

# 金属板片の面内圧縮機作による鍛造用スラグの作製

春日保男・古市裕司

## Preparation of Blank Slugs for Forging by a Process of Balanced Biaxial Compression of Thinner Metal Pieces

Yasuo KASUGA and Yuji FURUICHI

In a forging process, especially in a cold forging, metal slugs having a diameter-height ratio of from about 2.5 to 4.5 are generally accepted as blank material. The conventional preparation process of them is that, first a bar stock is cut into pieces to have a diameter-height ratio of from about 1/1.5 to 1/1.0 and then they are upset axially so as the said ratio of slugs to be attained.

In this paper, it is suggested that a sheet stock can be employed as the starting material, and a way to carry out the balanced biaxial compression of sheet metal pieces is referred to. Tandem tooling of a blanking die and a extrusion die with a punch is available for this purpose. The procedure is that once individually blanked metal pieces are successively forced into the extrusion die so to make them into a stock pile which, by passing through the die, separates again into pieces of a reduced diameter. Based on the experiment on aluminium, points essential to this scheme are enumerated. It is concluded that though the conditions for a technologically admissible, stable process can be specified, application of the process to real production appears somewhat limited mainly due to economical reasons.

### 1. 序 説

素形材産業において、塑性プロセスを経由する金属部品の生産比率は、鍛圧機械と金型の進歩により年々とも伸びる傾向にある<sup>1)</sup>。ブロック素材の鍛造分野では、鋼の冷間鍛造品として我が国が誇りえる製品が漸く市場を賑わすに至っている。

冷間鍛造では、一般に、直径・高さ比が概略 1/1.5 程度の棒鋼切片を当初形態として加工を発足させ、一旦これを、直径・高さ比で 2.5~4.5 程度のスラグとするまで据えこんで、このスラグを基礎にして諸々の成形作業に取りかかる例が多い<sup>2)</sup>。

塑性プロセスは一般に、最終形態と当初形態という二つの固体形状の間を、どのような変形加工操作で結びつけられるかという問題の解答として具現するとも言える。しかし、当初形態(Ausgangsform)が先験的に確定しているわけではなく、多くの鍛錬形金属の中間成品が、棒、管、形材、板といった形状で市場に流通するという事実が、慣行上の形態制限となっているに過ぎない。

いま、直径・厚さ比が 2.5~4.5 の盤状体をスラグの目標形態と考え、これをえるための予備工程をごく一般的に考えると、それは単に棒切片の据えこみには限られず、

別の素材形態からも当然発足できる。図 1 は、目標の直径・厚さ比(加工後形状スペクトル)  $\delta_{s1}$  を縦軸に、これに到達するための素材の直径・厚さ比(素材形状スペクトル)  $\delta_{s0}$  を横軸に与えたとき、両者間の変換に必要な加工度を斜線で与えた一般図である。(後述式(1)参照)

たとえば、前記のように棒切片の形状スペクトルを  $\delta_{s0}=1/1.5$  として、これに据えこみ加工度  $R=2.4$  を加えると加工後形状スペクトル  $\delta_{s1}=2.5$  のスラグが得られる。しかし  $\delta_{s0}$  が大きく異って、たとえば  $\delta_{s0}=8$  というような板切片を素材としても、これに加工度  $R=2.2$  の板面内等二軸圧縮が加えられれば理論上ほぼ  $\delta_{s1}=2.5$  のスラグがえられる筈である。

本報告は、この後者のような、慣行から外れた加工の技術的可能性を探り、これを遂行するときの制約条件を実験に基いて明確にしようとするものである。

#### 1・1 幾何学的前提条件

板切片の等二軸圧縮機作そのものは直観的に唯一つ定まるわけではないが、円板を重ねて押出す過程は実行するのに易しい一つの方法と認められるゆえ、ここでは先ず、課題を「重ねられた円板素材を円すいダイスによって押出す」という機構に限定することにした。

