

講 義

冷 間 加 工 (IV)

絞 り 加 工

春 日 保 男*

Cold Working (IV)

Drawing

Yasuo Kasuga

絞 り 加 工

板から底つき胴あるいは容器を成形する加工は既往からプレス成形の典型と見なされ、絞り (sheet-metal drawing) とよばれている。作業が比較的簡易で生産性の高い加工法として伝統も古く研究の進歩も他の成形加工よりいちじるしい。

絞り加工の分類は成形全般の分類より容易であるが、製品形状と加工度、加工寸法を合理的に分類の基準に入れた方法は公表されていない。絞りの形状分類で参考になるのは W. Schroeder¹⁾、吉田²⁾および前記合衆国金属学会のものである。また、円筒絞りに限定すれば、加工度、加工寸法は表 14 のごとく分類される。

特に加工寸法を指定する理由は多くの成形に比して材料の広範囲な流動を要求され、外部の機械的条件の影響を蒙りやすいからである。

プレス深絞りにおいては、刃かど部分を十分に丸め、板厚よりクリヤランスを大ならしめた打抜型類似のポンチおよびダイスを用いる。ただし材料の変形する部分 (フランジ) は 'しわ押え' とよばれる第3の工具とダイスの間で押え、材料中心部はポンチによりダイス穴内に導かれ結局、平面フランジは容器の筒面に変形させられる。

形成される筒面の深いもの (深さ寸法が直径に近いもの) 加工は特に深絞り (deep drawing) と称せられ、絞りの中でさらに典型と考えられている。

1. 解 析

解析容易という理由で、円筒の深絞りが最も多く取扱われ、各方面にわたって研究の進歩が見られる。

深絞り材料が受ける変形は、半径方向絞り、曲げおよび張出しの3主成分から成る。この3つの変形成分を

悉く解析しなければ満足ではないが、差当つての目的に

表 14 深絞りの分類条件

絞りの変形成分と条件値

変形成分	加工内容	加工度	加工寸法
半径方向絞り	板の周長の縮小をもたらす加工 (例 深絞りのフランジ部の変形)	絞り比 $\beta_0 = D_0/d$	相対ポンチ直径 $\delta = d/t_0$
曲げ	ブランク板面に対し板を曲げる加工 (例 ポンチ底の角隅での変形)	相対曲率伸 $1/\rho_d = t_0/rd$ $1/\rho_p = t_0/\rho_p$	相対半径 ρ_d, ρ_p 曲げ角度 θ_d, θ_p
張出し	固定閉曲線 (周長不変) の内部の材料を張り伸ばす加工 (例 ポンチ頭近傍の材料変形)	伸長比 $\lambda = l/l_0$	相対ポンチ直径 $\delta = d/t_0$

加 工 度 概 数

(原則として1回のプレスによつて達せられる値)

変形成分	加工度	下限界値	慣用値	上限界値
半径方向絞り	β_0	1.0	1.7~2.2	4.0
曲げ	$1/\rho_d$ $1/\rho_p$	1/10 1/500	1/8~1/5 1/12~1/8	1/2 1
張出し	λ	1.0	1.25	1.60

加工寸法分類および概数

通称による加工寸法分類	相対ポンチ直径 $\delta = d/t_0$	角隅丸味比 r_p/d	相対半径 $\rho_p = r_p/t_0$	曲げ角度 θ_p
大型絞り	500~1000	1/50~1/2	10~500	$0 \sim \frac{\pi}{2}$
中型絞り	100~500	1/30~1/2	3~250	$0 \sim \frac{\pi}{2}$
小型絞り	20~100	1/20~1/2	1~50	$0 \sim \frac{\pi}{2}$

1) 文献 (141) 参照

2) 文献 (128) 参照

* 名古屋大学工学部教授

は材料を变形させるに必要な力の予測ができれば充分である。この力を材料の中心寄り部分の強さと比較すれば加工の可能性はほぼ見当づけられる。

加工抵抗は主として半径方向絞りと曲げ（ことにダイラジャスでの曲げ）変形のために生じ、材料の中心寄りが張出されるのは、上記加工抵抗に打勝つて材料をダイス穴に引きこむ際必然的に伴う変形に過ぎない。

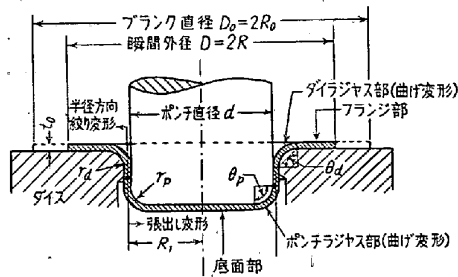


図73 深絞りにおける材料の変形および記号

図73は深絞りにおける主要変形部位の区分を示す。ポンチ荷重の根源をなすものはフランジ部の半径方向主応力である。図74はフランジ部を示すが、加工軸をzとする円筒座標r, θ, zを取つて微小セクトルに作用するr方向の力の釣合式を書くこととなる。

$$\frac{d(\sigma_r \cdot r \cdot t)}{dr} = \sigma_\theta t \dots\dots\dots (44)$$

ただし、 σ_r, σ_θ は r, θ 方向の主応力、t は半径 r における板厚とする。z 方向、すなわち t 方向の応力 σ_t は零と考えるので、平面応力の問題である。軸対称で θ 方向の力の釣合は自然保たれている。降伏条件は、Mises-Hencky 型にしたがえば、

$$\sigma_r^2 - \sigma_\theta \sigma_r + \sigma_\theta^2 = 3k^2 \dots\dots\dots (45')$$

Tresca 型では $\sigma_r - \sigma_\theta = 2k \dots\dots\dots (45)$

t が定まっていれば、(44) と降伏条件によつて σ_r, σ_θ を求めることができる。特に t の変化に注意する場合には t を r と工程の関数と考えねばならぬからやや面倒になる。

