

## 論 文

UDC 669.15-194 : 539.56 : 536.48 : 539.4.015.1 : 620.186.8

## 低炭素鋼の低温脆性破面と組織の関連性\*

寺崎 富久長\*\*・大谷 泰夫\*\*\*

## Study of Brittle Fracture Surfaces at Low-Temperature in Relation to Microstructures of Low Carbon Steels

Fukunaga TERASAKI and Hiroo OHTANI

## Synopsis:

The brittle fracture surfaces of the ferrite-pearlite and the martensite structure in low carbon steels were investigated with a scanning electron microscope. The direct correspondence between the fracture surface and the microstructure was made, and the dependence of the fracture mode on grain size was studied from the view point of the crystallographic orientation relationship.

The fracture surface prepared by the Charpy impact test revealed the discontinuous fracture process; it consisted of the repetition of nucleation and propagation of the microcrack, and the cleavage plane was determined as {100} by the orientation measurements of the facet pit and the fracture surface. These microcrack propagation units could be considered as the fracture facets and those in ferrite-pearlite structure were composed of some adjacent grains in which the crystallographic orientation differences about fracture surface {100} were very small. The fracture facet was generally larger than the ferrite grain size, but it did not correspond to the austenite grain directly.

The martensite structure, both as quenched and tempered, had the domains in which the crystallographic orientation of laths was uniform and the crack also nucleated and propagated in {100}.

(Received Apr. 10, 1971)

## 1. 緒 言

鉄鋼材料の衝撃靱性と組織との関連については、従来から多くの研究が行なわれているが、破面観察による破壊形態との関連において論じられた報告は比較的少ない。フェライト組織の場合には、結晶粒度が靱性に重要な役割を果たし、これらは、遷移温度に関する“Petchの関係”としてよく知られている。このような結晶粒度依存性は結晶粒界の破壊伝播抵抗や降伏応力の結晶粒度依存性などに起因するものと考えられている<sup>1)~3)</sup>。試料の断面観察から亀裂がフェライト粒界で停止している例も多く観察され<sup>4)</sup>、また破面観察から、亀裂の進行方向が粒界で変化する例やまた粒界でのリバーパターンと呼ばれる段の発生にともなう抵抗などが観察されている<sup>5)</sup>。これらの粒界の影響は、低温脆性破壊が{100}結晶面上に生ずる劈開破壊であり<sup>6)</sup>、粒界での劈開面の不連続性によるものであるが、シャルピー衝撃試験の破面などで、亀裂の伝播の結晶粒との対応については直接対応による詳しい観察は報告されていない。近年、走査型電子

顕微鏡が利用されるようになり、分解能の点では、レプリカ像に劣るが低倍率からの連続観察や立体観にすぐれているので、破面と断面組織の直接対応が容易に行なえるようになった。本報では、このような方法を利用して実験的にこの不連続亀裂の問題をとり上げようとするものである。

他方、調質鋼など複雑な組織の場合には、フェライト粒に相当する結晶粒度は明確ではなく、強度や靱性を論ずるのに、オーステナイト粒度やマルテンサイトラス(lath)などの微細変態性成物が金属組織因子として採り上げられている<sup>7)8)</sup>。しかしながら破面の性状はフェライト粒の場合とよく似た模様を示し、このことから調質鋼の低温脆性破面は擬劈開(quasi-cleavage)破面と呼ばれている。このような複雑な組織の場合の破面との対応については、すでにいくつかの報告があるが<sup>9)10)</sup>、最近の

\* 昭和45年4月本会講演大会にて発表  
昭和46年4月10日受付

\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所 理博

\*\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所

MATSUDA ら<sup>10)</sup>の報告では、低炭素鋼のマルテンサイト組織の場合には、マルテンサイトラスがいくつか集つて結晶方位が揃つた領域を形成し、この領域の大きさと破面観察で認められる変形の顕著な線 (heavy tear line) の平均間隔が対応しているところから、これらの大きさをフェライト粒に対比した有効結晶粒であると報告しており、また破面のファセットピットのレプリカ像からこの領域内では破壊は {100} 面と思われることを示した<sup>10)</sup>。

このようなマルテンサイト組織の破面の結晶方位については正確な測定結果はないが、薄膜の破断面の電子顕微鏡観察では必ずしも単純でなく、フェライト組織と同じ {100} 面のほかに {110}, {112}, {123} など多岐にわたることが報告されている<sup>12)</sup>。

本報ではこの擬劈開破面について破面と組織との直接対応から破面の形態について主として結晶方位の観点から調査し、フェライト組織の場合と対比して調査した結果について報告する。

## 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。フェライト-パ

ーライト組織を得るためには、供試鋼 A を用い熱処理は  $900^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr AC}$  および  $1200^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr FC}$  の焼準を行なつた。マルテンサイト組織については、供試鋼 B を用い  $1200^{\circ}\text{C} \times 10 \text{ min WQ}$  および  $1200^{\circ}\text{C} \times 10 \text{ min WQ} + 650^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr AC}$  の焼入および焼入れ焼もどし処理を行なつた。これら 3 種の供試材の組織の光学顕微鏡写真を Photo. 1 に示す。

### 2.2 試験方法

本報では、主として低温脆性破面の観察を目的としているので、ソーカット切欠、もしくは通常の  $2 \text{ mm V}$  切欠を付したシャルピー衝撃試験片を用い、 $-196^{\circ}\text{C}$  で破断せしめた試験片を観察に供した。

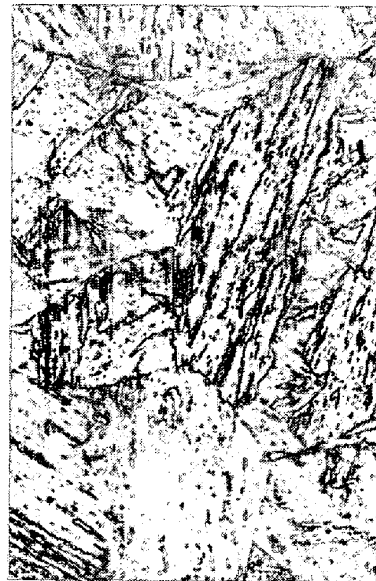
破面と組織の直接対応を得るために、破面を Ni メッキしたのち、破壊の進行方向に平行で破面に垂直な方向に試料を切断し、断面研磨の後ファセットピット試薬にて腐食を行ない、次いでメッキ層を剝離し、組織と破面との対応を観察した。剝離法については種々検討したが、Ni メッキ前に破面を  $5\% \text{CrO}_3$  水溶液中に 30 秒程度浸漬する方法<sup>10)</sup>がよく、またファセットピットを得る方法は TAOKA ら<sup>14)</sup>の用いた試薬でつぎの 3 種の試薬に順次浸漬することによつて得られる。

Table 1. Chemical composition of steels used.

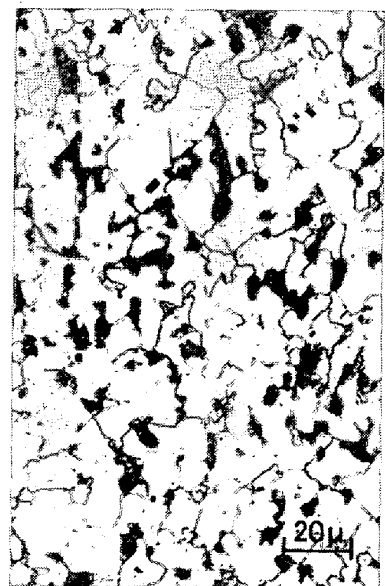
Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Sol. Al
A	0.15	0.33	0.30	0.020	0.018	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	0.024
B	0.12	0.34	0.70	0.020	0.028	0.29	0.79	0.40	0.46	0.06	0.003	0.045



steel B  
 $1200^{\circ}\text{C} \times 10 \text{ min WQ}$



steel B  
 $1200^{\circ}\text{C} \times 10 \text{ min WQ}$   
 $650^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr AC}$



steel A  
 $900^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ hr AC}$

$\times 500 (3/4)$

Photo. 1. Optical microstructures of materials used.

