

資 料

走査電子顕微鏡による炭素鋼の破壊面の観察*

金 井 良 昭**・内 堀 勝 之**

Observation of Fracture Surfaces of Carbon Steels with
Scanning Electron Microscope

Yoshiaki KANAI and Katsuyuki UCHIBORI

1. 緒 言

マイクロフラクトグラフィは材料の破壊の研究にきわめて有力な手段として、これまで光学顕微鏡法、レプリカ電子顕微鏡法によつて多数の報告がある。最近、走査電子顕微鏡が開発されるに及んで、破壊面は直接高い倍率で観察ができるようになり、その焦点深度が大きいことなどの特長と相まつて、より正確かつ直接的な情報を得ることが可能となり、各方面でその利用が急速に進められている。

この報告は、各種の熱処理によつて得られた代表的な組織の炭素鋼のシャルピー試験片の破壊面を観察した結果を述べる。レプリカ法と比較してとくに新しい観察結果ではないが、上に述べたような特長をもつ破壊面の観察結果は参考となるところが多いものと考えられる。

2. 供試材と実験方法

2.1 供試材

供試材の化学成分を Table 1 に示す。電磁軟鉄 S U Y B 1 は電解鉄を真空溶解したもので、他は大気溶解材であり、いずれも 20 mm φ の圧延材である。

Table 2 に熱処理、かたさおよび試験片形状を示す。また各試料の光学顕微鏡写真を Photo. 1 に示す。

2.2 破壊面の観察

衝撃破壊後、試片の破壊面を走査電子顕微鏡 JSM-2

型により観察した。観察の際に破壊面を電子ビームの軸方向に対して 45° の角度で傾斜させたのでえられた写真の大きさは横方向が標示した倍率の $1/\sqrt{2}$ になる。

3. 破壊面の特徴

温度を変えて行なつたシャルピー試験のうち、とくに完全脆性破壊および延性破壊に注目して、組織と破壊面との関係について観察例を示す。

Photo. 2: フェライト組織の場合。SUYB 1 (試料番号 A)。

(a)は -196°C での劈開破壊面でリバーマーキングが現われ、劈開段が重なりあつてしだいに大きい段になつている。(b)は 100°C での破壊面を示し、粒界破壊面とディンプルを含んだ延性破壊面とが共存している。

Photo. 3: フェライト-パーライト組織の場合。S 20 C (試料番号 B N)。

(a)は -196°C での劈開破壊面であり、パーライトの存在でフェライトのみの場合に比べてクラックの進行径路が複雑になつている部分 (A) がある。(b)は 30°C での延性破壊面であり、ディンプルの大きさは直径 10 μ 程度のフェライト部分と 1 μ ぐらいのパーライト部分との 2 群に大別される。多くの観察から破壊面上に占める後者の破面の割合は、パーライト量の変化に相当して増減する傾向がみられた。

Photo. 4: パーライト組織の場合。(試料番号 D N)

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
S U Y B 1	0.01	0.02	0.24	tr	0.009	0.08	0.01	0.02
S 20 C	0.22	0.01	0.63	0.029	0.032	0.01	0.01	0.04
S 45 C	0.45	0.27	0.62	0.017	0.012	0.06	0.06	0.17
S U P 3	0.89	0.22	0.55	0.019	0.014	0.06	0.15	0.15

* 昭和43年9月本会講演大会にて発表 昭和44年5月28日受付

** 三菱製鋼(株)技術研究所

Table 2. Heat treatment of specimens and Vickers hardness number.

Materials	Symbol	Heat treatment	Hardness(Hv(30))	Charpy test piece
SUYBI	A	950°C×30 min AC	62	JIS No 4
S 20C	BN	900°C×30 min AC	120	//
S 45C	CN	850°C×30 min AC	199	//
//	CM	850°C×30 min WQ	660	//
//	CT	850°C×30 min WQ, 500°C×1hr WC	335	//
SUP 3	DN	850°C×30 min AC	300	JIS No 3
//	DB	850°C×30 min Salt(280°C)quenched×1hr kept	602	// 3 mm width
//	DS	850°C×30 min OQ, 715°C×20hr AC	189	JIS No 3

Remarks: JIS No 3 U-shape notch, No 4 V-shape notch.

