

## 論 文

UDC 669.127-172 : 539.375 : 539.379.4

## 鉄単結晶の劈開破壊\*

坂木庸晃\*\*・中村正久\*\*

## Cleavage Fracture of Iron Single Crystals

Tsuneaki SAKAKI and Tadahisa NAKAMURA

## Synopsis:

Iron single crystals with various orientations were tested at low temperatures.

1) At  $-196^{\circ}\text{C}$ , the behaviour of the crystals depended on the orientations of their stress axis. When the angle between the specimen axis and  $[001]$  was less than  $26^{\circ}$ , the specimens fractured by cleavage with prior twinning. Most of the specimens were cleaved at  $\langle 011 \rangle$  type intersection of two twins, but some of them were cleaved by a twin going through the specimen surface. The specimens with the angle between  $[001]$  and tensile axis greater than  $36^{\circ}$  showed slip deformation preceded by twinning. The specimen with tensile axis near  $[111]$  was fractured by cleavage after crack opening at twins due to plastic deformation.

2) The crystals tested at  $-130^{\circ}\text{C}$  fractured in ductile manner with one exception.

(Received July 25, 1972)

## 1. 緒 言

鉄および鉄合金が低温において  $\{001\}$  面に沿って劈開することが BARRETT ら<sup>1)</sup>によつて明らかにされたのち、鉄単結晶の劈開に関する研究が盛んになった。鉄単結晶の低温における劈開破壊は引張方位と密接な関係があることが ALLEN ら<sup>2)</sup>の系統的な実験によつて明らかにされ、 $-196^{\circ}\text{C}$  においては引張方位が  $[001]$  からおよそ  $32^{\circ}$  以内にある場合および  $[011]$  のごく近傍の場合は劈開が生じ、それ以外の方位では劈開がおこらないことが示された。その後 EDMONDSON<sup>3)</sup>は ALLEN らと同様の実験を行なつたが結果は ALLEN らの結果とかなり異なつており、引張方位が  $[001]$  から  $24^{\circ}$  以内の場合は大多数の試験片は双晶の発生が先に起こりその後劈開し、ごく一部の試験片のみ双晶の発生を見ずに劈開した。引張方位が  $[001]$  から  $24^{\circ}$  以上離れている場合は、双晶発生のおとすべり変形が続き 100% 絞れることを示した。最近の研究<sup>4)</sup>では純鉄の  $-196^{\circ}\text{C}$  における変形挙動は ALLEN ら<sup>2)</sup>の結果よりも EDMONDSON<sup>3)</sup>の結果によく似た結論を得ている。

鉄および鉄合金の劈開応力と双晶発生応力がきわめて近く、双晶発生と劈開の間に密接な関係があることが知られて以来<sup>1)</sup>、双晶による劈開クラックの発生機構に目が向けられるようになりつぎのような説が提案されてい

る。つまり 2 個の双晶系の双晶が  $\langle 011 \rangle$  型の交さを起こし交さ線付近の集中応力によつて劈開クラックが発生するという説<sup>5)6)7)</sup>、双晶から放出されたエミッサリー転位の合体によつてクラックが発生するという説<sup>8)</sup>、双晶自体がさきに破壊を起こし母格子に劈開クラックを発生させるという説<sup>9)</sup>、双晶が障害物に高速度で衝突したときの衝撃波によつてクラックが発生するという説<sup>10)</sup>がある。また双晶とは関係のない劈開のメカニズムとしては、2 個のすべり系をすべつて来た転位が合体して劈開クラックを作るという考え<sup>11)12)</sup>、すべりが粒界などに阻止されるために集中応力が発生して破壊に到るという説<sup>13)</sup>がある。

低温における劈開の実験には鉄および鉄-シリコン合金がよく用いられるが、両者の性質は異なつており、鉄-シリコン合金の場合は双晶の  $\langle 011 \rangle$  型交さ説<sup>5)6)</sup>が有力であるけれども、純鉄の場合は双晶と劈開の間にはかなりへだたりがあるという説もある<sup>3)</sup>。

この実験は、引張方位が広い範囲にわたつて分布した純鉄の単結晶を用いて低温で引張試験を行ない、破面の観察を通じて劈開破壊の機構を調べ上述のいくつかの破壊機構のいずれの場合が多いかを検討したものである。

\* 昭和46年10月本会講演大会にて発表

昭和47年7月25日受付

\*\* 東京工業大学金属工学科 工博

Table 1. Chemical compositions of specimens.

C	0.008 (wt%)
N	0.001
O	0.003
Si	0.003
Mn	0.001
P	0.002
S	0.001
Al	0.003

## 2. 実験条件

鉄の単結晶は電解鉄を真空溶解してカーボン脱酸した鉄を用いてひずみ焼鈍法で作った。単結晶の化学成分は

Table 1 に示すとおりであつた。ひずみ焼鈍法で作った単結晶の板から厚さ 1.8 mm, 幅 1.6 mm, 標点間距離 20 mm の試験片をホイルカッターを用いて切り出し, その後電解研磨を施して試験片表面の加工層を除去して引張試験に供した。引張方位は Fig. 1 (a), (b) および Fig. 2 (a), (b) に示したように, [001] と [011] の間の 5 方位および [001] と  $\bar{1}11$  の間の 2 方位であつて, ステレオ三角形のうえで広い範囲にわたつて分布させた。引張温度は  $-196^{\circ}\text{C}$  および  $-130^{\circ}\text{C}$  であり, ひずみ速度は  $4 \times 10^{-4}/\text{sec}$  に一定させた。引張試験のあと, 破面を走査型電子顕微鏡を用いて観察した。