次に、素材円板の形状スペクトル  $\delta_{s0}$  を決めるためには、

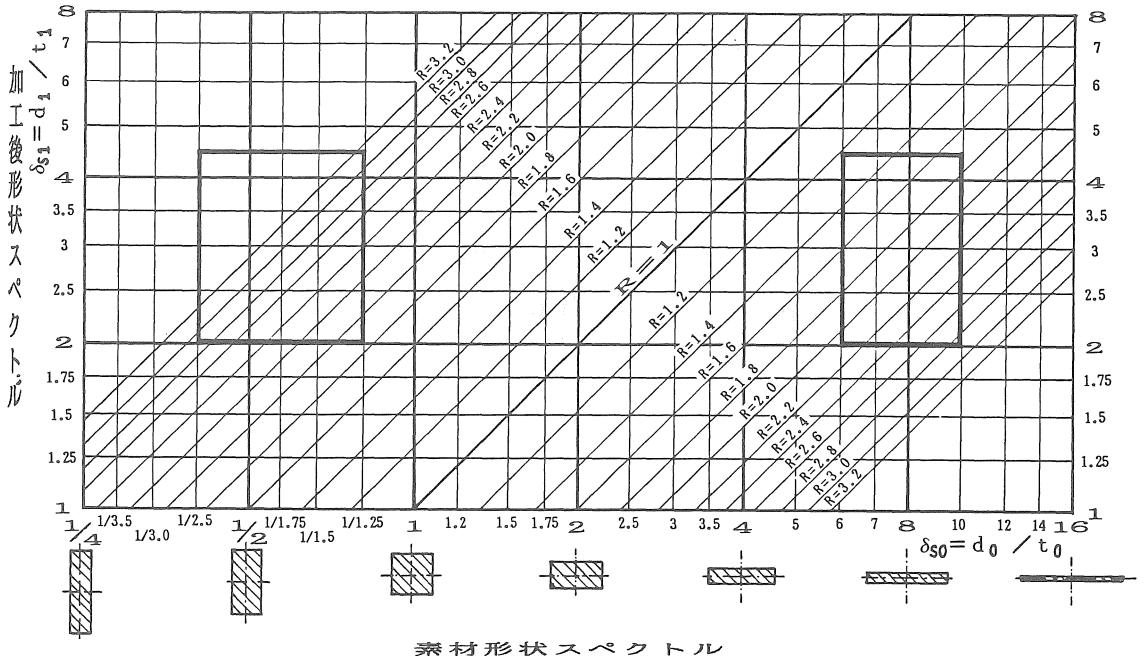


図1 塑性成形における形状変換と加工度

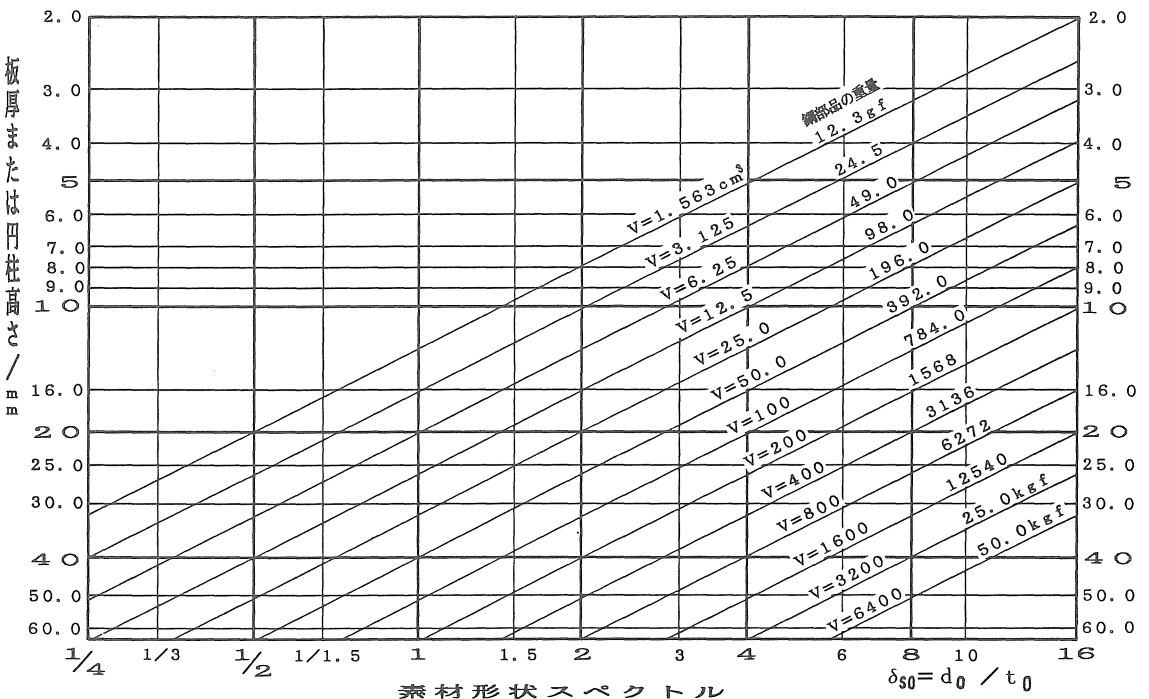


図2 素材重量の見積り

冷間鍛造の経済性に拘わる要因として、目的製品の重量の考慮が必要となる。図2は素材板厚 $t_0$ を縦軸、同じく形状スペクトル $\delta_{s0}$ を横軸として、スラグ体積、従って鋼部品の重量を求める線図であるが、薄板に属する2~3

mmの素板によって100gf程度のスラグを作製しようとすれば、 $\delta_{s0}$ を図の範囲より更に大きくして加工度を増さねばならない。 $\delta_{s0}$ が概ね10以上になれば、押し出し変形に伴う軸心部の材料先進により、素板は容易に冠状設体

となってダイスを通過する結果、目的の二軸圧縮は殆ど全く行われることなく無効に終る。

$\delta_{s0}$ の値として推奨できるのは8~10の範囲であることが経験的に知られた。この値によれば厚さが6 mmの板によって一個の重量が約100gfのスラグを作ることができる。

既往の基礎実験<sup>3)</sup>によって判明したいま一つの要点は、押し出しダイスの作業部に何枚まで円板を収容するかということである。それは、押し出し用ポンチとダイスの間で、できるだけ数少ない板状材料を拘束下にもたらすという、塑性成形の原則に基くもので、実はこの条件によって、用いるべき押し出しダイスの円すい頂角 $2\alpha$ 、減面比 $R$ などが定められるのである。ダイス作業部に全く挟みのない円すい台形材料円板を何枚収容できるか、その数を $n$ とすれば、幾何学的に

$$n = \frac{\delta_{s1}(R^{3/2} - 1)}{6 \tan \alpha}, \quad \delta_{s0} = R^{3/2} \delta_{s1} \quad \dots \dots (1)$$

が成立つが、 $1 \leq n \leq 3$ ,  $1.5 \leq R \leq 2.5$ のような制限を与えると、これによってダイス角 $\alpha$ が決まってくる。

