

純 Al 及 5052 合金の塑性異方性に関する研究

加藤良雄* 佐藤元太郎** 福井政隆***

(昭和53年5月30日受理)

Plastic Anisotropy of Aluminum and 5052 Alloy

Yoshio KATO, Mototaro SATO and Masataka FUKUI

The r -values of polycrystalline aggregates taken from the textured sheet cut in seven directions from the rolling direction of 90% cold reduction sheet were determined by a method of tensile deformation. The theoretical calculation of the r -values using the maximum resolved shear stress was made for the slip on the $\{111\} \langle 110 \rangle$ systems.

On the single crystals, the r -values obtained from the tension test and that calculated showed good agreement, but the experimental r -values of the polycrystals in whose texture two preferred crystallographic orientations $(112)[1\bar{1}\bar{1}]$ and $(110)[\bar{1}\bar{1}2]$ existed simultaneously were a little different from the calculated ones. The r -values of the polycrystal sheet were changed by cutting angles; the 45-deg. specimen had the highest maximum value. The applied slip system for theoretical calculation was found to be also satisfactory by observing traces of the slip band.

1 ま え が き

多結晶体を構成する個々の粒子は異方的であっても全体的にはその多結晶体は等方的性質をもつであろうが強度の塑性変形をうけ優先方位が鮮明に認められる場合にはその優先方位のもつ異方性の影響をうけるであろう。一般に降伏点、あるいは引張強さ等の値に大差のない場合でも成形加工性、特に深絞り性については大きな差が認められることから塑性異方性^{1)~5)}が提唱された。たとえば単結晶はその方位によって引張性質は異方的である。すなわち Fig. 1 に示すような代表的方位をもつ試料 No. 1, No. 18 及 No. 17 については Photo. 1 にみられるように No. 1 の r 値は低く、厚さ歪が大きい。No. 18 の r 値は殆んど 1 に近く大体等方的であるが No. 17 では r 値は ∞ で厚さ方向の変形は零である。これらのことは変形時に活動する γ 系の相異によるものと考えられよう。この γ 系は FCC 金属では 4 つの γ 面 $\{111\}$ と 6 つの γ 方向 $\langle 110 \rangle$ の 24 通りの組合せがある。それ

* 機械工学教室 教授

** 機械工学教室 講師

*** 大学院修士課程

を Fig. 2 に示す。 図中A, B, C, D は面を1, 2, 3, 4, 5, 6 は方向を示す。 球面三角形内にある結晶軸をもつものに対しては、たとえば001-011- $\bar{1}11$ 三角形内のものに対する最大迂り系はB1の如くである。 迂り系に対する表示は以後これに従うものとする。

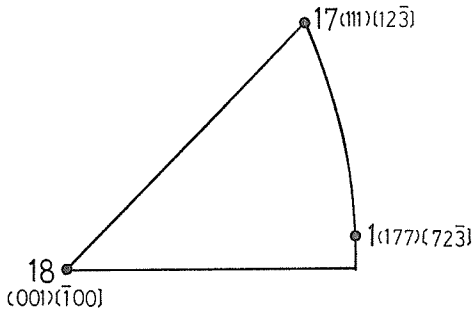
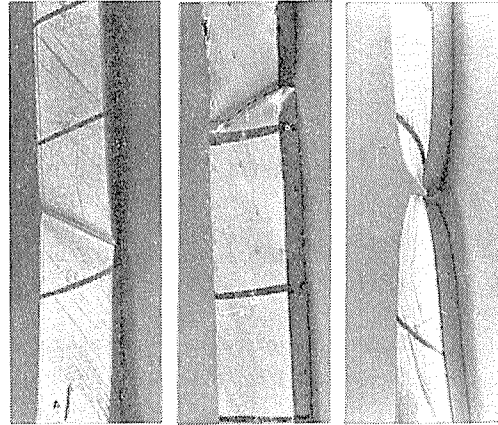


Fig. 1 Orientation for typical specimen.



No. 1 r値0.04 No. 18 r値0.80 No. 17 r値+∞

Photo. 1 Fracture section of specimen.