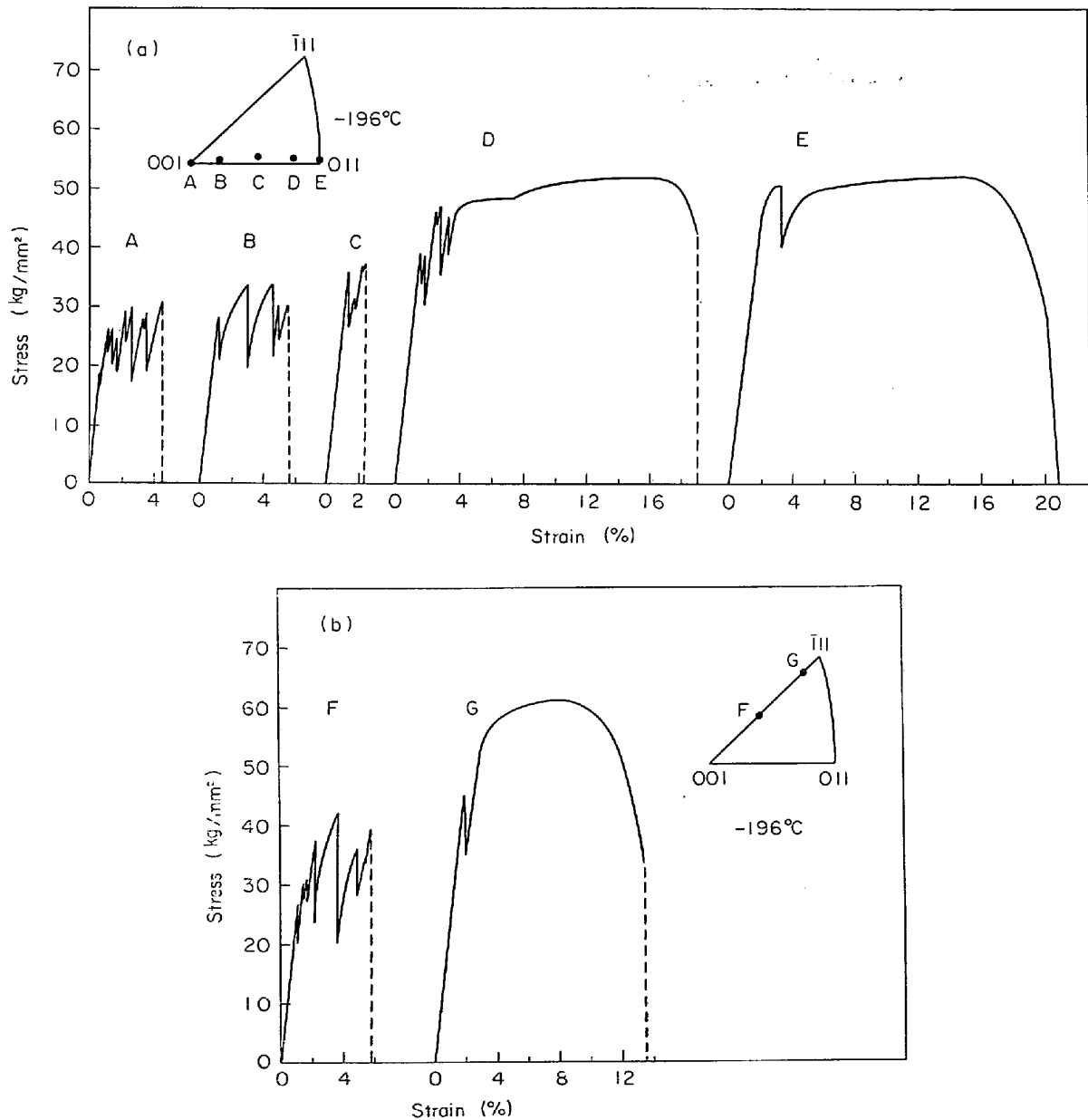


Fig. 1(a)(b) Stress-strain curves of iron single crystals tested at  $-196^{\circ}\text{C}$ .

### 3. 実験結果

#### 3.1 変形の方位依存性 ( $-196^{\circ}\text{C}$ の場合)

鉄の単結晶を  $-196^{\circ}\text{C}$  において引張つた場合の応力-ひずみ曲線を Fig. 1(a), (b)に示す.  $[001]$ 方位の試験片の応力-ひずみ曲線は Fig. 1(a)の曲線Aで示したように, 双晶の発生にもとづくセレーションが多数見られた.  $[001]$ 方位の引張の場合, たがいに交さる4個の双晶系に対して等しい分解剪断応力が働き, 実際に4個の双晶系の存在が光学顕微鏡観察により確認された. ひとつのセレーションとつぎのセレーションの間の曲線の傾きは変形初期の弾性変形域の直線の傾きよりゆるやかであつて, この間にすべり変形が生じていること

がわかつた. 変形量が  $4.5\%$  に達したとき  $(001)$ 面に沿つて劈開破壊した. 引張方位が  $[001]$  から  $26^{\circ}$  以内の試験片の変形挙動は  $[001]$  方位のものとはほぼ同様であつたが, 詳しくみると  $[001]$  から  $24^{\circ}$   $[011]$  方向に偏いた試験片Cの場合伸びがとくに短く  $2.5\%$  であり,  $[001]$  から  $[\bar{1}11]$  方向へ向かつて  $26^{\circ}$  傾いた試験片Fの場合は  $5.5\%$  という大きな伸びを示していることがわかつた.

引張方位が  $[001]$  から  $36^{\circ}$  以上離れると延性に富んで  $13\%$  以上の伸びを示すようになった. しかし詳しくみると方位による変形挙動の相違がみられた. 試験片Dの場合, 引張方位は  $[001]$  から  $36^{\circ}$  傾いており変形初期にかなり多数の双晶の発生が認められるにもかかわらずその

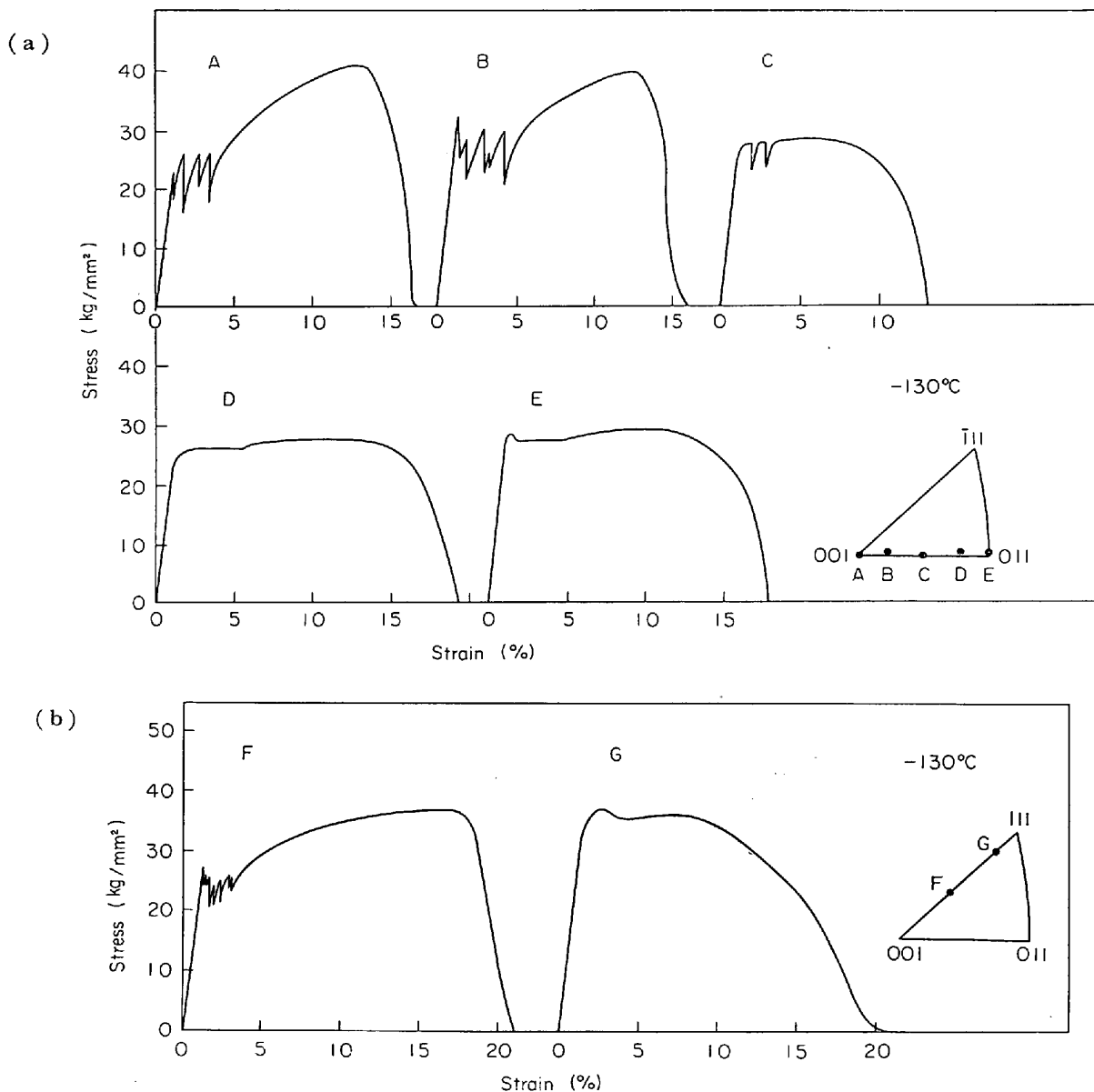


Fig. 2(a)(b) Stress-strain curves of iron single crystals tested at  $-130^{\circ}\text{C}$ ,

