

© 1991 ISIJ

/////////
 論 文
 ///////////

へき開ファセット破面領域の3次元解析 アルゴリズムの開発とその鉄鋼材料の ぜい性破面解析への応用

住吉 英志*・高野太刀雄*²・増田 千利*³

Algorithm to 3-dimensional Analysis of Cleavage Facet and Its Application for Brittle Fracture Surface of Steels

Hideshi SUMIYOSHI, Tachio TAKANO and Chitoshi MASUDA

Synopsis:

Computer image processing technology was applied to cleavage fracture surface analysis and an algorithm for the estimation of 3-dimensional cleavage facet boundaries and 3-dimensional facet areas were developed. An angle $\alpha_{i,j}$ between relative normal vectors of a mesh plane $M_{i,j}$ and the adjacent mesh plane $M_{i+1,j}$ along X axis was calculated and $\alpha_{i,j}$ was compared to a threshold angle α_{th} . If $\alpha_{i,j}$ is larger than α_{th} and $\alpha_{i+1,j}$ is smaller than α_{th} , the mesh plane $M_{i+1,j}$ was decided to be the facet boundary. The same calculation was continued along both X- and Y-axes to obtain facet numbers contained in the analyzed area. After the estimation of facet boundaries, 3-dimensional facet areas were calculated from the 2-dimensional facet areas divided by $\cos \beta_{i,j}$, which is the angle between average normal vector of a facet and vertical vector. The algorithm developed in this study was applied to analyze the cleavage fracture surfaces of mild steel and HT80 steel and the effect of the threshold angle on the estimated facet numbers, distribution of the values of α and the 3-dimensional facet areas were discussed. The developed method is very useful for analyzing the cleavage facet size and for discussing a relationship between cleavage fracture and microstructures of steels, such as ferrite and the prior austenite grain sizes.

Key words: steels; brittle fracture surface; cleavage facet; image processing; three-dimensional analysis; relative normal vector; personal computer.

1. 緒 言

フェライト鋼及び調質鋼の低温におけるシャルピー破面には、へき開あるいは擬へき開破面が認められ、特に前者にはリバーパターン等が認められることが知られている。これまで明瞭なへき開ファセットの定義はされていないが、とりあえず平均的な面方位がそろった領域を区分してファセット破面単位と定義すると、その2次元的な寸法、 ρ'_{2D} とシャルピー試験におけるぜい性/延性遷移温度との間に良い相関関係が成り立つこと、また ρ'_{2D} は結晶粒径の2~3倍程度となることが報告¹⁾されている。通常、ファセット破面単位の測定は2次元の破面写真上で熟練者が行っているが、破壊の進展は材料の

組織などの影響を受けるため破面は3次元的に変化する。特に調質鋼など金属組織が複雑な場合には、2次元的な観察からだけでは破壊様式に対応した解析は困難といえる。したがって3次元の検討が必要になるが、これにはコンピューターを利用した画像解析が有用であること²⁾は良く知られている。

本研究では、ぜい性破面を定量解析するために3次元形状をコンピューターを用いて解析し、ファセット破面の方位差を利用した境界決定法及びファセットの3次元の面積計算法に関するアルゴリズムを開発し、それを代表的なフェライト・パーライト鋼及び調質鋼のぜい性破面に適用し、その有用性を検討することを目的にした。

平成2年3月8日受付 (Received Mar. 8, 1990)

* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

*² 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

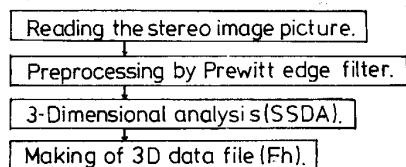
*³ 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals)

2. 解析方法

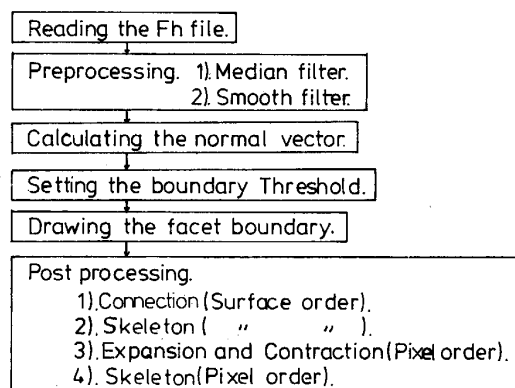
2.1 3次元破面高さ計算

Fig. 1 はへき開ファセット破面単位評価法確立のために行った解析全体のフローを示したもので、大別すると三つに分けられる。第1は3次元破面高さ計算、第2は

1. Calculation of fracture surface topography.



2. Determination of facet boundary.



3. Estimation the 3D-facet size.

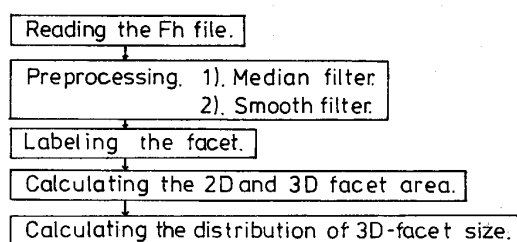


Fig. 1. Flow of 3-dimensional image analysis for cleavage fracture facet.