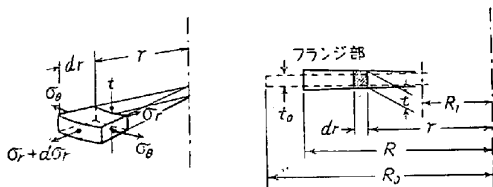


図74 フランジ部記号

歪はつぎのように表現される。フランジの外周縁が R から R + ΔR に微小変位した場合に元 r にあつた材料部分は r + Δr に変位する。このとき r に近接する r +

dr にあつた材料は $r + dr + \Delta r + \frac{\partial(\Delta r)}{\partial r} dr$ に変位する。ゆえに r と r + dr に挟まれた微小要素長さ dr は、外周の微小変位 ΔR により $\frac{\partial(\Delta r)}{\partial r} dr$ の長さ変化を生ずる。この量の元長さに対する比、変化率は半径方向の歪増分成分である。これを $d\epsilon_r$ と記せば

$$d\epsilon_r = \frac{\partial(\Delta r)}{\partial r} dr / dr = \frac{\partial(\Delta r)}{\partial r}$$

いま、 $\lim \left[\frac{\Delta r}{\Delta R} \right] = \frac{dr}{dR} \equiv V$ とおくときは V は r と R における半径方向の速度比を表わす。

$$dr = V dR$$

$$d\epsilon_r = \frac{\partial}{\partial r} (V dR) = \frac{\partial V}{\partial r} dR \dots\dots\dots (46a)$$

つぎに、半径 r における板厚を t とする。t は半径 r が固定していても R いかんにより異なる。すなわち t は独立変数 R と r の関数である。外周半径が ΔR の微小変位を行う場合の t の変化は

$$[\Delta t]_R = \frac{\partial t}{\partial R} \Delta R \text{ と } [\Delta t]_r = \frac{\partial t}{\partial r} \Delta r \text{ の和である。}$$

$$\text{結局、} \Delta t = [\Delta t]_R + [\Delta t]_r = \frac{\partial t}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial t}{\partial r} \Delta r$$

で Δt の元厚さに対する変化率、厚さ歪増分成分は

$$d\epsilon_t = \frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{t} \left(\frac{\partial t}{\partial R} + \frac{\partial t}{\partial r} \frac{\Delta r}{\Delta R} \right) \Delta R$$

この極限は

$$d\epsilon_t = \frac{1}{t} \left(\frac{\partial t}{\partial R} + \frac{\partial t}{\partial r} \cdot V \right) dR \dots\dots\dots (46b)$$

である。

円周方向の歪は簡単で、dθ をなす2つの子午面で挟まれた材料要素の半径 r の部分を見ると周方向の長さは r dθ で、r が Δr の変位をなせばこの長さは Δr dθ の変化を示す。

この変化の元長さに対する変化率は $\frac{\Delta r}{r}$ である。

$$\text{ゆえに、} d\epsilon_\theta = \frac{dr}{r} = \frac{V}{r} dR \dots\dots\dots (46c)$$

をうる。(46) a, b, c は3つの歪増分成分である。

(46.c) を r で偏微分すると

$$\frac{\partial}{\partial r} d\epsilon_\theta = \frac{1}{r} (d\epsilon_r - d\epsilon_\theta) \dots\dots\dots (47)$$

をうる。これ歪増分間で常に充たさるべき関係で、歪増分が、変位の増分と矛盾しないために必要な関係である。これをしばしば歪の適合条件という。

容積一定条件は

$$d\bar{\epsilon}_r + d\bar{\epsilon}_\theta + d\bar{\epsilon}_t = 0 \dots\dots\dots (48).$$

全歪は

$$\bar{\epsilon}_r = \ln\left(\frac{dr}{dr_0}\right), \quad \bar{\epsilon}_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right), \quad \bar{\epsilon}_\theta = \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \dots\dots\dots (49)$$

と書ける。\$r_0, t_0\$ などは考えている瞬間 \$r\$ に存する材料のブランクにおける半径座標および板厚である。

全歪の適合条件は

$$\frac{d\bar{\epsilon}_\theta}{dr} = \frac{1}{r} \left(1 - e^{-\bar{\epsilon}_\theta - \bar{\epsilon}_r}\right) \dots\dots\dots (50)$$

容積一定条件は \$\bar{\epsilon}_r + \bar{\epsilon}_\theta + \bar{\epsilon}_t = 0\$ …… (51) である。

問題を解くにあつては \$\sigma_r, \sigma_\theta\$, および 3 歪増分成分を未知数と考え、(44), (45), (47), (48) を独立の方程式を見做す。これと別に Levy-Mises の応力歪増分間の関係 1 つを利用すれば解きうる。ただし、(45) の \$2k\$ が全歪の関数で与えられる場合には解法は煩雑になる。\$2k\$ を終始一定と考える場合には比較的容易になるが、なお、歪成分を解析表示することはできない。われわれは半径方向応力成分が知りたいので、\$2k = 一定\$ の場合に対して結果だけを書くと、

$$\frac{1}{2} \int_0^{\chi_r} \frac{(2 - \chi_r) d\chi_r}{\chi_r - 1 - \chi_r^2} = \ln\left(\frac{r}{R}\right) \dots\dots\dots (52),$$

ただし、\$\chi_r = \sigma_r / 2k\$, のごとき陰関数表示となる。(52) は板厚変化が問題になる場合にのみ利用される。

\$t = t_0\$ ならば、解は実に簡単になり、しかも近似解として無意味ではない。(44) において \$t = 一定\$ とすれば、(9) と同じ式となりこれに (45) を入れると

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{2k}{r}$$

をうる、

(Mises-Hencky 型条件を用いると、やや複雑である。)

ふたたび \$2k\$ が一定と仮定できれば、境界条件 (\$r = R\$ で \$\sigma_r = 0\$) より

$$\sigma_r = 2k \ln \frac{R}{r} \dots\dots\dots (53)$$

あるいは \$\chi_r = \ln \frac{R}{r}\$ という簡単な結果をうる。

歪硬化する材料において、\$2k\$ を一定と考えることはできない。ゆえに任意の加工段階および半径位置の応力 \$\sigma_r\$ を近似度高く求めるには \$2k\$ を \$R\$ および \$r\$ の関数として表示せねばならぬ。

平面歪条件 \$\bar{\epsilon}_\theta = -\bar{\epsilon}_r\$ を用い (50) を積分すれば \$e^{2\bar{\epsilon}_\theta} = \frac{(rC)^2}{1 + (rC)^2}\$ をうる。\$r = R\$ では \$\bar{\epsilon}_\theta = \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)\$