- A : 15 cc H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-2 cc HCl-100 cc H<sub>2</sub>O
- B : 1 cc HCl-10cc·FeCl<sub>3</sub>·6 H<sub>2</sub>O 飽和水溶液-  
100 cc H<sub>2</sub>O
- C : 50 cc C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH-50 cc CH<sub>3</sub>COOH もしくは  
H·COOH

得られたファセットピットは Fig. 1 に例示するごとく主として {110} 面から成り、副面は {100} 面である。これを利用して結晶方位を測定することができるが、本報では傾角顕微鏡を用いてこれらのファセットピットや破面の結晶方位を測定した。破面に関する観察はすべて JSM-2 型走査電子顕微鏡によつて行なつた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フェライト (+パーライト) 組織

フェライト+パーライト組織の場合の 2 mm V 切欠シャルピー破面についての亀裂発生源近傍の走査電子顕微

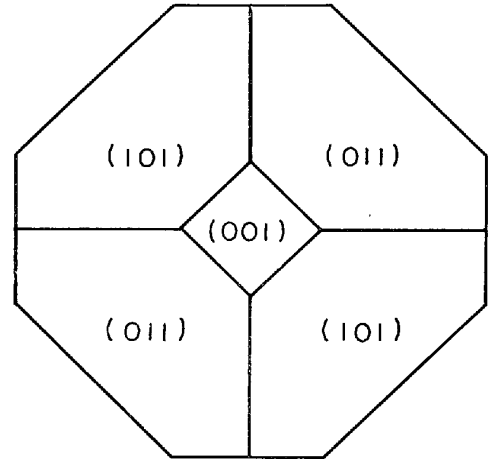


Fig. 1. Schematic illustration of a facet pit observed in the direction parallel to [001] axis.

鏡破面を Photo. 2 に示す。Photo. 2 は -196°C における破壊形態として、つぎの事実を示している。すなわ

V-notch Front

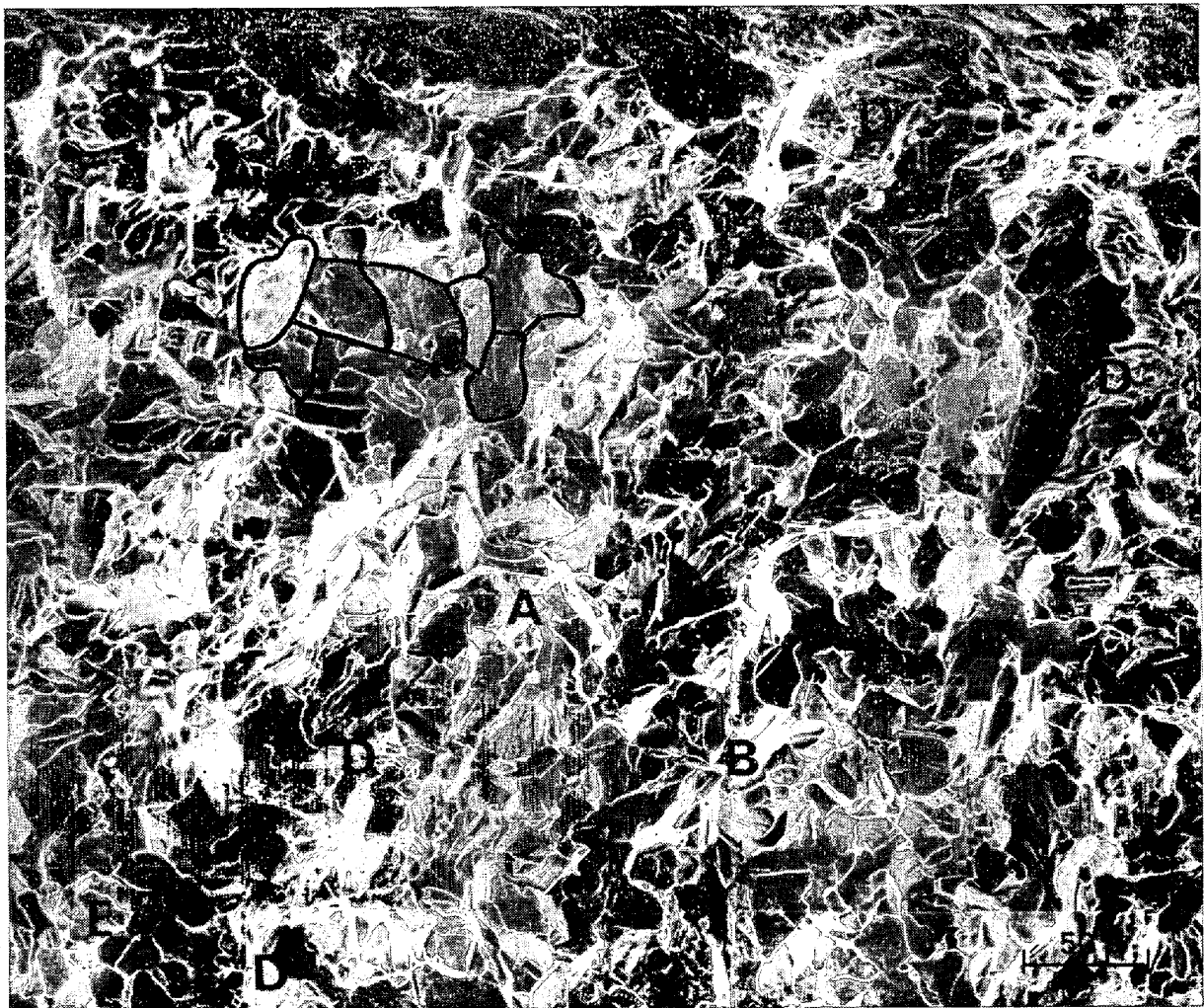


Photo. 2. Fractograph of ferrite-pearlite structure broken at -196°C. Fracture initiates at the neighbourhood of A~B and the continuous lines indicate microfracture units.

ち衝撃破壊の発生はマクロ的な亀裂発生領域の拡大連続撮影を行ない、個々のリバー・パターンの進行方向から判断すれば切欠底から 0.15~0.20 mm 程度内部に入った領域 (A~B) から発生していること、延性破面 (D) が局部的に存在し、これは切欠底のみでなく脆性破面内部にも存在し、この領域では破面の段が大きいこと、さらに破面は多数の微細亀裂から成り、破壊の伝播は微細亀裂の発生、伝播の繰り返して生じている。この1個の微細亀裂伝播域を破面単位と呼べば(その一例を Photo. 2 中に実線で示してあるが)、各破面単位には一つの微細亀裂発生点を含みつぎの破面単位とは連続的に繋がらずいつたん停止し、他の破面単位の微細亀裂発生によって結合するものと考えられる。Photo. 2 に示す延性帯はこれらの破面単位境界のそれよりも、さらに大きな破面単位群の不連続部であるが、破断温度が上げれば破面単位境界でも延性破断が観察されるようになる<sup>15)</sup>。この破面単位の大きさは Photo. 2 の E にみられるごとく、結晶粒程度のものもあるが一般には結晶粒よりも大きい。これは隣接結晶粒との結晶方位の相違が {100} 面に関して小さいためと考えられる。

Photo. 3 は組織と破面とを直接対応させて撮影した写真である。すなわち Fig. 2 に示すごとく同一個所を 3 方向より撮影し、Photo. 3 の上段は破面にほぼ垂直方向

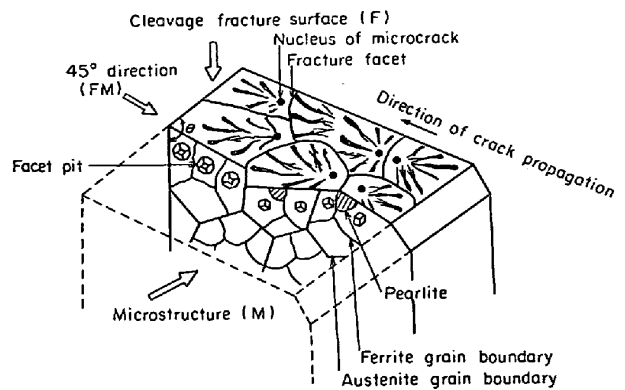


Fig. 2. Schematic illustration of observation of direct correspondence between microstructure and fracture surface. F, FM, and M in following photographs correspond to the observation direction illustrated here.