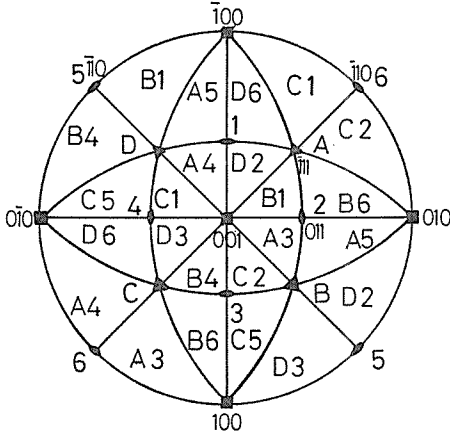


Fig. 2 Active slip system of face-centered cubic crystal.

2 実験方法

2・1 単結晶

純度99.99%Alの鋳塊を実験装置の都合上 Fig. 3 の形状に切出し、ブリッジマン法により単結晶化し、さらに電解研磨して鏡面として引張試片とした。なおラウエ法にて決定した試料面と軸方向を Fig. 4 に示す。引張試験はインストロン型試験機を使用し試験速度1mm/min、伸び10%、20%のときの試片の巾と厚さを予め記した格子線について3箇所をマイクロメーターで実測し次式より r を求めた。

$$r = \ln(w_0/w) / \ln(t_0/t) \quad (1)$$

w_0, w は試験前後の巾, t_0, t は試験前後の厚さである。

2・2 多結晶

純度99.99%Al 鋳塊と5052合金をそれぞれ厚さ15mmに機械加工しAlについては塩浴中にて300°C, 24hr, 5052合金に

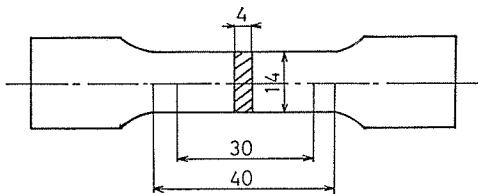


Fig. 3 Shape and size of specimen.

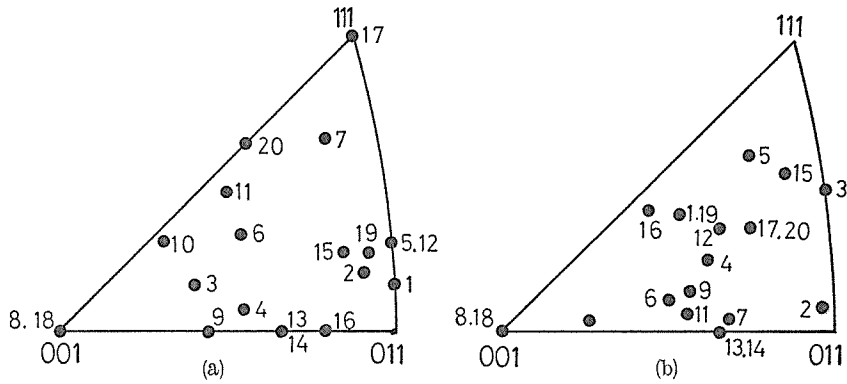


Fig. 4 Orientation of specimen.

(a) pole of specimen surface. (b) axis of specimen.

については540°C、30hr 熱処理を施し、前歴を除去しランダム方位であることを確認後、圧下率5%一定とし圧延率90%まで一方向冷間圧延した冷延板より圧延方向に対し0°~90°まで15°間隔で7方向に切出し、JIS6号試験片に機械加工し化学研磨、電解研磨して引張試験片とした。引張試験は速度1mm/minでAlについては3%伸び、合金では10%伸びのときの巾と厚さを測定した。なお5052合金の化学組成はTable 1の通りである。

Table 1 Chemical composition.