なる境界条件により積分定数 \$C\$ は \$1/(R_0^2 - R^2)\$ となる。ただし \$R_0\$ はブランク外半径である。

$$\therefore \bar{\epsilon}_\theta = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{r^2}{R_0^2 - R^2} - \ln \left(1 + \frac{r^2}{R_0^2 - R^2}\right) \right] = \ln \left(\frac{r}{\sqrt{R_0^2 - R^2 + r^2}} \right) \dots\dots\dots (54)$$

さて、実験的な根拠から

$$2k = 1 \cdot 10 \sigma_e(|\bar{\epsilon}_\theta|) = 1 \cdot 10 \sigma_e \left[\ln \left(\frac{r}{\sqrt{R_0^2 - R^2 + r^2}} \right) \right] \dots\dots\dots (55)$$

とおく、ただし、\$\sigma_e\$ は単純引張歪が \$|\bar{\epsilon}_\theta|\$ の場合の引張真応力とする。すなわち材料の塑性曲線から求めうるものとする。この \$2k\$ によつて (53) 相当式を書くと、

$$\sigma_r = 1 \cdot 10 \int_r^R \frac{\sigma_e(|\bar{\epsilon}_\theta|)}{r} dr \equiv 2\bar{k} \ln \frac{R}{r} \dots\dots (56),$$

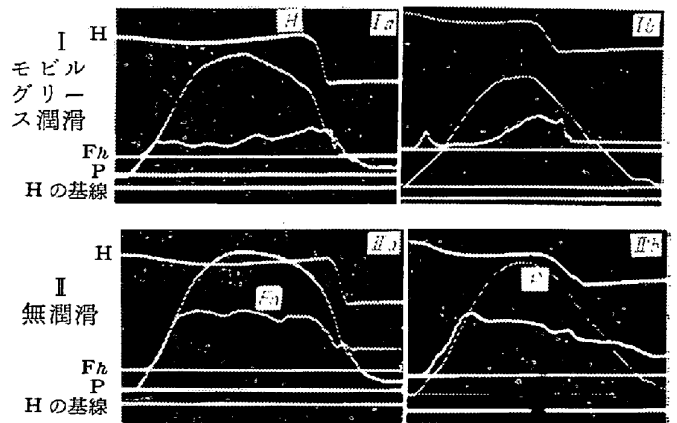
$$\frac{2\bar{k}}{r} = 1 \cdot 10 \left[\int_r^R \frac{\sigma_e(|\bar{\epsilon}_\theta|)}{r} dr \right] / \ln \frac{R}{r} \dots\dots\dots (57)$$

となる。加工段階 \$R\$ における、位置 \$r\$ の応力を近似度高く見積るには、(57) のごとき \$2k\$ の平均値 \$2\bar{k}\$ によればよい。式の形によつても明らかなように塑性曲線は対数歪を横軸に取ることが望ましい。

ポンチ荷重は、\$r = R_1\$ (\$R_1\$ はダイス穴とポンチの平均半径) における \$\sigma_r\$ に着目し、

$$P = 2\pi R_1 t_0 [\sigma_r]_{r=R_1} \dots\dots\dots (58)$$

により求める。(53) では \$2k = 一定\$ で、\$[\sigma_r]_{r=R_1}\$ は \$R\$ が \$R_0\$ から \$R_1\$ にいたる間、すなわち工程を通じて

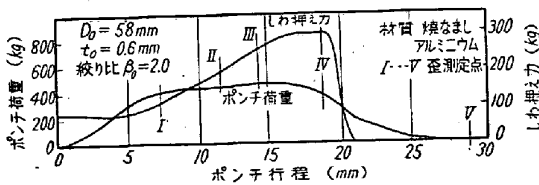


加工進行方向→ 加工進行方向→
 a: ダイラジヤス \$r_d = 1\$ mm
 b: ダイラジヤス \$r_d = 3\$ mm
 材質ブリキ板、厚さ \$0 \cdot 29\$ mm、ブランク直径 \$29, 0\$ mm
 ダイス径 \$16\$ mm \$\phi\$, ポンチ径 \$15\$ mm \$\phi\$, \$r_p = 2 \cdot 0\$ mm
 初期しわ押え力 H 250~350 kg
 ポンチ荷重 P 480~600 kg
 しわ押え面摩擦力 \$F_h\$

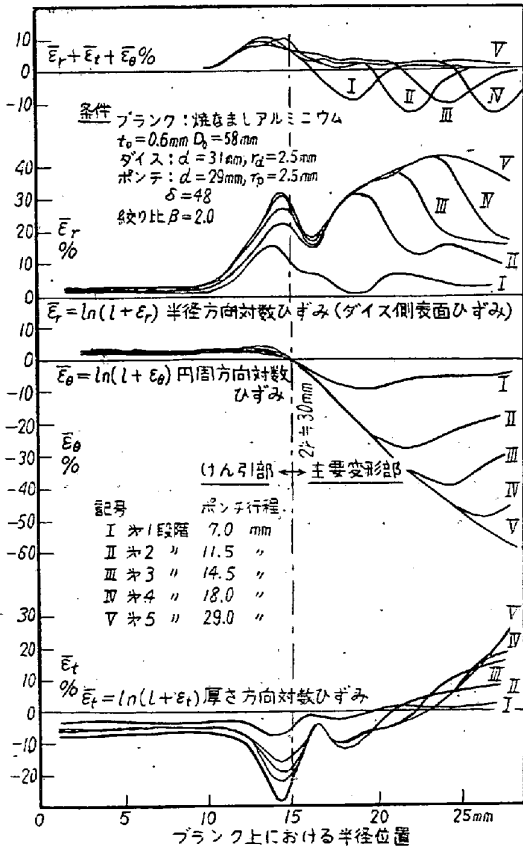
註) 図中 \$F_n\$ とあるは \$F_h\$ の誤り
 図75 深絞り力記録線図 (力の測定結果は図 80 参照)

単調に減少するが (56) の $2k$ は R と r の関数で, (58) に適用する場合には R と R_1 の関数となる. このとき, $[\sigma_r]_{r=R_1}$ は加工開始時は零で, 初工程で増加しその後減少してふたたび零になる. 当然工程のある段階で極大値をとる.