からの観察(破面)であり、下段は破面にほぼ垂直で破壊の進行方向を含む断面組織に垂直な方向からの観察したもの(組織面)である。中段は両者の位置関係を示すために両面に 45° の方向から撮影(45° 方向)したものである。以下は ( ) 内の表現に略する\*。Photo. 3 の組織面にはファセットピット、粒界、パーライト組織な

\* 撮影方向は Fig. 2 に示すように、破面、破面+組織面(45° 方向)、組織面である。これをおのおの F, MF, M として示す。

← Direction of crack propagation



×800 (4/7)

Photo. 3. Direct correspondence between fracture surface and microstructure. (ferrite-pearlite) A~F indicate the grain boundaries and the dotted lines indicate microfracture units. (P: pearlite)

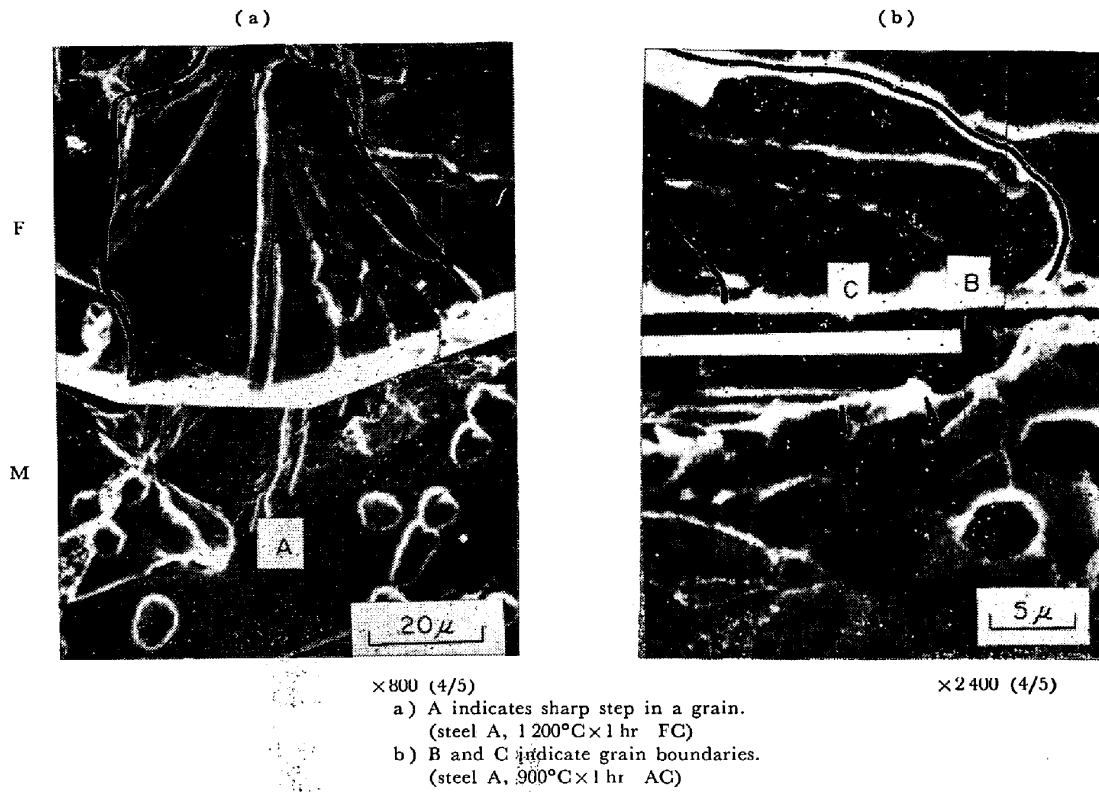


Photo. 4. Direct correspondence between fracture surface and microstructure. (ferrite-pearlite)

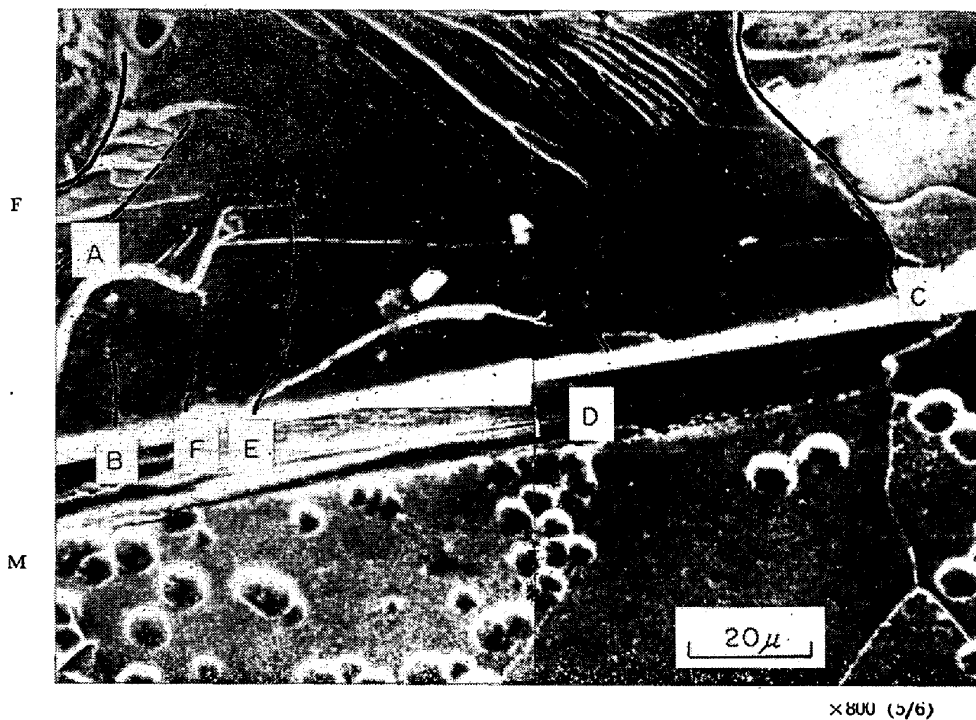


Photo. 5. Direct correspondence between fracture surface and microstructure. (ferrite-pearlite)

どが観察される。ファセットピットから後述する傾角顕微鏡を用いて破面の結晶方位を測定したところ、破面はすべて {100} 面であつた。粒界に対応する位置は A~F で示されているが、A, E では微細亀裂の発生を生じて

おらず、また F, C ではパーライト部であるが、この程度の倍率では明確な微細亀裂の再発生は観察されない。これらの点から破面単位と考えられる境界を破線で示した。

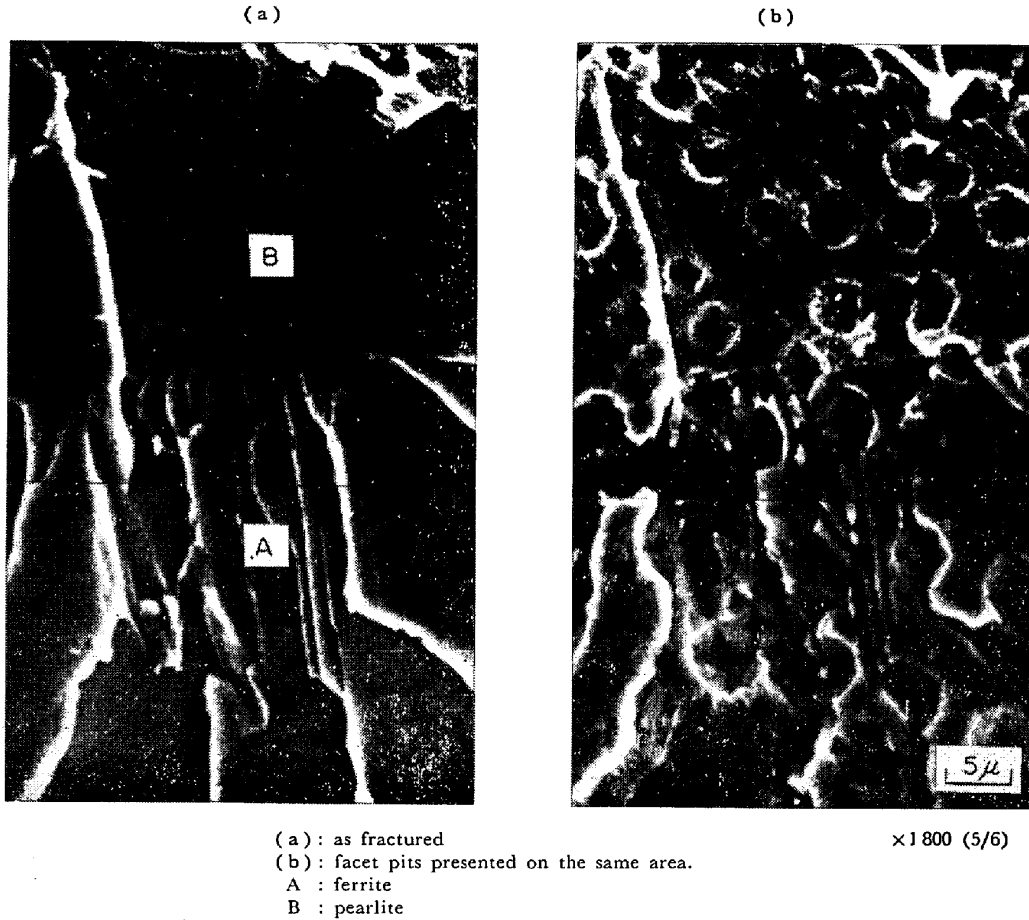


Photo. 6. Facet pits on the fracture surface of ferrite-pearlite structure.