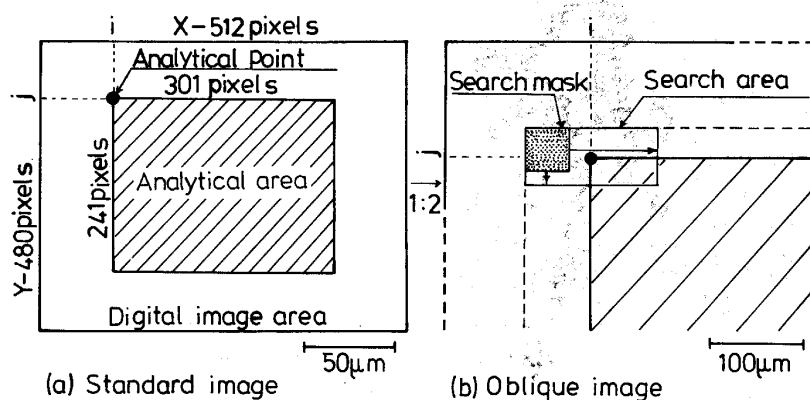


Fig. 2. Template matching for 3-dimensional topography.

へき開ファセットの境界決定、第3はへき開ファセット破面の3次元面積計算アルゴリズムである。ここでは第1の項目について述べるが、破面の3次元高さの計算を行い、以下の解析の基本データを得ることが目的である。まず、SEMを用いてビームに直角な面に対し傾斜角が $\theta=0$ 、8度となる条件で2枚のステレオ写真を撮影し、この写真をマクロスタンドにセットし、パーソナルコンピュータを使用して、CCDカメラからA/D変換器で 512×480 画素、256階調の画像を取り込みディスクに記憶させた。ステレオ画像の同一点高さ計算処理領域は、Fig. 2に示すようにほぼ写真中央で、横301画素、縦241画素とし、この領域を6画素間隔で 51×41 点解析した。なお、1画素は破面上で $0.43 \mu\text{m}$ 、解析点の間隔は約 $2.6 \mu\text{m}$ となる。傾斜角 $\theta=0$ 度の基準画像及び $\theta=8$ 度の参照画像上において、同一点の認識の判断に用いる探索マスクはX、Y方向について31画素の正方マスクとし、探索領域は参照画像の解析点を中心として、X方向に ± 45 画素、Y方向に ± 19 画素の小領域とした。計算された結果は高さファイルに記憶させて、以下の計算の時にはそれぞれデータを読みだして行った。

ここで用いた解析方法は、SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm³⁾)で、探索マスクや解析領域など一部修正して使用した。なおこの手法は1点当たりの計算時間が短いことが特徴で、今回の解析では1点当たりの計算時間は約4sであった。

2.2 ファセット境界決定アルゴリズム

Fig. 3にファセット境界決定法の考え方を示す。まず3次元解析後計算された破面形状の一部を切り出して示すが、図上でA、B、Cと記した面におけるファセット境界を決定した。その基本的方法は、隣接するA、B及びB、C面間の法線ベクトルのなす角度 α を求め、それと限界角度 α_{th} との関係が式(1)を満足する場合に、面Bをファセット境界と決定した。なお各面の法線

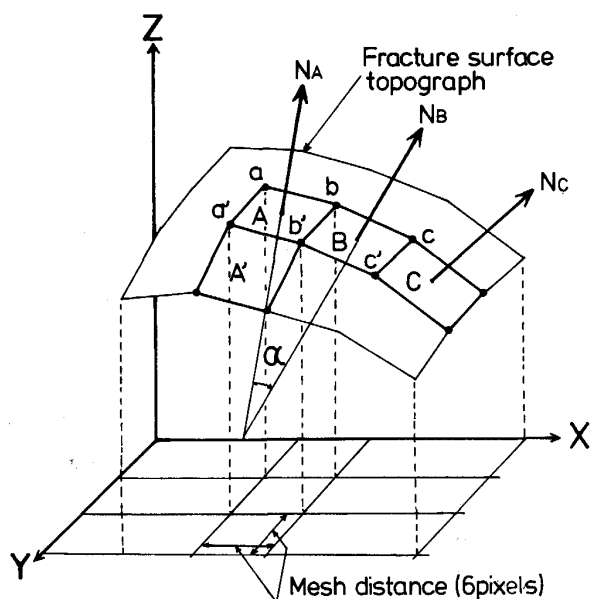


Fig. 3. Illustration of the calculation of the angle between normal vectors of adjacent meshes.

