

© 1985 ISIJ

# テクスチャー解析を用いたマルテンサイト 粒度および破面単位の定量化

.....  
論 文  
.....

古君 修\*・今中 誠\*・伊藤 庸\*<sup>2</sup>・柳沢 満\*<sup>3</sup>

## Measurement of Bundle Sizes of Martensite Structures and Facet Sizes of Brittle Fracture Surfaces by Applying a Technique of Texture Analysis

Osamu FURUKIMI, Makoto IMANAKA, Yō ITŌ and Mitsuru YANAGISAWA

## Synopsis :

Bundle sizes of the martensite structures and facet sizes of brittle fracture surfaces were measured in quenched and tempered 80 kgf/mm<sup>2</sup> steels by applying a technique of texture analysis. The cooccurrence matrix derived by HARALICK was useful to analyse digital images of the martensite structures and the brittle fracture surfaces.

The contrast parameter which is one of the parameters derived from the cooccurrence matrix, was found to have good relationships with the bundle size of the martensite structure and the facet size of the brittle fracture surface. Therefore, a bundle size and a facet size can be quantitatively known by measuring contrast parameters of a martensite structure and a brittle fracture surface, respectively.

### 1. 緒 言

画像解析技術はリモートセンシングの分野で発展してきたが、最近医学研究をはじめ金属研究などにとり入れられ始めている<sup>1)~3)</sup>。この動向の基礎となるのは、画像処理技術がデジタル画像を構成する最小単位である画素の濃淡をあるしきい値で二つの値に分類する2値化処理から、画素の濃淡レベルをたとえば256段階で量子化して画像処理する灰調レベル処理へと発展したことである。灰調レベル処理を行うことで、画素の集合体としての画像の性質を識別できるようになった。その方法の例として、テクスチャー解析などがある。

画像解析技術が金属研究に応用される目的は、大きく分けて二つある。第1に、研究の効率化とそれによつて従来人力では時間的制約上不可能であつた統計的解析が可能になることである<sup>4)</sup>。第2に、画像情報から抽出された特徴パラメーターを用い、金属の物理的あるいは化学的現象の解明の手段とすることである<sup>5)</sup>。これらの例に示されるように、画像解析技術を金属研究に応用することにより、新しい有益な情報が得られる。

マルテンサイト組織に認められるバンドルのサイズは、材料の強度および靱性を支配する要因の一つと考えられている。また、バンドルなどサブグレインが脆性破

壊の単位となることから、破面単位(ファセットサイズ)と強度および靱性にはよい相関関係がある<sup>6)</sup>。したがつて、バンドルサイズあるいはファセットサイズを測定することは、材料開発上重要な意味をもつ。しかしながら、それらの測定は従来人力で行われており多くの時間がかかることから、統計的信頼性に足るデータをもとに強度あるいは靱性との関係を調べた実験はない。フェライトの粒度などの測定は、従来の2値化処理で粒界を識別する方法を用い自動化が可能であるが、バンドルやファセットのように複雑な画像からそれらの境界を識別するのは困難である。したがつて、バンドルなどのサイズを自動的に測定するには、それに対応する画像解析での新しいパラメーターを求める方法が必要である。

本論文は、画像解析技術の一つであるテクスチャー解析手法で求められたパラメーターによる、調質80 kgf/mm<sup>2</sup>級鋼のマルテンサイト組織のバンドルサイズおよびシャルピー破面のファセットサイズの定量化について述べたものである。

ここで、本実験に用いたテクスチャー解析について述べる。テクスチャーを画像の濃淡の局部的変化の繰り返しによつて構成される細かい模様と定義する。たとえば、Fig. 1において画像がA, B, C, Dの四つの領域に区分されるのも、それぞれの領域内での模様つまりテ

昭和59年10月本会講演大会にて発表 昭和60年1月9日受付 (Received Jan. 9, 1985)

\* 川崎製鉄(株)技術研究本部鉄鋼研究所 (Iron &amp; Steel Research Laboratories, Technical Research Division, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)技術研究本部研究企画部 (Research Planning Dept., Technical Research Division, Kawasaki Steel Corp.)\*<sup>3</sup> 川鉄システム開発(株) (Kawatetsu System Development Corp.)

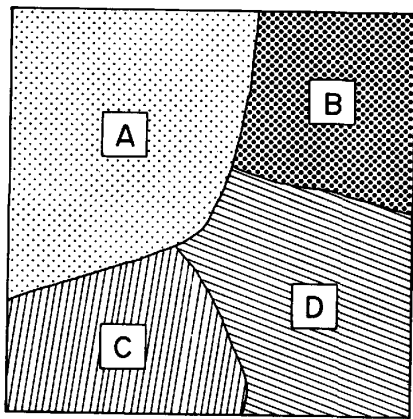


Fig. 1. Model patterns including different textures.

Table 1. Methods of texture analysis.