図 75 は深絞りにおける諸種の力の記録線図である. 曲線 P がポンチ荷重であるが, 工程初段階の曲線の上昇は案外ゆつくりしたものである. これは初工程においては半径方向絞り力の垂直成分が小さいためである.



(a) 深絞りにおける力の傾向



(b) 深絞りにおけるひずみの分布

図76 深絞りにおける力とひずみ

図 76 はアルミニウムに対する, ポンチ荷重と歪分布および歪経過を示す. 簡単な解析でも比較的良好に一致するのは周方向歪成分のうち, ダイラジャスより外の部分に該当するものである. 図において, 3成分の和が, 容積不変条件を充たしていないが, これは, 材料のダイス側表面で歪を測定したからで, ラジャスに当たる場所の曲

げ歪が含まれるからである.

(58)のポンチ荷重は, 実測されるポンチ荷重より相当に低い. 大抵, 計算結果を 30% 位増さなければ実測値に近づかない. これは, 計算が, 極く理想状態を仮定して純半径方向絞り力のみについて行なわれているからである.

a. 付加応力

(58) の $[\sigma_r]_{r=R_1}$ に付加されるべき応力成分にはつぎのものがある.

(1) ダイラジャスにおける曲げおよび直伸によるもの.

曲げモーメント式 (14) を rdt で割り, ダイラジャスで曲げるために必要な張力と考え, 曲つた材料をふたたび直伸して円筒壁を形成するために同じ程度の張力が必要と考え, 上記結果の 2 倍を付加応力とする.

$$\frac{\sigma_{be}}{2k} = \frac{t_0}{2rd} = \frac{1}{2\rho d}, \quad \rho d = rd/t_0.$$

一層大きな曲げ張力を導いて使用することもできるが実用性が少ない.

(2) ダイラジャスにおける摩擦によるもの.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{frd}}{2k} &= \left(e^{\mu \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \left(1 + \frac{rd}{R_1} \right) \\ &\quad \left\{ \ln \frac{R_0}{R_1} - \ln \left(1 + \frac{rd}{R_1} \right) \right\} \\ &= \left(e^{\mu \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \left(1 + \frac{2\rho d}{\delta} \right) \left\{ \ln \beta_0 - \ln \left(1 + \frac{2\rho d}{\delta} \right) \right\} \end{aligned}$$

が付加される. ただし, $\delta = d/t_0 = 2R_1/t_0$.

図. 77 は上式を図示したものである.

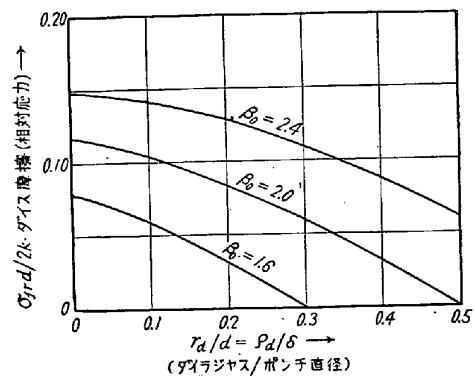


図77 ダイス摩擦応力成分の近似値

(3) しわ押えにおける摩擦付加応力.

解析の上では, フランジの外周 $r = R$ にしわ押え力 H が集中して加わり, ここで半径方向に $2\mu H$ の遠心力が加えられるものとして, 境界条件を修正することにより,

$$\frac{\sigma_{fh}}{2k} = \frac{1}{2k} \cdot \frac{\mu H}{\pi R t_0}$$

を考慮する。一般の歪硬化性材料では上の諸式における $2k$ の値は必しも共通ではない。しかし簡単のために平均値 $\bar{2k}$ を適当に選んで付加応力を一括処理できるものとしよう。しかるときはポンチ荷重の式として $[\sigma_r]_{r=R_1}$ の代りにつぎのごとき σ_φ を使用できる。

$$\frac{\sigma_\varphi}{2k} = \frac{1}{2k} (\sigma_{r_1} + \sigma_{be} + \sigma_{frd} + \sigma_{fh})$$

ただし、 $\sigma_{r_1} = [\sigma_r]_{r=R_1}$ 。

$$\frac{\sigma_{r_1}}{2k} = \ln \frac{R_0}{R_1} = \ln \beta_0$$

により近似させうるものとし、各成分応力の釣合を検べるに、 $R_0/R_1 = \beta_0 = 2.0$, $2R_1/t_0 = \delta = 100$, $r_d/t_0 = \rho_d = 8$, $\mu = 0.10$ の場合を一例にとればつぎのようになる。

	σ_φ	σ_{r_1}	σ_{be}	σ_{frd}	σ_{fh}
%	100	77.8	7.0	12.1	3.1

一般に $\sigma_{r \max} / \sigma_{\varphi \max} = \eta_{form} = 0.65 \sim 0.85$ と考えてよい。

2. 深絞り強さ

現実には生ずる σ_φ にポンチラジャス部の材料がたえられなければ、加工は不可能である。ポンチラジャス部で材料が示す臨界引張強さをしばしば深絞り強さという。

深絞り強さは便宜上破断臨界ポンチ力から求めた張力をブランク厚さ t_0 の円筒断面積で割って示される。破断時に、材料壁面の傾きが加工軸にほとんど一致していれば、破断ポンチ力を $2\pi R_1 t_0$ で割つたものと考えて差支えない。

深絞り強さ σ_z は単純引張りにおける材料の臨界強さ σ_b (引張強さ) とは異なる。表 15 は 4 種の金属に対する深絞り強さの一例で、この場合 $r_p/t_0 = 6.7$ で、ポンチは潤滑されている。いずれの金属も $\sigma_z/\sigma_b > 1.0$ で外見上強さが高まったかの観を呈している。この原因は破断部の材料が平面歪を受けること、破断箇所によつてさら

に二軸引張状態が現われること、曲げ変形を受けること、曲げと摩擦抵抗による応力解除作用を受けることなどである。

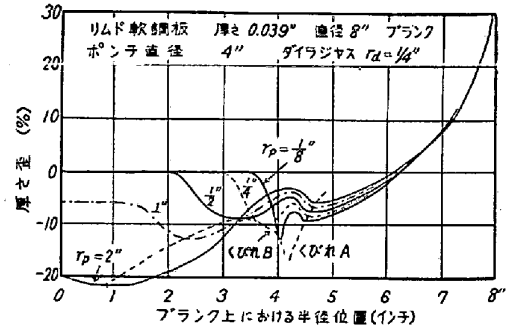


図78 深絞りにおける厚さ歪分布 (Swift)