ベクトルの計算と、隣接する面と法線ベクトルのなす角度 α は数学の公式から(2), (3)を用いた.

$$\alpha_A \geq \alpha_{th} \text{ and } \alpha_B < \alpha_{th} \dots\dots\dots (1)$$

$$|N_A = \vec{ba} \times \vec{aa'}| \dots\dots\dots (2)$$

$$\cos \alpha_A = \frac{|N_A| \cdot |N_B|}{||N_A|| \cdot ||N_B||} \dots\dots\dots (3)$$

ここでは図中のA面に示す3角形 aba' において, ベクトル $\vec{ba}$, $\vec{aa'}$ の2辺を用いて得られるベクトルでA面の法線ベクトルを代表させた. 以上の計算を X, Y 方向に行いファセット境界格子を求めた. 決定したファ

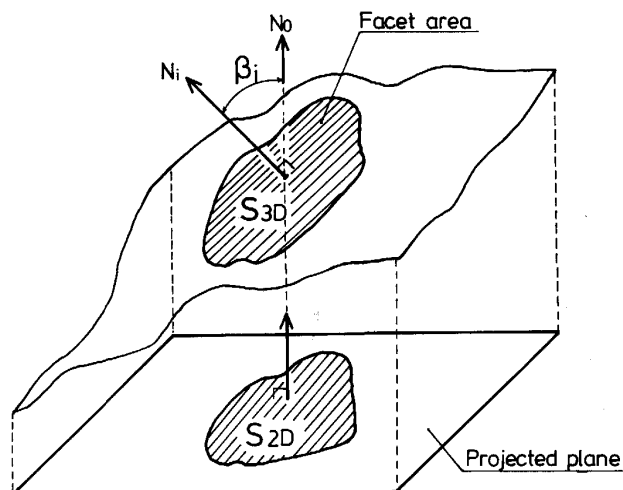


Fig. 4. Illustration of the calculation of 3-dimensional facet area.

セット境界は 6×6 画素の大きさを持っていることから, 以下の3次元ファセット面積計算の誤差が大きくなることや不連続面が生じるため, 6×6 画素の面単位での連結と細線化, 及び画素単位の膨張・収縮と細線化を行った. その後連続した境界面で囲まれたファセットを収束ファセットとし, その数 n を求めた.

2.3 3次元ファセット面積評価アルゴリズム

2.1 で求めた高さファイルからデータを読みだし, 2.2 において決定した2次元面上に投影したファセット境界内に含まれる面積 S_{2Di} を計算し, Fig. 4 に示すような法線ベクトル $|N_i|$ と SEM のビーム方向の基準ベクトル $|N_0|$ となす角度 β_i を計算し, 式(4), (5)から3次元面積 S_{3Di} を求めた. なお $|N_i|$ は, ファセット

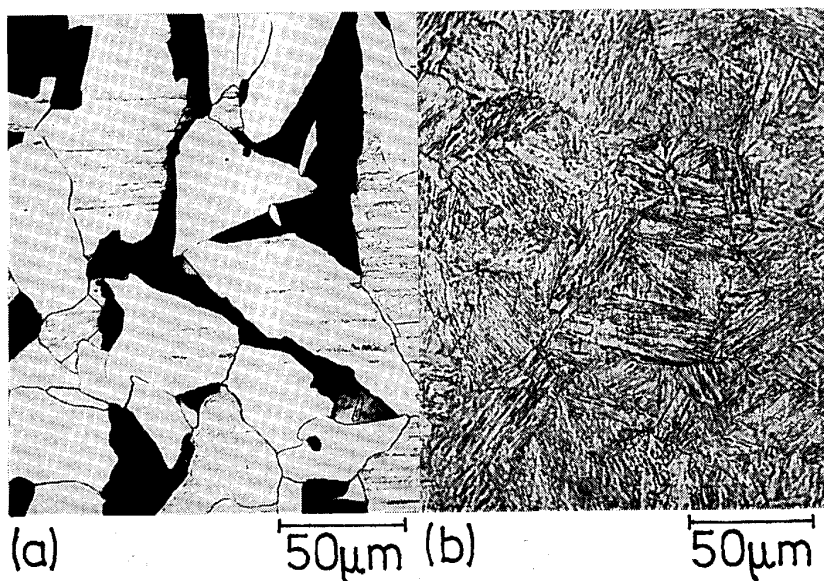


Photo. 1. Microstructures for (a) mild steel and (b) HT80 steel.