Texture	Statistic approach	Auto-correlation function
		Fourier transform
		Textural edgeness
		Mathematical morphology
		Spatial gray tone dependence
		Run length
		Cooccurrence matrix
		Auto-regression model
		Space lattice filter
		Correlation map
	Image vector	
	Structural approach	Weak texture measures
		-Relative extreme density
		-Relation tree
Strong texture measures		

クスチャーが異なるからである。このようなテクスチャーを計算機で自動的に識別するには、アナログ画像をデジタル画像に変換する必要がある。この変換の結果、デジタル画像は量子化するための最小単位である画素の集合体として構成されることになる。各画素は、濃淡情報すなわち黒から白に至る濃淡レベルをいくつかの段階に分割し量子化した値（灰調レベル）をもっている。しかし、各画素の大きさに対応する微小領域の平均濃淡情報のみでは、テクスチャーの識別は不可能である。したがって、テクスチャーを識別するためには、複数の画素の集まりによって構成される一定以上の大きさをもつ領域内の濃淡変化の特徴を抽出することが必要となる。

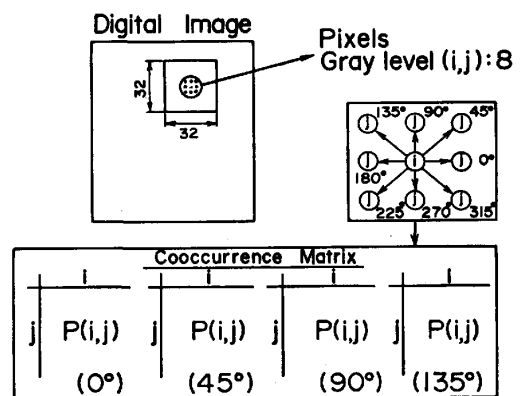
現在までに、テクスチャー解析の手法は Table 1 に示すように種々提案されている<sup>7)~9)</sup>。このなかで、フーリエ変換や空間格子フィルター<sup>8)</sup>は比較的均一なテクスチャーをもつ画像を比較定量化するためには効果的である。しかし、マルテンサイト組織や脆性破面のように一つの画像のなかに複雑なテクスチャーをもつ場合には、そのなかからバンドルあるいはファセットの大きさなど必要な情報に対応する特徴量を抽出することは難しい。

それに対し、HARALICK<sup>10)</sup>が提案した Cooccurrence Matrix を用いる方法は、画像を複数の領域に分割（分割領域）し、この分割領域内におけるテクスチャー特徴量を個々に識別することが可能である。このことから、分割領域すなわちテクスチャーを評価する最小単位のサイズを任意に選択することによって、多くのテクスチャーから構成されている画像から特定のテクスチャーを識別し定量化することができる。したがって、マルテンサイト組織あるいは脆性破面全体のテクスチャーのなかからバンドルあるいはファセットの大きさに対応する特徴量を識別し定量化するには、非常に有効な方法と考えられる。以上のことから、本研究では Cooccurrence Matrix を用いて、バンドルとファセットサイズの定量化を試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 テクスチャー解析の手法

Cooccurrence Matrix は、たとえば  $32 \times 32$  画素からなる分割領域内の隣接する画素の濃淡レベルが、 $i$  から  $i$  (本実験では、おのおのの画素は 8 レベルの濃淡情報をもつ) に変化する確率をすべての濃淡レベル変化の組合せについて求めたものである。隣接する画素は Fig. 2 に示すように 8 方向 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ ) 存在するが、 $0^\circ$  と  $180^\circ$ 、 $45^\circ$  と  $225^\circ$ 、 $90^\circ$  と  $270^\circ$  および  $135^\circ$  と  $315^\circ$  は濃度レベル変化に対してそれぞれ対象関係にあるので、本論文では 4 方向 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ) について Cooccurrence Matrix ( $P(i, j)$ ) を求めた。対象とする画像領域内におけるテクスチャーの規則性は、この Matrix から種々定義される式によって数値化できる。ここで規則性とは、“細かい”、“密である”、“帯状”、“突起性”などで表現されるテク



$P(i,j)$  Probability of gray level change from  $i$  to  $j$

Fig. 2. Cooccurrence matrix.

スチャーの性質である。この Cooccurrence Matrix から、以下に示す三つの数値が計算できる。

(1) Angular Second Moment

$$F_1 = \sum_{i=1}^{LVL} \sum_{j=1}^{LVL} \{P(i,j)\}^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、LVL は画像の濃淡レベルを示す。

(1)式は、特徴量として隣接する画素の濃淡変化の各組合せについて、その出現確率の2乗和を求めており、テクスチャーにおける濃淡変化パターンの統一性を評価した値である。