Photo. 4 (a) は組織面と 45° 方向の対応を示す他の例であり、粒内に認められる強い段Aは破壊の進行過程で生じたものであり、破面に示された破線は粒界もしくは亜粒界によるもので亀裂の不連続境界になつていない。この場合の破面単位を実線で示す。Photo. 4 (b) は破面と組織の対応を示したものであるが B, C に示す段は、ほぼ粒界に対応しているようであるが、破面単位の点からは実線でかこまれた領域をとるべきものと考えられる。Photo. 4 は破面単位として若干不明りような例を挙げたが、一般には破面単位はかなり明確である。Photo. 5 は破面と組織の対応をさらに示したものであり、D点は小傾角粒界に対応するもので多数の“リバー・パターン”を生成している。E, F, Bなども同様であるが組織面には粒界は観察されず、亜粒界のごときものと考えられる。Aはまた異なつた種類の境界であり、結局破面単位としては実線で示された領域に対応している。Photo. 6は破面のファセットピット写真であり、点線で示された境界は {100} 面に関して小傾角粒界であるが、腐食前の“リバー・パターン”からも明らかに破壊の不連続境界になつていない。このように {100} 面についてわずかの傾角になつている場合は破面単位境界

になつていず、亜粒界のごとき役割であることを示している。

### 3.2 マルテンサイト組織

マルテンサイト組織の場合の直接対応写真を Photo. 7 に示す。Photo. 7 から明らかになどとく、破面 C は不連

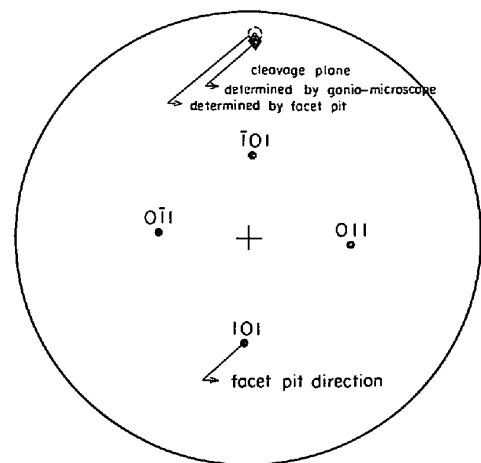


Fig. 3. Crystallographic orientation of cleavage plane determined by gonio-microscope in comparison with that determined by facet pit measurement.

← Direction of crack propagation

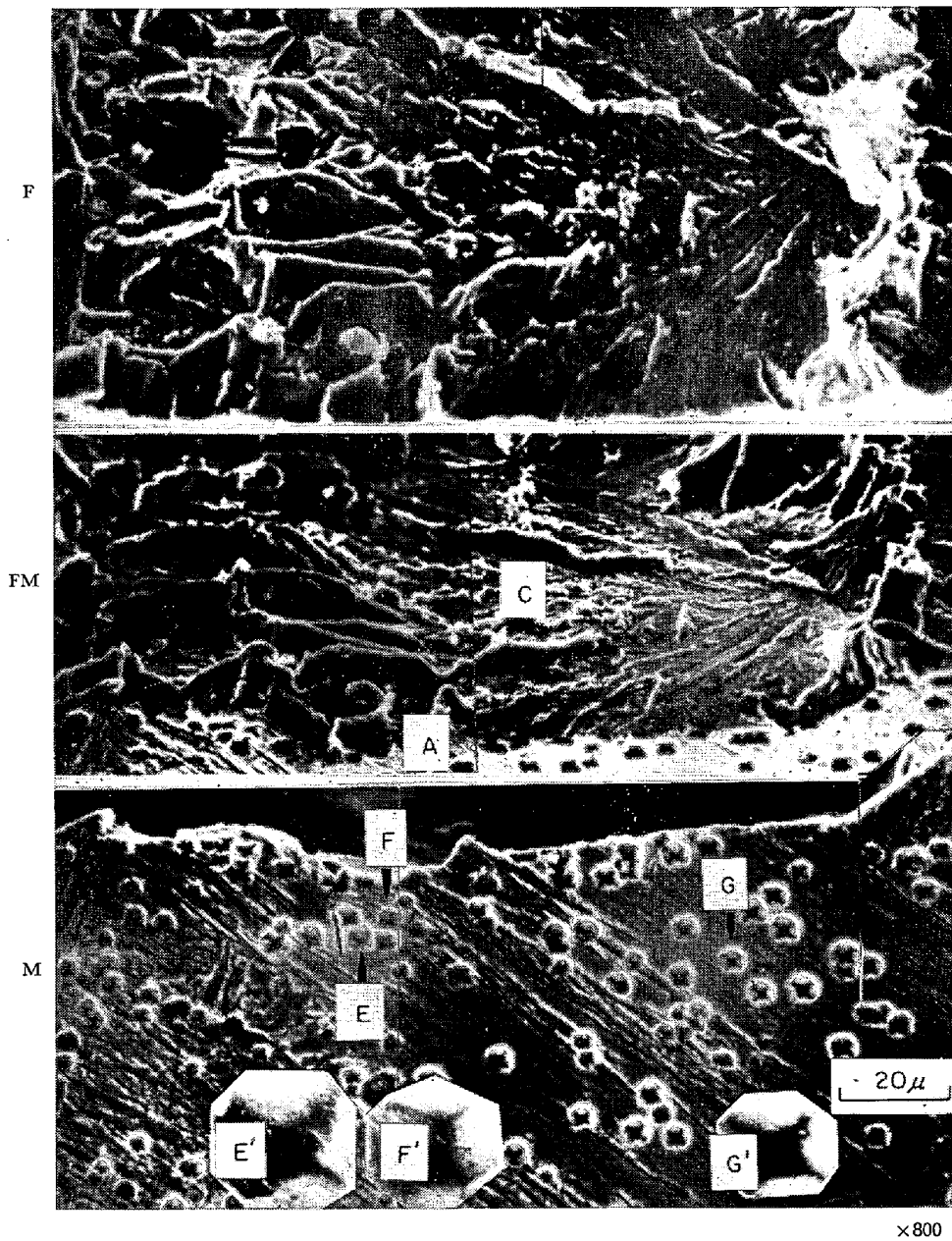
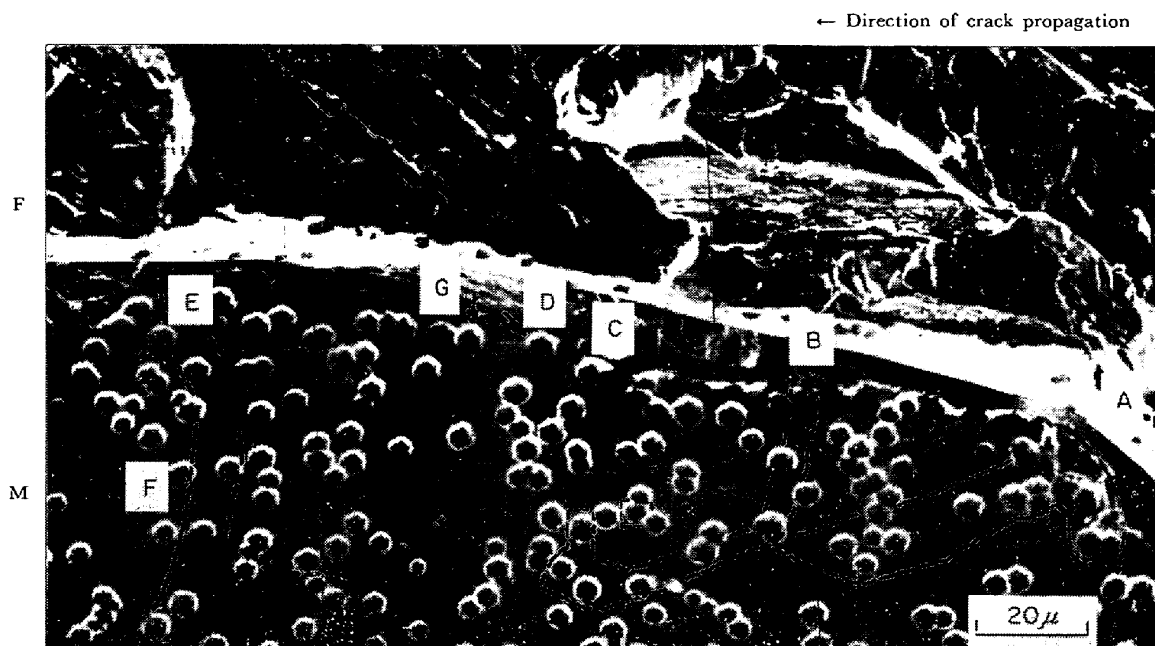


Photo. 7. Direct correspondence between fracture surface and martensite structure. E'~G' show the facet pits of E~G at large magnification.