σ_z は一般に材質、ポンチラジャス、板厚、潤滑の影響をかなりいちじるしく蒙る。図 78 は厚さ 1.0mm の軟鋼板を絞り比 2.0 で加工した場合の厚さ歪を異るポンチラジャスに対して実測した結果である。実験は H. W. Swift に負う。明らかにくびれが二つ現われ A はダイラジャスにおける引張曲げに起因する '壁部くびれ'、B はポンチラジャスにおける曲げに基く 'ラジャス部くびれ' といわれるものである。破断臨界部位は B である。B くびれの量があるポンチラジャスで最も少なくなることに注意すべきで、本例では $r_p/t_0 = 13$ においてその条件がみたされている。B くびれ量がそのまま σ_z に反映するとはいえないが、 $r_p/t_0 = 13$ 近傍において σ_z が最大となるものと見てよい。

ラジャス部における材料の変形は材質の処理状態、潤滑によつても異なる。

3. 限界絞り比

絞り比はブランク直径とポンチ直径の比によつて指定するのが慣例になつている。平板から一回の絞りで達しうる最大絞り比を限界絞り比という。

限界絞り比は加工方法に影響されるが、特殊な方法を除外すれば大抵の軟金属において 2.0 ないし 2.5 の範

表 15 深絞り強さと引張強さ

材 質	板 厚 mm	エリクセン値 mm (板厚 mm)	引張強さ σ_b kg/mm ²	限界絞り比* β_{0max}	深絞り強さ σ_z kg/mm ²	σ_z/σ_b
鋼 板 (ブリキ)	0.3	7.50 (0.281)	37.2	2.18	46.6	1.25
60/40 黄 銅	0.3	9.88 (0.305)	39.9	2.10	43.7	1.10
銅	0.3	5.90 (0.301)	22.3	2.05	24.8	1.11
アルミニウム 99.5%	0.3	8.05 (0.288)	8.6	2.04	9.7	1.13

* ポンチ 15mm ϕ $r_p = 2$ mm, ダイス 16mm ϕ $r_d = 2$ mm

困にある。最近では材質ならびに板の仕上り精度が向上しダイス材質および潤滑剤の性能が向上したので、軟鋼や黄銅では平ダイスで 2.25 の絞り比をうることはさ程無理でなくなった。作業現場では最悪の条件を予期して作業絞り比を限界絞り比よりもやや下げているが、大抵の場合限界値より 5% 程度低下させれば充分である。

注意すべきは再絞りを行なう場合で、二回の絞りによる総合絞り比を考慮すれば、初回絞り比が高めうる材質が必しも再絞りの全絞り比を上げえないことである。ただし、いずれの金属についても総合絞り比を高めるには初回の絞り比は高めた方がよい。図 79 は Swift による実験結果でこの点を示す。

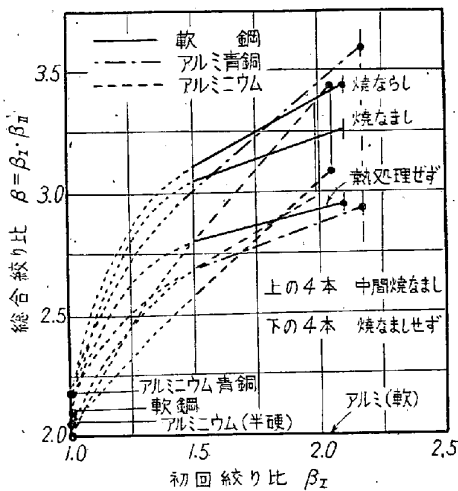


図79 初回絞り比と総合到達絞り比の関係 (Swift)

4. ダイスプロフィール

ダイスプロフィールは慣習的に円弧となつている。この円弧の半径をダイラジヤスという。ダイラジヤスの曲率は曲げ抵抗には一次的に、摩擦抵抗には二次的に影響し、曲率が大きくなれば、両抵抗成分ともに増す。厳密に言えばしわ押えによる摩擦成分も僅かながら増す筈である。材料の臨界強さに加工抵抗が抵触しないためには、このような付加抵抗成分を能う限り少なくすべきで、そのためには、曲率を小さくする(すなわちラジヤスを大きくする)ことが必要である。

ただし、無暗に r_d を大きくしても抵抗の軽減効果は上らず、また、材料がしわ押えから離れて自由にラジヤス部を絞り込まれる段階で口辺しわを発生する危険が殖えてくる。しわおさえ無しで自由に絞りうる絞り比はポンチ直径対板厚(相対ポンチ直径)の関数と見てよいから、ダイラジヤス部のみにおける絞り比をこれによつて定める考え方で、 r_d の上限を定めることができる。

以上の点より r_d/t_0 に与えられる制約はつぎの通りである。
 $17 \geq r_d/t_0 \geq 5$.

長軸をダイス穴軸の方向に取つた、だ円によつてプロフィールを形作る方式もある。この場合プロフィール部の自由絞り比を高めないことを前提にしているの、ダイス入口の曲率が円弧の場合の曲率より大きくなる欠点がある。しかし、プロフィール面が穴軸となす傾角は円弧の場合より好都合で、比較的厚板の絞りに適している。

Tractrix 曲線はダイスプロフィールで生ずる反力が、ポンチラジヤス部の材料にもたらす曲げモーメントのアーチを一定ならしめるような曲線である。これも厚板をしわ押え無しに絞る場合に好まれる。

直線(プロフィール部の立体形は円すい)はダイス工作上最も好ましい形で、もちろん、平面部や円筒部との遷移部には丸味を与える。直線プロフィールダイスは特定の条件下では円弧プロフィールダイスで達せられぬ高い加工度を遂行できるが、適用範囲の狭いのが欠点である。円すい母線がダイス穴軸となす角は小さいほどよく、少なへも 30° が望ましい実用上 15° 以下になすことは困難である。