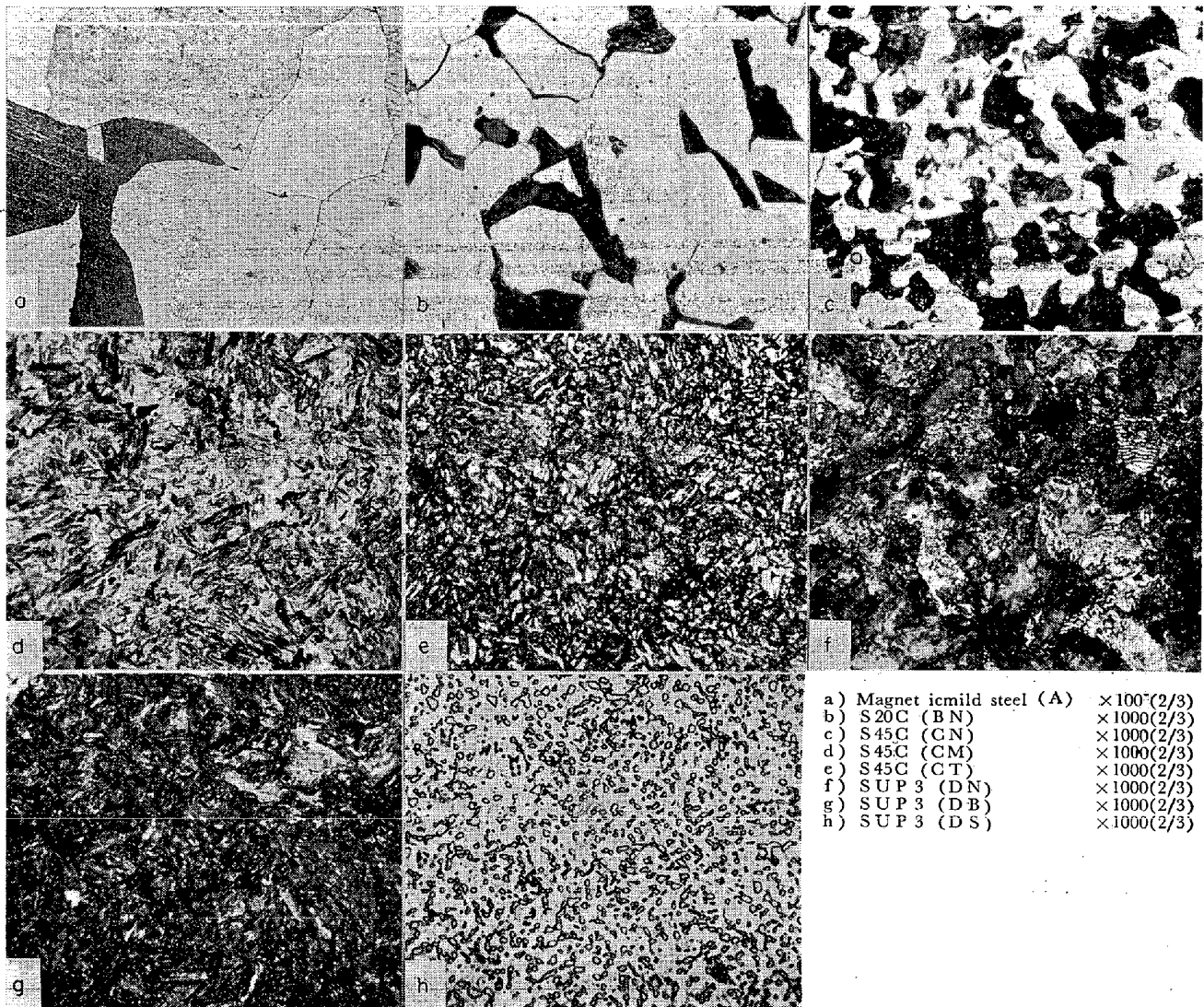


Photo. 1. Photo-micrographs of specimens.

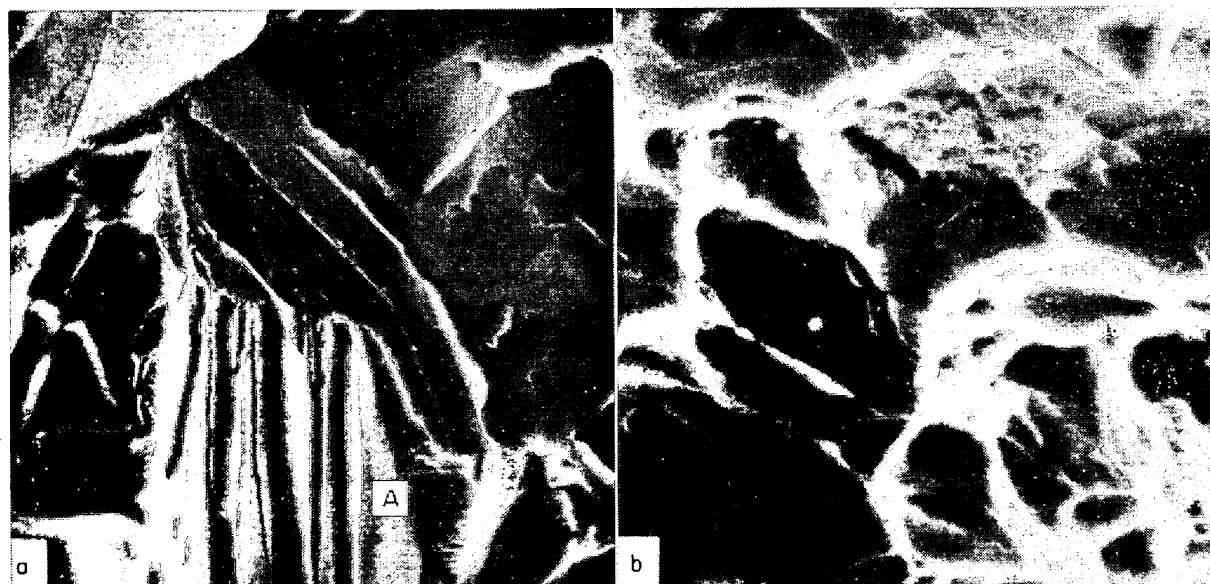
a) Broken at -196°C .