(2) Contrast

$$F_2 = \sum_{k=0}^{LVL-1} k^2 \left\{ \sum_{i=1}^{LVL} \sum_{\substack{j=1 \\ |i-j|=k}}^{LVL} P(i,j) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式で定義される特徴量はコントラストと呼ばれる性質に対応しており、分割領域内で特定方向に隣接する画素の濃淡レベル変化量の2乗の期待値を求めている。すなわち、分割領域内で濃淡レベルが頻繁に、かつ大きく変化してコントラストが強いテクスチャーが構成されている場合に、F<sub>2</sub>の値は大きくなる。

(3) Correlation

$$F_3 = \frac{\sum_{i=1}^{LVL} \sum_{j=1}^{LVL} (i \times j) P(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \dots\dots\dots (3)$$

$$P_x(i) = \sum_{j=1}^{LVL} P(i,j), P_y(j) = \sum_{i=1}^{LVL} P(i,j)$$

ここで、μ<sub>x</sub>, μ<sub>y</sub>, σ<sub>x</sub>, σ<sub>y</sub> はそれぞれ P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub> の平均と標準偏差である。

(3)式は、隣接する画素の濃淡レベルの関連性を評価したパラメーターであり、たとえば、暗い画素同士が隣接する確率が高い場合のようになんらかの関連性がテクスチャーの特徴として存在する場合、F<sub>3</sub>の絶対値は大きくなる。

本実験では、以上の(1)~(3)式に示される値とバンドルおよびファセットサイズの関係を調べた。

2.2 画像解析システム

本実験に用いた画像解析システムは、ニレコ(株)製画像解析装置 LUZEX 5000 に周辺機器として、光学顕微鏡、イメージディスプレイ、操作用ターミナル、ディジタイザタブレット、プリンターを接続した汎用装置である。画像処理部の LUZEX 5000 は、灰調レベルを 256 段階もつ 512×512 画素から構成されているデジタル画像を、10 画面記憶し解析できる。なお、2 値画像として 8 画面処理可能である。この装置は、マイクロプロセッサ LSI 11 を用いてユーザーが画像解析ソフトを開発できるようになっている。テクスチャー解析の

実験では、256 段階の灰調レベルを 8 段階に再分割して Cooccurrence Matrix を求めた。

2.3 モデルパターンを用いた検討

調質 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼のマルテンサイト組織を Photo. 1 に示す。マルテンサイト組織は、Fig. 3 に示すようにマルテンサイトラスが平行になつているいくつかのバンドルから構成されている<sup>6)</sup>。バンドルが平行なラスを単位としていることに注目し、モデルパターンを作製した。Fig. 4 は、バンドルサイズを 10×10 画素、20×20 画素、30×30 画素および 40×40 画素の 4 種類に変化させたモデルパターンで、斜線がマルテンサイトラスを模擬したものである。これらのテストパターンについて画像解析システムで(1)~(3)式に示すテクスチャー特徴量を求めて、これらの値とバンドルサイズの対応を調べた。この際、バンドルサイズの定量化に適した分割領域のサイズ(Window Size)を評価するため Cooccurrence Matrix を求める Window Size は、全視野 512×512 画素に対して、8×8, 16×16, 32×32, 64×64 および 128×128 画素の 5 条件とした。

Photo. 2 には、シャルピー試験で脆性破壊した破面の外観を示す。脆性破面は、このように黒と白の入りまじつた特徴のあるテクスチャーを構成しているが、ファセットサイズが大きくなるに従い、テクスチャーを構成している黒あるいは白の単位が大きくなる。Fig. 5 は、ファセットサイズを 10×10, 15×15, 20×20 および 25

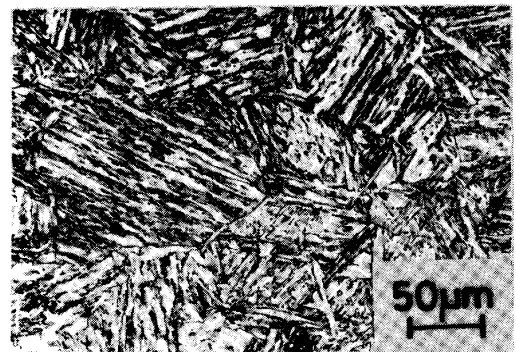


Photo. 1. Typical martensite structure of HT-80 steel observed by optical microscopy.