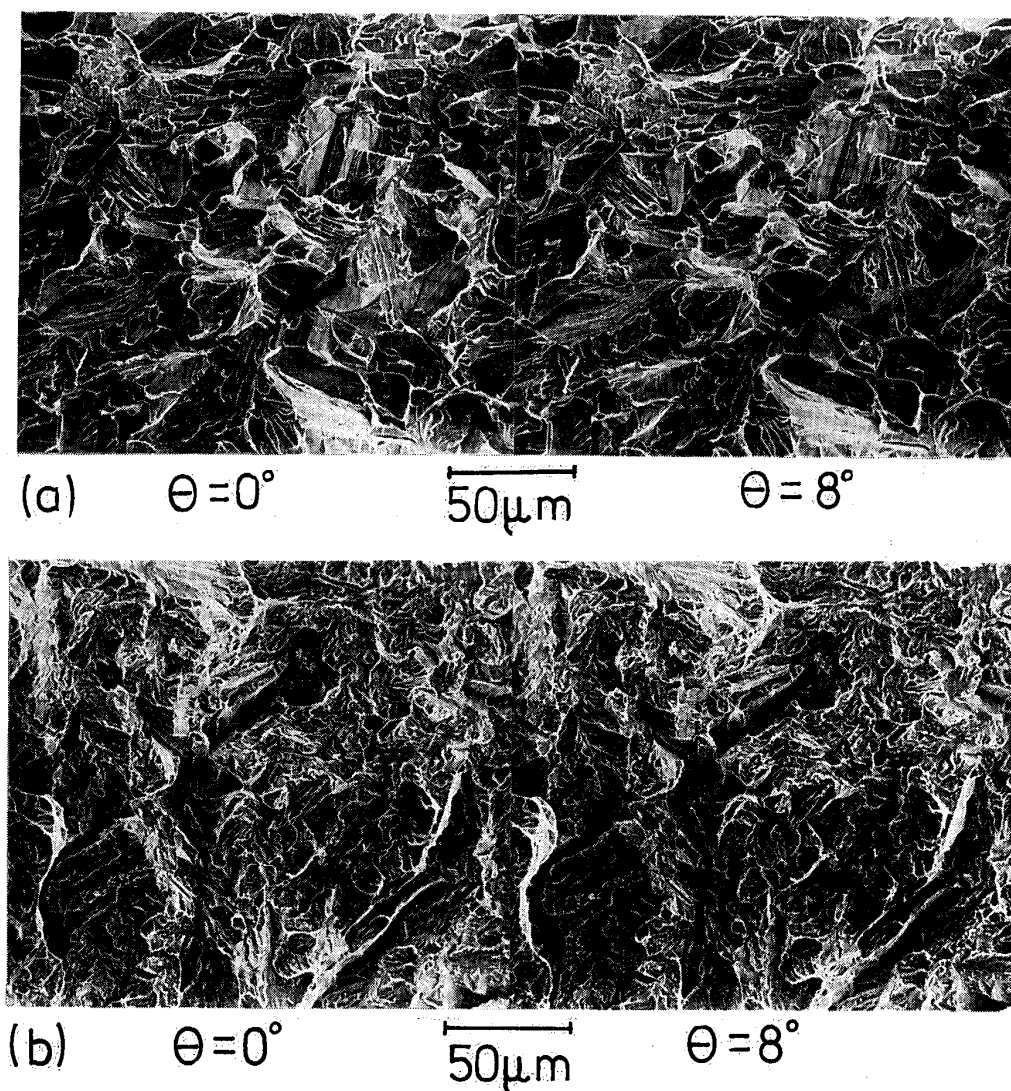


Photo. 2. Stereo fractographs for (a) mild steel and (b) HT80 steel.

境界内に含まれる格子が $|N_0|$ とす角度の単純平均とした。

$$\cos \beta_i = \frac{|N_0| \cdot |N_i|}{||N_0|| \cdot ||N_i||} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$S_{3Di} = S_{2Di} / \cos \beta_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho_{3Di} = 2\sqrt{S_{3Di}/\pi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R = \Sigma S_{3Di} / \Sigma S_{2Di} \quad \dots\dots\dots (7)$$

計算された S_{3Di} から円相当にしたときの直径 ρ_{3Di} を式(6)より求めた。なお S_{2Di} の計算では幅1画素の境界線は除いている。また解析領域全体における2次元及び3次元面積を求め、式(7)からそれらの比 R を計算した。

3. 解 析 例

供試材は、構造用圧延軟鋼板 SS41 鋼 (以下軟鋼と略

す) 及び高張力鋼 HT80 鋼である。その組織写真を Photo. 1 に示す。軟鋼はフェライト・パーライト組織であり、HT80 鋼は焼もどしマルテンサイト組織である。軟鋼のフェライト粒径は約 $33 \mu\text{m}$ で、パーライト組織の大きさはばらつきが大きい。また HT80 鋼の旧オーステナイト粒径は約 $23 \mu\text{m}$ であった。Photo. 2 に軟鋼及び HT80 鋼をそれぞれ -196°C 及び -100°C でシャルピー衝撃試験を実施して得られた破面のステレオ SEM 写真を示す。また目視により決めたファセット境界を Fig. 5 に示すが、ファセット寸法は軟鋼の方が HT80 鋼に比べて大きい傾向にある。なお今回用いた破面写真は、鉄鋼協会の特定基礎研究会「画像処理の材料組織への応用」破面分科会²⁾の共通試料であり、以下の解析結果は研究会が終了してから得られたものである。

Fig. 6 に軟鋼及び HT80 鋼の Fig. 5 に示す解析領域

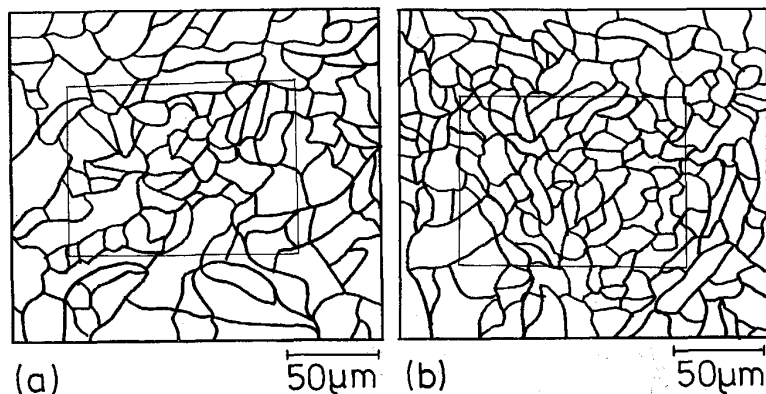


Fig. 5. Examples of facet boundaries decided by manual for (a) mild steel and (b) HT80 steel as shown in Photo. 2.