×300 (2/3)

b) Intercrystalline fracture surface with dimpled fracture surface at 100°C .

×300 (2/3)

Photo. 2. Fractographs of ferrite in magnetic mild steel (A) broken by notched-bar impact.

a) Cleavage pattern at -196°C .

×3000 (2/3)

b) Ductile fracture surface at 30°C

×3000 (2/3)

Photo. 3. Fractographs of ferrite-pearlite in S20C (BN) broken by notched-bar impact.

(a)は -196°C での劈開破壊面を示し、劈開小面の数もふえ、かつ大きさはフェライト組織の場合より小さくなっている。劈開面の段もフェライト組織より複雑になり、段の重合は明りょうではない。(b)は 100°C での延性破壊面を示し、直径が 1μ 以下の細かいディンプルが観察され、一部にはパーライトの層状破壊もみられる。

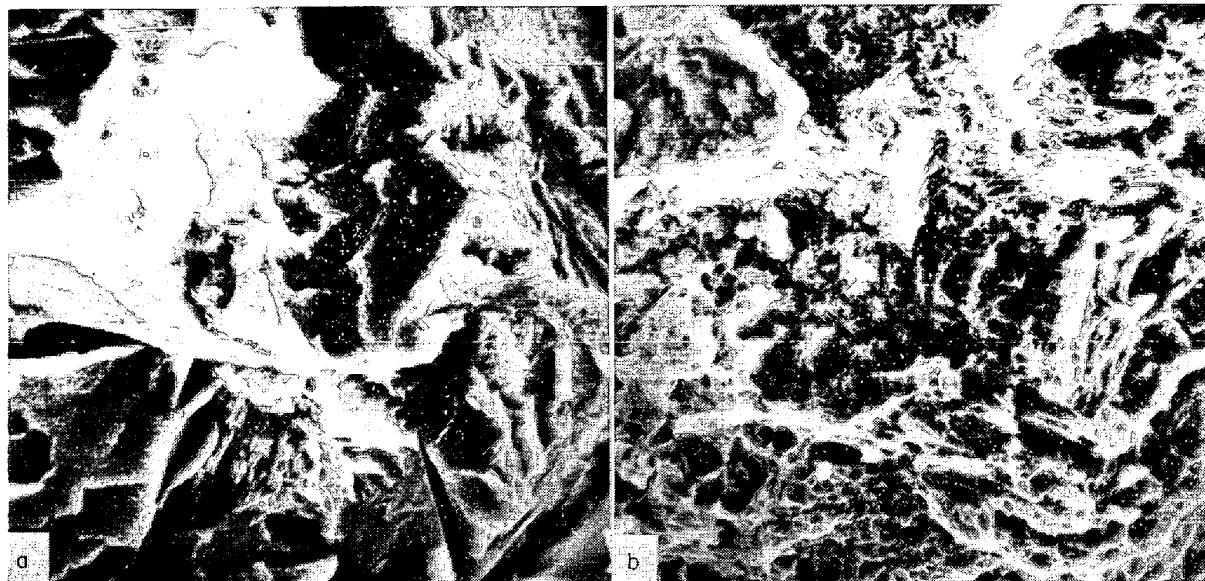
Photo. 5 は層状パーライトの破壊面を示す。層の間隔は約 0.3μ であり、これは Photo. 1 (f) より推定したパーライト層間隔とほぼ一致している。セメントイトがマイクロボイドの核となり層状の破壊面を生じたものと思

われる¹⁾²⁾。

Photo. 6: ベイナイトと微細パーライトとが共存した組織の場合。SUP 3 (試料番号DB)。

(a)は -196°C での劈開破壊面を示し、フェライトの場合のような明りょうなリバーマークはみられず、劈開段は羽毛状を呈している。このような羽毛状の劈開段がみられる破壊は擬劈開破壊³⁾とも呼ばれる。(b)は 100°C での破壊面で延性破壊面が主体をなし、一部に劈開破壊面がみられる。直径 1μ 以下の細かいディンプルもみられる。

Photo. 7: マルテンサイト組織の場合。S 45C (試料



a) Cleavage pattern at -196°C $\times 3000$ (2/3) b) Ductile fracture surface at 100°C $\times 3000$ (2/3)
Photo. 4. Fractographs of pearlite in SUP 3 (DN) broken by notched-bar impact.