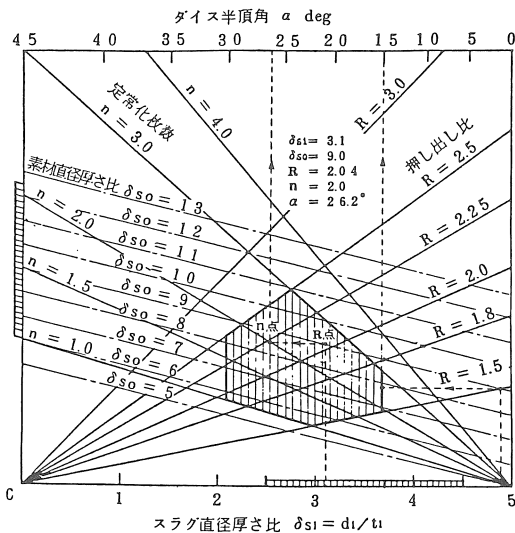


図3 工程計画図表

図3は、式(1)におけるパラメータ $\delta_{s1}$ 、 $\delta_{s0}$ 、 $R$ 、 $\alpha$ 、 $N$ の関係を表わす共点図表で、縦縞を施した領域が目的に対し概ね有効である。図において、たとえば、目標スラグのスペクトルを $\delta_{s1}=3.1$ 、素材スペクトルを $\delta_{s0}=9$ とすれば $R$ 点は加工度 $R=2.04$ を与え、 $R$ 点と同じ縦座標を $n=2$ の直線上に求めて $n$ 点とすれば、 $n$ 点の $\alpha$ 座標(上枠の目盛)によってダイス角が $\alpha=26.2^\circ$ と求められる。

所で、前述の通り、押し出しの機作に頼る限り、 $\delta_{s0}$ のいかに拘わらず、材料外周縁に対し、軸心部が先進する<sup>4)</sup>

結果、重ね合せられた板状体は紡錘状に中央が尖った形状となる。この凸出をここではウォーピング(warping)と呼び、平面からの凸出量をウォーピング高さ $w$ で指定する。

また、二軸圧縮応力はダイス壁からまず板の外縁に伝えられ、それが軸心に伝播するため、圧縮の有効性は軸心部の厚さの変化によりおおむね代表できると考えてよい。因に圧縮加工が理想的に行われれば、厚さ増加比は加工度(減面比) $R$ に等しくなる。

素材円板の厚さを $t_0$ 、軸心の厚さを $t_c$ とし、一方、加工後直径を $d_1$ とすれば、軸心板厚増加比 $t_c/t_0$ およびウォーピング形状比 $w/d_1$ は加工の有効性の評価のために用いることができる。

### 1・2 ポンチ先端形状の修正

押し出し用ポンチは上述のように、素材に対する拘束をできるだけ強化する態勢下に置かれることが望ましい。しかし、減面に有効なダイス作業部まで侵入することは許されない。従って、直径が素材円板に等しく端面の平坦なポンチがまず想定されるが、このポンチでは、後述で明らかな通り、軸心の先進が防ぎえず、製品スラグの形状は当然円板から外れた冠状体となる。そこで、素材円板がダイス作業部へ入りこむ以前にあらかじめ軸心を後進状態に置くため、ポンチ先端に球状窩(くり抜き)を与えることにした。(図4参照)

このような、くり抜きポンチによれば、当初いったん後進状態に持ちこまれた軸心は材料がダイス作業部に入るにつれ、加えられる先進によって後進状態を徐々に修復し、ダイス出口を通過した際に恰度後進が消滅するような形状管制が可能になる。しかも、当初の後進状態を解消するに際して軸心板厚の有効な増加が期待できる。

以下試みる実験は、一定の形状スペクトル $\delta_{s0}$ 、 $\delta_{s1}$ の間の変換において、この加工機作がどのような効果を持ちうるかに拘わるものである。

## 2. 実用プレスによる連続作業

以上は、コンテナ内にあらかじめ収容されている数多の素材円板を緩速液圧プレスで静的に押し出す実験の結果<sup>3)</sup>に基いている。現実作業では、たとえば板金条から素材円板を打抜き、引続いて押し出すといったタンデム・プロセスをポンチの一行程で行なわせる連続プレス加工が考慮に上る。この実用作業形態を実験室規模で具体化させた、いわば中間試験の立案過程につき次に述べる。

### 2・1 工具条件の決定

まず、素材円板の形状スペクトルを $\delta_{s0}=d_0/t_0=9$ と定め、目標スラグのスペクトルが $\delta_{s1}=d_1/t_1=3.5\sim 3.0$ となる加工度を求める。図1によれば、 $R=1.8$ とすれば



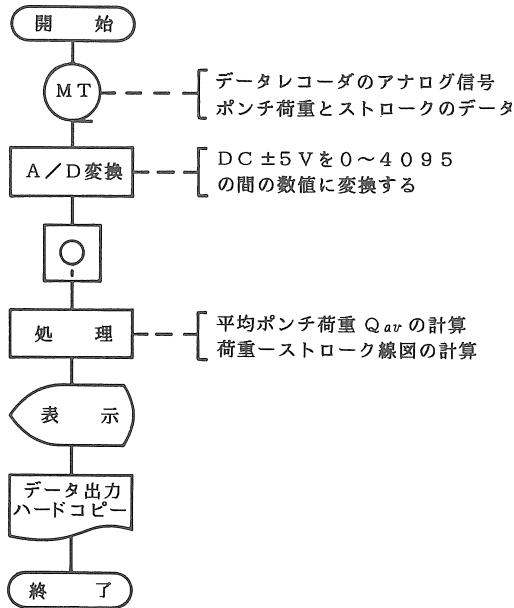


図5 信号処理流れ図

ポンチ荷重とひずみゲージ出力の間の検定は次のように行われた。ポンチとC2RI型ロードセルとを直列に配置し油圧プレスによって負荷した場合、ポンチ取付け柄のひずみゲージ出力をX軸に、ロードセル出力をY軸に、それぞれ動ひずみ計を介して入力し、X-Yプロットとして検定曲線を求めた。両者の間には良好な比例関係が