後すべり変形が14.5%続き、いくぶん絞れたあと劈開した。破面の2/3は(001)劈開面で占められていたが残りの1/3は複雑な型をなしていた。そして(001)劈開面上には引張方向に平行な(100)面に沿った縦に長いクラックが多数見られた。[011]方位の引張の場合は変形初期に少数の双晶が発生したけれどもすべり変形が主で、最後には[100]方向には100%絞れ、[0 $\bar{1}$ 1]方向にはまったく絞れず、ナイフの双状になつて破断した。破断部には(100)面に平行な縦に長い劈開クラックが認められた。引張方位が $[\bar{1}11]$ に近いGの場合、変形初期に1回双晶発生があつたがその後すべり変形のみ生じ、かなり絞れたのちおもに(001)面に沿つて劈開した。

### 3.2 -130°Cにおける変形

試験温度が-130°Cの場合の応力-ひずみ曲線を Fig. 2(a), (b)に示す。-130°Cにおいては特別な例外を除けば劈開は起こらなかつた。変形挙動と引張方位の関係についてみると、引張方位が[001]から26°以内にある場合、Fig. 2(a), (b)の曲線A, B, CおよびFに示したように変形初期にかなり多量の双晶が発生するにもかかわらず、劈開は起こらずすべり変形が続き12ないし21%伸びたあとほぼ100%絞れて破断した。破断は試験片のうちで双晶の分布密度の低い部分に生じており、双晶は母格子のすべり変形を妨げていることがわかつた。引張方位が[011]に近い試験片DおよびEの場合は変形初期に流れ応力が一定になる部分があつて、リュース帯の伝播を思わせるけれども、リュース帯であることを確認はできなかつた。試験片Gの変形はDおよびEと類似していた。-130°Cにおいても、[001]方位の試験片のうちで例外としてチャック部で劈開した試験片が1個あつた。この試験片の劈開面は-196°Cにおける劈開面といくぶん異なる様相を呈していたので破面の観察の項で述べることにする。

## 4. 劈開破面の観察および考察

### 4.1 引張方位が[001]から26°以内にある場合

引張方位が[001]から26°以内にある試験片を-196°Cで引張つた場合、変形は双晶の発生によつて始まり、2.5ないし5.5%伸びたあと劈開した。劈開破面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、これらの試験片の破面はよく似た構造をもつていることがわかつた。

劈開破面の一例をPhoto. 1に示す。この破面はF方位をもつ試験片のものである。破面の上で互いに直交して長く伸びている線は $[\bar{1}\bar{1}0]$ および $[\bar{1}10]$ 方位を持ち試験片の表面に現われた双晶に対応していた。したがつてこれらの線は劈開以前に発生した双晶および劈開クラック

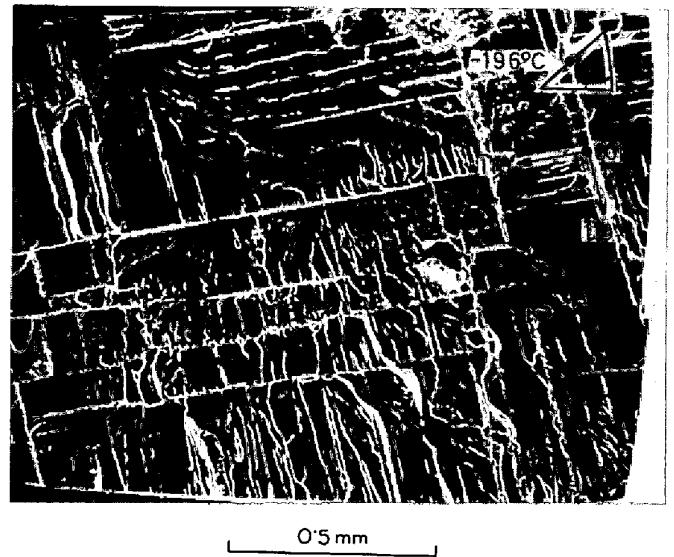
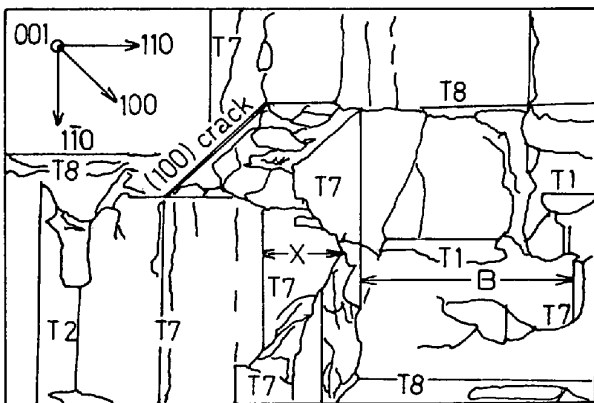


Photo. 1. Cleavage plane with "block pattern".

が伝播するときに発生した双晶が劈開面上に現われたものである。劈開面はこれらの双晶によつて互いに直角方向に区画されており“ブロックパターン”<sup>14)</sup>を示している。劈開面上に現われた双晶を立体観察すると多くの場合、Photo. 2に示したように双晶部分はきわめて平坦な面をなしており劈開面に対してかなり急な角度をなして傾いていた。双晶部分と母相の劈開面とのなす角を付録に書いた方法で測定したところ34.65°であつた。双晶部分は(001)劈開面と $\langle 011 \rangle$ 方向で交さしかつ34.65°の角をなしていることから、双晶部分は母格子の $\{112\}$ 面に一致していることがわかつた。この結果は、双晶部分は双晶と母格子の界面が劈開したものであるというBERRYの説<sup>15)</sup>と一致していた。

鉄には12の双晶系があつて<sup>16)</sup>、鉄の単結晶を[001]方位またはそれに近い方位に引張つた場合、T1, T2, T7, T8という4個の双晶系( $\bar{1}\bar{1}2$ )[ $\bar{1}11$ ], ( $\bar{1}\bar{1}2$ )[111], ( $\bar{1}\bar{1}2$ )[ $\bar{1}\bar{1}1$ ], (112)[ $\bar{1}\bar{1}1$ ]に対する分解剪断応力が等しいかあるいはほぼ等しくなり、4個の系の双晶が発生する。そして劈開面を立体観察して破面上に現われた双晶が劈開面となす傾斜のむきを調べればその双晶がどの系に属するものであるか知ることができる。Photo. 2をよく観察するとT1, T2, T7, T8の4個の系の双晶が存在することがわかる。

従来の研究によれば鉄または鉄-シリコン合金の単結晶の劈開は2個の双晶が $\langle 011 \rangle$ 型の交さをする場合、クラックが発生するという報告があり<sup>4)~7)</sup>また双晶先端部の集中応力を計算して破壊の機構を解明する試みもなされている<sup>7)</sup>。つぎに双晶と劈開クラックの発生について述べる。Photo. 3はFig. 1(a)のC方位の試験片



100μ

- T1:  $(\bar{1}\bar{1}2) \square \bar{1}\bar{1}1$  Twin
- T2:  $(112) \square \bar{1}\bar{1}1$  Twin
- T7:  $(\bar{1}\bar{1}2) \square 111$  Twin
- T8:  $(1\bar{1}2) \square \bar{1}\bar{1}1$  Twin