統的ではあるがフェライト粒における“リバー・パターン”とよく似た模様から成っており、あたかもフェライト粒の破面単位と同一の様相を示している。組織観察では、ファセットピットは明りような結晶面を示しており、少なくともファセットピットの大きさ（約  $2\mu$ ）程度でマルテンサイトは同一の結晶方位にあることを示している。またC面に対応する組織は、このファセットピットからすべて同一の結晶方位にあることを示している。A部での破面の変化は組織の結晶方位の変化と対応し、E, G点でのファセットピット（E', G'はその拡大像）は、ほぼ同一の方位にあり紙面に垂直方向にほぼ

[100]、上下方向に [010] の方位を示している。このことから破面Cは {010} 面であることがわかるが、傾角顕微鏡の測定結果を Fig. 3 に示す。測定された破面の結晶方位とこれと独立にファセットピットからこの領域の結晶方位を測定し、それから得られた {010} 面とはよく一致している。（Fig. 2 参照）

これらのマルテンサイト組織とフェライト組織の破面単位を対比するための焼もどしマルテンサイトの例を Photo. 8, 9 に示す。Photo. 8 は  $45^\circ$  方向と組織の直接対応であるが、フェライト粒同様明瞭な破面単位がみられ、A, B, C, E など破壊の不連続が生じている。



×800 (3/4)

Photo. 8. Direct correspondence between fracture surface and microstructure.  
(tempered martensite)

Photo. 1からもわかるごとく、オーステナイト粒は $100\mu$ 以上で写真の横幅程度であり、これらの単位よりかなり大きい。ファセットピット観察からA B, B C間は簡単な方位の目安で表現すれば  $\{111\}\langle 112\rangle$  (紙面垂直方向に  $\langle 111\rangle$ , A B, C Dに垂直方向  $\langle 112\rangle$ ) に近いが、点線で示された  $\{100\}\langle 110\rangle$  方位をもつバンドが、A, B点にみられる。C点にはこの方位帯はないが、Cを境としてC~Eでは  $\{111\}\langle 112\rangle$  と異なった方位を示している。しかしながらG Dなどに矢印で示すピットでわかるごとく、C E間はわずかの方位差をもついくつかの領域から構成されており、A B間などと異なるが、いずれも破面垂直方向に  $\langle 100\rangle$  軸で組織面に  $(001)\sim(011)$  に近い回転になっているようである。したがって破面的には同一単位を構成するものと考えられる。これらの事実を更にみるため、Photo. 9に他の一例を示す。Photo. 9はA~Cの領域はほぼ  $\{100\}\langle 100\rangle$  で同一であるが、B部に  $\{110\}\langle 112\rangle$  に近い方位があるため異なった破面単位を構成している。またD E域ではCに比し破壊の進行方向の変化があり、またこの間にGで示される点線位置に不連続に近い領域があるが明確な亀裂の停止再発生は生じていない。結晶方位の点からは、C部からEまでの間に  $\{100\}\langle 100\rangle$  から  $\{110\}\langle 100\rangle$  まで回転しており、破面に垂直の結晶方位  $\langle 100\rangle$  に関しては大きな変化を示さないことを示している。

以上の観察結果からマルテンサイト組織の場合にも、ラスの結晶方位が揃った領域では、低温脆性破壊に関し

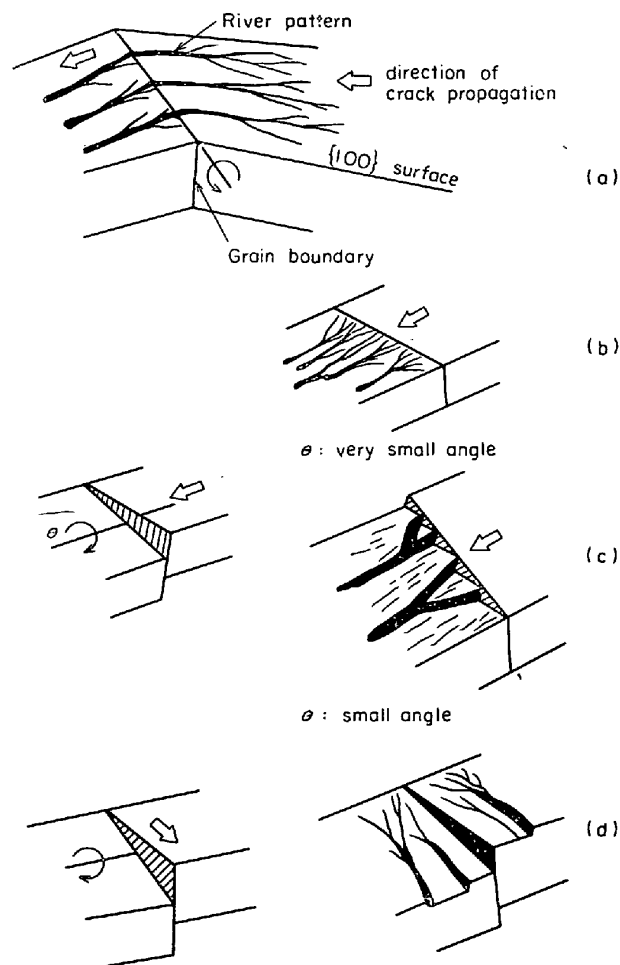
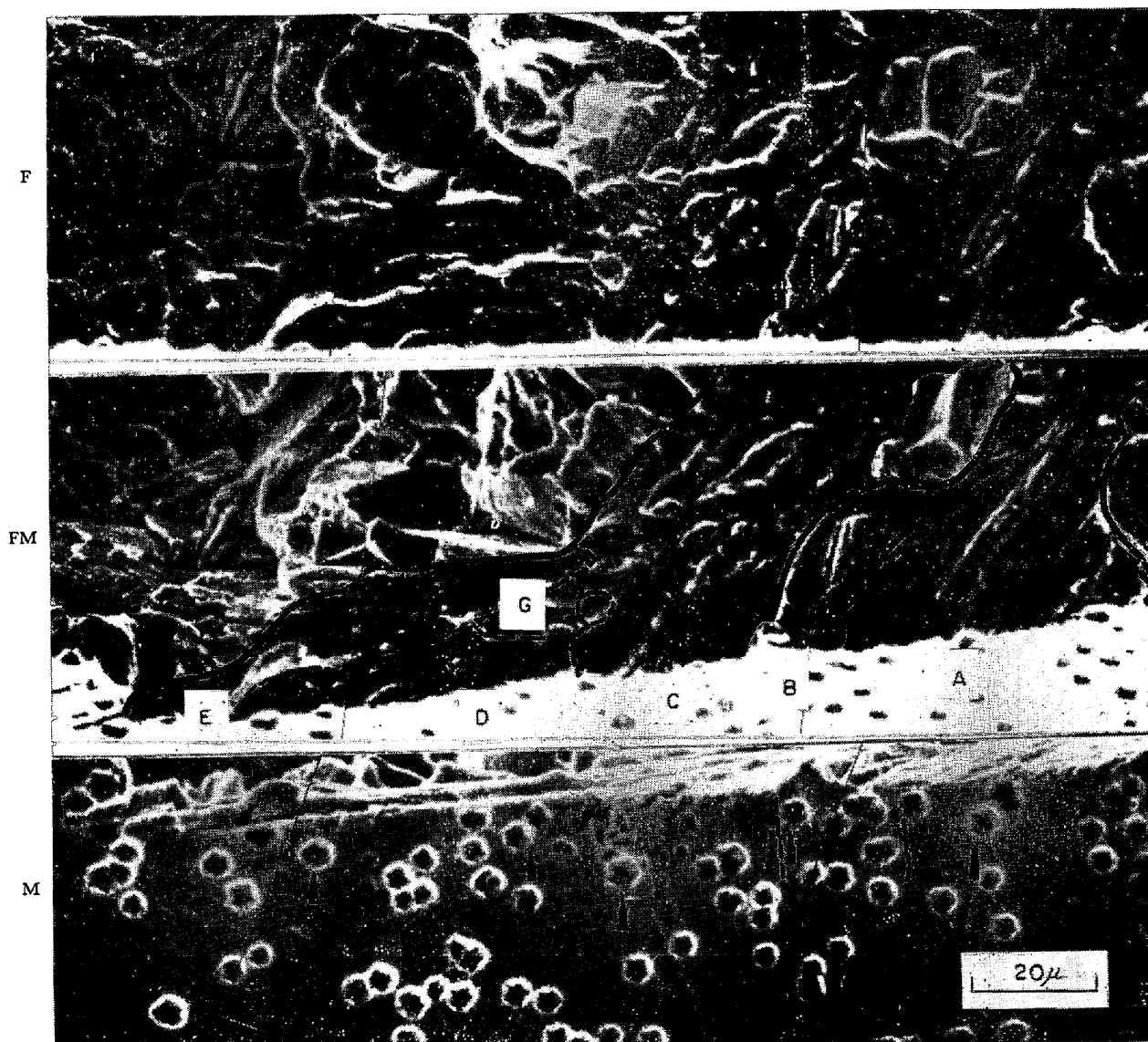


Fig. 4. Schematic representation of the changes in cleavage fracture surface at various kinds of small angle grain boundaries.