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

2.3 r値の計算

Xを試料軸、Yを巾方向、Zを厚さ方向とし、またxを迂り方向、yを迂り面法線方向とする。Fig. 5に示す如くx、y軸とX、Y、Z軸のなす角をそれぞれ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 及び $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ としx、y軸のX、Y、Z軸への方向余弦をTable 2のようにする。

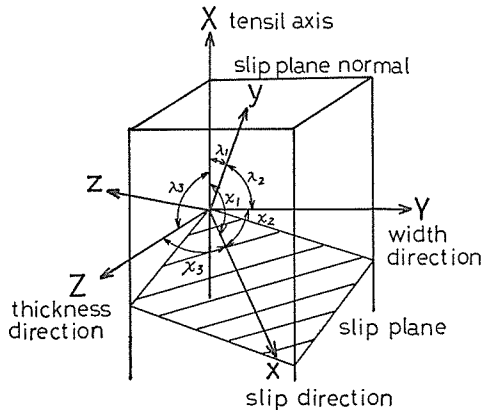


Fig. 5 Relation between (x-y-z) and (X-Y-Z).

Table 2 Direction cosine.

	x	y
X	D_1	E_1
Y	D_2	E_2
Z	D_3	E_3

単一迂りの場合

(X - Y - Z)系での伸歪 ε と迂り面上での剪断歪 $d\gamma$ の関係は次式で表わせる.

$$\varepsilon_{(X-Y-Z)} = d\gamma \begin{bmatrix} D_1 E_1 & D_2 E_1 & D_3 E_1 \\ D_1 E_2 & D_2 E_2 & D_3 E_2 \\ D_1 E_3 & D_2 E_3 & D_3 E_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

r 値に関する測定は初期変形についてのみ行われるので, 結晶回転は非常に小さいか全くないと考えられるから歪は迂りによってのみ生ずるとする. ゆえに巾方向と厚さ方向の伸歪 ε_Y と ε_Z は

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_Y &= d\gamma D_2 E_2 = d\gamma \cos \chi_2 \cos \lambda_2 \\ \varepsilon_Z &= d\gamma D_3 E_3 = d\gamma \cos \chi_3 \cos \lambda_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

よって塑性歪 r は

$$r = \varepsilon_Y / \varepsilon_Z = \cos \chi_2 \cos \lambda_2 / \cos \chi_3 \cos \lambda_3 \quad (4)$$

多重迂りの場合

それぞれの迂りが単一に活動したとすれば n 個の迂り系では

$$r = \frac{1}{n} \sum^n (\varepsilon_Y / \varepsilon_Z) \quad (5)$$

もし n 個の系のうち $r = \infty$ を含むときにはそれぞれの系で生じる剪断歪は等しいものとし次式の如く考える.

$$r = \frac{\sum^n (\varepsilon_Y)_n}{n} / \frac{\sum^n (\varepsilon_Z)_n}{n} \quad (6)$$

なお計算は最大シュミット因子の迂り系について行ったが, これは r 値を測定する変形範囲内では殆んどの場合単一で迂っているからである. またシュミット因子が同値で最初から多重迂りを生じているときには(5)または(6)式を用いた.

3 結果とその考察

3・1 単結晶

実験結果と計算値をまとめて Table 3 に示す. 伸歪10%と20%における r の実験値は同程度であるから歪は測定範囲内では均一である. また計算値と実験値とは1~2の例外的のものを除けばよい一致がみられることから塑性異方性 r は結晶方位に大きく依存することがわかると同時に, i) 伸歪の小さい間は結晶回転はない, ii) 計算は最大活動迂り系のみ

Table 3 Experimental results.

No.	orientation		experimental r-values			calculated r-value	tensile strength kg/mm ²
	surface	axis	10%	20%	mean		
1	177	732	0.041	0.041	0.041	0.104	5.85
3	1310	552	0.041	0.044	0.043	0.044	5.96
4	1610	1052	0.008	0.008	0.008	0.005	5.80
5	144	432	0.008	0.008	0.008	0.024	6.87
6	124	1013	0.643	0.638	0.641	0.680	4.69
7	234	23141	0.400	0.400	0.400	4.752	5.53
9	013	831	0.064	0.045	0.055	0.454	4.83
10	3414	3618	1.299	1.320	1.310	1.453	4.93
11	4511	951	1.298	1.580	1.439	1.812	6.06
12	144	421	0.223	0.152	0.188	0.122	4.17
14	058	085	7.242	4.708	5.975	5.933	5.37
16	023	932	0.059	0.054	0.057	0.014	4.96
17	111	123	∞	∞	∞	∞	6.76
18	001	100	0.791	0.805	0.798	1	4.34
20	112	132	0.869	0.850	0.860	0.714	5.80

