

## 切削表面集合組織の成因について

加藤良雄\* 木下修一\*\*

(昭和50年10月30日受理)

### On the Cause of the Cutting Texture

Yoshio KATO and Shuichi KINOSHITA

This paper describes the texture of the surface layer of a commercial Al-2.4% Mg alloy plate, [5052] which was formed by low speed two dimensional cutting. It was discussed by means of the pole figure obtained by X-ray diffraction method in order to study the cutting texture of the surface layer. The results obtained were summarized as follows.

It was found that the cut surface has a sort of texture which has a preferred orientation. In the surface before cutting, the orientation of specimen used was almost at random, but after cutting, the orientation (117) [772] or (116) [662] was predominant, which consisted of a texture which slightly leaned from (001) [110] orientation to the cutting direction. This cutting texture was very similar to the surface texture which was formed by cold rolling. This fact seems to show that the cutting mechanism of aluminum includes the rolling mechanism. Therefore, the cause of the cutting texture can be explained by the strain tensor of some active slip systems in rolling.

### 1 諸 言

アルミニウムは比重が小さく、耐食性が良好であるなどすぐれた特性を有しているが切削加工には種々の問題がある。例えば軟質の為に切削の際表面層の大きな塑性的流動が認められ良好な仕上面が得られにくいなどは顕著な事である<sup>1)</sup>。すなわち切削に際し切刃前方の被削材部分は圧縮を受け、後方の部分は引張りを受けるので、アルミニウムのような軟質材では切削加工の際の変形機構が複雑になり、バイト刃先による結晶の流動現象や加工硬化現象などの交錯した、いわゆる加工変質層が得られる。そしてこれら加工変質層はある特定の優先方位を有した集合組織を形成している<sup>2)</sup>。

\* 機械工学教室 教授

\*\* 大学院修士課程

市販5052アルミニウム合金板 (Al - 2.4% Mg) を乾式の低速二次元切削して得られた切削表面層の集合組織をX線回折法による極点図の作製によって検討し、その成因について考察を試みた。

## 2 実験要項

### 2.1 供試試料

Table 1 に示す化学成分を有する熱間圧延あがり板厚15mmの市販5052合金を13×50×25mmの寸法に機械加工した後  $KNO_3-NaNO_3$  の塩浴中で540°Cで40時間の熱処理を施して切削試験片とした。

Table 1 Chemical composition of specimen. (wt %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
Si + Fe = 0.45	0.10	0.10	2.4	0.2	0.2	R	

Fig. 1 に示す Al-Mg 二元系状態図よりこの試料は約200°C以上で完全固溶体をつくることわかる。

### 2.2 切削試験条件

ひざ型フライス盤 (NC盤) のスピンドルが回転しないように固定し、これにバイトを取り付けテーブルの横送りによって切削速度を与え縦送りによって切込みを与えた乾式低速二次元切削を実施した。使用工具は高速度鋼製シェーパー用付け刃バイト64-3型ですくい角 $\alpha = 15^\circ$ で逃げ角が $\beta = 3^\circ, 9^\circ, 15^\circ$ の3種類を用いた。切削条件は切削速度を $V = 100, 400, 800 \text{ mm/min}$ の3種類について、それぞれ切込み $t = 20, 60, 100 \mu$ の3種を行なった。

### 2.3 極点図の作成

集合組織の検討には極点図を用いた。すなわちX線回折装置 ( $CuK\alpha$  線使用) を用い、切削後の表面層について Schultz の反射法<sup>3)</sup>を用いてX線強度を測定し極点図を作製した。この際X線の強度測定用試料は切削加工後の試料板中央付近を13×30×3mmの大きさに切り出して使用した。極点図の作製に際しては投影面を切削面に平行にし、その上下方向を切削方向に平行にとった。なお反射法によった為、極点図の半径方向に $0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲が測定できなかった。

使用したX線 ( $CuK\alpha$  線) の浸透深さはどの程度であるか、すなわち、極点図に現われているデータは試料のどの程度の深さまで適用できるかが問題になるが、入射ビームの強度

