかなり差があるにもかかわらず、しきい値固定法の TH 3=20 画素で行った場合は HT と SG, SS の値にあまり差がない。これは HT のファセット長さ l の累積分布のグラフ [図 8 (a)] からわかるように、 $l=20$ 画素では累積値はすでに立ち上がっているためである。すなわち実際にはファセット境界であるのに、TH 3 が大きすぎたため削除されてしまったファセット境界が生じて、ファセット長さ l の平均値が実際より大きな値となり SG, SS の値に漸近したものである。

このように、すべての破面について、同一の TH 1, TH 3 で処理することはできない。しかし解析する破面のファセット長さ l の累積分布についての予備知識

図 9 ファセット境界同定の例

があれば、例えばファセット粒径の小さい HT には TH 3=13 画素、ファセット粒径の大きい SG, SS には TH 3=20 画素というようにその破面に適した TH 1, TH 3 を設定可能であり、これにより比較的正確にファセット境界が判断できることになる。

つぎに、しきい値自動決定法についてみると、累積分布の小さいほうから $1/3$ の値に TH 1 を等しくするという決定法により、今回解析した 3 試料については、表 2 に示したような良好な結果を得た。これは、検出されたエッジの約 $1/3$ 以下の部分にリバーパターンなどのノイズが含まれていたためであると考えられる。しかしながら、ノイズの含まれる割合は破面によってかなり異なると予想されるため、この決定法を用いて他の破面についても良好な結果が得られるかどうかは

表 3 コンピュータ自動測定結果

	Manual Analysis	Image Processing	α	$\frac{l}{l_0}$	Manual Analysis $\times \frac{l}{l_0}$
HT	11.1 μ m ①	13.5 μ m ①	28.8° ①	1.11 ①	12.3 μ m ①
SS	15.5 μ m ②	19.1 μ m ③	39.2° ③	1.20 ③	18.6 μ m ③
SG	15.6 μ m ③	18.7 μ m ②	32.1° ②	1.13 ②	17.6 μ m ②

不明であり、合理的な TH1 の決定方法については検討の余地がある。

以上の考察により、コンピュータ自動測定法としては、しきい値固定法が適しており本実験の解析結果としては、表 2 のしきい値固定法の網目部分、つまり HT に対しては TH 3=13 画素、SG, SS に対しては TH 3=20 画素としたものを採用することとした。なお表 2 で面積法と横断線法で求めた人手によるファセット破面単位の大きさの順位が、SG と SS で逆転しているが、これは両破面のファセットアスペクト比が異なったためと考えられる。表 3 に求めたファセット破面単位の最終結果を示す。また表 3 には併せて横断線法で手作業により求めた結果と、この条件（しきい値固定法で HT に対して TH 3=13 画素、SG, SS に対して TH 3=20 画素）下で、コンピュータにより自動的に測定された 36 横断面中のすべてのファセット境界の角度変化の平均値 α 、ファセット長さ l の総和をその水平方向の投影長さの総和で割った値 l/l_0 および手作業で求めた値と l/l_0 の積を示す。表 3 において、コンピュータ自動測定で求めた値と、手作業により求めた値を比較すると、手作業で求めた結果のほうが小さい結果となっている。これは手作業で求めたものは、ファセット断面の水平方向の投影長さのみで評価し、垂直方向の情報を考慮していないためである。一方、表 3 中に手作業で求めた値と l/l_0 の積を示すが、この値とコンピュータ自動測定で求めた値とはよく一致し

ている。また $\alpha, l/l_0$ の値はコンピュータ自動測定によるファセット破面単位とほぼ大小関係が合い、破面の評価に使える可能性を有している。また、これらの値は従来の方法では得られず、三次元画像処理技術を用いた当解析法により初めて得ることのできたものである。

7. 結 言

コンピュータ画像処理を用いた三次元形状再構築技術を用いて、シャルピ衝撃破面のへき開破面（ファセット破面）単位を測定するソフトウェアを開発した。得られた結果は以下のである。

(1) 同一点探索をエッジの部分のみについて行うアルゴリズムを用いることにより、パーソナルコンピュータでも三次元形状再構築を十分実用可能な時間で求めることができた。

(2) ファセット境界部の自動判断は、あらかじめ人手によるファセット長さの累積分布を予備知識として用いる、しきい値固定法により良好な結果を得た。

(3) 以上のアルゴリズムを用いた本ソフトウェアにより求めたファセット破面単位は、人手による結果とほぼ一致し、十分客観性のある結果が得られた。

本研究は、日本鉄鋼協会特定基礎研究会、画像解析による材料評価部会の破面解析分科会共通試験の一部として行われたものである。また、本研究の一部には文部省科学研究費総合研究 A (62302024) を使用した。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 駒井・ほか 3 名, 材料, 33-374 (昭 59), 1431.
- (2) 箕島・ほか 2 名, 機論, 54-500, A (昭 63), 670.
- (3) 駒井・菊地, 材料, 34-381 (昭 60), 648.
- (4) 駒井・野口, 鉄と鋼, 72-15 (昭 61), 2125.
- (5) 駒井・ほか 4 名, 機論, 53-494, A (昭 62), 1961.
- (6) 田村・ほか 5 名, 情報処理学会論文誌, 23-3 (昭 57), 321.

討 論

〔質問〕 江原 隆一郎

〔三菱重工業(株)広島研究所〕

ファセット破面単位の定量解析において鋼種の相違による難易はなかったか。

〔回答〕 画像処理を用いた定量解析において、鋼種の相異による解析の難易に最も影響を与えるものは、三次元形状再構築の部分である。すなわち、破面により三次元形状再構築の難易が異なることが知られている⁽⁵⁾。しかし、本研究においてはファセット境界、リバーパターンなどからなるエッジを抽出し、その濃淡

変化の大きいエッジ部分の高さのみを計算するアルゴリズムを採用したため、鋼種を問わず SSDA 法を用いても容易に三次元形状を再構築することが可能であった。一方、人手による解析において水平投影写真のみを用いた場合は、焼きもどし組織を有する HT 80 鋼のファセット境界を判断するほうが他の 2 鋼種の場合に比べて困難であったが、ステレオ写真を立体視しながら判断する手法を用いることにより、HT 80 鋼においても比較的容易にファセット境界を判別することができた。

54 巻 502 号, A 編 (昭 63-6) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
岸田路也ほか	1214	右	17~18	α 線膨張係数	α : 線膨張係数