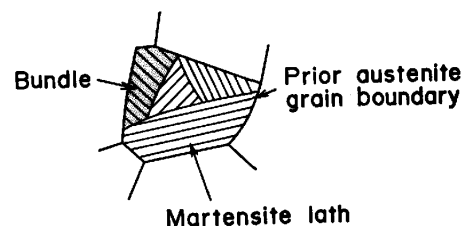
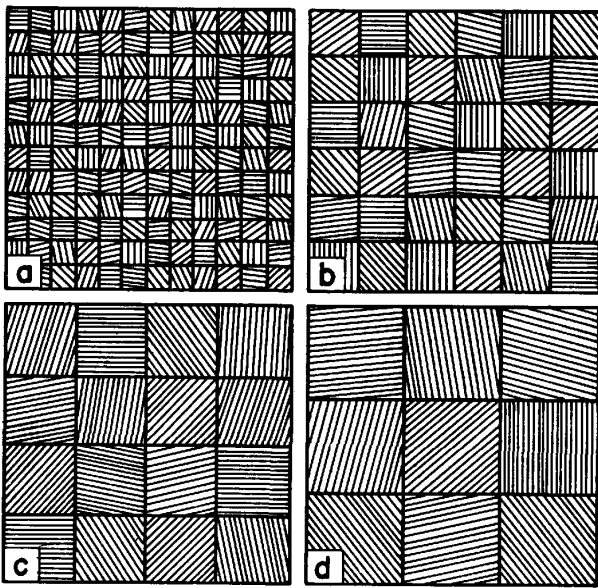
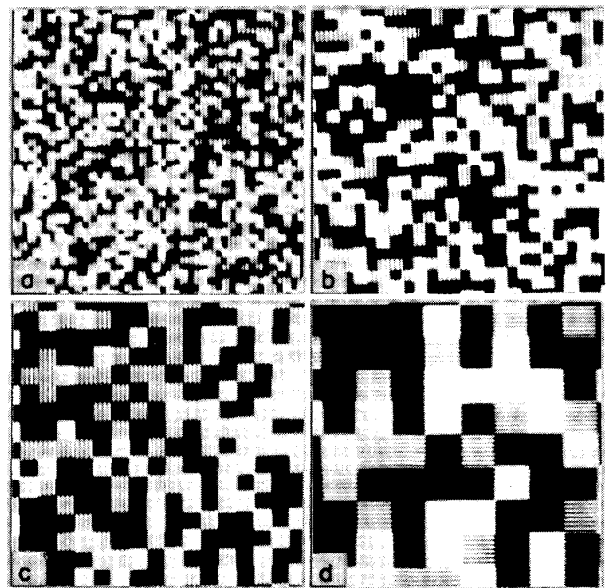


Fig. 3. Model of martensite structure.



(a) Bundle size : 10 pixels (b) Bundle size : 20 pixels  
(c) Bundle size : 30 pixels (d) Bundle size : 40 pixels

Fig. 4. Model patterns of bundle of martensite structure.



(a) Grain size : 10 pixels (b) Grain size : 15 pixels  
(c) Grain size : 20 pixels (d) Grain size : 25 pixels

Fig. 5. Model patterns of Charpy brittle fracture appearance.

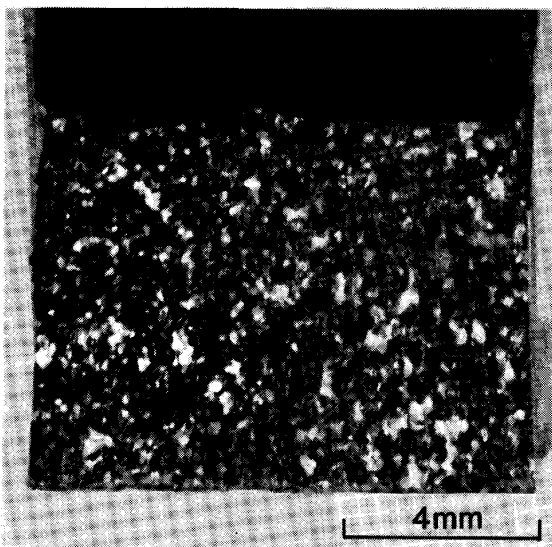


Photo. 2. Optical macrograph of Charpy fracture appearance of HT-80 steel.

×25 画素と変えたときのシャルピー脆性破面の画像を模擬したモデルパターンである。濃淡レベルは8段階として、おのおののファセットの濃淡レベルは乱数を用いて無作為に決定した。このモデルパターンについてマルテンサイト組織の場合と同様にテクスチャー特徴量  $F_1 \sim F_3$  を求め、ファセットサイズとの関係を調べた。

2.4 調質 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼を用いた検討

市販の調質 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼を用い、実際のマルテンサイト組織について Contrast  $F_2$  とバンドルサイズとの関係を調べた。供試鋼の化学組成を Table 2 に、製造プ

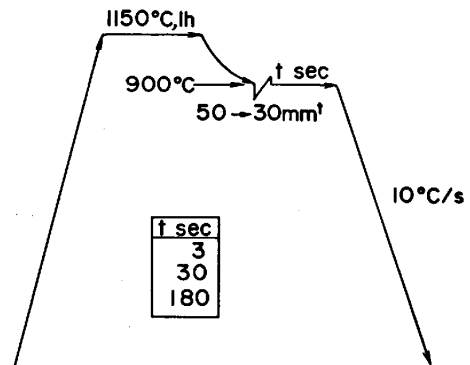


Fig. 6. Diagram of direct quenching process.