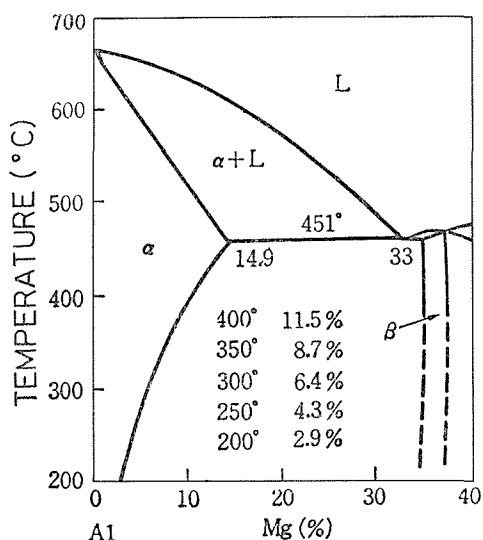


Fig. 1 The phase diagram of the aluminum-magnesium system.

は深さに対して指数関数的に減少するものであり、この問題を正確に把握する事は困難である。しかし、だいたいの値を求めた結果(付録)はおおよそ $50\mu$ 程度であり、加工変質層の検討には差支えないと思われる。ちなみに本実験条件における加工変質層の厚さはほぼ $80\mu$ 程度であった。

次に切削後の表面集合組織の内部への変化を調べる為に切削後の表面層のX線強度を測定後切削面裏側を塩化ビニール塗料にて被覆し、Jacquet法<sup>4)</sup>( $\text{HClO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$ )にて切削表面を $20\mu$ づつ電解研磨し、それぞれの場合に表面層のX線強度を測定し、極点図を作製する事により切削面内部への集合組織の変化を検討した。なお電解研磨の条件は液温 $9^\circ\text{C}$  電圧 $20\text{V}$  電流密度 $80\text{mA}/\text{cm}^2$ で研磨時間は約5分程度であった。

X線回折に関する条件は Table 2 に示す。

Table 2 Diffraction position.

Specimen	Al-2.4% Mg
Diffracting Plane	(111)
Tilting Angle	$\alpha$
Target	Cu
Filter	Ni
Voltage	30Kv
Current	10mA
Time Const	1 sec
$\beta$ -Scann Speed	$24^\circ/\text{min}$
Divergency Slit	$0.5^\circ$
Receiving Slit	5 mm
Scattering Slit	6 mm
$\gamma$ -Vibration	10 mm

### 3 実験結果

#### 3.1 切削表面層の集合組織

切削による集合組織の集積強度は(001) [110] 方位が切削方向へ約 $10^\circ$ 前後ずれた方位となる事が知られている<sup>2)</sup>。本研究室における先の研究を基礎にして切削方向への集合組織の傾きと切削条件の変化、特にバイト逃げ角と切削速度との関係について検討した。

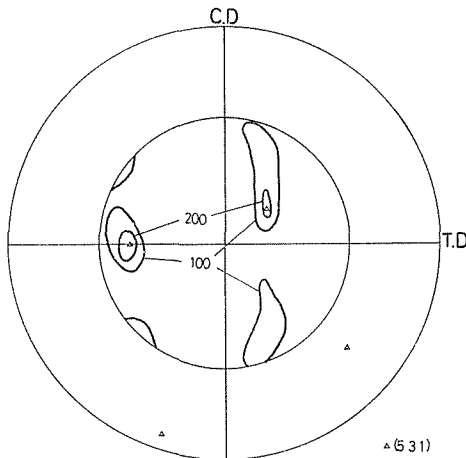


Fig. 2 (111) Pole figure before cutting.

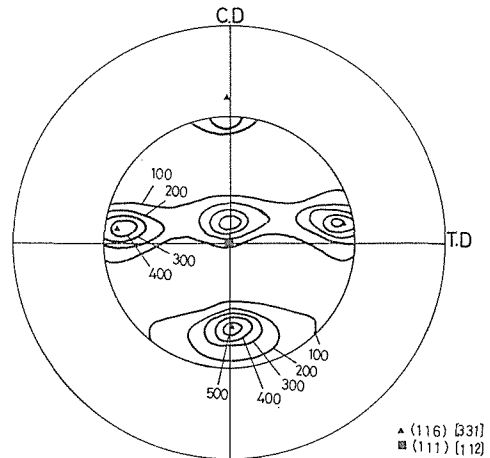


Fig. 3 (111) Pole figure under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  deg. ; clearance angle  $\beta = 3$  deg. ; speed  $V = 800$  mm/min ; depth of cut  $t = 0.06$  mm.

