研究

異方性材料の切削機構に関する研究*

—アルミニウム圧延板の二次元切削—

山本 明** 中村 示** 山中 彰***

The Cutting Mechanism of Anisotropic Materials

—Orthogonal Cutting of Aluminium Plates—

Akira YAMAMOTO, Shimesu NAKAMURA, Akira YAMANAKA

Aluminium plates which have various inclination to rolling direction are cut orthogonally, and the cutting force and the shear angle are measured. Moreover, the anisotropic parameters and the r -value are determined from tensile test of the same plates. Then, the effects of anisotropic nature on the chip formation are discussed from these results.

The main results are as follows.

(1) The cutting force R changes periodically against the plate inclined angle to rolling direction θ , and takes the minimum value near $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ and the maximum value at a middle of these. On the other hands, the shear angle ϕ changes in the reverse phase of R , and the ratio of its variation width to the mean value comes up to 50%.

(2) The slope angle of R to cutting velocity ($\beta-\alpha$) is almost invariable for θ . Accordingly, the main factor bringing a large periodical change of R consists in the variation of ϕ .

(3) These phenomena can not be explained with the theory of plane strain, because of a different aspects of aluminium plate in relation between r -value and θ from, for example, steel or copper plate.

(4) The ϕ ($\beta-\alpha$) relationship is almost plotted on a straight line distinguished only by θ , and is out of the solution by Merchant or Lee-Shaffer.

1. ま え が き

切削加工される被削材として一般に圧延材が多く使用されているが、このような圧延材では方向により力学的性質がいちじるしく異なるいわゆる異方性が存在することはよく知られている。したがって、これらを切削する場合、異方性主軸と切削方向の関係によって切削抵抗やせん断角などが変化することは当然考えられる。このような現象に関する研究はこれまであまり行なわれておらず、B. N. Colding¹⁾の研究の他、最近の阿武ら²⁾が行なった黄銅板の旋削による研究が見られる程度である。そこで、アルミニウムの圧延板を被削材として、その圧延方向と切削方向のなす角（以下この角を試料方向 θ とする）を種々変化させて二次元切削を行ない、切削抵抗、切削比、せん断角などを測定するとともに、その変化の様子を塑性学的に考察してみた。本報はこれらの結果についてのべる。

2. 切削実験

2.1 実験方法

厚さ 1.5 mm の市販アルミニウム板 (Al PI-1/2H) より、圧延方向に対し、 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ の 5 方向の試料 (長さ 150 mm, 幅 50 mm) を採取し、形削盤を用いて、切削速度 30 m/min で、切込み t を 0.1, 0.2, 0.3 mm と変化して二次元乾式切削した。バイトは SKH4 製で、すくい角 α は $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 、にげ角は 6° 一定とした。切削抵抗は形削盤の工具台上に取付けた抵抗線ひずみ計を利用した切削動力計で測定した。4 枚の試料を重ね合せて一組としたものを切削し、中央の 2 枚の試料について切削比やせん断角の測定を行なった。このようにして切削したときの切削状態は図 1 に示すように定常的なものが得られた。この図は $\theta=22.5^\circ$ の試料をすくい角 25° 、切込み $t=0.3$ mm で切削したときの切削状態を急停止装置によって凍結し、試料の側面を電解腐蝕 (弗酸 2% 溶液中で) したマクロ組織であり、切りくずは流れ型で、定常的な切削状態であり、また構成刃先の発生も見られないことがわかる。

2.2 実験結果

*原稿受付 昭和45年8月11日。精機学会関西支部定期講演会 (昭和45年7月24日) にて発表。

**正会員 大阪大学基礎工学部 (大阪府豊中市待兼山町1の1)

***正会員 トヨタ自動車工業(株) (豊田市トヨタ町1)

すくい角 $\alpha=25^\circ$, 切込み $t=0.3\text{mm}$, 試料方向 $\theta=22.5^\circ$.