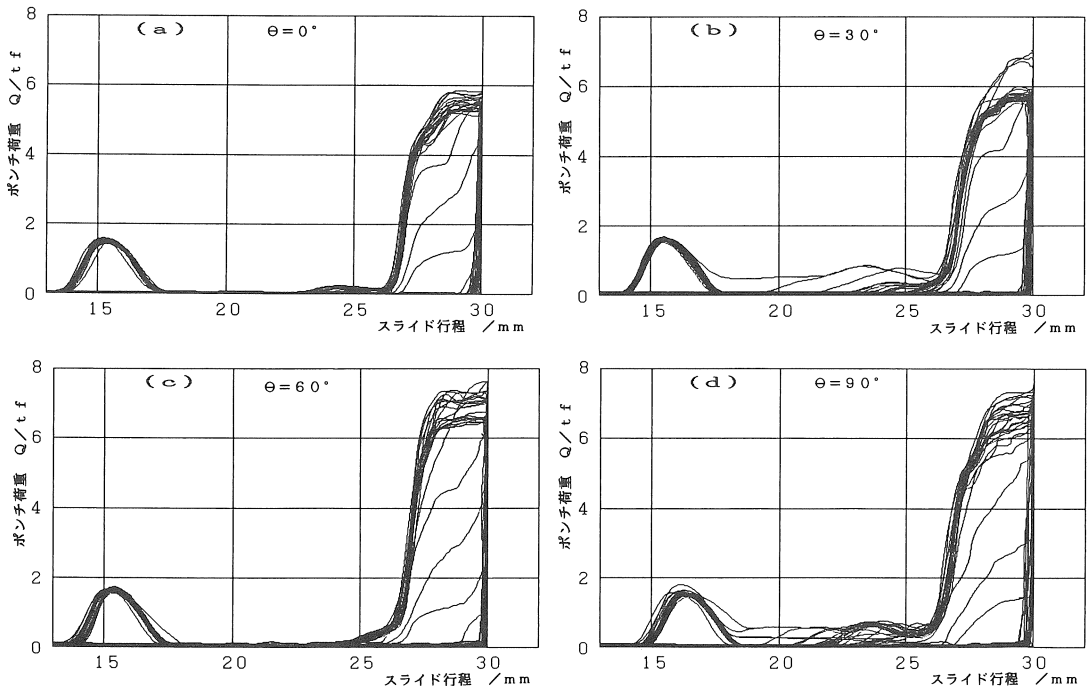


図6 (a), (b), (c), (d)プレス作動時のポンチ荷重-行程チャート

認められた。

### 3. 結果

加工が発足し、第1枚目の打抜きから第25枚目の押し出しが完了するまでのポンチ荷重-プレスライド行程チャートを重ね合わせて図6に示す。一見して、打抜きと押し出しの二つの仕事が、曲線の二つの山として捉えられていることが知れる。

押し出し工程では、予期されるように、当初の第1枚目から数枚目に至る間は過渡状態で、そこで呈する荷重は1枚、1枚の累積に他ならない。しかし、潤滑状態等工程支配条件が安定すれば荷重も定常化してばらつきの少ない繰返しとなる。

$\theta = 0^\circ$ , すなわちポンチ端面が平坦な場合の過渡荷重期間を示せば図7となる。加工当初に過渡状態を経験する素板の枚数は、工程計画において仮定されたダイス作業部収容枚数2よりかなり多い7枚で、第1枚目が押しこまれ始めてダイスを抜け出るまでもポンチの4行程を必要としている。ダイス内の実状が理想変形からどれ程異なるかを現わしている。

定常状態下の荷重経過が $\theta$ によりいかに影響されるかを図8に示す。 $\theta$ は荷重の全般的な大きさと、行程前半の立ち上りに影響し、単純ではないが、 $\theta = 60^\circ$ において荷重、立ち上がり勾配共に大きい。後述するようにこのような経過は加工目的に対し望ましい傾向と言える。

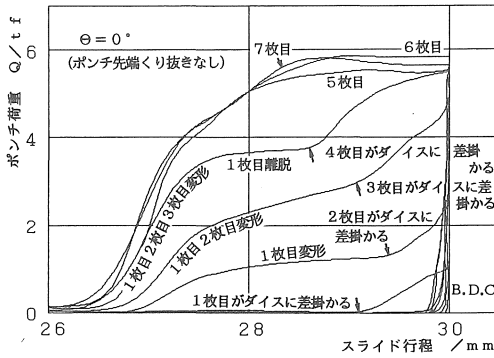


図7 加工当初過渡期における荷重—行程チャートの例

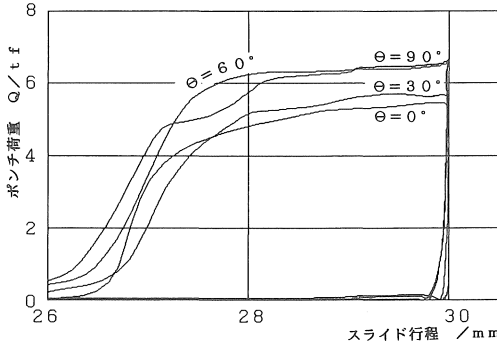


図8 押し荷重におよぼすポンチくり抜きの影響

$\theta=0^\circ$ の場合には荷重が最も低い、これは目的の圧縮変形がウォーピングによって妨げられ、板のたわみによってダイスを通過する傾向が著しいことを示す。

いま、図6に示された各々のスライド行程において、終りの3.0mmの区間で荷重 $Q$ を平均しその値 $Q_{av}$ を累積枚数に対しプロットして見ると図9のようである。 $Q_{av}$ は $\theta$ と順位を共にし、過渡期を除けば累積枚数と共に僅かに減少し乍ら定常状態に近接するが、その早さがまた $\theta$ により影響を受ける。 $\theta=90^\circ$ では25枚の累積によっても定常状態が得られず、可なり不安定な工程で終始した。