による。この2つの仮定にて、i)はこの程度の伸歪範囲内では十分に成立つことが明らかでありii)に対しては後述の迂り線観察からも妥当なものである。すなわち変形が相当に進むまでは最大シュミット因子の迂り系だけがみられる。板面が(111)がr値は最も高く、ついで001-111間の(112)、(113)近傍が高く、(011)近傍で低くなる傾向がみられる。しかし同一面すなわちNo.5とNo.12のように同一面でも方向が異なればr値にも差がみられ、面内異方性を示唆するものであろう。軸方位とr値については(b)にみる如くで板面(a)ほど明らかな関係はみられない。引張強さとr値については周知の如く特別の関連は見出せない。つぎに計算より求めた活動迂り系を確認するため単一迂りの例として試料No.2すなわち(156) [33328]について伸歪2.5, 5, 10及び20%のときの迂り線をPhoto. 2に示す。試料軸は写真の横方向に一致し、計算より求めた活動迂り系はC5である。これが活動したとすれば試料軸と迂り線のなす角度は51.3°でなければならない。結果は十分にこれを満足しC5の活動のみで結晶回転はみられない。なお写真中の太い格子線は別目的のために記したもので変形帯とは無関係である。

3・2 多結晶

圧延前の方位はランダムであると確認した純Al多結晶と5052多結晶を90%冷延したときの集合組織を(111)極点図でFig.6とFig.7に示す。両者ともに(112) [111]と(110)