Photo. 5. Trans-colony fracture surface of lamellar pearlite. $\times 10000$ (2/3)

番号CM)

(a) は -196°C での破壊面である。破壊は主として劈開破壊であるが、前オーステナイト粒界で破壊したと思われる個所もある。劈開段は羽毛状を呈し、破壊面がやや塑性変形したように思われる。(b) は 100°C での延性破壊面を示し、直径 1μ 内外のディンプルがみられるが、パーライトのような層状破壊面は観察されない。

Photo. 8: 焼もどしマルテンサイト組織の場合。S 45 C (試料番号CT)。

(a) は -196°C における劈開破壊面を示す。 500°C $\times 1\text{hr}$ の焼もどしにより炭化物が均一に析出したため

か一様な破壊面を示している。劈開段は焼入れ材と同様に羽毛状を呈しているが焼もどしにより靱性が回復したためかテアーリッジ³⁾が深いようである。(b) は 100°C での延性破壊面を示し、やや引伸ばされた形のディンプルも含まれている。

Photo. 9: 焼入れ焼もどしを施した S 45 C の 100°C における破壊面。

ディンプルの形状は破壊の条件によつて支配されやすく、応力の加わり方やマイクロボイドの核となるものの形状などによつてもいろいろの形をとるものと思われる。この写真は形状の異なつたディンプルの例である。等軸状の円形のディンプルのほか細長く円筒状に伸びたディンプルもみられる。供試材が圧延材であるので圧延によつて引伸ばされた非金属介在物がマイクロボイドの起点となり延性破壊が起こり、円筒状のディンプルが形成されたものと思われる。この円筒状のディンプルの部分ではクラックが圧延方向とほぼ平行な面内で進み、一方、等軸状の円形のディンプルの部分においてはクラックが圧延方向とは垂直な面内で伝播したものであろう。また非金属介在物自身は劈開を起こして寸断している。

Photo. 10: 球状化炭化物組織の場合。

SUP 3 (試料番号DS)。(a) は -196°C における劈開破壊面である。炭化物がほぼ均一に球状化しているためか破壊面にも均一に凹凸がみられる。劈開段は羽毛状を呈している。(b) は 100°C での延性破壊面を示しディンプルがほぼ均一に分散しているのがみられる。相隣りあうディンプル底部間の距離は約 2μ であり、これは Photo. 1 (h) における炭化物間隔とほぼ一致している。非常に微細な析出物はディンプル発生の核になりうるか否か明らかでないが、本鋼種の球状化炭化物のよ

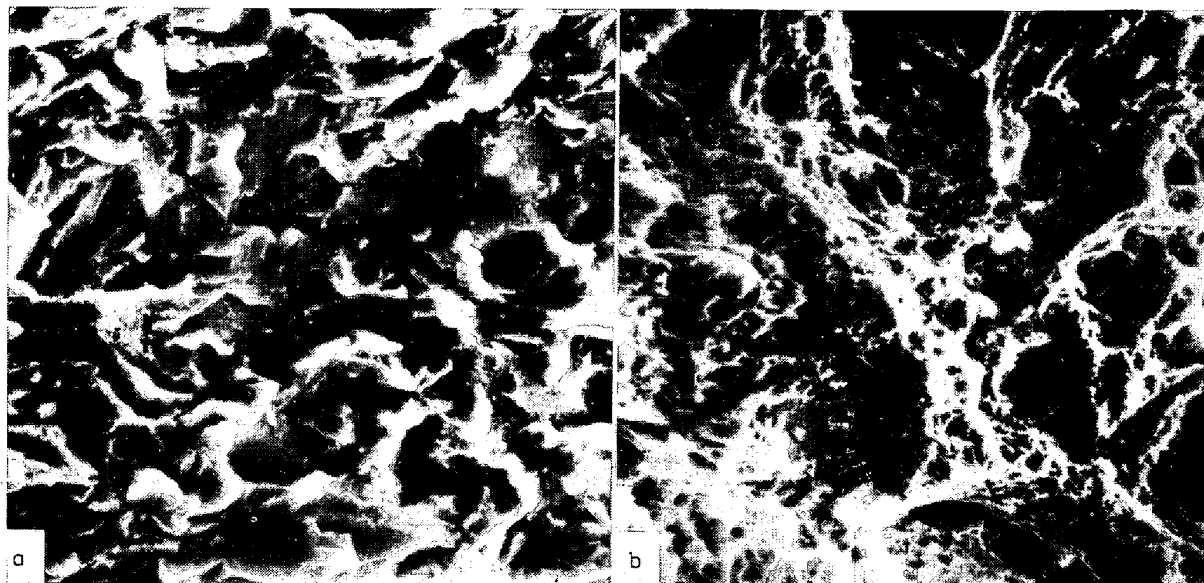
a) Cleavage pattern at -196°C $\times 3000$ (2/3)b) Ductile fracture surface with cleavage fracture surface at 100°C $\times 3000$ (2/3)

Photo. 6. Fractographs of mixed structure of bainite and fine pearlite in SUP 3 (DB). The structure was formed by reaction at 280°C and broken by notched-bar impact.