内に対応した3次元形状を, Fig. 7 に決定したファセット境界を2次元投影面上に表示した結果を示す. Fig. 6 では, Fig. 1 の3. で示したメディアンとスムーズフィルター処理により, リバーパターンなどの細かな特徴は除かれている. これは HT80 鋼においても同様である. 軟鋼については破面全体がかなり凸凹が激しく, HT80 鋼では平坦な面が多いが, それらの面間では段差が認められている. 計算から求めたファセット境界で, Fig. 5 の目視の結果と比較的一致している部分は, サイズが大きいファセットである.

Table 1 にファセット破面単位のステレオ画像解析結果と目視結果, 及び試験条件と材料の機械的性質なども併せて示す. まず両鋼とも同一破面内で得られた3組のステレオ写真について解析を行っているが, それらを Code で区分した. ファセット破面単位については, 3次元及び2次元の円相当とした直径 ρ_{3D} 及び ρ_{2D} で表した. また, Manual はステレオ写真を観察してファセット境界を目視で決めた後, 解析内の円相当直径 ρ'_{2D} で表示した. 更に, 結晶粒径は Photo. 1 上で求めたものである. 画像処理による解析領域内の収束ファセット数 n , 及び R 値も併せて示した. Table 1 から ρ_{3D} は, 軟鋼と HT80 鋼でそれぞれ $13.9\mu\text{m}$, $13.4\mu\text{m}$ で顕著な差はない. さらに ρ_{3D} の値は軟鋼が HT80 鋼に比べばらつきが大きい. また, 結晶粒径 d との比は軟鋼で約 42%, HT80 鋼では約 60% である. ρ_{2D} は両鋼で顕著な差はなく, ρ_{2D} と ρ'_{2D} との比は軟鋼で 29%, HT80 鋼で 23% それぞれ小さい. 最後に式(7)から計算される R は軟鋼で約 1.3 倍, HT80 鋼で約 1.2 倍である.

4. 考 察

4.1 下限値 α_{th} の影響

ファセット境界決定に用いた隣接するメッシュの法線ベクトルのなす角度 α の境界条件として, 式(3)を用いたが, α_{th} のファセット境界決定に及ぼす影響につい

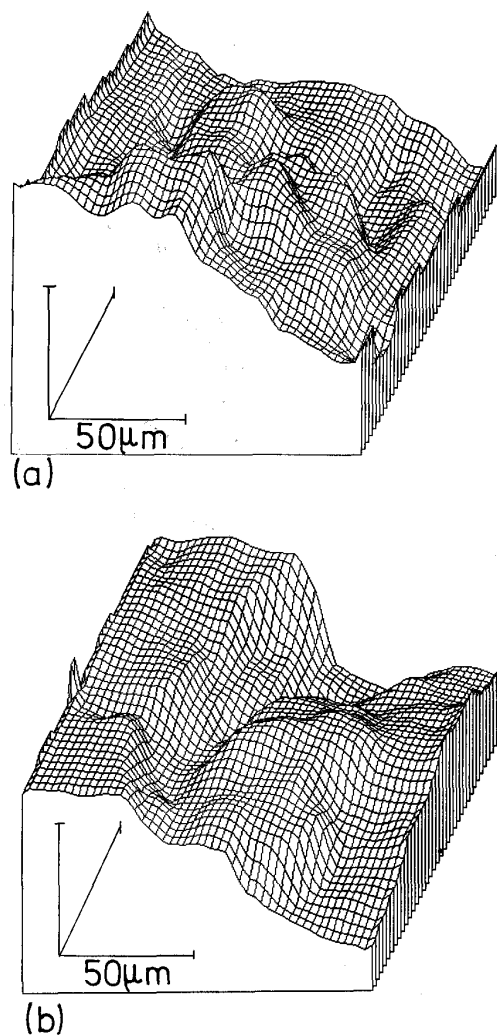


Fig. 6. Bird's eye views of fracture surface for (a) mild steel and (b) HT80 steel as shown in Photo. 2.