5. しわ押え力

深絞りのしわはフランジしわとボデーしわ、さらに口辺しわに分けて論じられる。しわ押えはフランジしわの制御のために具えられるもので、付随して、変形の均一化や、ある程度のボデーしわ、口辺しわの制御を行なうことができる。

しわ押えにどれだけの荷重を与えればよいかは純理論的に定め難く、経験的または実験的に定められている。つぎに公表されている式を記す。

Sachs, $p_h = \frac{1}{100} \left(\frac{\sigma_s + \sigma_b}{2} \right)$, (板厚等幾何学的条件に

p_h = フランジ面単位 無関係)

面積当り押え力 kg/mm^2

σ_s = 耐力, または降伏点応力 kg/mm^2

σ_b = 引張強さ kg/mm^2

Siebel, $p_h = a \{ (\beta_0 - 1)^2 + b\delta \} \sigma_b$

$\beta_0 = D_0/d =$ 絞り比

$\delta = d/t_0 =$ 相対ポンチ直径

$a =$ 定数 $= 0.0025$, $b =$ 定数 $= 0.0050$

(p_h が kg/mm^2 の場合)

福井, 吉田, $H_n = \frac{(\sigma_s + \sigma_b)}{180}$

$\times D_0 \{ [(D_0 - d_2 - 2r_d)/t_0] - 8 \}$

$H_n =$ 全しわ押え力 kg

$d_2 =$ ダイス穴径 mm

$D_0 =$ ブランク直径 mm

$r_d =$ ダイラジヤス mm

t_0 = 板厚 mm

フランジしわはダイス面としわ押え面間に生ずる隙間が根源であるという考え方から、ダイス面としわ押え面間の間隔を一定に固定した。いわゆる固定しわ押え方式を推奨する人もある。間隔は $1.08 t_0$ 程度とするが、材料周縁が、ダイラジャスにさし掛るとき、しわおさえが周縁部に追隨して口辺しわをある程度制御する能力は無い。

定圧式しわ押え方式は逆で、しわ押え自体は可動で、空気圧などで負荷されている。したがって、板厚のいかなる変化にも、また、周縁のいかなる動きにも対応できる性質をもつ。この場合にはダイラジャス部での追隨作用も良好で、実用上定圧式が好まれるのはこれらの長所による。欠点は、工程のある段階では、しわ押え力が必要以上に加わり過ぎることであるが、工程に相応わしい圧力制御は困難で、ほとんど実行されている例はない。

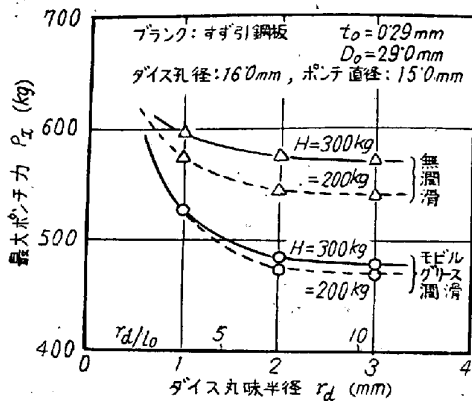


図80 最大ポンチ荷重に影響する因子

6. 潤滑

諸種作業条件の中で潤滑の占める役割は少ないものではない。図 80 はダイラジャス、しわ押え力、潤滑条件の差異により、工程中の最大ポンチ荷重がどの程度影響されるかを示したものである。潤滑の有無による荷重の差が相当顕著なことを認めうる。摩擦係数は二つの場合に 0.05 および 0.18 であるが、実用される油脂相互間でもこの程度の開きは珍しいものではない。潤滑剤の変更により、摩擦係数を 0.01 程度に低めることも可能であるが、 0.03 前後の値を僅か低めるために努力しても、作業面の改善は余りえられない。

低粘性の鉱油では工程を通じて摩擦抵抗の性質は不変で、境界摩擦型(クーロム型)抵抗を現わす。

高粘性の鉱油 ($2 \cdot 000$ cst 以上) では、材料工具間で充分な相対速度がえられる場合には部分粘性潤滑が達せられる。同じ絞り速度では粘性が高いほどポンチ荷重の軽減がもたらされやすい。

獣脂等半固形剤では境界摩擦係数が鉱油よりいちじる

しく低い。加工の進行とともに潤滑膜の摩耗が現われ工程末期における摩擦係数を増す。しかし概して低粘性鉱油の値より低い。深絞りにおいてはこの最後のタイプの潤滑剤が最も望ましい。

なお、平底ポンチによる絞り比を向上させるにはポンチ頭部を潤滑せず、ダイス面としわ押え面のみ潤滑することが望ましい。

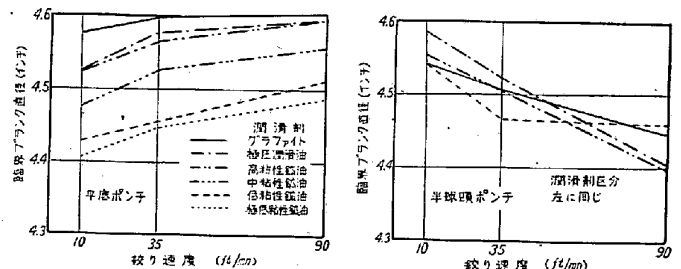
この他の詳細については節末の文献に譲る。

7. 絞り速度

深絞りにおける速度の影響に関しては従来いろいろ検討した結果が出て、不明瞭なものの一つであった。最近 H. T. Coupland および D. V. Wilson により系統的研究が発表された。それによれば、深絞りの速度効果は、材料の変形抵抗におよぼす歪速度の影響と、潤滑におよぼす絞り速度の影響からなるといわれている。

軟鋼類では歪速度による変形抵抗の変化が顕著で、これが、主としてポンチラジャス部の張出し変形に強く影響する。たとえば、平底ポンチの場合には速度が高まると厚さ歪の材料中心部への伝播が阻止され、結局、強さを維持する上好ましく、限界絞り比を高めうる。半球状ポンチの場合には逆で、速度が高まるほど歪量が張出し部全域に多くなり、絞り性を低下させる。

図 81 は Coupland 等の結果の一例である。



材質 リムド軟鋼(超深絞り用) C 0.075%, S 0.024%, P 0.013%, Mn 0.36%, Ni 0.07%, Cu 0.07%, Sn 0.01%, 板厚 0.04インチ, ポンチ直径 2インチ 半径クリアランス 0.060インチ, 平底ポンチラジャス, ダイラジャス共に 3/8 インチ