Fig. 2 に示す (111) 極点図は切削前の試料表面の極点図で強い集積はほとんどないと考えられる。

これらの試験片を切削速度  $V = 800 \text{ mm/min}$ , 切込み  $t = 60 \mu$  の切削条件のもとでバイトの逃げ角を  $\beta = 3^\circ, 9^\circ, 15^\circ$  と変化させた場合の切削表面層の極点図は Fig. 3 ~ 5 の

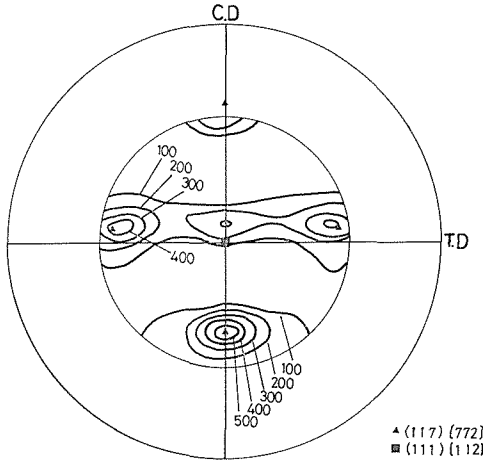


Fig. 4 (111) Pole figure under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  deg. ; clearance angle  $\beta = 9$  deg. ; speed  $V = 800 \text{ mm/min}$  ; depth of cut  $t = 0.06 \text{ mm}$ .

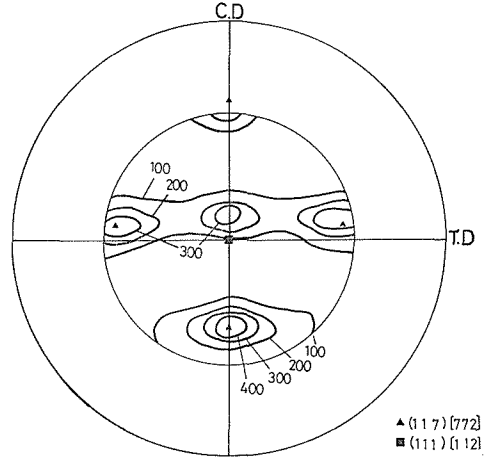


Fig. 5 (111) Pole figure under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  deg. ; clearance angle  $\beta = 15$  deg. ; speed  $V = 800 \text{ mm/min}$  ; depth of cut  $t = 0.06 \text{ mm}$ .

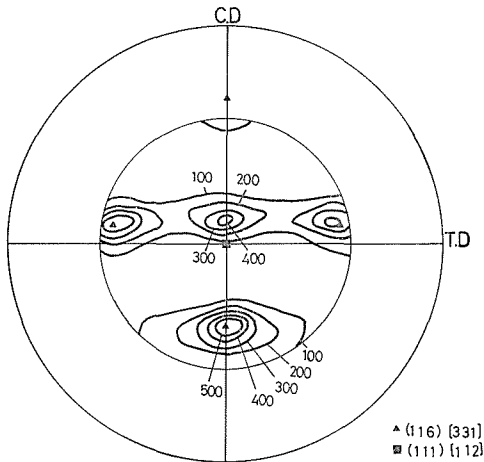


Fig. 6 (111) Pole figure under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  deg. ; clearance angle  $\beta = 9$  deg. ; speed  $V = 100 \text{ mm/min}$  ; depth of cut  $t = 0.02 \text{ mm}$ .

ようになる。Fig. 3 ~ 5 の極点図を見ると切削前の母材ははっきりとした集合組織を示していないが切削加工後は (001) [110] 方位から切削方向へ約 10 度前後傾いた (116) [331], (117) [772] 等の方位を有する典型的な切削集合組織を形成している。しかしながらバイトの逃げ角と集合組織の切削方向への傾きおよびその集積強度とは明瞭な相関関係は見出し得ない。ただ逃げ角が小さい場合の方が切削方向への傾きがいくぶん大きいようである。そして切込み量が大きくなるに従って加工変質層の厚みも増すようである。