て検討する. ここでは α_{th} を 10 度から 20 度の間で 2 度ずつ変えたとき得られる収束ファセット数 n , 及び Fig. 8 の図中太線で囲った収束ファセット面積と全面積の比 R' を求めた. $\alpha_{th} = 12$ 度の結果はすでに Fig. 7 に

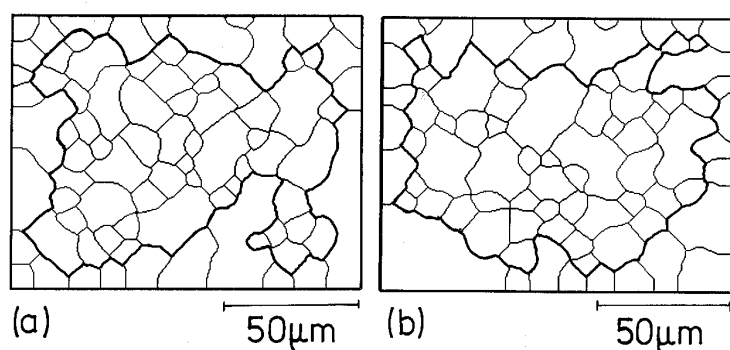


Fig. 7. Examples of facet boundaries decided by image analysis for (a) mild steel and (b) HT80 steel as shown in Photo. 2.

Table 1. Analytical results for cleavage facet sizes.

Material	Code	Facet size ρ (μm)			Area ratio S_{3D}/S_{2D}	Facet number	Grain size (μm)	Charpy energy ($\text{N}\cdot\text{m}$)	Test temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Vickers hardness (HV)	Structure
		Analysis $\alpha_{th} = 12^{\circ}$		Manual							
		3-dimensional ρ_{3D}	2-dimensional ρ_{2D}	ρ'_{2D}							
Mild steel	S1	14.29	12.31	16.39	1.37	56	32.97	2.9	−196	149	Ferrite pearlite
	S2	13.95	12.54	19.56	1.25	51					
	S3	13.32	11.91	15.78	1.27	56					
	Mean	13.85	12.25	17.24	1.30	54.3					
HT80	H1	13.55	12.18	15.76	1.24	49	22.83	15.7	−100	286	Tempered martensite
	H2	13.37	12.21	17.41	1.18	51					
	H3	13.43	12.18	14.34	1.23	51					
	Mean	13.43	12.16	15.84	1.22	50.3					

示したので、ここでは HT80 鋼において α_{th} が 10 度及び 20 度での結果についてのみ Fig. 8 に示した。 $\alpha_{th} = 10$ 度では $\alpha_{th} = 12$ 度のものと比べると、一つ一つは細かいファセットに区分されるが、収束しない大きな領域が残る。一方 $\alpha_{th} = 20$ 度では、全体にファセットの寸法が大きくなり、不連続な境界線が多数残る。これらに対し $\alpha_{th} = 12$ 度では、比較的きれいにファセット境界が決定されている。

Fig. 9 は横軸に α_{th} 、縦軸に解析領域内において決定した収束ファセット数 n を示した。これから軟鋼では α_{th} が 12 から 14 度で n が最大になる傾向があるのに対し、HT80 鋼では α_{th} が増すと n は直線的に減少し軟鋼とは傾向が異なる。また R' 値を同一図上にプロット

した。HT80 鋼では α_{th} が 12 度から 16 度の範囲ではほぼ一定になるのに対して、軟鋼では $\alpha_{th} = 12$ 度で R' は最大となる。すなわち n は α_{th} の増大とともに減少するが、 $\alpha_{th} = 12$ 度で R' が最大となる。以上、Fig. 8, 9 から α_{th} の最適値は 12~16 度の範囲内と推定できるが、今回の解析では R' が最大となる $\alpha_{th} = 12$ 度が最適値と考えられる。

4.2 法線ベクトル角度差 α の分布

Fig. 10 に軟鋼の解析領域内における法線ベクトル角度の差 α の分布を示す。縦軸はメッシュ数 m を対数で、横軸を 10 度おきに取った α 値で示した。なお図中には、X, Y 方向に取った場合のデータを記号分けして表示した。これから、 α が 0 度から約 30 度の範囲に解析領域

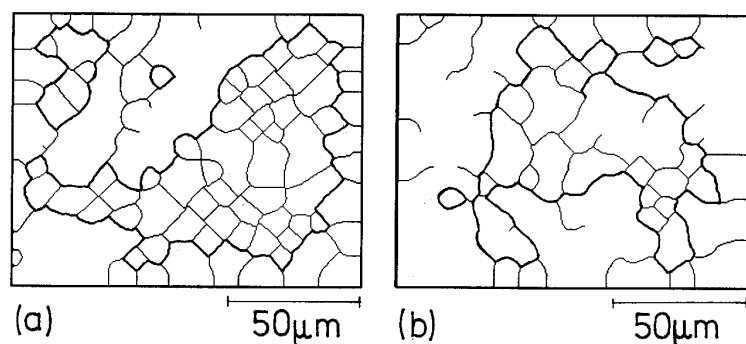


Fig. 8. Examples of facet boundaries decided at the threshold angles for $\alpha_{th} = 10$ degrees and (b) $\alpha_{th} = 20$ degrees.