図 1 切削状態

図 2 切削抵抗 R の θ による変化 (その 1)

図 3 切削抵抗 R の θ による変化 (その 2)

(1) 切削抵抗の合力 R の変化

主分力 F_c , 背分力 F_t を測定して切削抵抗の合力 R を求めた結果の一例を図 2, 図 3 に示す。図 2 は $t=0.2\text{mm}$ ですくい角 α を, 図 3 は $\alpha=25^\circ$ で t を変化した場合のものである。切削抵抗 R は試料方向 θ によって

図 4 ϕ の θ による変化

図 5 $(\beta-\alpha)$ の θ による変化

周期的に変化し, その変化率 (以下全振幅の平均値に対する比をいう) は α の減少, t の増大とともに増し, 40% 近くにも達する。変化周期は 90° よりむしろ 180° とみるべきであろう。そして, $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ よりも少し小さい値で極小値となり, その中間で極大値を示している。

(2) せん断角 ϕ の変化

切削比から求めたせん断角の変化は図 4 に示すように, これも試料方向 θ によって大きく変化している。さきの R の変化と比較してみると, 同じ θ で R の極大値となっている点で ϕ は極小値となっていることがわかる。また, θ の変化率は α が大きくなるほど大きく, $\alpha=30^\circ, t=0.2\text{mm}$ では 60% 近くになる。

(3) 切削抵抗の方向角 $(\beta-\alpha)$

切削抵抗 R が切削方向となす角 $(\beta-\alpha)$ を求めてみると, 図 5 のようになり, この角は α と t のみの関数で, θ によってはほとんど不変とみなすことができる。すなわち, θ が変化しても R の方向は一定であるといえる。

(4) ϕ と $(\beta-\alpha)$ の関係

図6 ϕ と $(\beta-\alpha)$ の関係

ϕ と $(\beta-\alpha)$ の関係を求めてみると図6のようになる。図で、直線 a は Merchant の条件式 ($2\phi + \beta - \alpha = 90^\circ$)、直線 b は Lee-Shaffer の条件式 ($\phi + \beta - \alpha = 45^\circ$) を示している。実験値はこれらの条件式よりはずれており、図示のように α , t を変化して得られる値はほぼ θ で整理できる。そして、 θ をパラメータとした近似直線の関係位置は図に示したように ϕ の場合と同様に、 0° , 90° と 45° の間に 22.5° のものが入っている。このことから、従来切りくず発生の塑性条件式として ϕ と $(\beta-\alpha)$ の関係を求めようとしてきた試みでは、圧延材の場合、切削方向と圧延方向の関係を明らかにした上で論じなければならないことがわかる。

さて、図4、図5に示した $t=0.2\text{ mm}$ の場合について近似的に

$$\phi \approx 0.17\alpha \{2 + \cos(4\theta + 10)\} + 6 \quad [\text{deg}] \quad (1)$$

$$\beta - \alpha = 45 - 0.88\alpha \quad [\text{deg}] \quad (2)$$

が成立する。なお、この式では変化の周期を 90° として扱っている。これをもとにして図6の関係を求めてみると

$$\begin{aligned} \phi &= \cos(4\theta + 10) \{8.7 - 0.18(\beta - \alpha)\} \\ &\quad - 0.39(\beta - \alpha) + 23.4 \quad [\text{deg}] \quad (3) \end{aligned}$$

とくに、 $\theta=0^\circ$ と 90° 、すなわち圧延方向またはこれと直角方向に切削するときは近似的に

$$\phi = 32 - 0.57(\beta - \alpha) \quad [\text{deg}] \quad (4)$$

また、 $\theta=45^\circ$ では

$$\phi = 15 - 0.21(\beta - \alpha) \quad [\text{deg}] \quad (5)$$

である。図6に(3)式より得られる値を点線で示した。

(5) 切削抵抗変化の原因についての検討

切削抵抗 R はせん断面を平面とみなす切削模型では

$$R = \frac{\tau_s \cdot A_0}{\sin \phi \cdot \cos \omega} \quad (6)$$

と表すことができる。ここで、 τ_s はせん断面上でのせん断応力、 A_0 は切削面積、 ω は R のベクトル方向とせん断面のなす角である。また、さきのべたように α 一定の条件では、 $\beta - \alpha \equiv K$ は一定と考えられるから

$$\omega = \phi + K \quad (7)$$

と表わすことができる

ここで、(1), (2), (6), (7) 式を用いて、 θ による R の変化の要因を考えてみよう。いま、 θ_i における R , τ_s , $A_0 / \sin \phi \cdot \cos \omega$ の値をそれぞれ R_i , τ_{si} , $f(\phi_i)$ とし、 $\theta_i + \Delta\theta$ における値を $R_j = R_i + \Delta R$, $\tau_{sj} = \tau_{si} + \Delta\tau$, $f(\phi_j) = f(\phi_i) + \Delta f$ とすると、 R の変化率は

$$\frac{R_j - R_i}{R_i} = \frac{\tau_{sj} \cdot f(\phi_j) - \tau_{si} \cdot f(\phi_i)}{\tau_{si} \cdot f(\phi_i)} \quad (8)$$