次に示す Fig. 6 ~ 8 の 3 枚の (111) 極点図はバイトのすくい角  $\alpha = 15^\circ$ , 逃げ角  $\beta = 9^\circ$ , 切込み  $t = 20 \mu$  と一

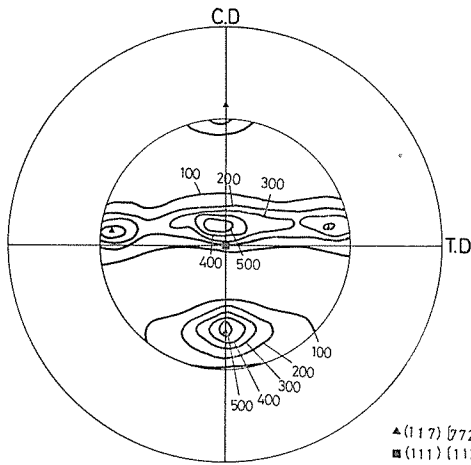


Fig.7 (111) Pole figure under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  deg. ; clearance angle  $\beta = 9$ deg. ; speed  $V = 400$  mm/min ; depth of cut  $t = 0.02$  mm.

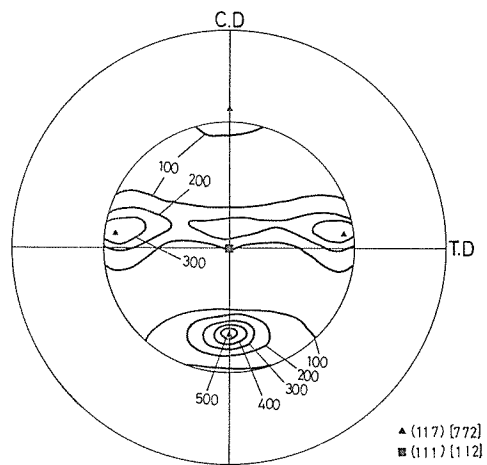


Fig.8 (111) Pole figure under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  deg. ; clearance angle  $\beta = 9$ deg. ; speed  $V = 800$  mm/min ; depth of cut  $t = 0.02$  mm.

定にしておいて切削速度を  $V = 100, 400, 800$  mm/min と変化させた時のものである。

ごらんのように集合組織の状態としてはほとんど同様な傾向にあり、バイト逃げ角の変化の時と同じく切削速度と集合組織の切削方向への傾きとも明瞭な関係はない。切込み量に関して、ある程度切削速度を増大した場合の方が仕上げ面の形状も良好で加工変質層の厚みも薄くなる傾向がある。これは切削の際に生じる構成刃先に関係があると思われる。

### 3.2 圧延集合組織との比較

圧延板の表面層の集合組織は中心部のそれと同一の集合組織の場合もあり、あるいは全く異なる場合もある。本研究室における圧延集合組織の研究によれば、アルミニウム圧延板の中心部の集合組織は主方位が  $(110) [\bar{1}\bar{1}2] + (112) [11\bar{1}]$  方位として表わされるが<sup>5)</sup>、表面層の集合組織はこれと異なり、 $(001) [110]$  方位と表わされ、かつこの集合組織の変化は突然である事が示されている。この圧延における表面集合組織  $(001) [110]$  方位は前述の切削集合組織の方位と極めてよく類似しておりこの点について検討を加えた。

Fig. 9 ~ 12 に示す 4 枚の極点図はすくい角  $\alpha = 15^\circ$ 、逃げ角  $\beta = 9^\circ$ 、切削速度  $V = 100$  mm/min、切込み  $t = 20\mu$  の切削条件で切削した試験片を Jacquet 法によって切削表面を  $20\mu$  ずつ電解研磨し、その都度 X線強度を測定し極点図を描いたものである。Fig. 9 において最初  $(001)$  面と約  $13$  度の角度関係にある  $(116)$  面を持つ集合組織であったものが電解研磨により  $20\mu$  ずつ内部の組織に入ってゆくに従って集合組織の面指数も Fig. 10, 11 に表わされているように  $(1110)$ ,  $(1118)$  と  $(001)$  面に近づいてゆき  $60\mu$  研磨後の表面においては、Fig. 12 に示すようにほぼ完全な  $(001) [110]$  方位となっている。この事はアルミニウムのような軟質材の切削ではバイト刃先における剪断機構に塑性的流動が伴ない