製品形状は、工程の直接評価に結びつくから、軸心板厚増加比 $t_c/t_0$ とウォーピング形状比 $w/d_1$ を累積枚数に対してプロットしてみた。結果はそれぞれ図10および11のようである。ウォーピング高さ $w$ は製品の前面において測定された。

図10において際立っているのは $\theta=60^\circ$ である。この場合だけが目標の板厚に極めて近い。図11と対比すれば $\theta=60^\circ$ ではウォーピングも相対的に少ないが、 $90^\circ$ には及ばない。しかし、 $\theta=90^\circ$ については、図6、図9の荷重経過にも認められるように、工程の安定な遂行が困難なことを考慮に入れなければならない。この場合のウォーピ

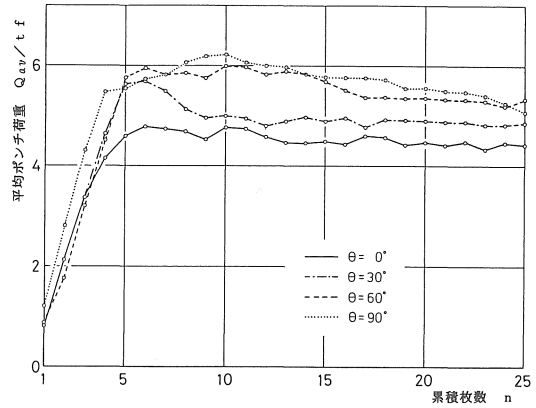


図9 工程平均荷重の推移

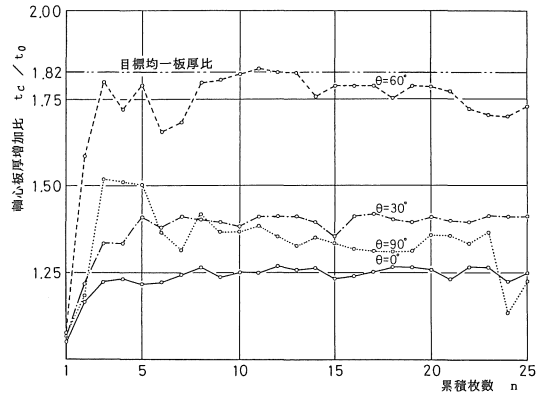


図10 軸心板厚増加比の推移

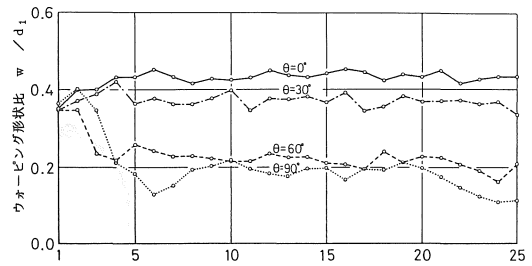


図11 ウォーピング形状比の推移

ングは、加工当初に形成された後進性の軸心凹みが工程終了まで修復されないのに加えて、新たに先進性のたわみが、軸心の周囲にトーリック面として生じ、この面の凸出高さを $w$ として測定するため、一見低い形状比を与えることになる。また、トーリックな変形は高次の座屈に対応して荷重を増す。

以上総じて、 $\theta=0^\circ$ と $60^\circ$ は対照的であったから、この二つの場合にダイス内の材料がとる姿勢を比較して見た。結果を図12に示す。

$0^\circ$ の場合の著しい先進は材料軸心間に大きい隙間をもたらすが $60^\circ$ では隙間は縮退し、加工当初には板厚の総体的減少さえ認められる。この結果を定量的に表わしたの