ロセスを Fig. 6 に示す。900°C で 50 mm から 30 mm の厚さに圧延し、その後の冷却開始までの時間を 3s~180s の間で選択することによりバンドルサイズを変化させている。室温まで 10°C/s で冷却した後、光学顕微鏡試料を採取しナイタールで腐食してバンドルサイズを測定した。バンドルサイズは、バンドル境界をトレーシングペーパーに書き写し、一定面積中のバンドルサイズの個数を測定することによって求めた。サイズは、円近似して直径に換算した。同様な試料について、(1)~(3)式に従い分割領域を 32×32 画素としてテクスチャー特徴量を求めた。その際、1画素は約 1μm×1μm の面積に相当した。また、エッチング条件の違いによる誤差を除くため、画像はあらかじめ正規化したものを用い

Table 2. Chemical composition of steel (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	B
0.12	0.25	0.78	0.011	0.004	0.25	1.02	0.48	0.20	0.037	0.063	0.0009

た。

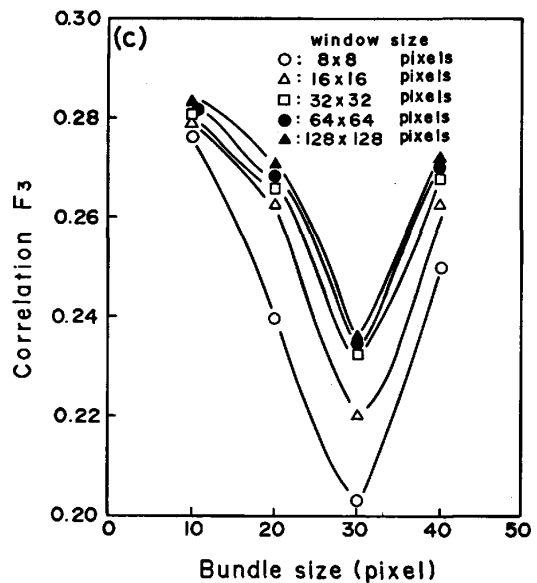
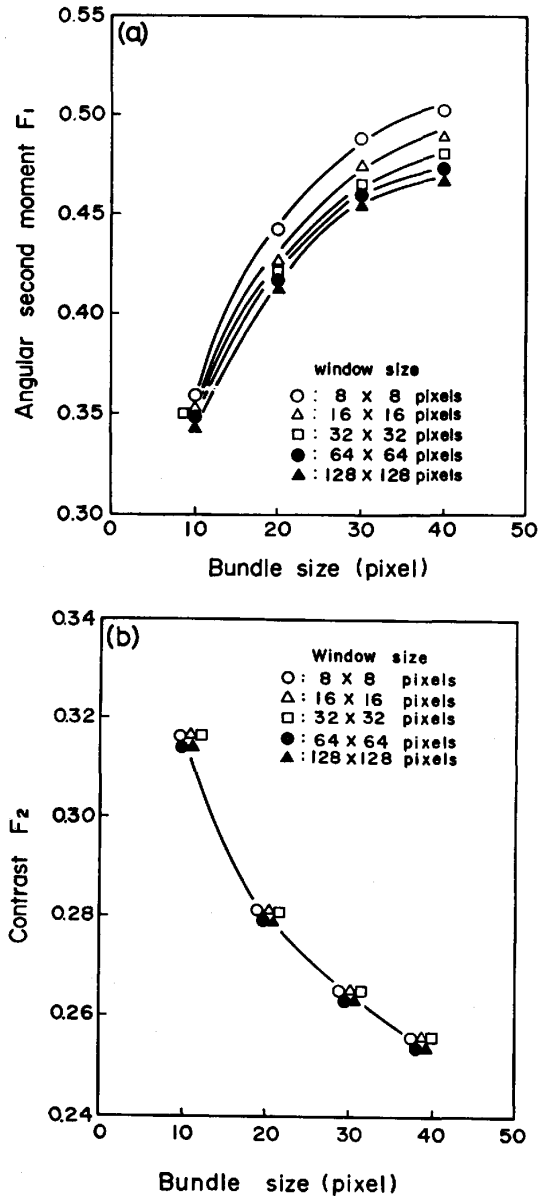
つぎに、バンドルサイズの定量化を検討したものと同様な試料から JIS Z 2202 4号試験片を採取し、脆性破壊する試験温度でシャルピー衝撃試験を行つた。その試験片の破面を走査型電子顕微鏡で観察し、写真から人力によりファセットサイズを測定した。ファセットサイズは、ファセット境界をトレーシングペーパーに書き写し、一定面積中のファセットの個数を測定することによつて求めた。サイズは、バンドルサイズを求めたときと

同様に、円近似して直径に換算した。同様な試料について、(1)~(3)式に従い分割領域を 32×32 画素としてテクスチャー特徴量を求めた。その際、1画素は約 4 μm×4 μm の面積に相当した。また、バンドルサイズの定量化の場合と同様に画像は正規化したものを用いた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 バンドルサイズの定量化