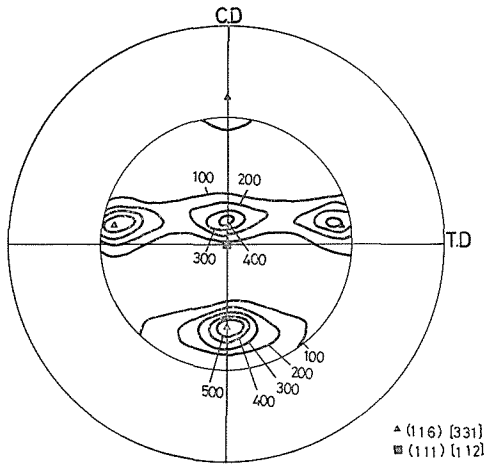


Fig. 9 (111) Pole figure for the cutting surface under the following cutting conditions : Rake angle  $\alpha = 15$  ded. ; clearance angle  $\beta = 9$  deg. ; speed  $V = 100$  mm/min ; depth of cut  $t = 0.02$  mm.

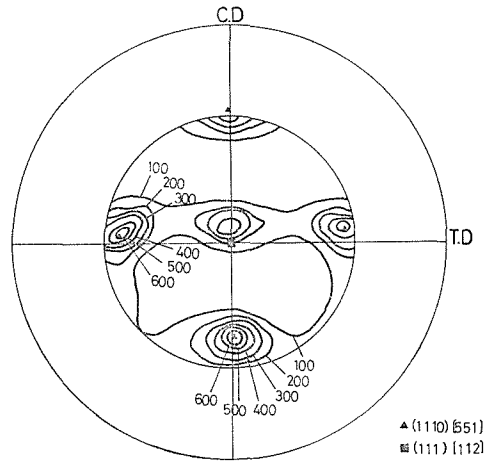


Fig. 10 (111) Pole figure for the section at a depth of 0.02 mm from the surface.

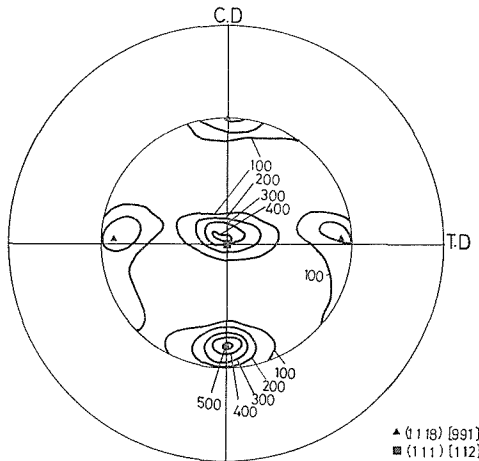


Fig. 11 (111) Pole figure for the section at a depth of 0.04 mm from the surface.

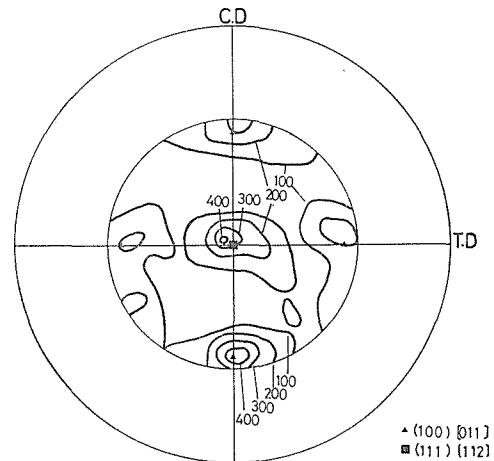


Fig. 12 (111) Pole figure for the section at a depth of 0.06 mm from the surface.