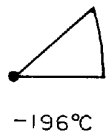
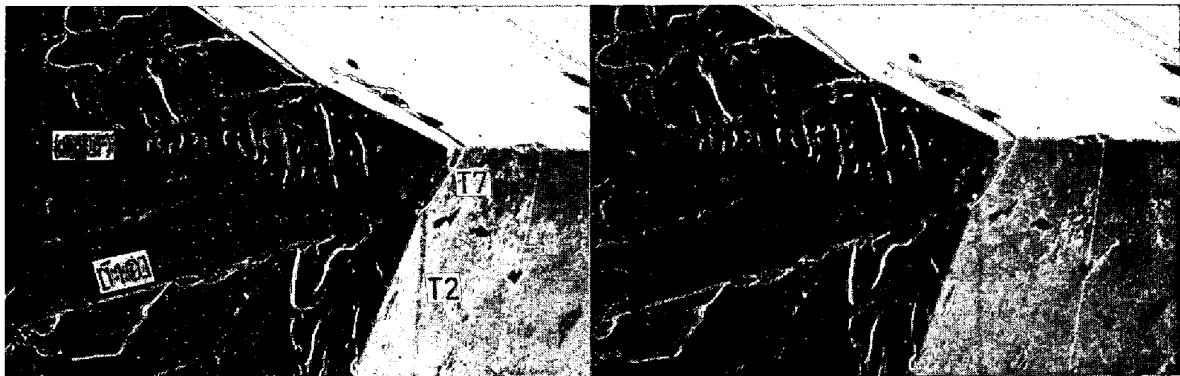
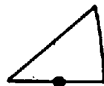


Photo. 2. Four systems of twin, T1, T2, T7 and T8, are found on the (001) cleavage plane with the tensile plane of A. A vertical crack parallel to (100) plane is formed. (Stereo viewing)



-196°C

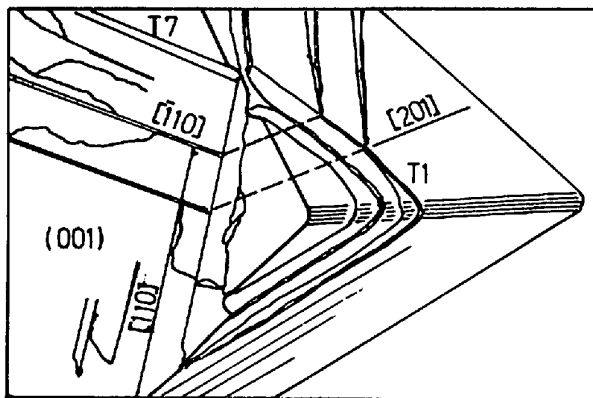


100μ

Photo. 3. Cleavage was caused by  $\langle 011 \rangle$  type intersection of two twins T2 and T8.

の破面および試験片の側面を示したものであつて、2個の双晶 T2 と T7 の  $\langle 011 \rangle$  型の交さ部分から劈開が始まつていた。そして双晶自体は複雑な破壊をしていた。A方位を有する試験片にも同様な  $\langle 011 \rangle$  型の双晶の交さにもとづく破壊がみられた。しかしB方位の試験片の場合、Photo. 4 に示すように、試験片の片隅から劈開が始まつており、2個の双晶 T1 と T7 が交さして存在す

るけれどもこれらは  $\langle 011 \rangle$  型の交さではなく、クラックの発生に寄与しないといわれている  $\langle 012 \rangle$  型の交さであつた。この場合、双晶 T1 が試験片の表面に突き抜けること自体が原因となつて破壊が生じたものと考えられる。またF方位をもつ試験片の場合、Photo. 5 に示したように、双晶 T8 が試験片の表面に突き抜ける部分から破壊が発生しており、特別に2個の双晶が交さしている

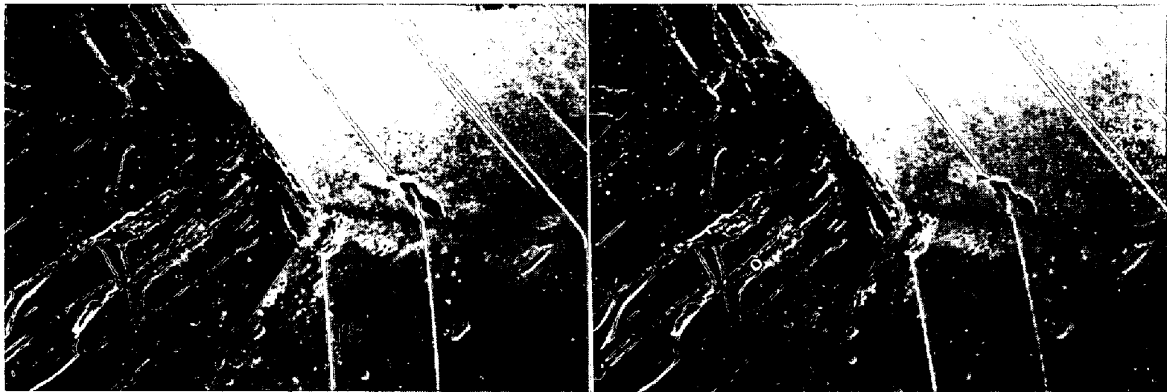


50 $\mu$



-196 $^{\circ}$ C

Photo. 4. Cleavage was caused by the twin going through the specimen surface. Twins T7 intersected to the twin T1 along the [201] direction.



-196 $^{\circ}$ C



100 $\mu$

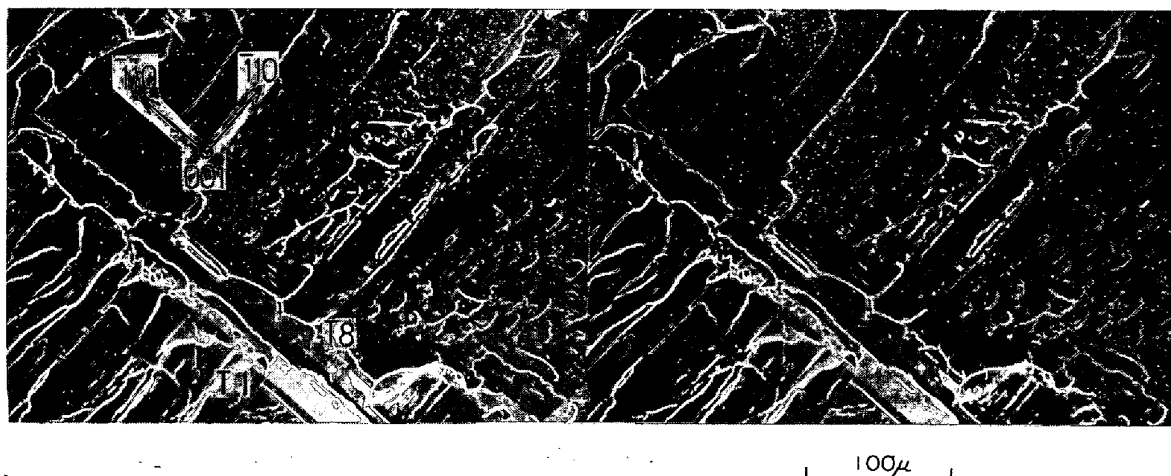
Photo. 5. Cleavage was caused by the twin T8 going through the specimen surface.

とは考えられない. Photo. 6 の例では, 試験片の中心部に 2 個の双晶 T1 と T8 があつて, 立体観察するとこれら 2 個の双晶は互いに反対側に傾斜しており両者は  $\langle 011 \rangle$  型の交さをなしていることがわかる. しかしこの部分はクラックの発生場所ではない.