図81 深絞りにおける速度の影響 (Coupland)

8. その他

角筒絞りの考え方、再絞り比、再絞りにおける中間形状、各種加工法²⁾、加工機械、材料および試験³⁾⁴⁾が問題であるが、これらも文献にゆづりたい。

- 1) 文献 (176) 参照
- 2) 文献 (131) (132) 参照
- 3) 材料については文献 (187) 参照
- 4) 試験については文献 (179)→(183)参照

文 献

1. 深絞り全般および解析

- (119) 福井伸二: Researches on the deep-drawing processes, Sc. Pap. I.P. CR., Vol. 34 pp. 1422~1527 (1938)
do. appendix, Vol. 35 pp. 373~385 (1939)
- (120) 福井伸二, 由利裕三, 吉田清太: 薄板の円筒深絞り加工の全歪説による解析, 理工研報告, 第8巻4号, 179~196 ページ (昭29)
- (121) 福井伸二, 竹山寿夫, 吉田清太, 阿部邦雄: 深絞り加工の限界, 日本機械学会誌, 55巻, 405号, 640~646 ページ (昭27)
- (122) 益田森治: 絞りの塑性変形 (第1報~第3報) 機械学会論文集, 第8巻32号, I-121~136 ページ (昭17)
- (123) 益田森治: 同上 (第4報) 同上, 第11巻41号, I-1 (昭20)
- (124) 益田森治: 同上 (第5報) 機械学会誌, 第50巻, 345号, 116~118 ページ (昭22)
- (125) 益田森治: 深絞りの塑性学的研究 機械学会論文集, 第16巻5号, 139~143 ページ (昭25)
- (126) 益田森治: 深絞りの塑性学 (小峰) (昭27)
- (127) 斎藤浩一: 深絞りについて, 機械学会論文集, 第16巻53号, 139~143 ページ (昭25)
- (128) 吉田清太: 平面ダイスによる平板から円筒成形の成形域区分図, 科学研究所報告, 第34輯1号, 66~75 ページ (昭33)
- (129) 吉田清太: 底孔がない円筒の張出し加工, 底孔がある円筒の張出し加工, 科学研究所報告, 第33輯5号, 249~278 ページ (昭32)
- (130) 臼井, 宮川: On deep-drawing of aluminium sheet metal without blankholder, Memoirs, Fac. of Tech. Tokyo Metro Univ. No.3 pp. 13~28 (1953)
- (131) 田村 豊: 絞り加工について, 自転車生産技術, 25号 37~54 ページ, 26号 63~73 ページ, 27号 47~56 ページ (昭31)
- (132) 春日保男: 深絞りにおける最近の諸問題
(1) 剛体工具編, 機械の研究, 10巻1号 157~163 ページ (昭33)
(2) たわみ性工具編, 同上, 10巻2号 255~261 ページ (昭33)
(3) 熱処理を伴う深絞り編, 同上, 10巻3号, 376~382 ページ (昭33)
- (133) Chung, S. Y., and Swift, H. W.: Cup-drawing from a flat blank, Part I. II. Proc. I.M.E. App. Mech. Vol. 165 pp. 199~223 (1951)
- (134) Swift, H. W.: The mechanism of a simple deep-drawing operation Sheet Metal Ind., Vol. 31 No.330 pp. 817~828 (1954)
- (135) Siebel, E. u. Panknin, W.: Das Tiefziehen im Anschlag. Wt u. Mb. 46 Jg. Heft 7

s. 321~326 (1956)

- (136) Siebel, E. u. Beisswänger, H.: Tiefziehen (C. Hanser) (1955)
- (137) Swift, H. W.: Modern Workshop technology, Part I pp. 377~398 (Cleaver-Hume) (1950)
- (138) Willis, J.: Deep drawing (Butterworths) (1954)
- (139) Jevons, J. D.: The metallurgy of deep drawing and pressing, (Chapman) (1949)
- (140) Johnson, W.: Research into some metal forming and shaping operations, Sheet Metal Ind. Vol. 34 No.357 pp. 41~50, No. 358 pp. 121~127 (1957)
- (141) Box, W. A. and Schroeder, W.: Effect of shape on the formability of deep-drawn sheet-metal parts, Mech. Eng. Vol. 66 No. 10 pp. 643~648 (1944)

2. ダイスプロフィール

- (142) 宮川松男: 絞り加工の挫屈限界基準, マシーナリ 21巻5, 6号 549~552 ページ, 717~720 ページ (昭33)
- (143) 春日保男, 玉越 登: プロフィール部を円錐とせる平面ダイスによる深絞り (第1報) 機械学会 34 期通常総会講演会前刷, 第5室 No. 527 47~50 ページ (昭32)
- (144) 春日保男, 玉越 登: 円錐部をもつ平ダイスによる深絞り (第2報) 機械学会塑性加工専門講演会前刷, 昭和 32 年度 21~24 ページ (昭32)
- (145) Beisswänger, H.: Tiefziehen dünner Blech mit Sonderwerkzeuge Z. Metallkde., Jg. 40, Nr. 3 s. 101~115 (1949)
- (146) McDonald, J.: Radii on edges of drawing dies, Machinery (A) Vol. 58 No.12 p. 202 (1952)
- (147) Bauder, U. Tiefziehen von Hohlkörpern aus dicken Stahlblechen, Stahl u. Eisen, 71. Nr. 10 s. 500~512 (1951)

3. しわ押え

- (148) 福井伸二, 工藤英明, 吉田清太, 大川陽康: 深絞り性試験についての試み, 理工学研究所報告 第6巻6号, 351~357 ページ (昭27)
- (149) 春日保男: 薄い板の深絞り強さの一検討. 機械学会論文集, 第16巻53号, 144~148 ページ (昭25)
- (150) 春日保男: Research on Sheet drawing Memoirs of Fac. Eng. Nagoya Univ. Vol. 5 No. 2 pp. 217~252 (1953)
この他 (119) (133) (134) 参照