← Direction of crack propagation



×800 (9/10)

Photo. 9. Direct correspondence between fracture surface and facet pits on tempered martensite structure.

てフェライト粒と同様な挙動を示し、擬劈開破面の結晶方位は {100} 面をなしていることが明らかとなった。これらの事実から破面単位として破壊の生ずる {100} 面を微小な角度範囲で共有する領域であるといえる。

#### 4. 検 討

##### 4.1 フェライト組織の破面単位

フェライト粒度と破面単位の対応は、破面単位が一般に大きく近接結晶粒との方位関係が破面の結晶方位である {100} 面に関して少傾角をなしている場合には、粒界が亜粒界のごとく有効な亀裂伝播阻止効果をもたないため、これを模型的に分類すれば Fig. 4 のごときものとなる。ねじれ境界や傾角境界の小傾角粒界の種類および

角度の大きさによつて破面の様相は変化し、一般には両者の混合であるが、典型的な模様を (a)~(d) に示した。写真からこれらの例に対応させれば (a) は適切な例は見当たらないが、Photo. 5 E の亜粒界などがこの例に近く、(b) は Photo. 3 A, E, Photo. 5 D などが対応する。(C) の例としては Photo. 3 C, Photo. 5 A があり、(d) は Photo. 4 (b) の B, C がこの類と考えられる。TURKALO<sup>9)</sup> は、フェライト+パーライト組織の場合に破面の不連続性を観察しているが、破面の単位はパーライトコロニーを最小単位としており、大きいものではいくつかのコロニーを横切つてオーステナイト粒界まで達するものもあることを報告している。これらの結果は、結晶方位の観点からみれば破面の結晶方位である

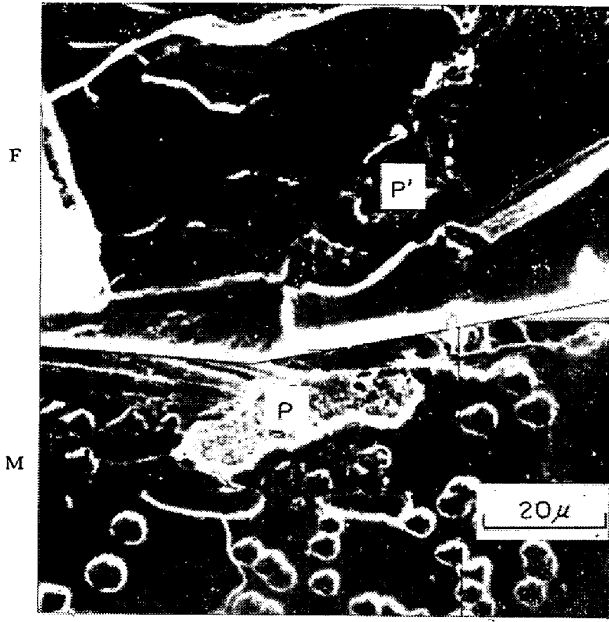


Photo. 10. An example of fracture surface at pearlite site in ferrite-pearlite structure.

{100} 面に関して少傾角をなしている場合に相当するものと考えられ本実験結果から説明できるものと思われる。

本実験結果では主としてフェライト粒について報告したが、パーライト部でも一般には破面の様相は類似しており、これらについては別報で報告の予定であるが、ここでは Photo. 10 にパーライト部の破面の一例を挙げるにとどめる。つぎに、 $\gamma \rightarrow \alpha$  変態に際して隣接結晶粒間の {100} に関する方位関係について検討する。変態の結晶方位関係を Kurdjumow-Sacks 関係であると仮定し、 $(011)_\alpha \parallel (111)_\gamma$ ,  $(11\bar{1})_\alpha \parallel (10\bar{1})_\gamma$ ,  $(\bar{2}1\bar{1})_\alpha \parallel (\bar{1}2\bar{1})_\gamma$  の場合のステレオ撮影図を Fig. 5 に示す。この場合、 $(011)_\alpha \parallel (111)_\gamma$  を固定すれば  $(\bar{2}1\bar{1})_\alpha \parallel (\bar{1}2\bar{1})_\gamma$  のほかに  $(\bar{2}1\bar{1})_\alpha \parallel (\bar{2}11)_\gamma$ ,  $(21\bar{1})_\alpha \parallel (2\bar{1}\bar{1})_\gamma$  の関係が得られ、これは  $[011]_\alpha$  のまわりに  $(\bar{2}1\bar{1})_\alpha \parallel (\bar{1}2\bar{1})_\gamma$  からそれぞれ  $60^\circ$ ,  $10^\circ$  の回転によつて得ることができる。さらににこれらの双晶関係が存在するので結局、 $(011)_\alpha \parallel (111)_\gamma$  系に属する K-S Variant の数は6個となる。この6つの系について {100} 劈開面の方位関係を Fig. 6 に示すが、それぞれ約  $10^\circ$  離れた6つの近接グループに分類できる。Photo. 3 A の側面からは  $20^\circ$  近い角度をなしているので少なくともこの  $10^\circ$  程度の方位差は、同一破面単位にあるものと考えられる。すなわち、ある破面に着目した場合6つの系の中、着目する破面以外の他の5つの中の1つは  $10^\circ$  程度の近接小傾角粒である。さらに、他の  $\{110\}_\alpha \parallel \{111\}_\gamma$  系について考察すれば Fig. 5 に示すごとく  $(0\bar{1}\bar{1})_\alpha \parallel (11\bar{1})_\gamma$  系を除いて他の2つすなわち、 $(101)_\alpha \parallel$

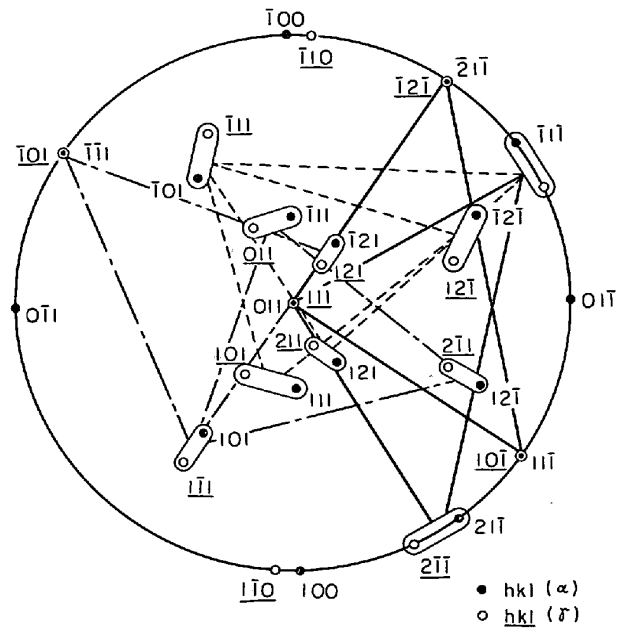


Fig. 5. Stereographic projection of Kurdjumow-Sacks relation.