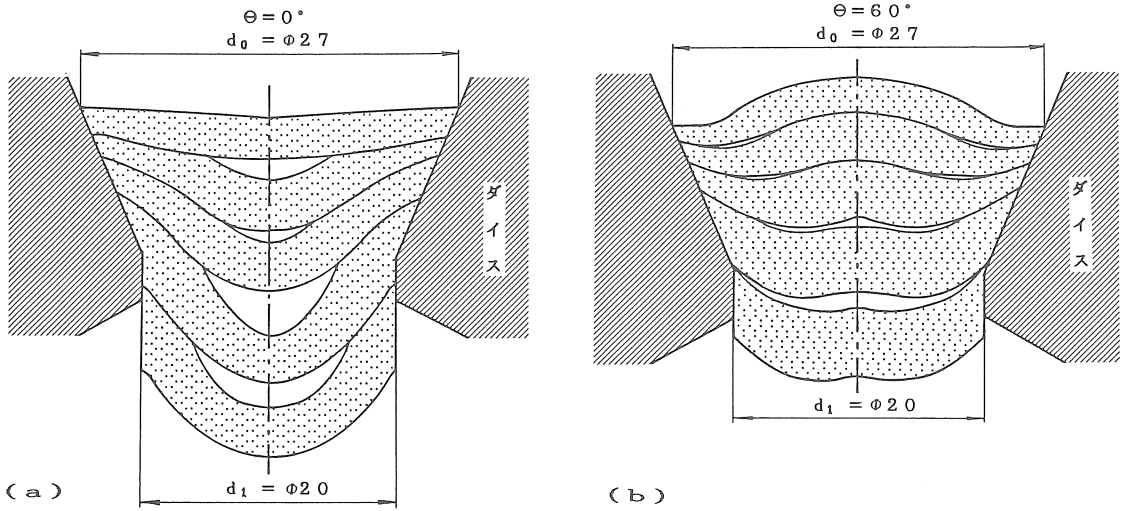


図12(a), (b) ダイス作業部前後におけるスラグの形状

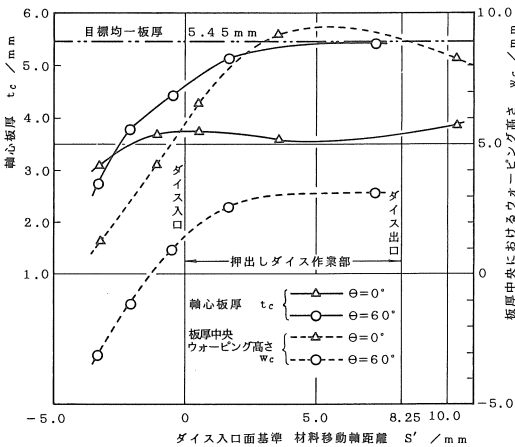


図13 軸心板厚とウォーピングの経過

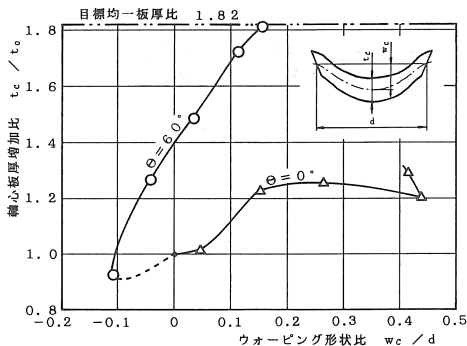


図14 材料形状比の経過 (工程性能図)

が図13である。ダイス内で材料が移動するにつれ、軸心板厚  $t_c$  と板厚中央で見積られたウォーピング  $w_c$  とがいかなる経過を辿るかを示す。 $\theta=0^\circ$ では  $w_c$  が工程を通じて正の値でことに前半では確かな増調を呈し、 $t_c$  は結局増加を抑制された形をとる。 $\theta=60^\circ$ では  $w_c$  が、工程の初

段階で負から正へ反転し、ダイス作業部を通過するときには  $w_c$  の増加が抑制されている。それに伴い、 $t_c$  は  $w_c$  の符号反転時期に急増している。

図14は軸心板厚増加比  $t_c/t_0$  とウォーピング形状比  $w_c/d$  が、二つの場合にどの程度異なる経過を辿るかを見たものである。 $\theta=60^\circ$ において、 $w_c/d$  が  $-0.1$  から  $+0.1$  の間に殆どすべての有効な加工機作が発揮されていることがよく判る。

#### 4. 荷重の検討

$\theta=60^\circ$  のポンチの有効性は以上で明らかになったが、図6および図8に示された荷重においても特徴が示されている。すなわち前述のようにポンチ荷重は行程早期に立上り、高い一定値で工程を終る傾向が強い。この水平な荷重過程と図12における材料の充満率は、中実丸棒の押し出しとの類似性を想起させずには置かない。

中実材を定常状態で押し出すとき、素板1枚分のポンチ行程によって、遂行される理想仕事を K. Fink の法則に準拠して求めてみる。

$$Q_1 = \text{理想押し出し荷重 kgf}$$

$$s = \text{ポンチの押し出し距離 mm}$$

$$\bar{\sigma}_r : \text{材料の平均変形低抗 kgf/mm}^2$$

$$d_{e1} : \text{材料円板の厚さひずみ増分}$$

$$V : \text{変形を受ける材料体積 mm}^3$$

とすれば、ポンチ行程  $ds$  による理想仕事増分は

$$dW_1 = Q_1 ds = V \cdot \bar{\sigma}_r \cdot d_{e1}$$

で、理想押し出し荷重は

$$Q_1 = V \cdot \bar{\sigma}_r \cdot \frac{d_{e1}}{ds} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし、計算に当っては、加工物変形体積を、

表2 理想仕事に関する幾何学的関数

変形部名称	変形する体積	ひずみ率 $\frac{d\epsilon_1}{ds}$	関数	変形部で加えられる平均全ひずみ $\bar{\epsilon}_f$ (対数ひずみ)
入口過渡部	$V = V_0 \left( \frac{s}{t_0} \right)$	$\frac{1}{h_0} \cdot \frac{1 + \psi}{\psi^2}$	$\psi = \left( 1 + \frac{3s}{h_0} \right)^{\frac{1}{3}}$	0.1068
定常部	$V_s = V_w - V_0$ (一定)	$\frac{1}{h_0} \cdot \frac{\psi + \phi}{(\psi \cdot \phi)^2}$	$\phi = \left\{ \left( \frac{h_1}{h_0} \right)^3 + \frac{3(t_0 - s)}{h_0} \right\}^{\frac{1}{3}}$	0.2802
出口過渡部	$V = V_0 \left( 1 - \frac{s}{t_0} \right)$	$\frac{R}{h_1} \cdot \frac{1 + \chi}{\chi^2}$	$\chi = \left\{ 1 + \frac{3R(t_0 - s)}{h_1} \right\}^{\frac{1}{3}}$	0.1860

$t_0$  : 素円板の厚さ,  $V_0$  = 素円板の体積,  $V_w$  : ダイス作業部容積,  $h_0, h_1$  : 図4参照, 入口, 出口の高さ,  $R$  : 加工度 =  $(d_0/d_1)^2 = (h_0/h_1)^2$   $s$  : ポンチの押し出し距離。