複雑になっている事を示している。すなわち刃先近傍の極く表面の部分では刃先の丸みと逃げ面による Bunishi 効果とともに、刃先において剪断力が加わる為に集合組織の傾きが生じてくるものと考えられる。図中  $20\mu$  研磨後の極点図 (Fig. 10) の X 線強度が増大しているのは研磨により切削面の凹凸が除かれた為と考えられる。また加工変質層の厚みは X 線の浸透深さが約  $50\mu$  程度である事から約  $80\mu$  程度と考えられ、これは他の研究者の値<sup>6)</sup> と大体一致する。

#### 4 考 察

Fig. 3～8に示したように切削条件の種々の変化によっても切削加工集合組織には明瞭な差異は生じていない. この事は本実験のような最大切込み  $100\mu$  という程度の切込みではいわゆる微少切削の領域に入りバイトのすくい角, 逃げ角の相違といってもミクロ的に見た場合, 刃先近傍の雰囲気というものはほとんど同様な状態であると考えられる. すなわち刃先の丸み, また切削中に生じる構成刃先により実際の切削中におけるすくい角, 逃げ角というものはほとんど同様な値であると考えられる. それ故, 切削条件のある程度の変化によっても集合組織に明瞭な変化があらわれないと考えられる. その他おおまかな傾向としては逃げ角が小さい場合の方が切削方向への集合組織の傾きがいくぶん大きいようである. また切削速度の影響としては切込み量に関係してある程度切削速度を増大した場合の方が仕上げ面の形状も良好で加工層の厚みも薄くなる傾向がある. 右に示した写真は切削断面のもので結晶粒界が切削方向へ流されているのがよくわかる.

##### <圧延理論による切削集合組織の解析>

Fig. 9～12に示した(111)極点図のように切削加工集合組織は切削最表面層においては(117)というような



Photo. Longitudinal section. Cutting conditions : rake angle  $\alpha=15$  deg. ; clearance angle  $\beta=9$  deg. ; speed  $V=400$  mm/min ; depth of cut  $t=0.06$  mm.

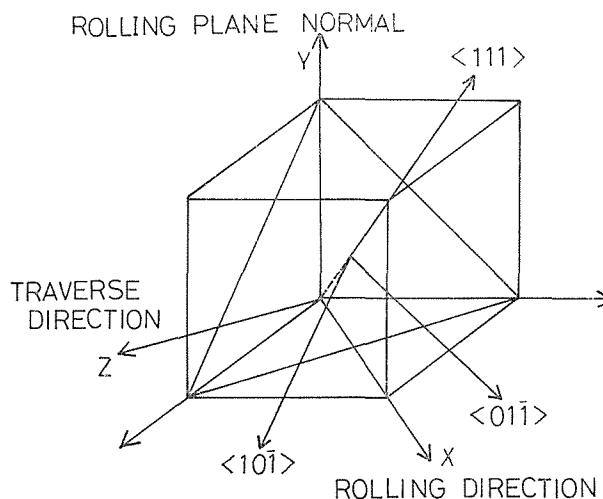


Fig.13 The relation with the rolling direction and the slip systems.

面指数であるが内部にゆくに従って漸次変化し、ある程度内部(約 $60\mu$ )においては圧延における表面集合組織(001)[110]方位と一致している。この事はアルミニウムのような軟質材の切削ではバイト刃先における剪断機構に塑性的な流動がともない複雑になり、切削機構の一部に圧延機構と類似した点がある事を示している。それ故、加工変質層中の集合組織の生成について切削過程をバイト刃先の丸みにおける微小圧延と仮定して解析を試みた。Fig. 13に示すように圧延方向、圧延面法線方向および横方向をそれぞれX, Y, Z軸とすれば単一のすべり系での微小なすべり $d\gamma$ によるひずみは(1)式のごとく2つのテンソルの和として表わされる。すなわち

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(XYZ)} &= \varepsilon^l_{(XYZ)} + \mathbf{R} \\ &= \begin{pmatrix} \varepsilon_x & (\gamma_{XY} + \gamma_{YX})/2 & (\gamma_{XZ} + \gamma_{ZX})/2 \\ (\gamma_{YX} + \gamma_{XY})/2 & \varepsilon_y & (\gamma_{YZ} + \gamma_{ZY})/2 \\ (\gamma_{ZX} + \gamma_{XZ})/2 & (\gamma_{ZY} + \gamma_{YZ})/2 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} 0 & (\gamma_{XY} - \gamma_{YX})/2 & (\gamma_{XZ} - \gamma_{ZX})/2 \\ (\gamma_{YX} - \gamma_{XY})/2 & 0 & (\gamma_{YZ} - \gamma_{ZY})/2 \\ (\gamma_{ZX} - \gamma_{XZ})/2 & (\gamma_{ZY} - \gamma_{YZ})/2 & 0 \end{pmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $\varepsilon_x$  および  $\gamma_{XY}$  などは垂直ひずみと剪断ひずみを表わしており、 $\varepsilon^l$  と  $\mathbf{R}$  はそれぞれ変形の束縛条件を与えるひずみテンソル、ならびにそれを残す為の回転を表わす反対称テンソルである。Fig. 14に示す(001)標準ステレオ投影図(図中A~Dはすべり面を表わし番号1~6はすべり方向を表わす)によって、すべり系ならびに圧延面法線と圧