4. しわ押え

- (151) 菊池庸平: 深絞り加工におけるしわの発生. (第1報) しわの数, 機械学会論文集, 第15巻, 50号, IV-54~59 ページ (昭24)
- (152) 菊池庸平: 深絞りにおけるしわの問題. 機械学会

- 誌, 第 56 卷 409 号 110~116 ページ (昭28)
- (153) 宮川松男: 深絞り加工におけるしわの発生について (第1報) 平面ダイスの場合の理論, 機械学会論文集, 第 23 卷 130 号, 390~398 ページ (昭32)
- (154) 宮川松男: 同上 (第2報) 平面ダイスの場合の実験, 同上 399~407 ページ (昭32)
- (155) 宮川松男: 同上 (第3報) 円錐ダイスの場合の理論, 同上 407~411 ページ (昭32)
- (156) 宮川松男: 同上 (第4報) 円錐ダイスの場合の実験, 同上 412~415 ページ (昭32)
- (157) 宮川松男: 深絞り加工におけるしわ押え方式について, 同上 415~421 ページ (昭32)
- (158) Geckeler, J. W.: Plastisches Knicken der Wandung von Hohlzylindern und einige andere Faltungerscheinungen am Schalen und Blechen, Z.A.M.M. Bd. 8 Heft 5, s. 341~352 (1928)
- (159) Baldwin, W. and Howald, T. S.: Folding in the cupping operation. Trans. A. S. M. Vol. 38 pp. 757~788 (1947)
- (160) Siebel, E.: Der Niederhalterdruck beim Tiefziehen. Stahl u. Eisen, 74. Nr. 3 s. 155~158 (1954)
- (161) Senior, B. W.: Flange wrinkling in deep-drawing operations, J. Mech. Phys. of Solids, Vol. 4 No.4 pp. 235~246 (1956)
5. 潤滑
- (162) 春日保男: 深絞りに関する研究, 第1報, 実験装置および結果, 機械学会論文集, 第 19 卷 86 号 1~8 ページ (昭28)
- (163) 春日保男: 同上, 第2報, 板おさえ面およびダイ面に生ずる摩擦抵抗, 同上 8~14 ページ (昭28)
- (164) 春日保男: 同上, 第3報, 加工抵抗の構成, 同上 14~18 ページ (昭28)
- (165) 春日保男: 深絞りの潤滑材料, 機械学会誌, 第 58 卷 434 号, 240~247 ページ (昭30)
- (166) 春日保男, 河合 望: 深絞りにおける潤滑機構および潤滑剤 (第1報) 精密機械 20 卷 3 号, 85~89 ページ (昭29)
- (167) 春日保男: 板金絞りにおける作業条件, 金属, 第 27 卷 12 号, 934~938 ページ (昭32)
- (168) 春日保男, 野崎徳彦: 圧力潤滑深絞り法. (第1報) 機構概念, 特性および可能性, 機械学会論文集, 24 卷, 146 号 720~727 ページ (昭33)
- (169) 春日保男, 野崎徳彦: 同上, (第2報) ポンチ頭部における材料の変形. 同上 728~732 ページ (昭33)
- (170) 河合 望: 深絞り加工における潤滑, マシーナリ 第 21 卷 9 号, 895~902 ページ (昭33)
6. 絞り速度
- (171) Coupland, H. T. and Wilson, D. V.: Speed effects in deep drawing Sheet Metal Ind. Vol. 35 No. 370 pp. 85~103, 108 (1958)
7. 角筒絞り
- (172) 益田森治, 美代乙彦: 角絞りの塑性変形(その1) ひずみの測定, 機械学会論文集, 第 18 卷 65 号 94~97 ページ (昭27)
- (173) 福井伸二竹山寿夫, 吉田清太, 大川陽康, 四角筒容器の深絞り加工第1報, 理工学研究所報告 5 卷 3, 4 号 (昭26), 第2報, 同上, 8 卷 1 号 (昭26).
- (174) Brootzkooos, S. D.: How to calculate blanks for seamless rectangular shells, The Machinist (E) Vol. 93 pp. 1101~1106 (1949)
- (175) Panknin, W.: Über den "unstarren" Faltenhalter, Werkst. u. Masch. bau. 47 Jg. Heft 8 s. 418 (1957)
8. 再絞り
- (176) 馬場秋次郎: 円筒容器の再絞り, 機械学会論文集 第 22 卷, 114 号, 97~102 ページ (昭31)
- (177) Oehler, G.: Das Ziehverhältnis als Funktion der Zugzahl Werkst. u. Masch. bau. 40 Jg. Heft 9, s. 334 (1950)
- (178) Chung, S. Y.: An experimental investigation into the redrawing of cylindrical shells Proc. I.M.E. (B) Vol. 113 No.10 App. Mech. (1952~1953)
この他 (138) 130 ページ参照
9. 深絞り性その他
- (179) 山田嘉昭: 板の加工性試験法, 機械の研究, 第10 卷, 1 号, 169~176 ページ (昭33)
- (180) 宮島 尚: 深絞り用鋼板の選別法, 機械の研究, 第 10 卷 1 号, 164~168 ページ (昭33)
- (181) Hughes, M. L.: The mechanical testing of thin mild-steel sheet and strip. Sheet Metal Ind. Vol. 35 No.369 pp. 5~18 (1958)
- (182) Ludington, E. N.: The prediction of the cupping properties of sheet metals by the use of ultimate tensile strength. Sheet Metal Ind. Vol. 34 No.363 pp. 485~490 (1957)
- (183) Kemmis, O. H.: The assessment of the drawing and forming qualities of sheet metal by the swift cup-forming test. Sheet Metal Ind. Vol. 34, No.359 pp. 203~208 (1957)
- (184) Hundy, B. B: Recent B.I.S.R.A. work on the elimination of Stretcher strains in mild-steel pressing, Sheet Metal Ind. Vol. 31 No. 330 pp. 909~922 (1954)
- (185) Grainger, J. A.: Presswork and Presses (Machinery Pub. Co.) (1952)
- (186) Hain, K.: Getriebetechnik im Werkzeugmaschinenbau, Feinwerktechnik, Bd. 60 Nr. 2 s. 48~57 (1956)
- (187) Kemmish, W. B. German Engineering steels and their British equivalents, Machinery (London) Vol. 90, No. 2304 pp. 84~89 (1957)