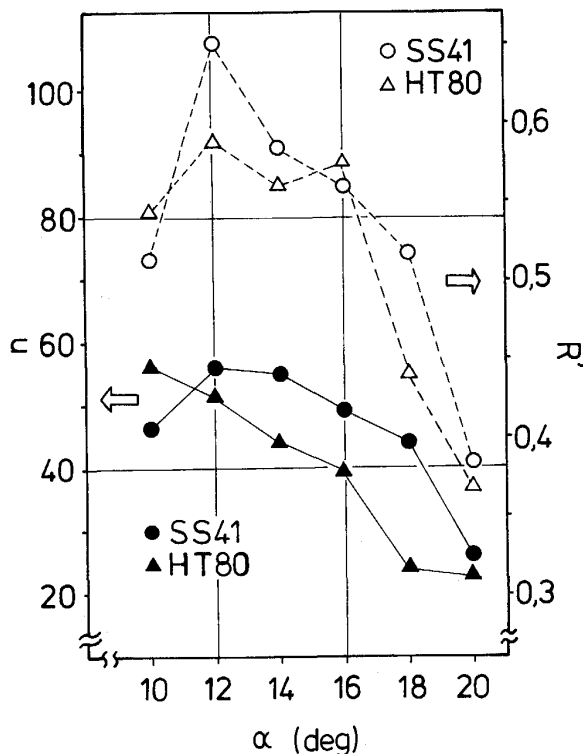


Fig. 9. Variation of facet number, n and ratio of closed facet area to total area, R' , to the threshold angle, α_{th} .

の約 80% 以上のメッシュが含まれることがわかる。基本的に両鋼種とも m は α が増すと直線的に減少する傾向にあるが、注意深くみると図中実験で示す軟鋼では、 X 方向と Y 方向の関係が 50 度で逆転しており、 α が増すほどその傾向は強くなっている。これは少なくとも急角度で傾斜した面が X , Y 方向で差があることを意味している。Photo. 2, 3 においてき裂の成長方向と破面観察方向とが不明ではあるが、き裂と材料の圧延方向などとの関係が明らかになると、材料の異方性と破壊が生じる優先的方向との関係が検討できると考えられる。

4.3 3次元へき開破面の評価

今回の3次元解析における結果の特徴として従来目視による方法と異なる点は、へき開破面の3次元的なファセット寸法や面積比が求められたことにある。そこで、3次元的なデータと2次元的なデータとの関係を検討する。Fig. 11 はそれぞれ軟鋼、HT80 鋼の2次元及び3次元におけるファセット直径の分布を表したものである。 ρ_{3D} と ρ_{2D} のピークは両鋼種とも 8~10 μm で、30 μm をこえるものが ρ_{3D} で見られるが、全体として大きな変化はなく類似した分布をしている。2次元的には、ファセットサイズの平均値は約 12.3 μm であるのに対し、3次元の寸法は約 13.7 μm と大きくなっている。

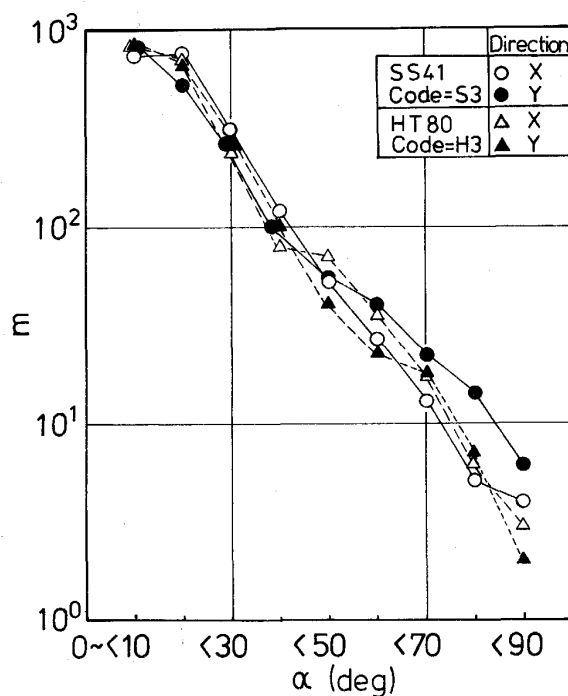


Fig. 10. Relationship between the mesh number, m and the angle of normal vector, α between adjacent meshes.

このことは当然のことであるが、従来の目視による方法では解析不可能であったことで、Table 1 で示す ρ'_{2D} の鋼種間での大小関係が、 ρ_{3D} では逆転している点も含め、3次元解析による方法で初めて明らかになったことである。

また、 R 値は Table 1 にまとめて示してあるが、両鋼種とも観察視野による値が異なり、場所によるばらつきがあること、さらに平均的な R 値は軟鋼の方が、HT80 鋼に比べて大きいことがわかる。 R 値には二つの意味があり、一つは破面全体の傾斜も含めた巨視的な凹凸が大きい場合、二つは破面の巨視的な凹凸は小さくても細かな凹凸が多い場合である。大別すると前者は軟鋼の場合に、後者は HT80 鋼の場合に該当する可能性がある。