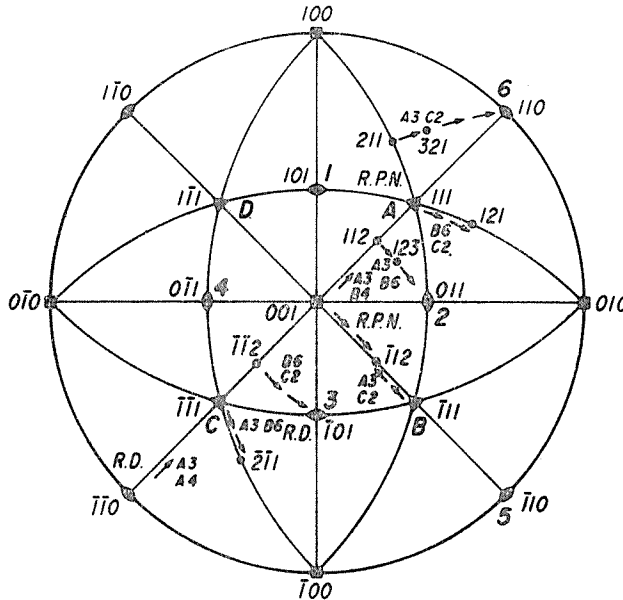


Fig. 14 Standard (001) stereographic projection for cubic crystal showing slip plane normal A-D and slip direction 1-6.



延方向を表示すると (001) [110] 方位において、板厚の減少と圧延方向への伸びに最も寄与するすべり系は A3, A4, C1, C2 のすべり系である。A3とA4が活動する場合とC1とC2の場合では回転は逆向となる。そこでA3とA4が等価に活動した時のひずみテンソルを計算する事にしその結果を (2) 式に示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(A3, A4)} = d\gamma & \begin{pmatrix} \sqrt{2}/\sqrt{3} & 1/2\sqrt{3} & 0 \\ 1/2\sqrt{3} & -\sqrt{2}/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ & + d\gamma \begin{pmatrix} 0 & 3/2\sqrt{3} & 0 \\ -3/2\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式からA3とA4の活動によって縦断面の形状が矩形から平行四辺形に変形し、結晶が横方向のまわりに回転することがわかる。一方最小仕事の原理によって前記のひずみを打消すすべり系を選ぶとB6, D6になる。そこで、すべり系B6とD6の活動によるひずみテンソルを求めると (3) 式で示される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(B6, D6)} = d\gamma & \begin{pmatrix} 0 & 1/\sqrt{3} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ & + d\gamma \begin{pmatrix} 0 & -1/\sqrt{3} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

それ故、A3とA4ならびにB6とD6が1 :  $\frac{3}{2}$ の割合で活動すると仮定すれば、ひずみテンソルは (4) 式で示されるものとなる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(A3, A4, B6, D6)} = d\gamma & \begin{pmatrix} \sqrt{2}/\sqrt{3} & 2/\sqrt{3} & 0 \\ 2/\sqrt{3} & -\sqrt{2}/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ & + d\gamma \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式は圧延表面層において工具と試験片との間に働く大きな摩擦力によって垂直ひずみの $\sqrt{2}$ 倍のせん断ひずみが与えられれば、結晶方位は (001) [110] 方位からの回転が起らない事を意味している。そして、(3) 式で示されたB6, D6のすべり系によるひずみがより大きな場合、結晶方位は横方向のまわりに回転し (117) [772] 方位となる事が考えられる。すなわち、圧延による垂直ひずみと摩擦力による剪断ひずみとの兼ね合いにより、結晶の方位が (001) [110] 方位から横方向のまわりに回転すると考えられる。切削の場合、