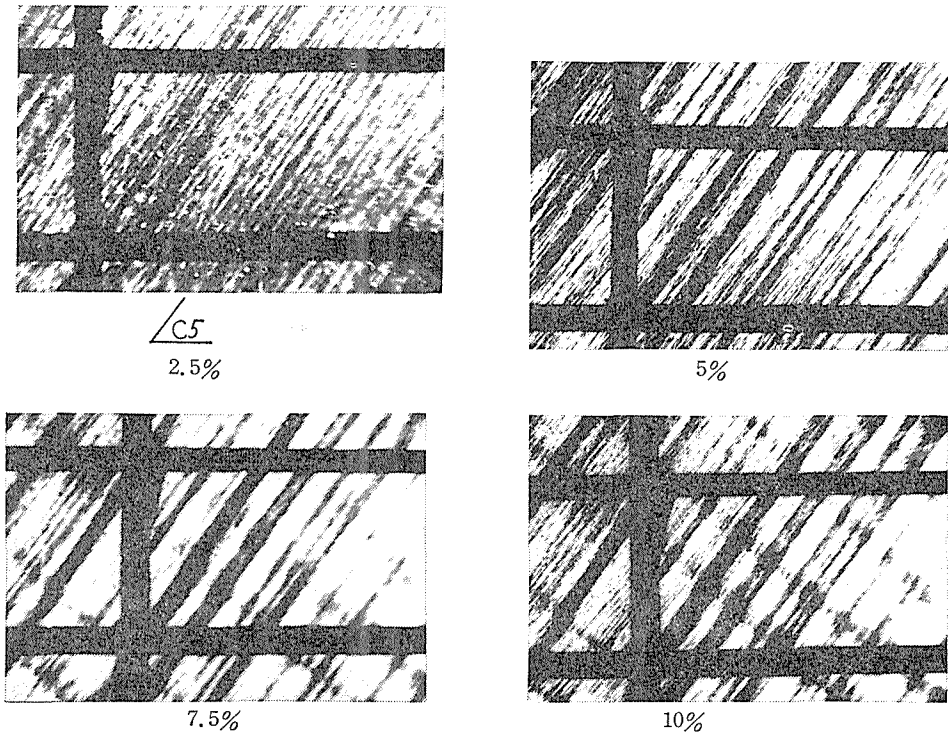


Photo.2 Slip traces of specimen No.2

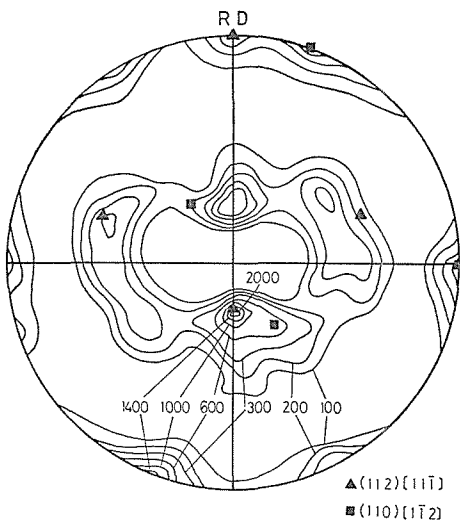


Fig.6 (111) pole figure for the rolling texture of 99.99% Aluminum after 90% reduction.

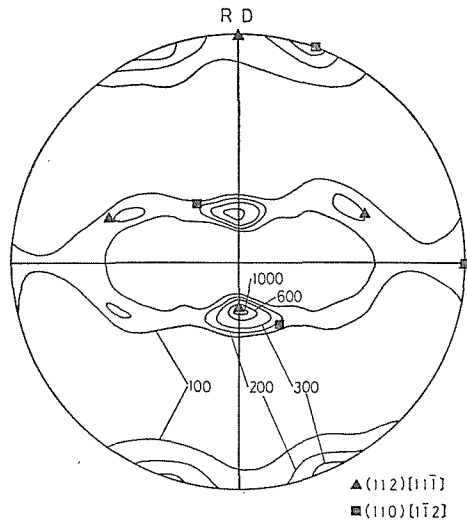


Fig.7 (111) pole figure for the rolling texture of 5052 Alloy after 90% reduction.

[112] の併存を認めるが集合組織としてはAlよりも5052合金のほうが鮮明である。集合組織とは多結晶体を構成する結晶粒が特定の方位を占める割合と考えられるから5052合金のほうが優先方位のもつ異方性の影響を強くうけるであろうと予想される。圧延集合組織にあらわれたこれら2つの優先方位について試料がそれぞれの単結晶と考えたときの r 値を圧延方向から横方向までの7方向について計算し、さらに極点図より(112) [111] と(110) [112] の集積強度は前者が後者の2倍として、その重みつき平均をとり r の推定値とした。計算した7方向の試料方位をFig. 8 に示す。

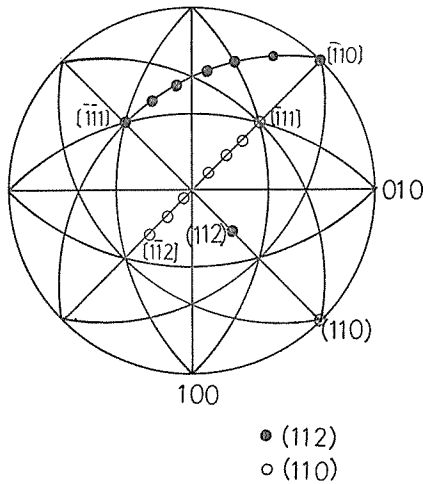


Fig. 8 Calculated orientation.

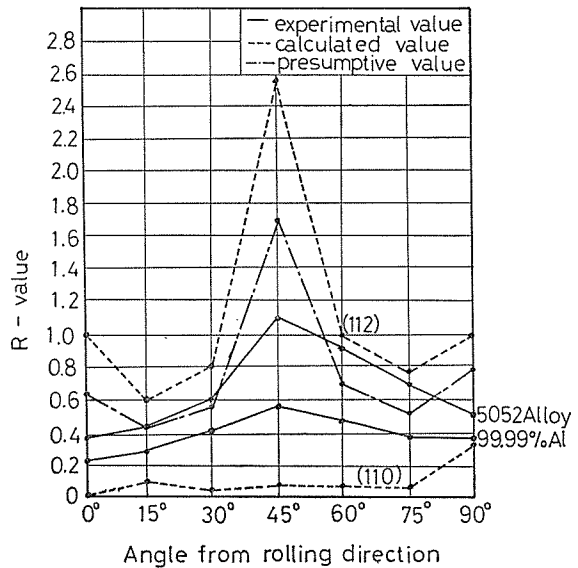


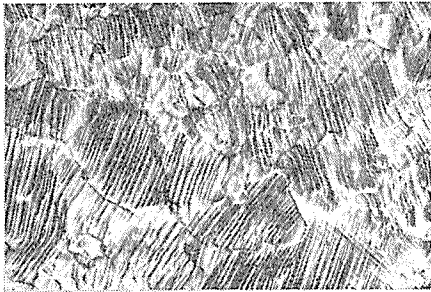
Fig. 9 Comparison between experimental and calculated r -values.