モデルパターンを用いて、テクスチャー特徴量  $F_1 \sim F_3$  がバンドルサイズの定量化に有効であるか検討した結果を Fig. 7 (a)~(c) に示す。テクスチャー解析の項で述べたように、Cooccurrence Matrix としては 0°, 45°, 90° および 135° の4方向について求められるので、 $F_1 \sim F_3$  も4方向について測定できる。各方向の特徴量は、ラスの方向性に依存する。しかし、ラスの方向は一つのバンドル内では一定であつてもマルテンサイト組織全体的にみると一定方向にはないので、 $F_1 \sim F_3$  の値としては4方向の平均値を用いて、方向性の影響を除いた。 $F_1$  はバンドルサイズが大きくなるに従い増加する傾向にあるが、その関係は分割領域の大きさによつて変化する。また、 $F_3$  はバンドルサイズが30画素で最



(a) Angular second moment (b) Contrast (c) Correlation  
Fig. 7. Relationship between texture parameters and bundle size in model patterns.

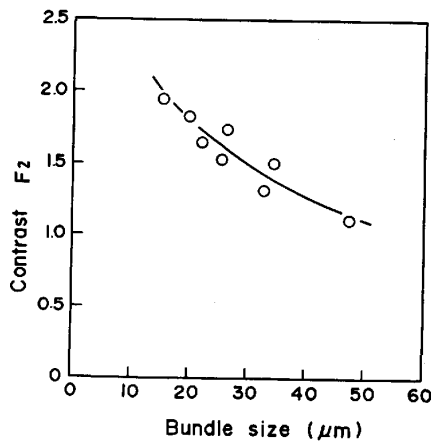


Fig. 8. Relationship between contrast and bundle size in HT-80 steels.

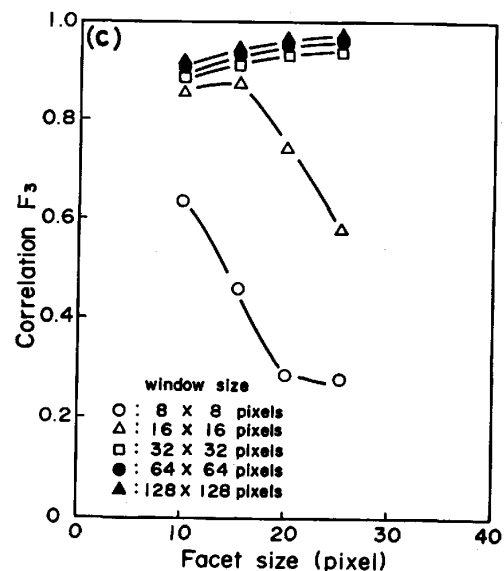
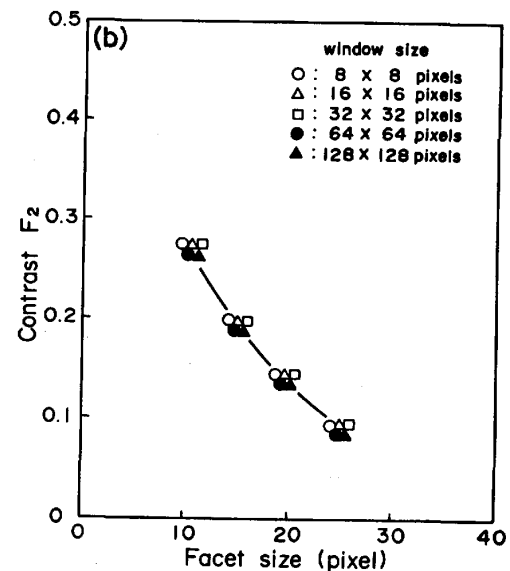
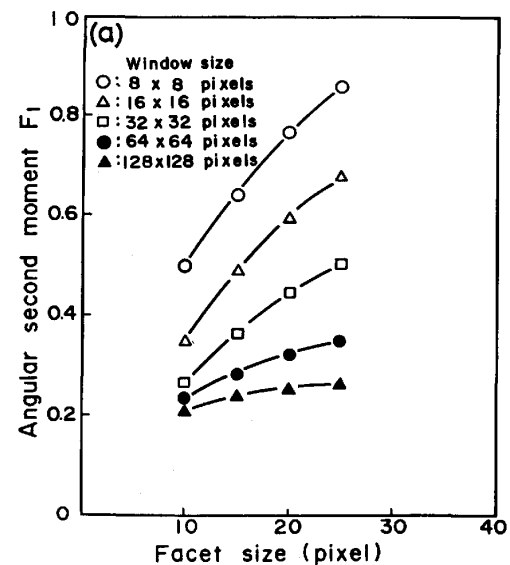
小値を示し、さらに分割領域の大きさによつて値が異なる。したがつて、バンドルサイズは  $F_1$  および  $F_3$  では分割領域の影響をうけるため一義的に定量化することができない。それに対し、 $F_2$  とバンドルサイズの関係は分割領域の大きさに依存せず一定で、そのうえよい相関が認められた。これらのことから、バンドルサイズを定量化するパラメーターとしては、分割領域の大きさに依存しない Contrast  $F_2$  が適当である。