以上述べたことから純鉄の単結晶においては, 引張方

位が  $[001]$  から  $26^{\circ}$  以内にある試験片の劈開クラックの発生は 2 個の双晶の  $\langle 011 \rangle$  型の交さに由来するものばかりではなく, 双晶が試験片の表面に突き抜ける所からも発生する場合がある. また島結晶から劈開クラックが発生した例もあつた (Photo. 7).

引張方位が  $[001]$  から  $26^{\circ}$  以内にある場合, クラック



-196°C



Photo. 6. Two twins, T1 and T8, intersected along [110] direction, however, where no cleavage crack was nucleated. (Stereo viewing)

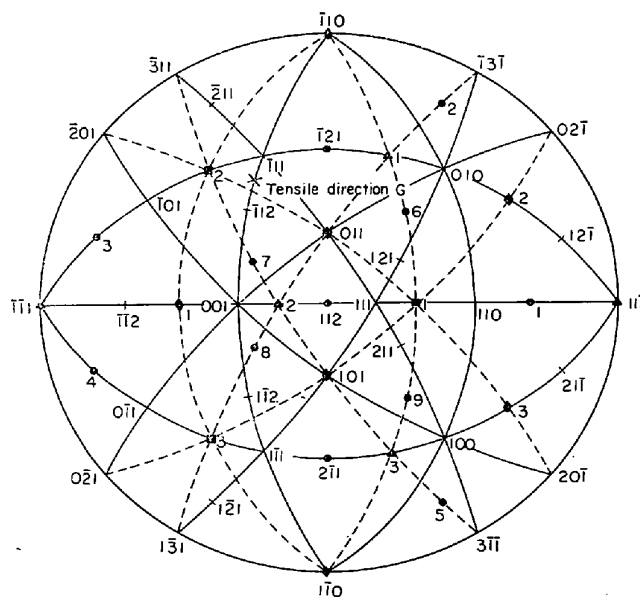


Photo. 7. Cleavage occurred at an island grain.

が伝播するとき発生した薄い双晶が劈開面上に  $\langle 011 \rangle$  方向をもつ細い線となつてみられた。このような薄い双晶が破面の近くに存在することは以前にも報告がある<sup>17)</sup>。このほかに、Photo. 11(a)に●印で示したような“舌”<sup>18)</sup>とよばれる小さな双晶も多数みうけられた。

#### 4.2 [001] から 36° 以上離れている場合

引張方位が [001] から 36° 以上離れた試験片では変形初期に双晶が発生しその後10%以上すべり変形が続き、あるものは劈開し、別のものは100%絞れたのち破断した。劈開の場合、その破面の構造は前節で述べたグループの破面の構造とは異なつていた。Fig. 1(a)のD方

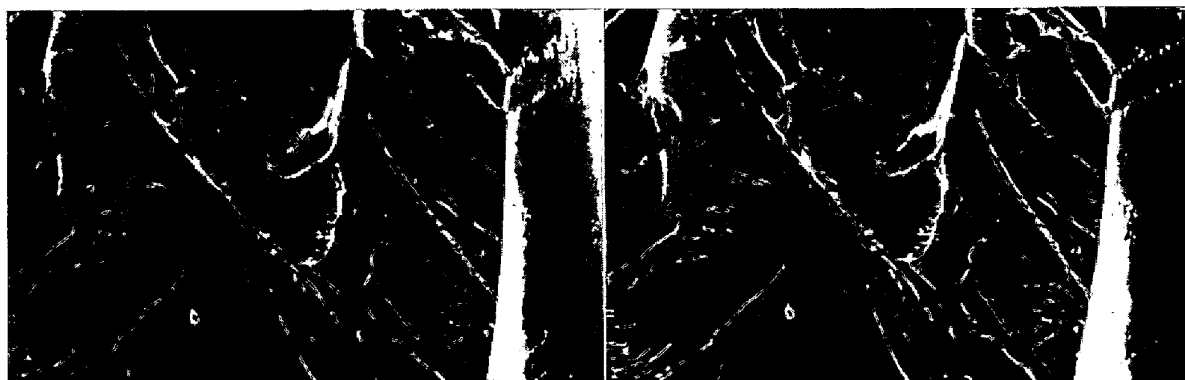


hkl: Miller indices of the pole in matrix

- : 001 poles,
- ◆ : 011 poles
- ▲ : 111 poles,
- : 112 poles in (112)  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$  twin

Fig. 3. Stereo graphic projection of poles of matrix and of (112)  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$  twin.

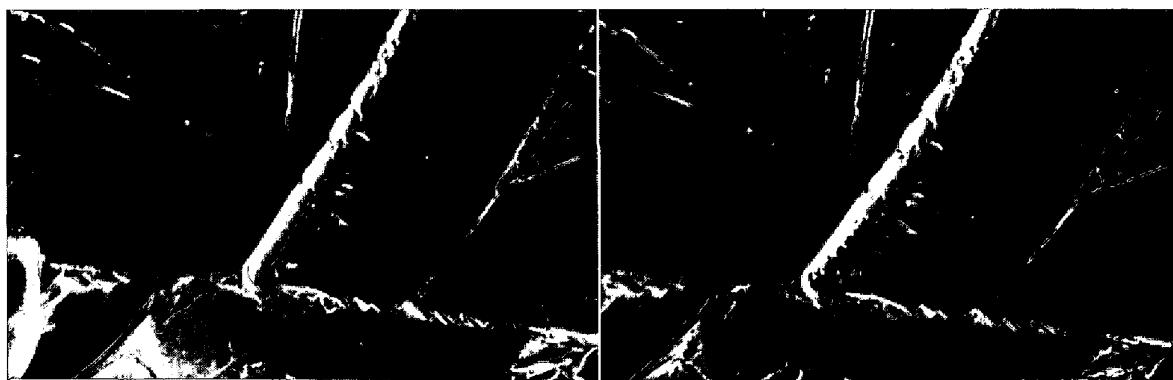
位の試験片では、変形初期に双晶が発生したのち19%伸び少し絞れたところでもにも (001) 面に沿つて劈開した。破壊は Photo. 8 に×印で示した島結晶が粒界破壊することによつて発生した。破面には滑かにリバーパタ

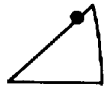


-196°C 

100μ

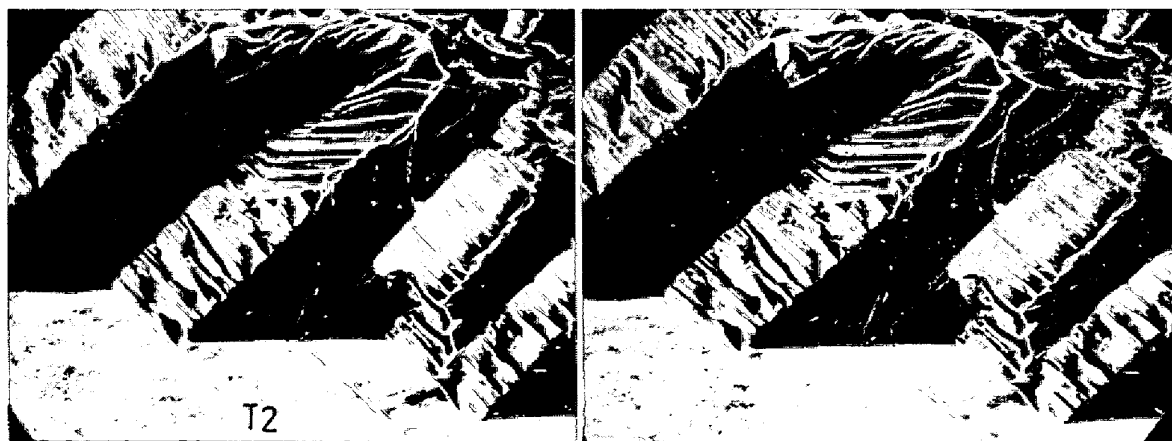
Photo. 8. Cleavage started by the intergranular fracture of island grain. No thin twins and no tongues were found on the cleaved surface. (Stereo viewing)