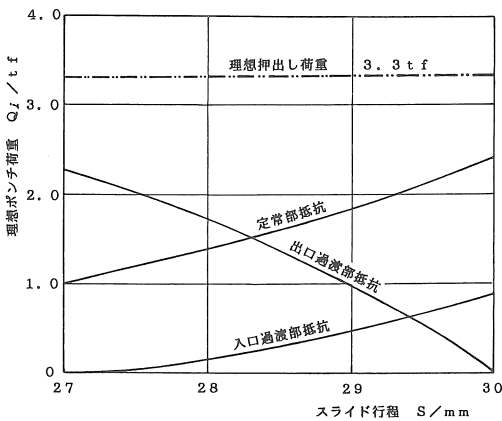


図15 理想ポンチ荷重の計算

(i) ダイス作業部入口へ入り始めて素板一枚分が恰度テーバー部に収まるまでの過渡体積, (ii) 当該ポンチ行程を通じ常に作業部に存在する体積および (iii) 出口から素板一枚分が恰度抜け出るまでにテーバー部に残存する過渡体積の三部に分けて考える。

表2は(2)式右辺の各項の計算に役立てるためsの関数を示す。各部分体積に対する荷重の計算結果は図15のようで、各変形部で求められるQiを加えると、理想押し力として概ね3.3tfの一定値がえられる。この値が $\theta = 60^\circ$ の実測値からかなり低く距るのは当然である。

丸棒の定常押し荷重は図16の要素円板を作業部の中で考えるスラブ法によるのが簡単で、しかも摩擦の影響を見込むことができる。それによると押し出し荷重は

$$Q'_1 = -A_0 \sigma_{z_0} = A_0 \bar{\sigma}_f \cdot \frac{1+B}{B} (R^B - 1) \quad \dots\dots(3)$$

となる。(附録参照)

ただし、 $A_0 = (\pi/4)d^2_0 \text{mm}^2$ ,  $\sigma_{z_0}$  : ダイス入口応力 kgf/mm<sup>2</sup>,  $B = \mu \cot \alpha$ ,  $\mu$  : ダイス面摩擦係数,  $R$  : 減面比である。 $\mu$  が0, したがってBが0の極限では、

$$Q_1 = A_0 \bar{\sigma}_f \ln R \quad \dots\dots(3')$$

となる。式(3')によって理想荷重を求めるのに、 $A_0 = 573 \text{mm}^2$ ,  $\ln R = \ln 1.82 = 0.60$ , また、塑性曲線のひずみ0.60までの平均低抗として  $\bar{\sigma}_f = 10 \text{kgf/mm}^2$  を用いれば、 $Q_1 = 3440 \text{kgf}$  が得られ、大たい前記計算結果に近い。また、 $\mu = 0.10$  を仮定して式(3)により  $Q'_1$  を求めると、 $Q'_1 = 4580 \text{kgf}$  となりなお実験値との間に開きがある。ダイス入口および出口の附加的せん断仕事のための抵抗増は<sup>5)概略</sup>

$$Q_s = A_0 \bar{\sigma}_f [4 / (3\sqrt{3})] \alpha \quad \dots\dots(4)$$

と書けるから、 $\alpha = 23^\circ = 0.4014 \text{rad}$  によって、 $Q_s = 1770 \text{kgf}$  が上記に加わることになる。都合えられる

$$Q = Q'_1 + Q_s = 6.35 \text{tf}$$

は実験結果に照し納得のゆく値である。

$\theta = 60^\circ$  のポンチによる加工荷重はこのように棒の押し出しの見積り荷重に近く、変形の理想に一歩近いことが察せられた。

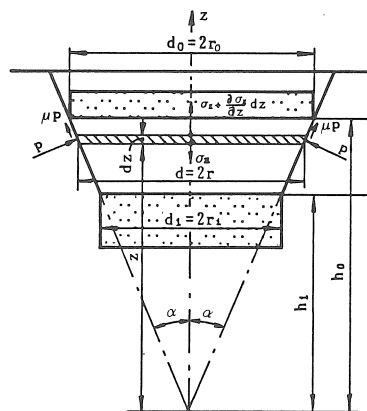


図16 スラブ法図解

## 5. 検討と評価

### 5・1 形状

素板25枚の累積に対し、製品の結局形状比がどうなる



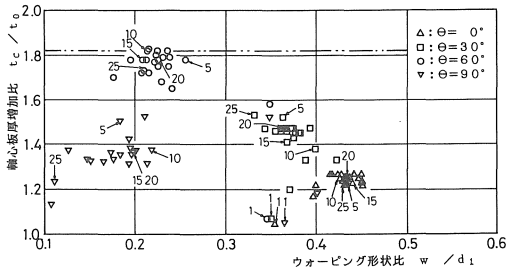


図17 製品の窮極評価

かを、図14と同様の座標面上の点で表わした。図17はそれである。ウォーピング  $w$  は板の前線で測定した。点に附した数字は累積枚数を表わす。当初の一枚はポンチのくり抜きに関せず一定の形状に落着くゆえ、くり抜きの効果が板の積重りによることが明かである。度々引用された  $\theta=0^\circ$  および  $60^\circ$  では点のばらつきが比較的に少なく、工程がいかに安定しているかは此の図によっても明かである。

5・2 ポンチ下死点

これまでの実験結果は、下死点におけるポンチとダイスの間の縦すき間を0.5mmとした場合である。これを意図的に3.5mmに拡大して実験を試みたが、形状管制の困難が増大し好結果は得られなかった。前記のように縦すき間の増加は材料拘束を緩和することに通じるためである。

5・3 材料歩留り

板材から素材円板を打抜き限り、歩留りは90%より以上を望めない。球軸受の内外輪の鍛造では正方形板ブロックから出発する例<sup>9)</sup>がある。本研究でも歩留りは重要と考え、ダイスは従来通りの円すいで、素材だけを正方形として加工を発足させる実験を試みた。この場合歩留りは98%に向上できるのである。ただし、ダイス面と材料直辺部との間に当初生じる隙間のために矢張り形状管制が困難で、高い加工度には耐えられない。ダイス作業部の軸直角断面形状(キャリパー)の設計に一段の工夫を要する模様である。