で求められる。この式より

$$\frac{\Delta R}{R_i} = \frac{\Delta\phi}{f(\phi_i)} + \frac{\Delta\tau}{\tau_{si}} + \frac{\Delta\tau \cdot \Delta\phi}{\tau_{si} \cdot f(\phi_i)} \quad (9)$$

が得られる。

いま、 $\alpha=30^\circ$, $t=0.2\text{ mm}$ の切削条件で θ が 0° から 45° まで変化したときの R の変化率を求めることにする。

実験結果より

$$\begin{aligned} \theta=0^\circ \text{ では } R_0 &= 65\text{ kg}, \phi = 21.3^\circ, \beta - \alpha = 18.6^\circ, \\ f(\phi_0) &= 4.31, \tau_{s0} = 15.1\text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta=45^\circ \text{ では } R_{45} &= 85\text{ kg}, \phi = 11.2^\circ, \beta - \alpha = 18.6^\circ, \\ f(\phi_{45}) &= 7.13, \tau_{s45} = 11.9\text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

ここで、 τ_s の値は(6)式より、上記の R , ϕ の値を用いて求めたものである。これらの値より

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 0.31, \quad \frac{\Delta\phi}{f(\phi_0)} = 0.65$$

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_{s0}} = -0.21, \quad \frac{\Delta\phi \cdot \Delta\tau}{f(\phi_0) \cdot \tau_{s0}} = -0.14$$

が得られる。

以上の結果より、 θ による R の変化の要因はせん断角 ϕ の変化による影響がもっとも大きく、せん断応力 τ_s の変化によるものがこれにつづき、 ϕ によるものと逆方向に働いていることがわかる。ここで、せん断応力 τ_s が θ によって変化する様子はせん断応力は引張降伏応力に比例するものと考え、後述の引張試験結果よりある程度類推することができる。しかし、このようなせん断角の大きな変化はこれまでの切削理論では説明することができない。そこで、つぎに ϕ が θ によって変化する様子

図 7 試料の応力-ひずみ関係

を塑性理論を用いて考察してみよう。

3. 塑性理論による考察

3.1 引張試験による異方性パラメータの決定

試料の異方性パラメータを求めるために、試料方向 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の試験片について引張試験を行なった。試験片の形状は JIS 5 号試験片とし、その軸方向および幅方向のひずみを測定するために塑性域用ひずみゲージ (KL-6-A4) を試験片中央部に張付し、試験片にくびれが生じるまで引張試験を行ない、応力-ひずみ曲線を求めた。その結果を図 7 に示す。ここで、塑性ひずみ 0.2% のときの応力を降伏応力 $\sigma_{0.2}$ として定める。

$\theta = 0^\circ, 90^\circ$ のときの r 値をそれぞれ r_0, r_{90} すると、異方性主軸に関する応力とひずみ増分の関係式³⁾より

$$r_0 = \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} = \frac{1}{G} \quad (10)$$

$$r_{90} = \frac{d\varepsilon_x}{d\varepsilon_z} = \frac{1}{F} \quad (11)$$

の関係が得られる。ここで、異方性パラメータ F, G, H, N は元来相互の比が重要で、その絶対値はあまり問題とならないので、ここではパラメータ H を 1 として扱うことにする。

また、 $\theta = 45^\circ$ のときの r 値を r_{45} とすると

$$N = \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}} \right) \left(r_{45} + \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

である。このようにして得られた r 値を表 1 に示すように θ によってかなり大きく変化している。また、表で長さ方向の塑性ひずみ ε_{pl} 、幅方向の塑性ひずみ ε_{pb} は $\sigma_{0.2}$ 付近の値で、単に大きさの程度の比較という意味で示した。

3.2 平面ひずみ理論と考察

表 1 θ による機械的性質の変化

試料方向 θ	降伏応力 $\sigma_{0.2} \text{ kg/mm}^2$	塑性ひずみ		r 値	くびれ角 Ψ
		$\varepsilon_{pl} \times 10^{-6}$	$\varepsilon_{pb} \times 10^{-6}$		
0°	13.2	1720	450	0.35	$63^\circ 0'$ $-63^\circ 0'$
45°	12.3	2820	1440	1.00	$57^\circ 20'$ $-52^\circ 2'$
90°	13.4	2220	850	0.62	$58^\circ 15'$ $-58^\circ 15'$