また実験結果と計算値及推定値を Fig. 9 に示した。(112) の45°方向は最大シュミット因子の迂り系 $D6$ だけでは r 値が無大なるので次に大きい $A5$ も考慮して(6)式より r を求めたものである。Fig. 9 よりAl及5052合金ともに実験値は45°方向に極大値をもち圧延方向(0°)より横方向(90°)が幾分高い山形を示し、圧延材の異方性がみられる。計算値は(112)面では45°に高い山形で全体的には実験結果と定性的一致がうかがえるが(110)面では90°方向に若干高くなるだけで全体に r 値を低下させ、圧延材の面内異方性への影響は殆んどない。これら2つの面に対する計算値から推定値も(112)面におけると同様の傾向を示すのは当然であるが、この推定値に対してはAlよりも5052合金のほうが実験的により近似している。これは5052合金のほうが集合組織が鮮明であるから集合組織にあらわれた2つの方位以外の方位の影響が少ないためであろう。

ゆえに圧延材が優先方位の結晶粒のみで構成されているなら、より推定値に近い値が期待される。

以上のように実験値と計算値は定性的によい一致をみるがその値にずれがある。この原

因として1) 優先方位は (112) $[\bar{1}1\bar{1}]$ と (110) $[\bar{1}\bar{1}2]$ だけであるのか, 2) 両者の強度比が正確に2対1であるのか. 3) 単結晶の計算でよいのか, まずこの3点が問題になろう. そこで1)については, 本実験では極点図より一応この2つの優先方位としたが, これ以外に Hu の⁶⁾ 表現による (123) $[\bar{1}2\bar{1}]$ も検討しなければならないだろう. 2)については, 強度比の値は推定値に直接きいてくるのでさらに厳密に定量的に決定しなければならない. 3)については, 1)と2)が正確に決定されるなら, 単結晶近似における誤差は小さくなると考えられる. なお以上の他に最大 γ 系のみで計算したがこの点については単結晶におけると同様に γ 線観察より十分に説明できるものである. すなわち多結晶体の構成粒子がランダムなら γ 線は特別の意味をもたないが, かりに圧延材の大部分が優先方位の結晶粒で占められているか, 大多数の粒子が類似の方位をもつならば各粒子に作用している γ 系が類推できる. この意味において構成粒子に対して計算に用いた γ 系が活動しているか否かを確認するため, 一例として 30° 方向に切出したAl試片について γ 線の観察結果を Photo. 3 に示す. 試料軸方向は写真の横方向に相当し, この試料の活動 γ 系は



$\angle B4$ $\angle A5$

Photo.3 Slip traces of aluminum sheet cut at 30° from rolling direction.

$A5$ が最大で, ついで $B4$ と $D3$ が同じ大きさである. この3者の試料軸とのなす γ 線角度はそれぞれ 50.7° , 84.9° 及 90.0° でなければならない. このように予想される γ 線角度は Photo. 3 にみるようによく一致している. またひとつの結晶粒中では殆んどひとつの γ 系の活動だけがみられ, 多結晶粒中での変形は大部分シュミット因子最大の単一 γ 変形であることがわかる. とくに粒界の傾角が小さい場合には粒界の影響は少なく γ 線は粒界を通している. さらに結晶粒の多くは同一の方位が優先しており, 極点図の結果が相当に確実

なことを示唆している. 以上のように圧延材の塑性異方性は (112) 面の影響が大きく, 集合組織が鮮明ならかなりよい推定値が求められるが, よりよい一致を期待するには結晶

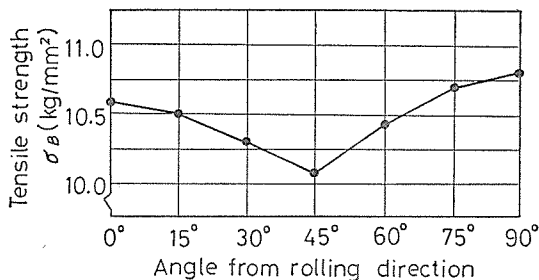


Fig.10 Relation between tensile strength and cutting angle from rolling direction.