-196°C 

200μ

(a)



(b)

-196°C

20μ

Photo. 9(a) Cleavage occurred by slipping off of the twin. (Stereo viewing)  
 (b) Plastically deformed twins were found on the cleavage plane. (Stereo viewing)



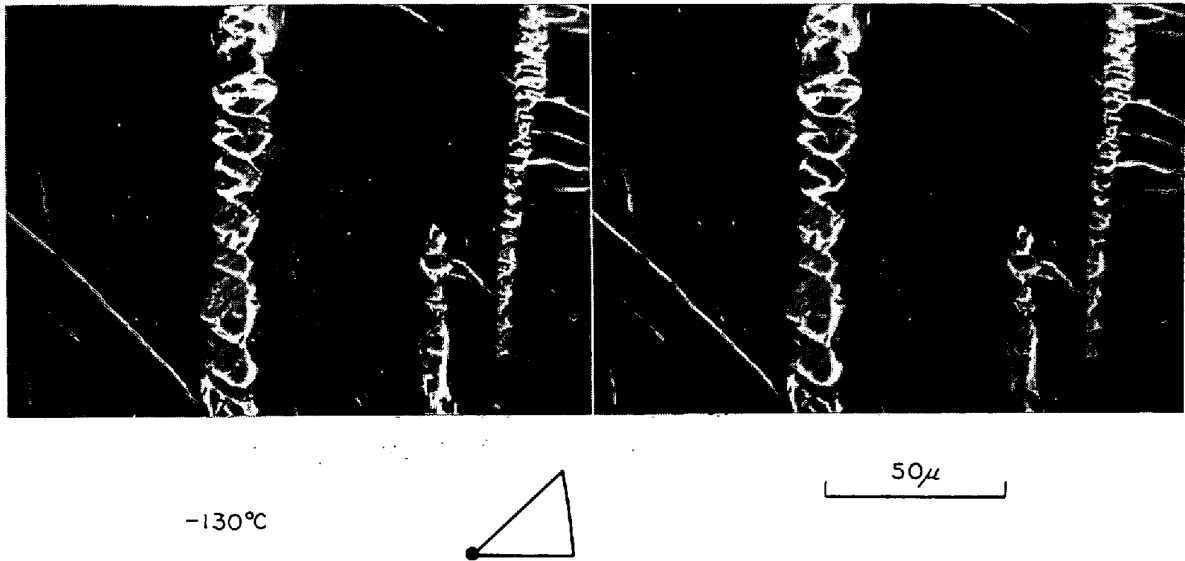


Photo. 10. Granular twin (mark○) and plastically deformed twin (mark●) were observed on the cleavage plane of [001] specimen tested at  $-130^{\circ}\text{C}$ .

ーンが流れており、クラック伝播に伴って発生する薄い双晶とか“舌”はほとんどみられなかつた。D方位の場合、双晶系に対するシュミット係数の値が0.34であつて、前節で述べたグループの試験片の場合のそれの0.41ないし0.49に比較して小さいために、クラック伝播時に双晶が発生しがたいものと考えられる。また劈開に至るまでにすべりによる変形が15%ほど続いているために双晶の発生が抑制されたものとも考えることもできる。この試験片の破面の近傍には(001)面に沿う縦に長いクラックが多数発生していた。

[011]方位の引張の場合には(100)面に平行な縦に長いクラックが発生した。このクラックは互いに交さる2個のすべり面をすべつて来た転位の合体によつて発生するものと説明されている<sup>7)</sup>。

Fig. 1 (b)に示すG方位の試験片は引張軸が $[\bar{1}11]$ に近く、13%以上伸びたあと局部的に絞れてから、おもに(001)面に沿つて劈開した。この試験片の破面をみるとPhoto. 9 (a)に示したように、破壊は双晶の部分から始まつており、変形初期に発生した双晶がまずすべり変形をおこして双晶自体が破壊し、それが原因となつて母格子が劈開したように見受けられる。また劈開クラックが伝播中に双晶と交さし、双晶に大きなすべり変形をひきおこす場合があつた。その例をPhoto. 9 (b)に示す。

つぎに母格子と双晶内のすべり系について検討する。G方位の試験片は局部収縮を起こしたあと破壊したのであるけれども、ここでは試験片の形状を理想化して変形前の結晶方位関係が保たれており双晶のみ導入されているものと仮定する。鉄-シリコン合金のすべり系に関する竹内らの研究によれば、 $-196^{\circ}\text{C}$ において活動するす

べり系は $\{011\}\langle 111\rangle$ である<sup>19)</sup>から、ここでは $\{011\}\langle 111\rangle$ すべり系のみ考えることにする。G方位の試験片の母格子の $\{011\}\langle 111\rangle$ すべり系のうちで最も大きな分解剪断応力の働くすべり系は $(\bar{1}10)[\bar{1}\bar{1}1]$ および $(\bar{1}10)[111]$ であつて(Fig. 3参照)、これらのすべり系に対するシュミット係数の値は0.29である。双晶系についてはT2 $(112)[\bar{1}\bar{1}1]$ およびT7 $(\bar{1}\bar{1}2)[111]$ 系がシュミット係数のもつとも大きい系であつてその値は0.22である。さて、いつたんこれらの系の双晶が発生すると双晶内部にはシュミット係数の値の大きい $\{011\}\langle 111\rangle$ すべり系が存在する。 $(112)[\bar{1}\bar{1}1]$ 双晶を例にとつて説明する。母格子のステレオ投影図がFig. 3に実線で示され

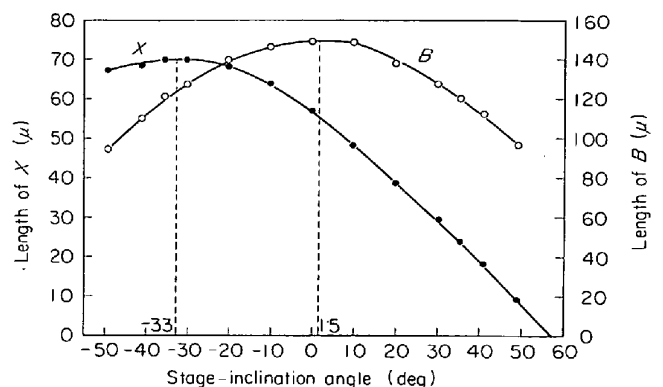
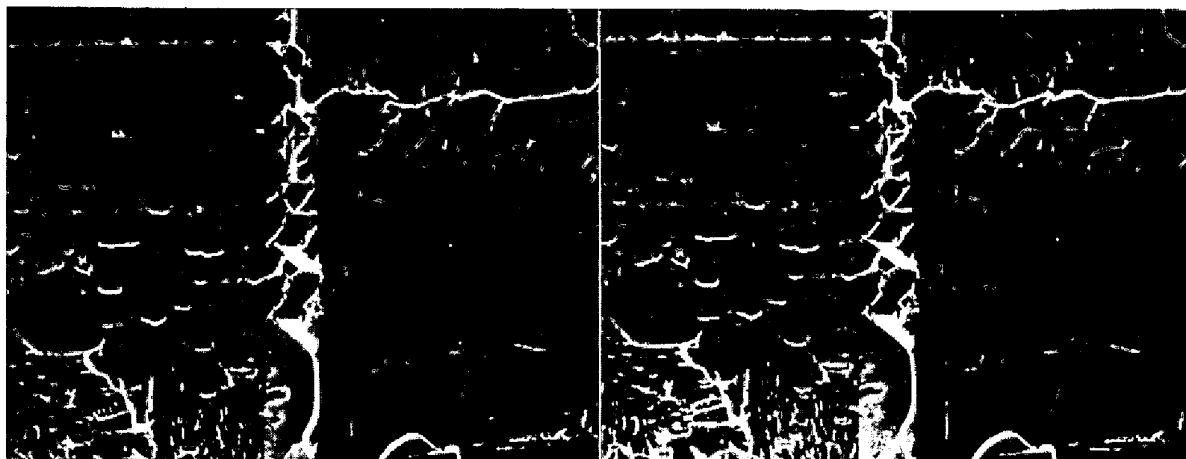