図 8 τ_s の実験値と計算値の比較 ($t=0.2\text{mm}$)

直交異方性をもつ圧延薄板の圧延方向を x 軸、板面内でこれに直角な方向を y 軸、板厚方向を z 軸とする。いま、薄板が平面ひずみ状態にあるときの降伏条件式⁴⁾は

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4(1-c)} + \tau_{xy}^2 = T^2 \quad (13)$$

ここで、 c は定数 (等方性のときは $c=0$)、 T は x, y 軸に関するせん断降伏応力である。

圧延方向に対して θ なる傾角で切り出された引張試験片の引張降伏応力を σ とすると

$$\sigma = 2T \left(\frac{1-c}{1-c \sin^2 2\theta} \right)^{1/2} \quad (14)$$

(13), (14) 式よりせん断降伏応力 τ_s は

$$\tau_s = T(1-c \sin^2 2\theta)^{1/2} \quad (15)$$

(14) 式に $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ のときの引張降伏応力 $\sigma_{0.2}$ を代入して、 $c = -0.15$ 、 $T = 6.15 \text{ kg/mm}^2$ の値が得られる。この c と T の値を用いて、(15) 式より τ_s と θ の間の関係が求められる。この計算値と切削実験結果より (6) 式を用いて求められる τ_s の値を比較してみると図 8 のようになり、計算値と実験値の曲線の傾向はほぼ逆位相の関係にある。

つぎに、圧延方向に対する最大せん断ひずみ速度方向の傾きを Φ 、最大せん断応力方向の傾きを Φ' とすると、

図 9 切削模型における力と変形状態の関係
(平面ひずみ理論)

図 10 ϕ の実験値と理論値の比較 (平面のひずみ理論)

$$\tan 2\phi = \frac{1}{1-c} \tan 2\phi' \quad (16)$$

の関係がある。いま、図 9 に示すように圧延方向と切削方向の間の角を θ とし、せん断面は最大せん断ひずみ速度方向に生じるとする。 R と最大せん断応力 $\tau_{\max}$ のなす角は 45° であるので

$$\phi = \theta - \phi', \quad \phi' = \theta + \beta - \alpha - 45^\circ \quad (17)$$

の関係が得られ、(16), (17) 式を用いて ϕ と θ の関係を求めることができる。

ここで、一例として $\alpha = 30^\circ$, $t = 0.2 \text{ mm}$ の場合について計算した結果を図 10 に示す。計算では、 $\beta - \alpha = 18.6^\circ$, $c = -0.15$, また(2)式より得られる値が用いられた。実験値も比較のため図に記入してあるが、ここでも二つの曲線は逆位相の関係にある。したがって、異方性材料の切削機構を平面ひずみ理論で説明することは少なくともここで用いた被削材に関しては困難であるという

図 11 くびれ角 Ψ の定数

ことができよう。さらに、平面ひずみ理論では板厚方向のひずみは均一として無視しているが、異方性材料では外力の作用方向によって、異方性各主軸方向のひずみの値が大きく変化する(表 1 参照)のために、異方性材料の切削機構を解析するのに平面ひずみ理論を用いるとこのような不都合なことがあるものと考えられる。

3.3 平面応力理論による考察

圧延薄板の引張試験片でのくびれは異方性の状態に応じたある傾斜角で発生することがわかっている。このようなくびれは理論的には特性曲線(すべり線)と一致するはずであり³⁾、特性曲線の傾斜 dy/dx は

$$[(G+H)\sigma_x - H\sigma_y]dx^2 + 2N\tau_{xy}dx \cdot dy + [(F+H)\sigma_y - H\sigma_x]dy^2 = 0 \quad (18)$$

を満足する。いま、図 11 に示すようにくびれ角 Ψ を定義すると

$$dy/dx = \tan(\Psi + \theta) \quad (19)$$

これを(18)式に代入すると、つぎの関係式が得られる。

$$a \tan^2 \Psi + 2b \tan \Psi - c = 0 \quad (20)$$

ここで、 $a = H + (2N - F - G - 4H)\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta$

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

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

この式はくびれ角 Ψ と異方性パラメータ F, G, H, N および θ の間の関係を与える。表 1 に示した r 値を用いて、くびれ角 Ψ を求めた結果を同じ表に示してある。