4.4 今後の課題

今回提案したぜい性破面に現れるへき開破面単位の設定法は、従来行われていた目視による方法では行えない3次元情報が得られることが大きな特徴である。また、判断の基準は隣接する破面単位間における法線ベクトルの角度差のみであり、非常に明快であるといえる。さらに、決定した破面単位個々の3次元面積が計算できるため、フェライト結晶粒径、パーライト組織の寸法あるいは

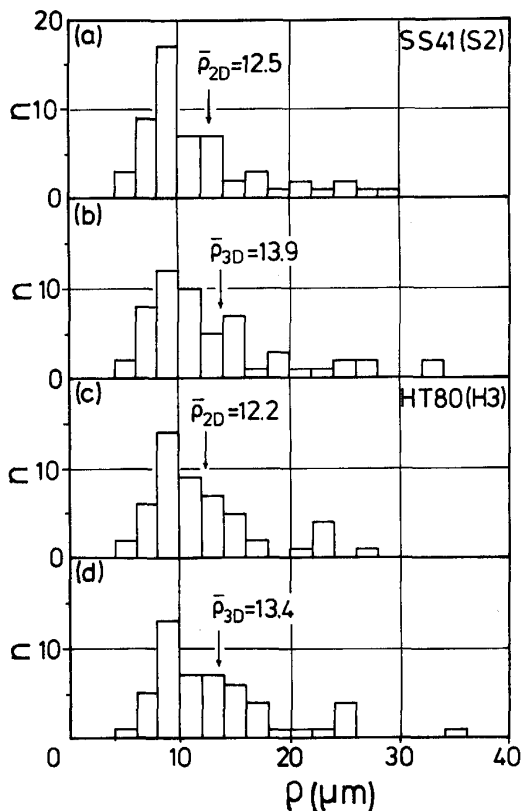


Fig. 11. Distribution of facet diameter calculated for 2-dimensional or 3-dimensional scales.

は旧オーステナイト結晶粒径、焼もどしマルテンサイト組織の亜結晶粒径など、金属組織との対応関係が定量的に解析できる可能性が開けたといえる。

今回解析した軟鋼、HT80 鋼の場合には、破面写真の倍率、ステレオ写真撮影の傾斜角度など一定であり、それらを変えたデータについては検討できなかったが、破面の特徴に対応した最適の写真倍率や傾斜角度、また、 α_{th} の組織及び材料依存性についても今後検討する必要がある。さらに今回提案した解析手法により、パーソナルコンピュータクラスでも十分解析できることが明らかになった。このため提案したアルゴリズムで3次元の解析精度や、メッシュサイズ、後処理等の精度への影響など定量的に明らかにすることが必要であろう。

5. 結 論

(1) 破面のステレオ写真を基に3次元形状を求め、そ

の内部を細かくメッシュに区分し、隣接するメッシュ間の法線ベクトルの角度差を計算し、これが境界条件を満足する場合にファセット境界とするアルゴリズムを開発した。これを解析領域内で X, Y 方向に適用し、連続したファセット境界を求めることができた。

(2) 個々のファセット破面単位の2次元面積と、破面の平均的な法線ベクトルと垂線とのなす角度から3次元面積を求め、この2次元面積と3次元面積との比から破面の巨視的な形状を解析するパラメーターを提案した。

(3) 軟鋼及び HT80 鋼のぜい性破面に開発したアルゴリズムを適用し、隣接するメッシュ間の法線ベクトルの相対角度差のしきい値 α_{th} を 10 から 20 度の範囲で調べた結果、 $\alpha_{th} = 12 \sim 16$ 度で最適値が存在すること、 $\alpha_{th} = 12$ 度で解析領域内で連続したファセット数 n が最大、あるいは収束するファセットの2次元面積が最大となることがわかった。また、 α_{th} の組織及び材料依存性の可能性については今後の課題である。

(4) ファセットの3次元円相当径の分布は、軟鋼及び HT80 鋼で、それぞれ約 5 から 33 μm 、及び 5 から 35 μm の範囲でかなりばらついていて、また、2次元と3次元の円相当径は類似した分布であった。3次元のファセット円相当径は、2次元のそれに比べ軟鋼及び HT80 鋼で、それぞれ約 13 及び 10% 大きいことが解明された。また、2次元的なファセット円相当径は解析結果の方が目視による結果に比べて小さかった。

(5) 解析領域内における各メッシュの隣接するメッシュとのなす角度 α の分布から、 α が 30 度以下のメッシュが約 80% 以上も占めていた。また、軟鋼では X, Y 方向で α の分布が 50 度で逆転し、異方性が認められた。これは材料組織の影響によると考えられ、今後圧延方向の異なる場合にき裂の成長方向と組織との関連が検討できる可能性があることを指摘した。

文 献

- 1) 寺崎富久長, 大谷泰夫: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 1067
- 2) 金属材料の新しい画像解析技術 (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編) (1989), p. 65
- 3) Subroutine Package for Image Data Enhancement and Recognition (SPIDER) USER'S MANUAL (1982), II-13 [Joint System Development Corp., Tokyo]