Fig. 4. Relationship between the length of the twin,  $X$ , in Photo. 2 and the length on the (001) cleavage plane,  $B$ , and the stage-inclination angle of the scanning electron microscope.  $X$  was maximum at the stage-inclination angle of  $-33^{\circ}$ , and  $B$  was maximum at  $+15^{\circ}$ , so the twinning part intersected to the (001) cleavage plane by the angle of  $34.5^{\circ}$ .



-196°C (a)

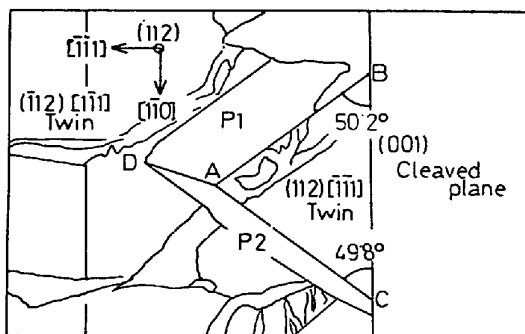


50μ



(b)

5μ



BC:  $(\bar{1}\bar{1}0)$   
 AC:  $[20\bar{1}]$   
 AB:  $[02\bar{1}]$   
 AD:  $\blacksquare 1$   
 $\langle 001 \rangle$   
 in twin  
 P1:  $\blacksquare 2$   
 $\{001\}$   
 in twin  
 P2:  $\blacksquare 3$   
 $\{001\}$   
 in twin

Photo. 11(a) Cleavage of twin itself was seen on the cleavage plane. (Stereo viewing) Tongues (●) are also seen.

(b)  $(112) [\bar{1}\bar{1}1]$  twin on the  $(001)$  cleavage plane was cleaved along the planes of P1 and P2, which where  $\{001\}$  planes in the  $(112) [\bar{1}\bar{1}1]$  twin. The stereo graphic projection of these planes are indicated by the poles  $\blacksquare 2$  and  $\blacksquare 3$  in Fig. 3.

るような母格子の中に  $(112) [\bar{1}\bar{1}1]$  双晶が導入されると双晶内部のステレオ投影図は破線で示される。Fig. 3にある  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$  は  $(112) [\bar{1}\bar{1}1]$  双晶内部の  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 112 \rangle$  の極を表わしている。母格子と双晶は  $(112)$  面と  $[\bar{1}\bar{1}1]$  方位を共有するほか、母格子の  $(011)$ ,  $(101)$ ,  $(1\bar{1}0)$  面は双晶内部の3種類の  $\{011\}$  面と平行の関係にある。G 方向で引張った場合、 $(112) [\bar{1}\bar{1}1]$  双晶内部にはすべり面が  $(\bar{1}10)$  ですべり方向が  $\blacktriangle 2$ , およびすべり面が  $\blacklozenge 1$  ですべり方向が  $\blacktriangle 1$  という  $\{011\} \langle 111 \rangle$  型のすべり系があつてシュミット係数の値は 0.48 である。もうひとつの双晶  $(\bar{1}\bar{1}2) [111]$  の内部

にも同様なすべり系が存在する。したがつてG方位の引張試験片においては変形中に双晶が発生すれば、双晶内部のすべり系に対して母格子のすべり系に対する分解剪断応力の1.7倍の分解剪断応力が働くことになり、双晶自体がすべり変形を起こす可能性もでてくる。双晶自体が塑性変形する場合、双晶内部のすべり系と母格子のすべり系は必ずしも連続ではないから、双晶境界および母格子による拘束も強いけれども、双晶自体が大きやすべり変形をして破壊に到る可能性もある。

4.3 双晶の破壊

鉄の単結晶を低温で引張った場合、劈開に先立つて双

晶が発生するために、母格子が劈開するとき双晶自体が破壊される。双晶の破壊のうちでもつとも頻繁に起こるのは双晶境界の劈開である。双晶境界の劈開についてはすでに4.1節で詳しく述べたのでここではひとこと付け加えるに留める。-130°Cにおいて劈開した試験片の破面上に Photo. 10 に○印で示した塊状の双晶が  $[1\bar{1}0]$  方向に並んでいた。これは塊状の双晶が発生し、その境界面が粒界破壊と同様の破壊をしたものである。

双晶自体がすべり変形をして破壊する場合もあり、その代表的な例は Photo. 9 (b) である。そのほかにも、Photo. 10 に●印で示したのもも双晶自体のすべり変形による破壊である。

まれには双晶内部で劈開が生ずることもありその例を Photo. 11 (a) に示す。双晶部分の各部の方位関係を調べたところ Photo. 11 (b) に示した結果が得られ、双晶内部の  $\{001\}$  面が劈開したことが明らかになった。

## 5. 結 論

引張方位が広い範囲に分布した鉄の単結晶を -196°C および -130°C において引張つて劈開破壊の挙動を調べ、つぎのような結果を得た。

1. -196°C においては、引張方位が  $[001]$  から 26° 以内にある場合、双晶の  $\langle 011 \rangle$  型の交さによつて劈開が生ずる場合が多かつた。しかし双晶の  $\langle 011 \rangle$  型の交さがあつても劈開を起こさない場合、双晶が試験片の表面に突きぬける部分から劈開する場合もあり、純鉄においては劈開の原因は双晶の  $\langle 011 \rangle$  型の交さ以外にもあることがわかつた。また結晶が不完全で島結晶を含むために、島結晶から破壊が生ずることもあつた。

2. 引張方位が  $[\bar{1}11]$  に近い試験片を -196°C で引張つた場合、変形の初期に発生した双晶がすべり変形を行ない、それが原因となつて劈開が生じたと思われる破壊の形態がみられた。

3. -130°C においては特別な例外を除けば劈開はおこらなかつた。

終わりに、本研究に用いた走査型電子顕微鏡は昭和45年度文部省科学研究費によつていることを記し、当局に謝意を表します。

## 文 献

- 1) C. S. BARRETT, G. ANSELL, and R. F. MEHL: Trans. ASM, 25(1937), p. 702
- 2) N. P. ALLEN, B. E. HOPKINS, and J. E. McLENNAN: Proc. Roy. Soc., A234 (1956), p. 221
- 3) B. EDMONDSON: Proc. Roy. Soc., A264(1961), p. 176