最表面層で最大の剪断力が加わり内部へゆくに従って、その大きさは小さくなってゆくと考えられる。それ故、板面に垂直なひずみに対して最表面では剪断によるひずみが大きく、(001) [110] 方位が切削方向へ回転し、(117)  $[\overline{772}]$  の方位となるがある程度内部では(4)式に示したような釣合いが保たれる事により、結晶が回転しない為に(001) [110] 方位になると考えられる。

以上、刃先近傍における切削機構を微少圧延と仮定して圧延理論による解析により、(001) [110] 方位が安定に存在する条件を求め、それにより切削加工集合組織の成因について検討したわけであるがまだ種々の問題を含んでいる。例えば切削機構を微少圧延と仮定しうるのか、また実際の切削においてそのようなすべり系が活動するのかどうか疑問の余地は残されていると思われる。

## 5 結 論

市販 5052 アルミニウム合金 (Al - 2.4 % Mg) の乾式低速二次元切削による切削表面集合組織について、その実態を主として X 線回折による極点図の作製により検討を加えた。結果を要約すると次のようである。

1) 試料を切削した場合、加工前の母材ははっきりした集合組織を示していないが加工後は (001) [110] 方位から切削方向へわずかにたよった (117)  $[\overline{772}]$  方位を持つ切削加工集合組織ができる。

2) 本実験の範囲程度のバイトの逃げ角、切削速度と集合組織およびその切削方向への傾きとは明瞭な関係は見出し得ない。

3) 切削加工集合組織は同一材料の一方向冷間圧延によって生じる表面層の集合組織、すなわち (001) [110] 方位が優先している事に類似しており、アルミニウムのような軟質材の切削では剪断機構に塑性的流動がともなって複雑になり、切削機構の一部に圧延機構と類似した点がある事を示している。

4) それ故、この事実を基にして切削過程を刃先近傍における微少圧延と仮定して圧延理論による切削集合組織の解析を行ない、板面法線方向の垂直ひずみの  $\sqrt{2}$  倍の剪断ひずみがあれば、(001) [110] 方位からの結晶の回転が生じない事、そしてそれ以上の剪断力が存在すれば結晶方位は切削方向へ回転し、切削最表面層における (117)  $[\overline{772}]$  方位となり得る事を示した。

5) 切削加工集合組織の内部への変化は内部へゆくに従って (001) [110] 方位からの傾きが小さくなり、ついには (001) [110] 方位と一致している。この事実は 4) で述べたように板面法線方向の垂直ひずみと切削方向への剪断ひずみとの兼ね合いにより、種々の量の結晶回転が存在する事になり集合組織の内部への変化が生じるとと思われる。

## <付 録>

「X線浸透深さ」

$$G_x = (1 - e^{-2ax/\sin\theta})$$

$G_x$  : X線の% (95%とする)

$\mu$  :  $\mu/\rho$  (質量吸収係数) で表わす  
 $\theta$  : 反射角

上式を変形すると

$$\begin{aligned} \exp(-2\mu x/\sin\theta) &= 1 - G_x \\ -2\mu x/\sin\theta &= \ln(1 - G_x) \\ \therefore x &= -\frac{\sin\theta}{2\mu} \ln(1 - G_x) \end{aligned}$$

ここで  $G_x = 0.95$   
 $\mu/\rho = 48.7 \text{ cm}^2/\text{g}$  (CuK $\alpha$ 線, アルミニウム)  
 $\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$  (アルミニウム)  
 $2\theta = 38.5^\circ$

以上より

$$\begin{aligned} x &= -\frac{2.70 \times \sin 19.3^\circ}{2 \times 48.7} \ln(1 - 0.95) \\ &= 0.0502 \end{aligned}$$

したがって、浸透深さは約  $50\mu$  程度である。

### 参 考 文 献

- 1) 財満, 滝水: アルミニウムの切削機構に関する2~3の考察, 日本機械学会論文集 **35** 277 (1969-9)
- 2) 財満, 滝水: アルミニウムの切削表面層組織. 軽金属, 20 336 (1970)
- 3) カリティ: X線回折要論. 290. アグネ. 1972.
- 4) 田島栄: 電解研磨と化学研磨. 29. 産業図書. 1954.
- 5) 長島: 集合組織 **40**. 金属学会新書. 昭40 金属学会.
- 6) 日本熱処理技術協会. ひずみ研究部会編: 残留応力.