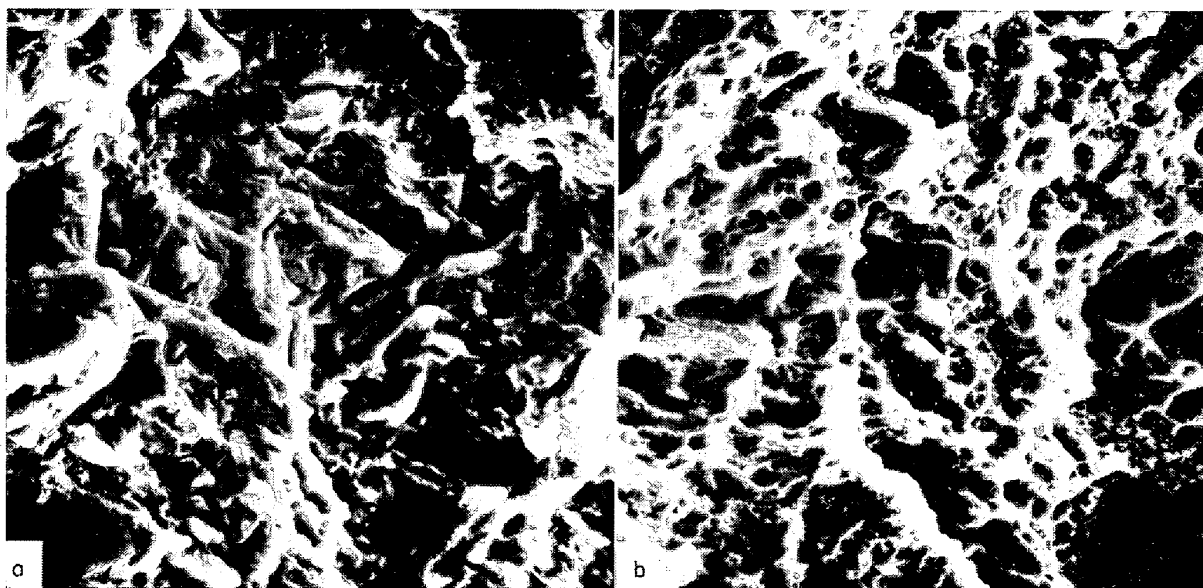
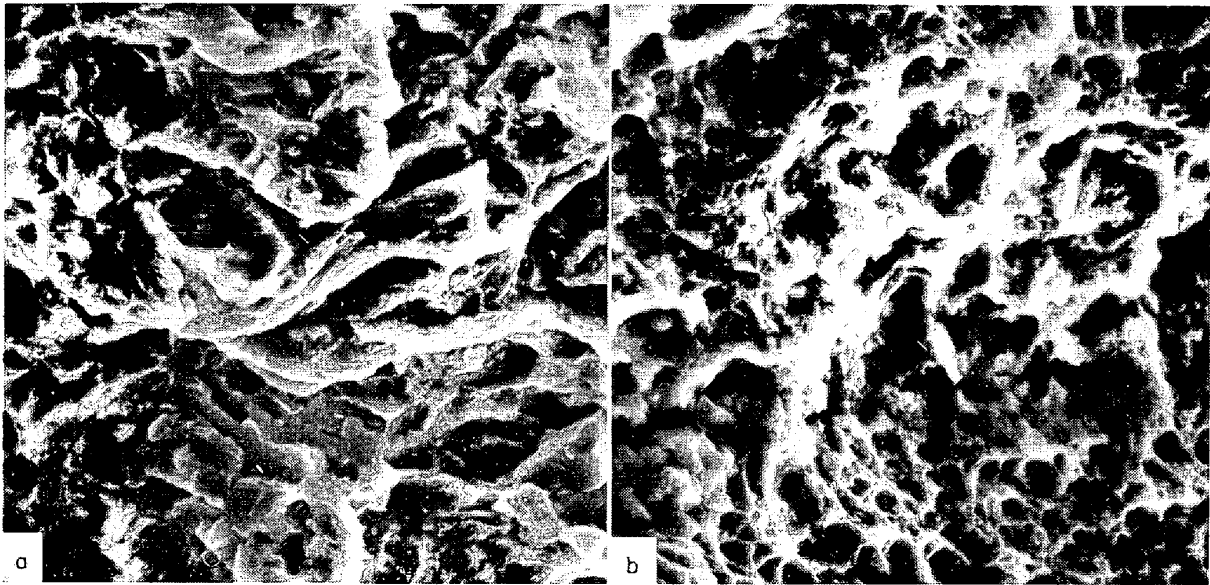
a) Cleavage pattern with small amount of intercrystalline fracture at -196°C $\times 3000$ (2/3)b) Ductile fracture surface at 100°C $\times 3000$ (2/3)

Photo.7. Fractographs of untempered martensite in S45C (CM) broken by notched-bar impact.



a) Cleavage pattern at -196°C $\times 3000$ (2/3) f) Ductile fracture surface at 103°C $\times 3000$ (2/3)

Photo. 8. Fractographs of tempered martensite of S45C (CT). The structure was formed by reaction at 500°C for 1hr and broken by notched-bar impact.