つぎに、調質 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼でバンドルサイズを変化させた試料について求めた  $F_2$  と、人力により測定したバンドルサイズとの関係を示したものが Fig. 8 である。 $F_2$  とバンドルサイズとの間には、モデルパターンを用いた実験と同様により相関関係があつた。この関係を用いて  $F_2$  からバンドルサイズを求める場合には、 $\pm 5 \mu\text{m}$  以下の誤差で定量化が可能と考えられる。

### 3.2 ファセットサイズの定量化

モデルパターンを用いて、テクスチャー特徴量  $F_1 \sim F_3$  がファセットサイズの定量化に有効であるかを検討した結果を、Fig. 9 (a)~(c) に示す。ファセットについても方向性がないので、 $F_1 \sim F_3$  の値としては4方向の平均値を用いた。バンドルサイズの定量化の場合と同様に、 $F_1$  はファセットサイズが大きくなるに従い増加し、その関係は分割領域の大きさに依存する。また、 $F_3$  とファセットサイズの関係は、分割領域の大きさによつて異なつた傾向を示す。それに対し、 $F_2$  とファセットサイズの関係は分割領域の大きさに依存せず一定でそのうえよい相関が認められた。これらのことから、ファセットサイズの定量化についても、Contrast  $F_2$  が適当であることがわかる。

圧延後から冷却までの時間を変えた試料について、人力により測定したファセットサイズと  $F_2$  の関係を



(a) Angular second moment (b) Contrast (c) Correlation  
Fig. 9. Relationship between texture parameters and facet size in model patterns.

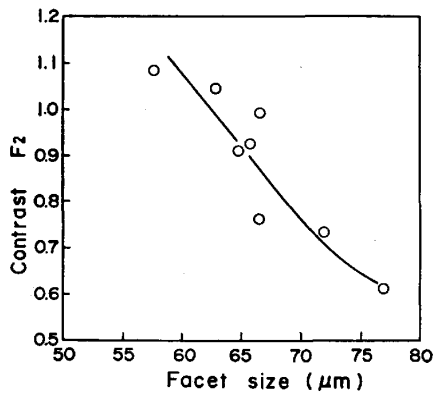


Fig. 10. Relationship between contrast and facet size in HT-80 steels.

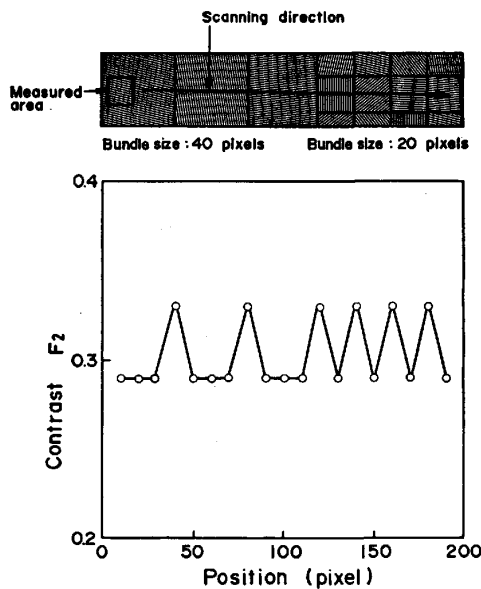


Fig. 11. Change in contrast along a scanning direction for model patterns of bundle of martensite structure.

Fig. 10 に示す.  $F_2$  とファセットサイズの間には, モデルパターンの場合と同様なよい相関関係が認められた.

#### 4. 考 察

前項で示したように, モデルパターンと実際の調質 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼において, Contrast  $F_2$  とバンドルおよびファセットサイズには, 分割領域の大きさに依存せずよい相関関係があることが明らかになった. したがって, バンドルおよびファセットサイズの定量化には,  $F_2$  が非常に有効なパラメーターとなる. ここでは,  $F_2$  の有効性について, その機構を考察する.

Fig. 4 に示すモデルパターンのうちバンドルサイズが 20 画素と 40 画素について, 特定ライン方向での  $F_2$  の変化を調べた. 分割領域は 16×16 画素とした. その

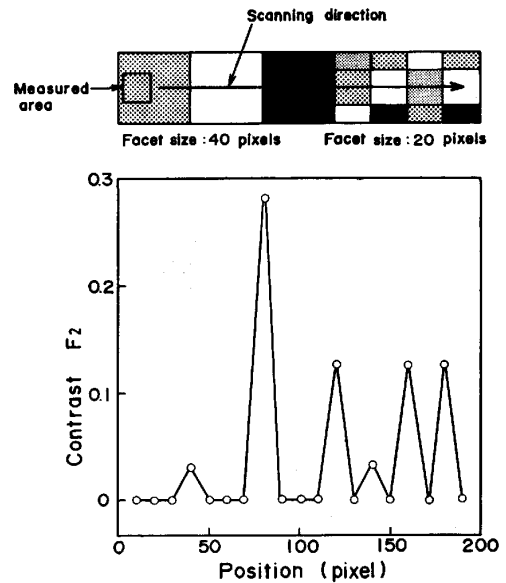


Fig. 12. Change in contrast along a scanning direction for model patterns of Charpy brittle fracture appearance.