粒の大きさ, 形状と粒界の影響等について検討しなければならないが異方性に大きな影響を及ぼすものは結晶方位であり, 集合組織であることは明らかである.

3.3 多結晶Alについて塑性理論による検討

3.3.1 引張降伏応力

圧延材より7方向に切出した試験片について引張試験より求めた引張強さ σ_B を Fig.10 に示す.

各切出し角に対して面内異方性は明確である。Hillによれば¹⁾ 圧延方向に対して α の傾きで切出された試片ではその方向の引張降伏応力 σ_α は次式で表わされる。

$$\sigma_\alpha = [F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha + H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

F, G, H, N は異方性パラメーターで、これらは前に実験的に求めた r から次式によって求められる。

$$r_\alpha = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha} \quad (8)$$

切出し角 α に対する r を代入し

$$\left. \begin{aligned} r_{\alpha=0^\circ} &= 0.23 = H/G, \\ r_{\alpha=45^\circ} &= 0.54 = 2[H + (2N - F - G - 4H)/4]/(F + G), \\ r_{\alpha=90^\circ} &= 0.38 = H/F \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

いま圧延方向、板巾方向及び板厚方向をそれぞれ X, Y 及び Z 軸にとれば X, Y 軸に関する剪断応力 T と N には次式の関係がある。

$$2N = 1/T^2 \quad (10)$$

引張方向が X 軸と α だけ傾いた場合平面歪下におけるその方向の引張降伏応力 σ_α はまた次式でも表わせる。

$$\sigma_\alpha = 2T \left(\frac{1 - c}{1 - c \sin^2 2\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

c は異方性定数で異方性パラメーターによって決定されるものである。

$$c = 1 - \frac{N(F + G)}{2(FG + GH + HF)} \quad (12)$$

(11), (12)に σ_α と異方性パラメーターを入れて c と T が求まる。いま降伏応力として $\sigma_\alpha = 0.94\sigma_B$ ⁷⁾とすれば $\sigma_{\alpha=0} = 9.96$ (kg/mm²)となり、 $T = 4.25$ (kg/mm²), $c = -0.37$ が得られる。そしてこの T の値より(9), (10)から $H = 0.004$, $F = 0.07$, $G = 0.016$, $N = 0.027$ を得る。これらの値と切出し角 α とから引張降伏応力を求めるとFig. 11のようになる。実験値と計算値との傾向はよく似ているが数値的に30%程度の差がある。これは降伏応力を σ_B の94%としたからであろう。元来降伏応力は単位体積中の結晶粒の数、温度等の影響を受け、それによって数値にかなりの開きが生じるものであるが、特にアルミニウムの

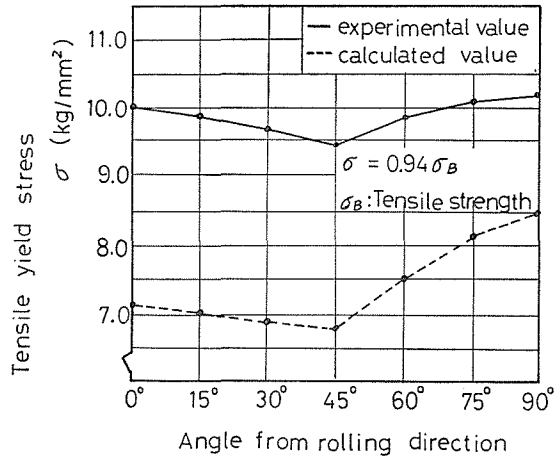


Fig. 11 Comparison between experimental and calculated in tensile yield strength.