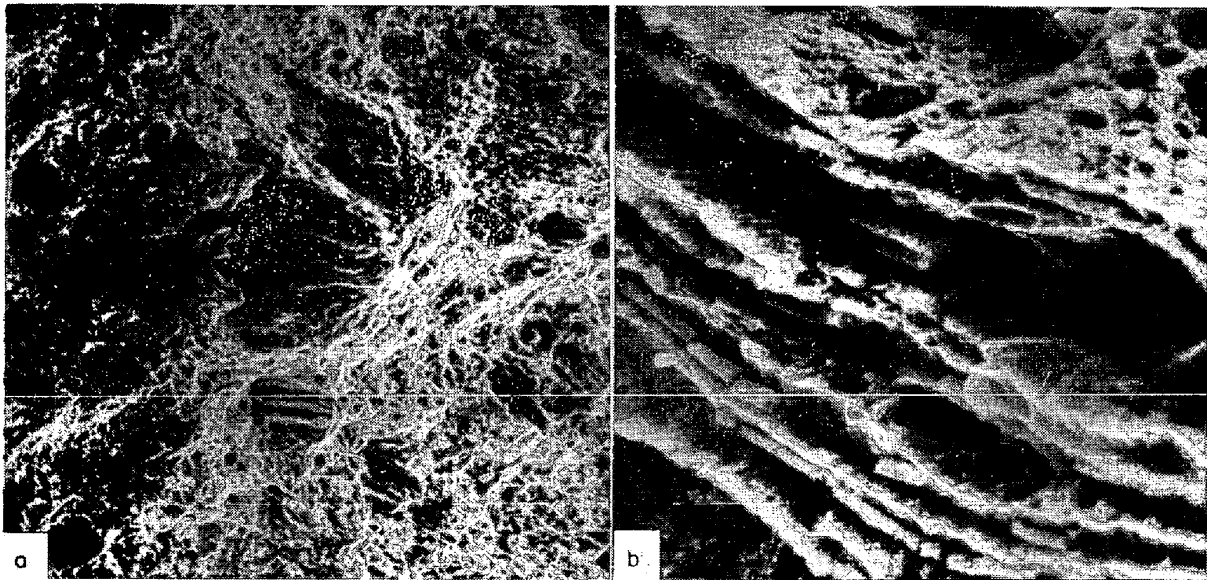
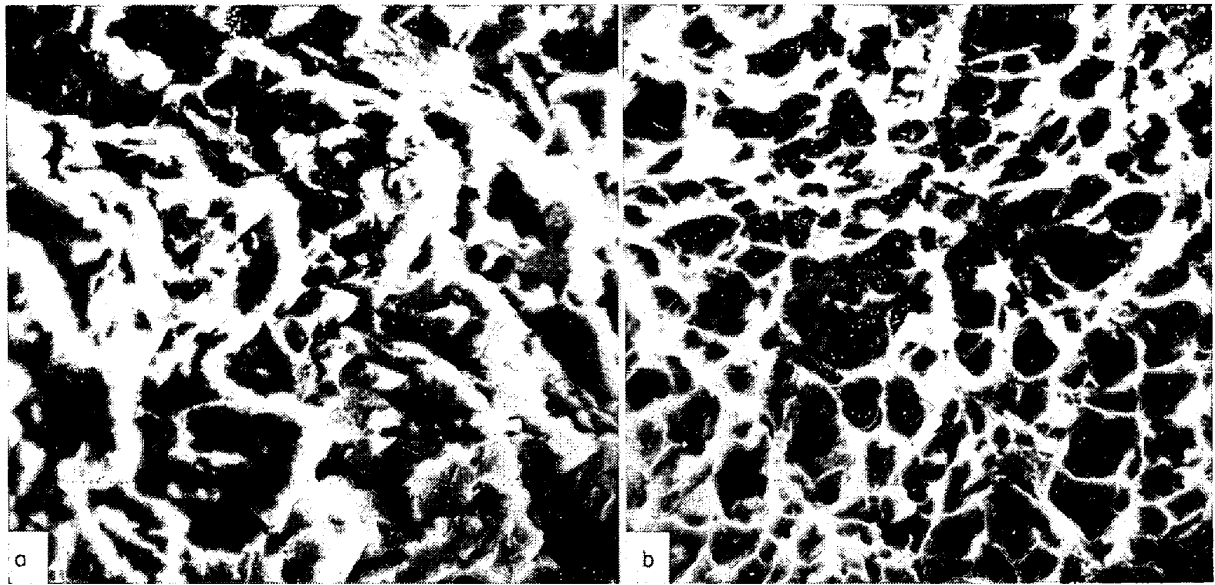


Photo. 9. Dimple pattern of string type in S45C (CT) broken by notched-bar impact at 100°C . Something which is supposed to be non-metallic inclusions are observed at the bottom of dimples. a) $\times 300$ (2/3) b) $\times 3000$ (2/3)



a) Cleavage pattern at -196°C $\times 3000$ (2/3) b) Ductile fracture surface at 100°C $\times 3000$ (2/3)
 Photo. 10. Fractographs of spheroidized carbide structure in SUP 3 (DS)
 broken by notched-bar impact.