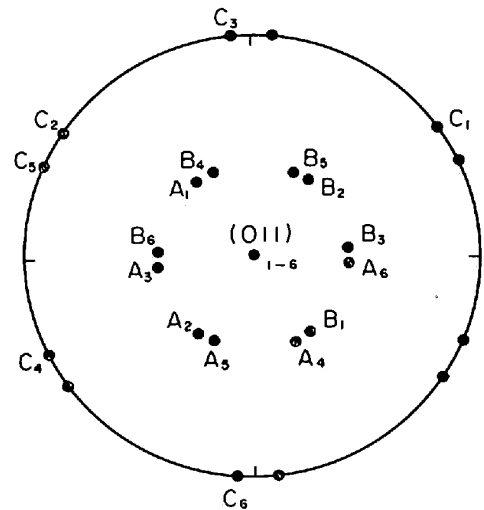
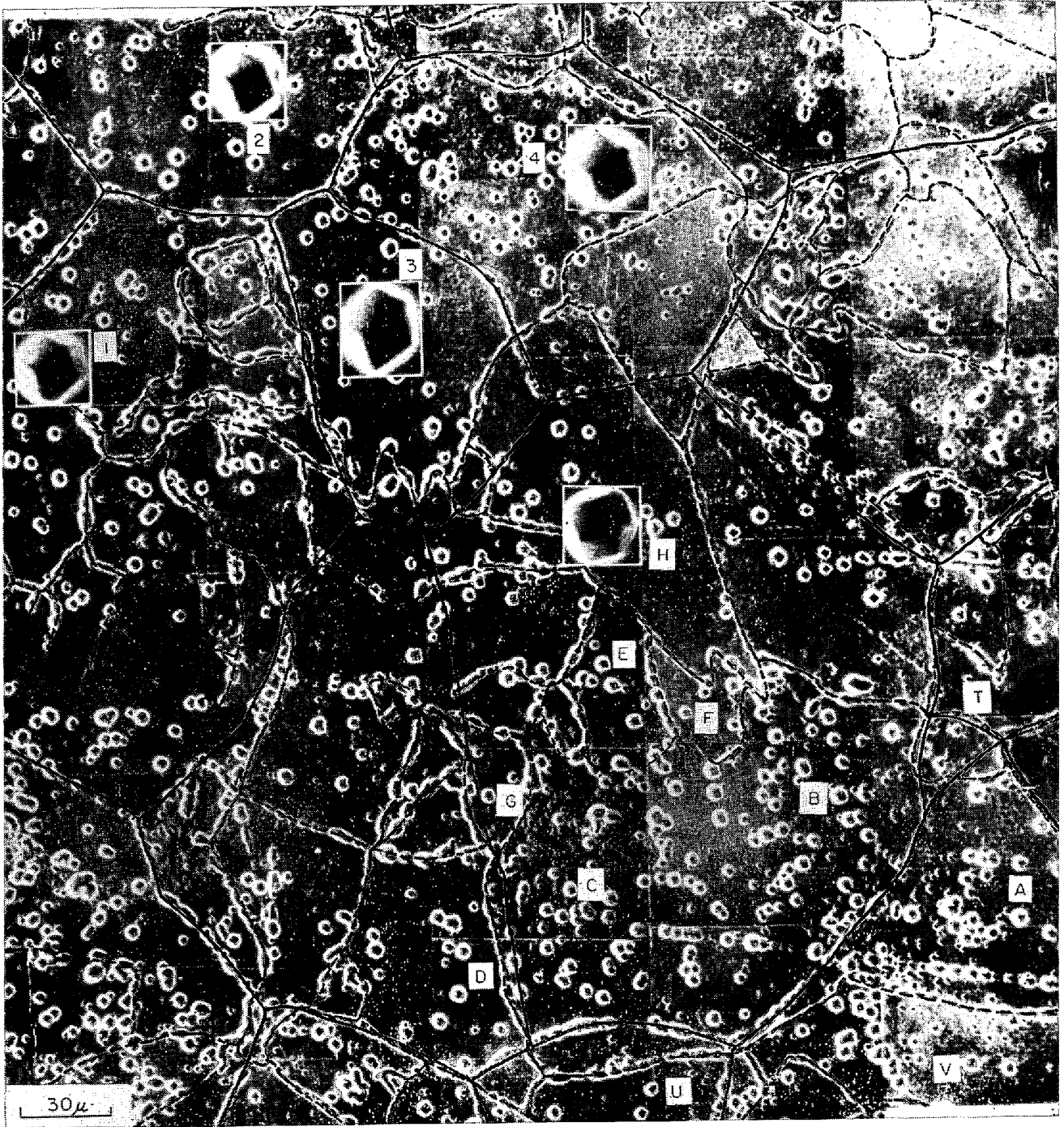


Fig. 6. Stereographic projection of {100} cleavage planes of K-S relation of six variants having  $(111)_\gamma \parallel (011)_\alpha$ .

Variants are defined as follows; 1.  $[\bar{1}10]_\gamma \parallel [\bar{1}\bar{1}1]_\alpha$ , 2.  $[\bar{1}10]_\gamma \parallel [\bar{1}1\bar{1}]_\alpha$ , 3.  $[\bar{1}01]_\gamma \parallel [\bar{1}\bar{1}1]_\alpha$ , 4.  $[\bar{1}01]_\gamma \parallel [\bar{1}1\bar{1}]_\alpha$ , 5.  $[0\bar{1}1]_\gamma \parallel [\bar{1}\bar{1}1]_\alpha$ , 6.  $[0\bar{1}1]_\gamma \parallel [\bar{1}1\bar{1}]_\alpha$ .  
Relative orientations of cube axes of six variants: A =  $[001]_\alpha$ , B =  $[010]_\alpha$ , C =  $[\bar{1}00]_\alpha$ ;  $(011)_\alpha$  projection.  
(quoted from the reference 17).

$(1\bar{1}1)_\gamma$ ,  $(\bar{1}01)_\alpha \parallel (\bar{1}11)_\gamma$  はわずかの回転によつて  $(011)_\alpha \parallel (111)_\gamma$  系に一致する系をそれぞれ2つ含む。したがつて合計24個のK-S Variantの中、6つは相互に近接小傾角粒になるので、隣接粒の数にもよるが、ランダムなvariantをとるにしても2~3個の結晶粒が破面単位



×800 (3/5)

Photo. 11. Relation between  $\gamma$  and  $\alpha$  grains.

Continuous and dotted lines show  $\gamma$  and  $\alpha$  grain boundaries respectively.

をなしてもよいことになる。さらに  $20^\circ$  程度まで許せば同一破面単位に属する結晶粒の数は一層大きくなる。まだどの程度の角度まで破面単位に入るかは現在のところ測定していないが応力軸と亀裂面の相対関係や粒界の種類、亀裂伝播方向など局部条件によるものと思われる。

$\gamma \rightarrow \alpha$  変態時の隣接  $\alpha$  粒相互の関係とこの  $\gamma$  粒との関係をみるためにまず真空法<sup>10)</sup>にて  $\gamma$  粒界を現出させた。つぎにファセットピット腐食を行ない更に若干研磨の

後、フェライト粒を現出させ  $\gamma$  粒、 $\alpha$  粒の対応を求めた。Photo. 11 はその対応写真であり、実線は  $\gamma$  粒界、点線は  $\alpha$  粒界を示す。Photo. 11 中のファセットピットの方位測定結果を Fig. 7 に示す。1~4 に示す異なる4個の  $\gamma$  粒内のファセットピットは実験誤差内で一致し、研磨後の  $\alpha$  粒は同一粒であつた。A~H については、A, B, C, E は同一の  $\alpha$  粒をなし、また F, G はこの粒と紙面にほぼ垂直方向の  $\{100\}$  面に関して  $10^\circ$  以内、

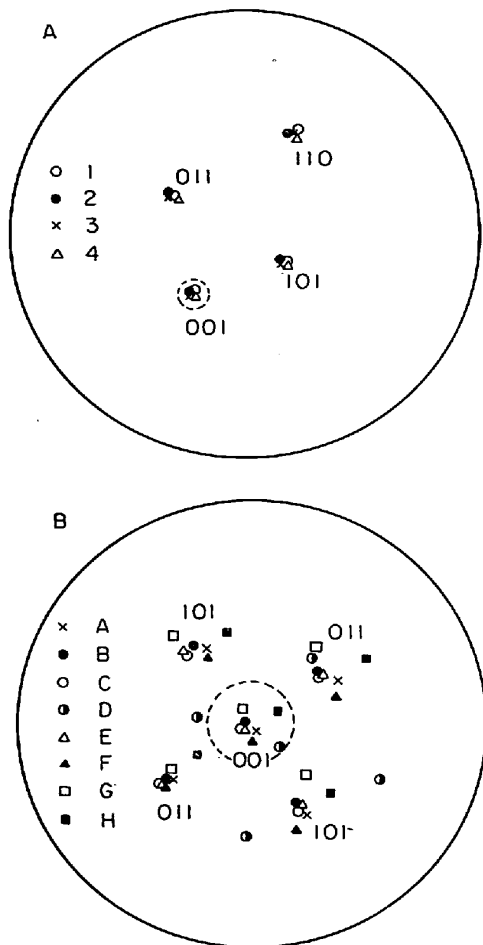


Fig. 7. Crystallographic orientations determined by facet pits of ferrite grains which are indicated in Photo 11.