さて、以上のべた(18), (19), (20) 式は単純圧縮の場合にもそのまま成立するものとして、この関係を切削過程にあてはめ、くびれ方向をせん断面方向と考え、くびれ角 Ψ をせん断面と R のなす角 ω に対応させる。試料の圧縮方向が圧延方向となす角を θ とすると、これは切削模型(図 8 参照)では $(\theta + \beta - \alpha)$ に対応する。

(20)式より Ψ を計算してみると、これは θ に対して図 12 に示すような変化をする。この図で実線は Ψ の正の値を、点線は負の値をそれぞれ表わしている。一方、実験値 ω は図示のように θ に対して、 Ψ の負の値の場合とほぼ同位相の変化をする。その上、その変化率も近い。

図 12 ω の実験値と理論値の比較 (平面応力理論)

また、この切削模型では ψ は負の値のときに相当する。このように平面応力理論によってせん断角 ϕ が θ によって変化する様相を一応説明することができる。

3.4 c の値と両理論の適用性

さきにのべたように、これまでの切削理論でよく用いられている平面ひずみ理論では θ に対する ϕ の変化をうまく説明できなかった。ここで、もし c の値が正であれば図5より明らかなように、 τ_s は c が負のときと逆位相になり、図7に示した τ_s の実験値の変化と同じ傾向をもつことになる。この位相関係の一致は $\phi-\theta$ 関係においても認められる。つまり、 $c>0$ では ϕ の θ に対する変化を平面ひずみ理論で定性的に説明することができる。

ここで、実験の試料として用いた圧延のままのアルミニウム板は一般に表1に示すように r 値は $\theta=45^\circ$ 方向で大きい値で、そのために c の値は負となっている。ところが鋼、銅、黄銅などの圧延板では逆に r 値は 45° 方向で最小となり、このときは c は正となる。このようにアルミニウムでは平面ひずみ理論で説明できず、平面応力理論にしたがうような結果となったと考えられる。阿武ら²⁾は黄銅板について材料実験から $c=0.05$ 、切削実験から $c=0.25$ を得て、平面ひずみ理論で定性的によく説明できるとのべている。

4. 結 論

アルミニウム圧延板を圧延方向と切削方向のなす角 θ

を変化させて二次元乾式切削を行ない、切削抵抗、せん断角を測定して、これらの変化が主として何によってもたされるものであるかを検討した。

その結果つぎのようなことがわかった。

- (1) 切削抵抗 R は θ によって周期的に変化し、 $\theta=0^\circ$ 、 90° 、 180° より少し小さい値で極小値を、その中間で極大値を示す。その変化率（全振幅の平均値に対する比）は切込み t の増加に伴って増し、40%近くにもなる。
- (2) せん断角 ϕ も同様に周期的に変化し、 R が極大・極小値となるとき ϕ は極小・極大値となる。その変化率はすくい角 α の増大とともにまし、60%にも及ぶ。
- (3) R の方向 $(\beta-\alpha)$ は θ によってほとんど変化せず α 、 t によって定まる値となる。
- (4) ϕ と $(\beta-\alpha)$ の関係は Merchant や Lee-Shaffer の式よりはずれており、 θ をパラメータとして表わすことができる。また、切削抵抗 R とせん断面のなす角 ω は実験的に試料材質とすくい角で定まる常数とみることができるが試料材質の影響は θ によって大きく変化する。
- (5) R の θ に対する大きな周期的変動の原因はおもに ϕ の変化にあり、それぞれの変化率も類似する。
- (6) 平面ひずみ理論を用い、すべり線をせん断面に対比すると、 τ_s および ϕ の θ に対する周期的変動は理論値と実験値では逆位相の関係にあり、 ϕ の θ による変化をうまく説明できない。しかし、平面応力理論により、引張試験片のくびれ方向をせん断面に対比させると、 ϕ はこの理論にしたがうような変化をする。

参 考 文 献

- 1) Bertil N. Colding: A Yield criterion applied to the Shear-angle Relationship, Microtechnic, Vol. XIV (1960), No. 2, 47.
- 2) 阿武芳朗他: 被削材異方性の切削抵抗におよぼす影響, 日本機械学会論文集, 36, 286 (1970-6) 1023.
- 3) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, 1950, 鷲津久一郎他訳 塑性学, 培風館.
- 4) 福田 実: 異方性材料の塑性論の R 値表現, 塑性と加工, 5, 36 (1964-1) 3.