如く明確な降伏点を示さない材料では正確な値を見出すことは相当に困難である。

3・3・2 くびれ角

Fig. 12 に試験片に発生したくびれ角の一例を示す。異方性材料の引張試験に表われるくびれ角 θ は Hill によれば

$$a \tan^2 \theta + 2b \tan \theta - c = 0 \tag{13}$$

で表わせる。ただし

$$a = H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha$$

$$b = [(N - F - 2H) \sin^2 \alpha - (N - G - 2H) \cos^2 \alpha] \sin \alpha \cos \alpha$$

$$c = a + F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha$$

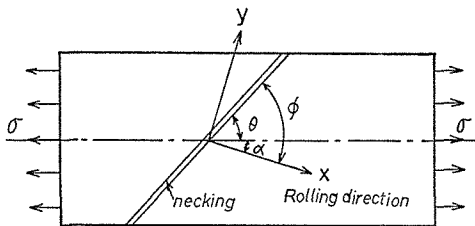


Fig. 12 Geometric relationship of necking angle.

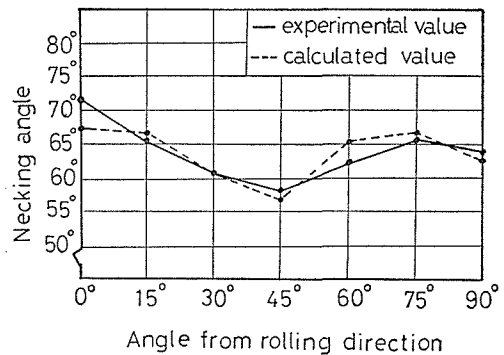


Fig. 13 Comparison between experimental and calculation values for necking angle.

である。切出し角 α に対する a , b , c を(13)に代入すれば θ が求まる。この結果を実験値と比較してFig. 13に示す。両者はかなりよく一致している。

4 ま と め

99.99% Alの単結晶, 多結晶および5052合金多結晶の塑性異方性 r 値を測定した結果次のことが明らかになった。

99.99% Al単結晶の場合

(1) 各方位の単結晶について引張試験より求めた r の実験値と迂り系より計算した理論値はよく一致し, 計算の根拠とした1) 変形が初期の間は結晶回転は無視する。2) 最大シェミット因子の迂り系だけで計算する。この2つの仮定は迂り線の観察からも妥当なものであった。

(2) r 値は板面方位が(111)において最も大きく, (112), (113)近傍について(001), (011)近傍の順に小さくなる傾向が認められた。

Al多結晶と5052多結晶の場合

90%冷間圧延して異方性をもたせた圧延板から圧延方向に対して7方向に切出した板の r 値と集合組織及迂り線については

(1) 圧延材の(111)極点図より(112) $[\bar{1}1\bar{1}]$ と(110) $[\bar{1}\bar{1}2]$ の2つの優先方位の共存が認められ, そしてAlより5052合金のほうがより鮮明な集合組織を示した。

(2) 理論 r 値と実験 r 値はAlよりも5052合金のほうが定量的により近似が得られた。

(3) 7方向の切出し角 α に対する r 値は45°方向に極大値をもち, 圧延材の面内異方性を示し, これは(112)面にて顕著である。

(4) 迂り線の観察から圧延材の優先方位にしたがった迂り線が多数の結晶粒にみられ, 変形が相当進むまでは最大シェミット因子の迂り系のみ活動であることが明らかになった。

なお降伏応力とくびれ角について Hill の塑性理論と実験値との適応はよい一致を示した。

参 考 文 献

- 1) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, (1950). 鷲津久一郎訳, 塑性学, 培風館
- 2) R. S. Burns and R. H. Heyer: Sheet Metal Ind, 35 (1958), 261.
- 3) R. L. Whiteley, D. E. Wise and D. J. Blickwede: Sheet Metal Ind, 38 (1961), 349.
- 4) 五弓, 鈴木: 日本金属学会誌, 27 (1963), 68.
- 5) 長島, 武智, 加藤: 日本金属学会誌, 29 (1965), 393.
- 6) H. Hu, P. R. Sperry and P. A. Beck: J. Metals, 4 (1952), 76.
- 7) アルミニウム加工技術便覧, 日刊工業