D, H は  $20^\circ$  程度の差異を示している。

この結果では、A, B, Cで示される $\alpha$ 粒に対して、同一 $\gamma$ 粒から生成した $\alpha$ 粒 G, Fなどがおのおの異なる $\gamma$ 粒から生成した $\alpha$ 粒 D, U, V, Tなどよりもより近い $\{100\}$ 方位をもつことなどから、同一 $\gamma$ 粒内より生成した $\mu$ 粒がより同一破面単位を形成しやすいように思われるが、結論を得るためにはさらに多くの実験が必要である。いずれにしても破面単位が $\gamma$ 粒の大きさと直接対応しないことは明らかである。

#### 4.2 マルテンサイト組織

実験結果でみたごとく、マルテンサイト組織の場合にもほとんどフェライト粒と同様な関係で論議しうることを示した。マルテンサイト組織の場合にはさらに微細なラスに分割され、また炭化物の形態の差などが問題となる。マルテンサイト組織の場合の電子顕微鏡透過写真の一例を Photo. 12 に示す。Photo. 12 にみられるごとく、ラスの揃った領域では電子回折では単一の結晶方位を示す程度には揃っている。このことは晶癖面が  $\{110\}_\alpha$

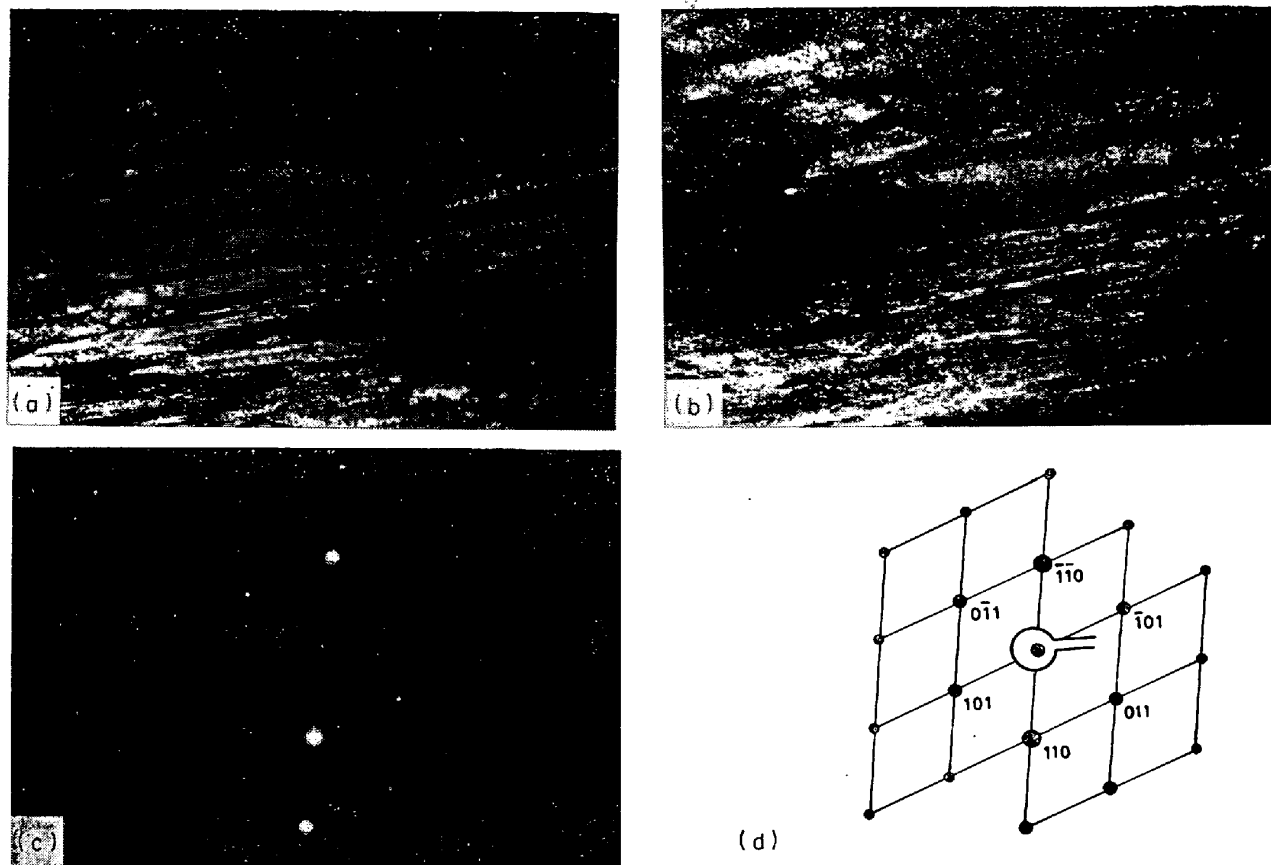
$\{111\}_\gamma$  であり、多重度の大きい面になっていることなど揃いやすい挙動をしているものと考えられる。これらの領域中には、同一の晶癖面をもつ双晶関係にある他の variant で変態したラスが僅かに存在するが<sup>10)</sup>、この場合は破面単位境界を形成するにいたらず“リバー・パターン”の形態を変化させる程度と考えられる。MATSUDA<sup>10)</sup>は破面にみられる有効な“heavy tear line”としてオーステナイト粒界、方位の揃ったラスからなる領域 (bundle) の境界などを挙げているが、一般にオーステナイト粒界は揃ったラスからなる領域の境界をなしており、本実験結果と似た結果になっている。しかしながら破面を結晶学的にみた場合には、必ずしもこれらの境界に対応したものではなく、それよりも破壊の進行する $\{100\}$ 面を微少な角度で共有する領域の大きさになっている。このような領域の大きさについては、微細亀裂の生成伝播の単位と対応しており、このような衝撃破面の構成と靱性の関係については、さらに検討の要がある。すなわち遷移温度に関する“Petch の関係”についての従来の論議は、初期亀裂の大きさと降伏応力の粒度依存性を通じて結晶粒度の影響が論じられている。この点からは必ずしも $\{100\}$ 面を単位とした大きさと対応するものではなく、とくにマルテンサイト組織の場合の強度の粒度依存性はフェライト粒と異なるものと考えられ、さらに遷移温度の論議になれば塑性変形の影響が強くなり、それほど簡単ではない。

本報では主として低炭素鋼のフェライト+パーライト組織、マルテンサイト組織について報告したが、次報では、ベイナイト組織を含めて主として冷却速度の函数として組織を変え靱性との問題を論議し、また変態挙動の異なる高炭素鋼の場合や、温度の函数としての遷移領域の問題についてこのような観点から順次報告する予定である。

## 5. 結 言

低炭素鋼のフェライト+パーライト組織およびマルテンサイト組織の低温脆性破面について、破面と組織の対応から破面構成の結晶粒度依存性の問題を主として結晶方位の観点から調査した。シャルピー衝撃破面は、不連続な破壊の進行を示しており、微細亀裂の生成伝播過程の繰返しから構成されている。この領域を破面単位とすれば、フェライト+パーライト組織では破面単位は $\{100\}$ 面を微少な角度で共有する隣接結晶粒からなっており、一般には通常のフェライト結晶粒より大きい。オーステナイト粒とは直接対応するものではない。

マルテンサイト組織の場合には、焼入れ材、焼もどし



a : bright field image, b : dark field image, c : diffraction pattern,  
d : schematic representation of diffraction pattern.

Photo. 12. Electron micrographs of martensite.

材にかかわらず，結晶方位的に揃ったラス群よりなる領域を有しており，亀裂の発生と伝播はこの領域を単位として，その $\{100\}$ 面で生じている．また破面単位の構成についても，この領域をフェライト粒と置き換えればまったく類似した関係を示し，この観点から低炭素マルテンサイト組織の場合には擬劈開破壊も劈破壊と本質的な差異を示さない．しかしながらマルテンサイト組織は，さらに微細な構造をもつものであり，これらの点を含めて，破面単位と靱性の関連について調査する必要があるが，この結果の報告は次報以下に譲る．

最後に，本実験を通じて有益なご助言をいただいた中央技術研究所主任研究員邦武立郎氏ならびに，走査電子顕微鏡観察にご努力いただいた上野谷繁雄氏に感謝の意を表する．

#### 文 献

- 1) J. HESLOP and N. J. PETCH: *Phil. Mag.*, 3 (1958), p. 1128
- 2) A. H. COTTRELL: *Trans. AIME*, 212 (1958), p. 192
- 3) A. A. JOHNSON: *Phil. Mag.*, 6 (1961), p. 177
- 4) G. T. HAHN, et al.: "Fracture" (proc. intern. conf. in Swampscott 1959), p. 92
- 5) C. CRUSSARD, et al.: *JISI* (1956), p. 146
- 6) F. TERASAKI: *Acta Met.*, 15 (1967), p. 1057
- 7) B. B. CHINA and P. JUBB: *JISI*, 193 (1959), p. 329
- 8) T. KUNITAKE: *Trans. ISIJ*, 7 (1967), p. 254
- 9) A. M. TURKALO: *Trans. AIME*, 218 (1960), p. 24
- 10) S. MATSUDA, et al.: *Trans. JIM*, 9 (1968), p. 343, 11 (1970), p. 36
- 11) S. MATSUDA, et al.: *Trans. JIM*, 11 (1970), p. 371
- 12) H. LINDBORG and B. L. AVERBACH: *Acta Met.*, 14 (1966), p. 1583
- 13) G. HENRY, et al.: "Microfractography" *Edd. Métaux.*, (1966)
- 14) T. TAOKA, F. FURUBAYASHI and S. TAKEUCHI: *Jap. J. Appl. Phys.*, 4 (1965), p. 120
- 15) 寺崎, 大谷: 鉄と鋼 (掲載予定)
- 16) 盛, 藤田ほか: 鉄と鋼, 54 (1968), S 203, S 204, S 205
- 17) J. M. CHILTON et al.: *JISI*, 208 (1970), p. 184