うに大きい析出物はマイクロボイド発生の核になりうるものと考えられる。ただしディンプル内の球状炭化物と地との区別を明確に観察することはできなかつた。

Photo. 11: 電磁軟鉄, S 20C, S 45C, および SUP3 と C 含有量がそれぞれ異なる試料の焼ならし材の -196°C における劈開破壊面。

パーライト量が増加するにつれてしだいに複雑な形状になり, 劈開小面もより小さくなっている。

Photo. 12: Photo. 11 と同じ組織の 100°C における破面。

パーライトが増加するにつれて直径の小さいディンプル群が増加している。このようにディンプルの大きさは組織の影響を受けることがわかる。

4. 結 言

走査電子顕微鏡を使つて炭素鋼の各種の組織とシャルピー破壊面の関連性について調査した結果, 脆性破壊面とくに劈開破壊面および延性破壊面はともに組織の影響を強く受けることがわかつた。すなわち;

(1) フェライト-パーライト組織の劈開破壊面においては, パーライト量の増加とともにリバーマーキングの形状は複雑になり, 劈開小面は小さくなる。

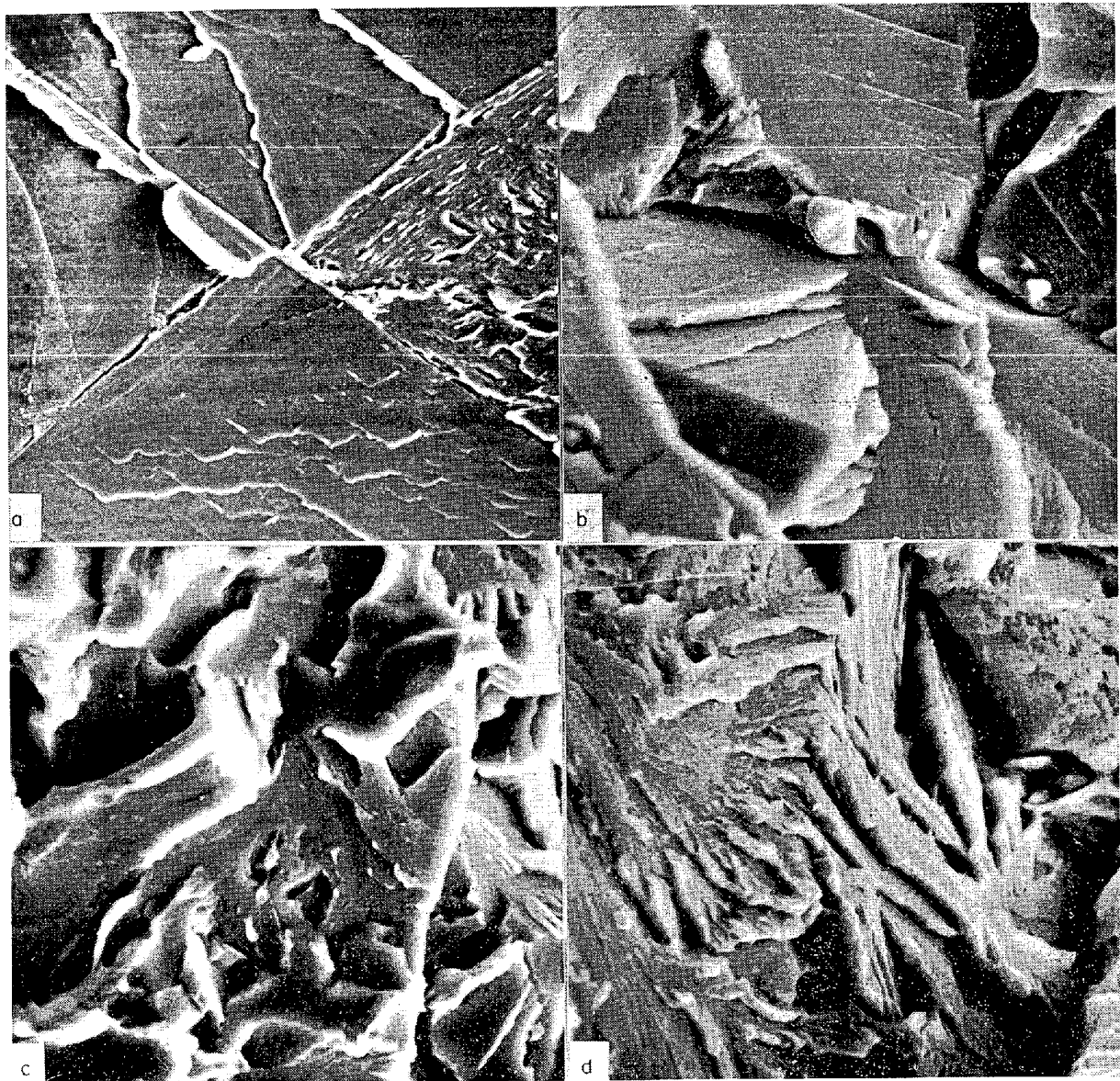
(2) フェライト-パーライト組織の延性破壊面のディンプルの直径は比較的小さいものと大きいものとの2群とに大別され, パーライト量の増加とともに小さいディンプル群の占める割合が多くなる。

(3) マルテンサイト, 焼もどしマルテンサイトならびにベイナイトと微細パーライトとが混在した組織および球状炭化物組織の劈開破壊面において劈開段が羽毛状を呈する。