- 4) 寺崎: 日本金属学会会報, 9(1970), p. 147
- 5) D. HULL: Acta Met., 8(1960), p. 11
- 6) R. HONDA: J. Phys. Soc. Japan, 16(1960), p. 1309
- 7) 寺崎: 住友金属, 19(1967), p. 342
- 8) A. W. SLEESWYK: Acta Met., 10(1962), p. 803
- 9) K. KITAJIMA: Proc. 1st Int. Conf. Fracture, 2 (1961), p. 659
- 10) E. HORNBOGEN: Trans. AIME, 221(1961), p. 711
- 11) A. H. COTTRELL: Trans. AIME, 212(1958), p. 192
- 12) Y. T. CHOW, F. GAROFALO, and R. W. WHITMORE: Acta Met., 8(1960), p. 480
- 13) A. N. STROH: Proc. Roy. Soc., A223(1954), p. 404
- 14) W. D. BIGGS and P. L. PRATT: Acta Met., 6 (1958), p. 694
- 15) J. M. BERRY: Trans. ASM, 51(1959), p. 556
- 16) E. SCHMID and W. BOAS: Plasticity of Crystals, (1950), p. 90 [Hughes]
- 17) C. F. TIPPER and A. M. SULLIVAN: Trans. ASM, 43(1951), p. 906
- 18) C. D. BEACHEM: Fracture, ed. by H. LIEBOWITZ, 1(1968), p. 244 [Academic Press]
- 19) S. TAKEUCHI, E. FURUBAYASHI, and T. TAOKA: Acta Met., 15(1967), p. 1179

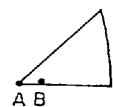
## 付 録

引張方位が  $[001]$  から 26° 以内にあつて双晶の発生によつて変形が始まつたあと、劈開破壊した試験片の破面上には Photo. 1 に示したような  $\langle 011 \rangle$  方向の長い双晶がみられる。双晶と劈開面の交わる部分の立体写真 Photo.

Table 2. The length of the twin,  $X$ , was maximum when the stage-inclination angle was  $\alpha$ , and the length on the  $(001)$  cleavage plane,  $B$ , was maximum at the stage-inclination angle of  $\beta$ , then the twin intersected to the  $(001)$  plane with the angle of  $\alpha-\beta$ .  $X$  and  $B$  are shown in Photo. 4.

$\alpha$	$\beta$	$\alpha-\beta$	$X_{\max}$	$B_{\max}$	Specimens
33.0°	-1.5°	34.5°	70 $\mu$	143 $\mu$	A
38.3°	3.3°	35.0°	26	936	B
36.4°	2.2°	34.2°	18	20	B
40.0°	5.5°	34.5°	15	42	B
31.0°	-4.3°	35.3°	28	33	B
38.7°	4.3°	34.4°	13	33	B
mean value		34.65°			

Angle between  $\{001\}$  &  $\{112\}$  planes: 35.27°



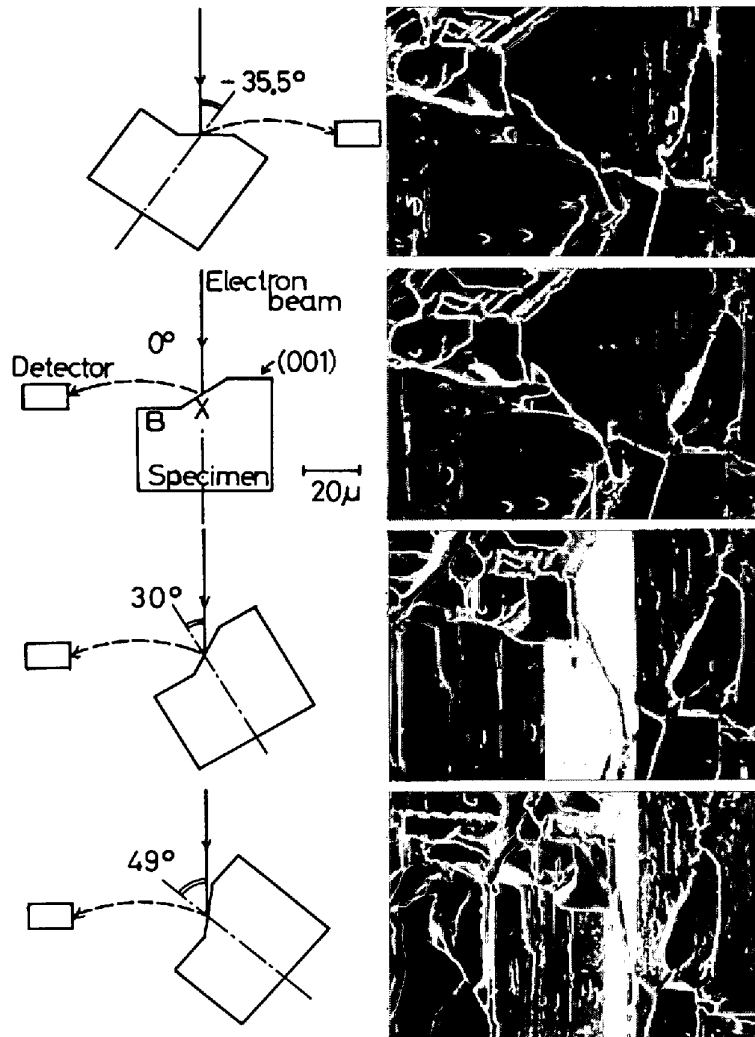


Photo. 12. The length of the twin and (001) cleavage plane varied with the inclination of the stage of the scanning electron microscope.

2によれば双晶 T1, T2, T7, T8 は (001) 劈開面に対して急な角度をなしており, その面は (001) 劈開面に比較してきわめて平坦かつ滑かであつて多結晶純鉄の粒界破壊面とよく似ている. つぎにこの双晶部分が (001) 劈開面となす角度の測定を試みた. Photo. 2 に X と書いた部分は双晶部分にとつた長さ, B は (001) 劈開面上にとつた部分の長さである. Photo. 2 に示した  $[1\bar{1}0]$  軸のまわりに走査型電子顕微鏡のステージを傾斜させて, 傾斜角を  $-49^\circ$  から  $+49^\circ$  まで変えたときの破面の一部を Photo. 13 に示す. この写真から X および B の長さを求めてステージの傾斜角に対してプロットすると Fig. 4 の正弦曲線が書け, X はステージの傾斜角が  $-33^\circ$  のとき最大になり, B は  $1.5^\circ$  のとき最大になることがわかつた. したがつて双晶部分は (001) 劈開面に対して  $34.5^\circ$  傾斜している. 他の部分について測定した値も含めてこ

れらの角度の関係を Table 2 に示す. Table 2 に示した  $\alpha$  は X の部分が最大の長さを示すときのステージの傾斜角,  $\beta$  は B の部分が最大の長さを示すときのステージの傾斜角,  $\alpha - \beta$  は双晶部分が (001) 劈開面となす角である.  $X_{\max}$  と  $B_{\max}$  は X および B の部分の実長である. さて Table 2 によれば  $\alpha - \beta$  の平均値は  $34.65^\circ$  であつた. (001) 劈開面と  $\langle 110 \rangle$  方向で交わり  $34.65^\circ$  に近い角をなす低指数の面としては  $\{112\}$  面がある.  $\{112\}$  面と  $\{001\}$  面のなす角は  $35.27^\circ$  であつて  $\alpha - \beta$  の平均値とは  $0.62^\circ$  の差で一致する. したがつて双晶部分は母格子の  $\{112\}$  面に相当することがわかつた. また引張方位が  $[\bar{1}12]$  に近い試験片 (Fig. 1(b) の F と G) の場合  $(\bar{1}12)$  面で劈開することはなかつた. したがつて劈開以前に発生した双晶と (001) 劈開面の交叉する部分は双晶境界が劈開したものと考えられる.