結果を Fig. 11 に示す. 16×16 画素の分割領域でバンドルの境界を含み, その結果ラスの方向性が領域中で変化しテクスチャーの統一性が失われると,  $F_2$  が大きくなることわかる. したがって, バンドルサイズが小さくなると 16×16 画素の領域でバンドル境界にかかる確率が高くなり, そのためマルテンサイト組織全視野にわたって測定して得られた  $F_2$  の平均値は大きくなる. また, バンドルサイズが大きくなるに従い,  $F_2$  とバンドルサイズの相関性が小さくなる現象も, このことから説明される. この原理により,  $F_2$  でバンドルサイズが定量化できる.

バンドルサイズの定量化の場合は, 一つのバンドル内では Cooccurrence Matrix およびそれらから求められる  $F_2$  は変わらず, 分割領域が粒界を含み, ラスの方向が変化するところで  $F_2$  が大きく変わる原理を用いた. 同様に, Fig. 5 に示すような画像の場合においても, 一つのファセット内では  $F_2$  は変わらず, ファセット境界で濃淡レベルが変化するところで  $F_2$  が大きくなるものと考えられる. Fig. 12 に, 特定ライン方向での  $F_2$  の変化を示すが, ファセット境界上で  $F_2$  が大きくなることわかる.

以上述べたように, バンドルおよびファセット境界上で  $F_2$  が大きく変化し, したがってある画像上で境界の出現確率が高いほど  $F_2$  は大きくなる. この原理により, バンドルサイズおよびファセットサイズの定量化がテクスチャー解析のパラメーターの一つである Contrast  $F_2$  を用いて可能になったものと考えられる.

## 5. 結 言

調質 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級鋼のマルテンサイト組織のバンドルサイズの定量化およびシャルピー試験片の脆性破面のファセットサイズの定量化について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) テクスチャー解析の一つである HARALICK が提案した Cooccurrence Matrix およびこの Matrix から得られるパラメーターの一つである Contrast  $F_2$  を用いることにより、マルテンサイト組織のバンドルサイズを定量化することができる。

(2) 同様に、シャルピー破面のファセットサイズも Contrast  $F_2$  で定量化することができる。

(3) Contrast  $F_2$  によるバンドルサイズの定量化の原理は、ラスの方向がバンドル境界上で変化しテクスチャーの統一性が失われ、それに伴い境界を含んだ領域での Contrast  $F_2$  が大きくなることによる。したがって、バンドルサイズが小さくなると境界を横切る確率が高くなり、Contrast  $F_2$  は大きくなる。

(4) Contrast  $F_2$  によりファセットサイズが測定できる原理も、バンドルの場合と同様で、ファセット境界を含んだ場合の Contrast  $F_2$  が大きくなることによる。

今後、画像解析技術がさらに進歩することにより、金属研究に新しい展開が生ずるものと考えられる。

終わりに、本研究の遂行にあたり多大なる御支援をいただいた川崎製鉄(株)技術研究所第2研究部長田中智夫博士および水島研究部第二研究室長上田修三博士に深く感謝致します。

また、本研究の実験に御協力いただいた同所企画部試験課白鳥三男氏に謝意を表します。

## 文 献

- 1) 川路憲一, 古君 修: 金属臨時増刊号 (1984) 5, p. 46
- 2) 深町正利: 金属材料技術研究所研究発表会概要集 (1983), p. 1
- 3) 中田栄一: 金属臨時増刊号 (1984) 5, p. 37
- 4) 古君 修, 山本厚之, 今中 誠, 西池氏裕: 鉄と鋼, 70 (1984), S 566
- 5) 深町正利: 日本金属学会会報, 23 (1984), p. 651
- 6) 松田昭一, 井上 泰, 三村 宏, 岡村義弘: 鉄の強靱性 (1971), p. 45 [Climax molybdenum development Company LTD.]
- 7) 辻内順平: 応用画像解析 (1981), p. 109 [共立出版]
- 8) 中田栄一, 飯坂譲次, 今中 誠, 橋本喜久男: 鋳研報告 (1977) 32, p. 53
- 9) M. M. GALLOWAY: Texture analysis using gray level run lengths (1974) [National Science Foundation]
- 10) R. M. HARALICK: Documentation of procedures for textural/spatial pattern recognition techniques (1976) [NASA Lyndon B. Johnson space center]