(4) 球状炭化物組織ではディンプルの底部間の距離は炭化物粒間の距離とほぼ一致する, などの諸点で特長があつた。

文 献

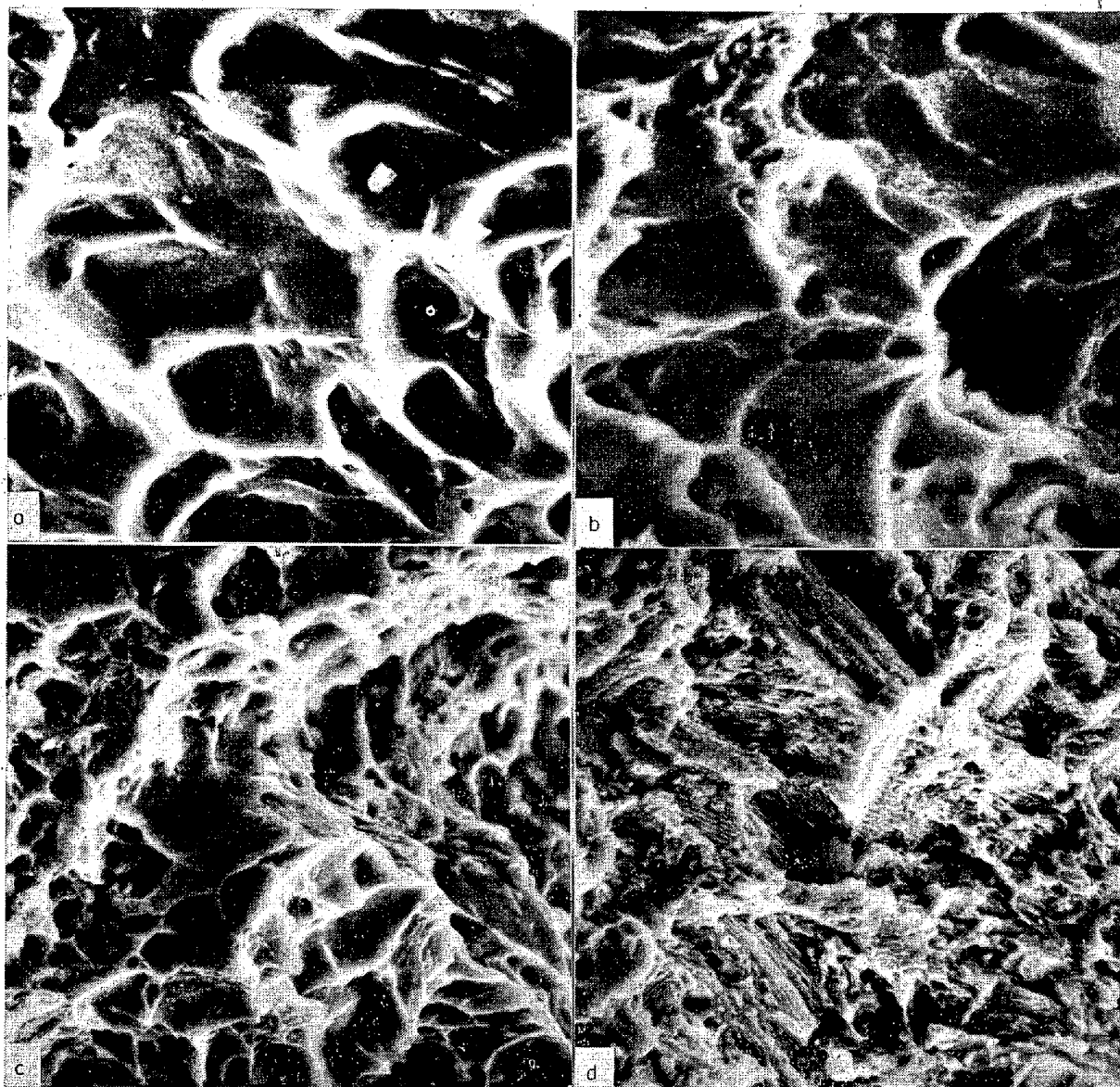
- 1) K. W. BURNS, F. B. PICKERING: J. Iron Steel Inst., 202 (1964) 11, p. 906
- 2) 中西: 鉄と鋼, 47 (1961) 4, p. 582
- 3) C. D. BEACHEM et al.: "Characterizing Fractures by Electron Fractography, Part XII, Illustrated Glossary, Section 1, Quasi-cleavage", Naval Research Lab. Memorandum Report 1432 (1963), p. 3
- 4) C. D. BEACHEM: Trans. Amer. Soc. Metals, 56 (1963) 3, p. 319



a) Magnetic mild steel (0.01% C) $\times 1000$ (2/3)
c) S45C (0.45% C) $\times 3000$ (2/3)

b) S20C (0.22% C) $\times 3000$ (2/3)
d) SUP3 (0.89% C) $\times 3000$ (2/3)

Photo. 11. Influence of carbon content on cleavage pattern in ferrite-pearlite steels.
Specimens were broken by notched-bar impact at -196°C .



a) Magnetic mild steel (0.01% C) $\times 3000$ (2/3)

c) S45C (0.45% C) $\times 3000$ (2/3)

b) S20C (0.22% C) $\times 3000$ (2/3)

d) SUP3 (0.89% C) $\times 3000$ (2/3)

Photo. 12. Influence of carbon content on dimple pattern in ferrite-pearlite steels.
Specimens were broken by notched-bar impact at 100°C.