5・4 潤滑

押ししダイスの潤滑は、工程を安定化させ軸心の先進を防ぐ上で不可欠である。せん断面は新生面であるため押ししダイスに凝着し易い。実験では当初図4のように、打抜ダイスの二番面に油溝を設けたが、ここを急速に通過する素材には充分な潤滑剤を与え得なかった。そこで、むしろ打抜段階から材料と行動を共にするポンチの逃げ面に油溝と4個の給油穴を設け強制給油によって潤滑状態を著しく改善できた。

4・5 硬さ分布

板材は棒材に比し、一般に結晶組織がち密で硬さの分

布も均一である。しかし、ひとたび板をせん断しダイスを通過させると、辺縁部ほど附加のせん断仕事を多くこむり、軸心に比べ辺縁の硬度は高まるため、不均一な硬度分布となる。棒材の当初状態では、軸心の結晶組織が少なく、硬度は外周より高い。しかし、すえこみ加工を加えると軸心と外縁の硬度は均一化される。この点、板材から出発するスラグは不利である。

6. 結論

比較的薄い板片を重ねてダイスで押出すことにより、板片の等二軸圧縮が相当効果的に行いうることは以上で明らかとなったが、前節で検討した通り、経済的に本法を実施できるためには、制約条件も少くない。次の諸点に留意する必要がある。

1. 板の原板をどのような入手経路から求めるかが問題で、たとえば品質の揃った廃材が纏って入手出来るといった条件が望ましい。
2. 目的製品重量に対する制限が棒材に比べ厳しい。100gf程度の鋼製品に対し、板厚6mm以上の打抜きを要する。
3. 分離する場合のせん断面積、変形させる場合の受圧面積共に棒と板を比べたとき板の方が大きくなる場合が多い。
4. 歩留りも板の打抜きには限界がある。しかし、冷間鍛造用棒材にはピーリングによる歩留り低下があるゆえ、常に板が不利とは言い得ない。

以上を要するに、加工の常道から外れた領域の作業の厳しさによって却って棒材据こみの優秀性が浮彫りにされた。しかし、金属板片の面内圧縮によって板厚増加を計ること自体は技術的に実現可能であり、生産ラインの中で成立させることも可能であることが明らかとなった。その計画立案における要点は、板片個々の、工具による拘束をできるだけ強化することで、これによってダイス作業部の容積制限が生じ、工具および工程の設計が定められるのである。

[附 録]

図16に基き要素スラグのZ軸方向の釣合方程式は

$$2\sigma_z dr + r d\sigma_z + 2(1 + \mu \cot \alpha) p dr = 0 \quad \dots\dots(4)$$

半径方向、円周方向垂直応力を  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  とし、平均垂直応力を  $\sigma_0 = (1/3)(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)$  とする。また  $Z$ ,  $r$ ,  $\theta$  に関する偏差応力を  $s_z = \sigma_z - \sigma_0$ ,  $s_r = \sigma_r - \sigma_0$ ,  $s_\theta = \sigma_\theta - \sigma_0$  として、降伏条件を書くと、

$$s_z^2 + s_r^2 + s_\theta^2 = (2/3)\bar{\sigma}_1^2 \quad \dots\dots(5)$$

$\bar{\sigma}_1$ : 単軸引張降伏応力の平均

である。変形の単軸性により  $s_r = s_\theta$ ,  $s_z = -2s_r = -2s_\theta$  が

えられるから、結局  $s_z = (2/3)\bar{\sigma}_r$ ,  $s_r = s_\theta = -(1/3)\bar{\sigma}_r$  となる。次はダイス面圧と  $\sigma_r$  が一致するものとし、 $\sigma_r = s_r + \sigma_0 = -p$  から、 $\sigma_0 = (1/3)\bar{\sigma}_r - p$  が得られ、前記  $s_z$  式から  $\sigma_z + p = \bar{\sigma}_r \dots \dots \dots (6)$

が得られる。(4), (6)から  $p$  を消去すれば

$$d\sigma_z / \{2\sigma_z \mu \cot \alpha - 2\bar{\sigma}_r(1 + \mu \cot \alpha)\} = dr/r \dots \dots (7)$$

境界条件  $r=r_1$  で  $\sigma_z = 0$  を用いて、(7)を積分し、ダイス入口  $r=r_0$  における  $\sigma_z$  を求めると  $\sigma_{z0} = \bar{\sigma}_r \frac{1+B}{B}$

$$[1 - (r_0/r_1)^{2B}] = \bar{\sigma}_r \frac{1+B}{B} (1 - R^B) \text{ が得られる。}$$

## 文 献

- 1) 素形材 昭和60年6月(72/79) ページ
- 2) Machinery (E) Vol.90, No.1957-2/22, p.425, また, 春日: 成形加工論, コロナ社機械工学大系37巻, 72 ページ, 昭51
- 3) 春日他: 第27回塑加連合講会講演論文集'76, 11/10~12, 365ページ

昭和52年度塑加春季講演会同'77, 5/19~21, 481ページ

昭和53年度塑加春季講演会同'78, 5/17, 525 ページ

第30回塑加連合講演会同'79, 11/20~22, 272ページ

堤 外: 機械学会東海支部創立30周年記念講演会同'81, 7/14, 705ページ

4) R. Hill: The 10th Report, Strength and Testing of Materials Part I, 1957

5) たとえば, 春日: 塑性学および加工, 昭和55年, コロナ社, 238ページ参照

6) 藤井 尚他4名: 第31回塑性加工シンポジウム資料, 日本塑性加工学会, 昭45. 5月, 59ページ  
藤井 尚: 機械学会誌, 71巻, 591号, 昭43. 4月, 543ページ

(受理 昭和61年1月25日)