

# 深絞り性試験についての試み

福井伸二, 工藤英明, 吉田清太, 大川陽康

## A Method for Testing of Deep-Drawability of Sheet Metals

Shinji FUKUI, Hideaki KUDO, Kiyota YOSHIDA, and Hiroyasu OKAWA

**ABSTRACT:** We can obtain approximately the deep-drawing stresses for a circular blank of sheet metal from its tensile property, but can not estimate generally the deep-drawability from such simple property. This is mainly due to that the strength of the weakest section where the drawing force is carried, is largely affected by: (a) inclination between side wall of the shell and punch, (b) complexity of state of stresses acting there, and it can hardly be estimated precisely from the tensile property. To know the deep-drawability, therefore, we determine the drawing limit experimentally by drawing many circular blanks of various diameters by conical die and punch. This process, however, requires labour and large number of blanks. To save these, we draw blanks having a diameter over the drawing limit (the ratio of punch diameter and blank diameter is about 0.37) by the conical die and measured the circumferential strain on periphery at the moment of break down of the shells. This strain is found to be practically available for a comparing scale of deep-drawability of sheet metal.

(Received December 10, 1952)

### 1. 緒言

薄板の深絞り加工, 或はその目的の薄板の製造に際し, 材料の深絞り性を予め知るための試験が必要な場合が多い. そのために成可く簡単な試験で深絞り性の比較, 良否の判定をする方法が種々試みられて来た. 現在用いられて居る試験方法を大別すれば, 引張試験, エリクセン試験, 或は液圧張出し試験の結果から深絞り性を比較する間接的なものと, 実際に絞り加工を行う直接的な試験方法とがある. 間接的試験結果と深絞り性の関係についての実験は可成り多く行われて居るが, 一般に両者の間には一定した関係は認められず, 正しい判断を得る事は出来ない. 故に実際加工に等しいか, 或は類似の加工をする様な試験方法が望ましい. この様な試験方法の一つに, 円錐形ダイスを使用して直接に絞り限界を求める方法がある<sup>(1)</sup>. この場合素板の直径が板厚の 50~70 倍程度であると特別のしわ抑え装置を必要としないの

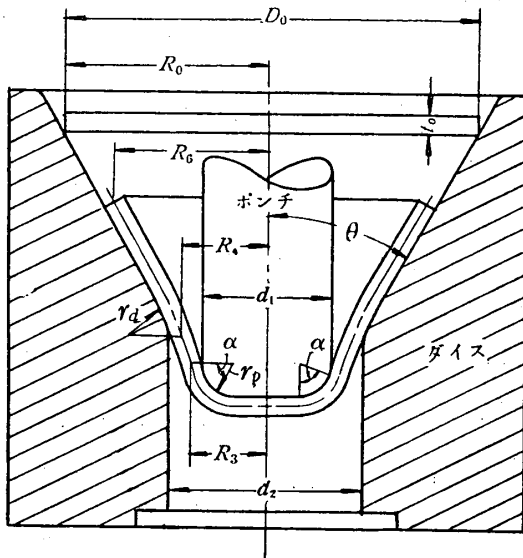
で, しわ抑え力による摩擦の影響が除かれるし, 又取扱いも簡単である. 然し絞り限界を求めるためには直径の異つた幾種類かの素板試験片が必要で, 試験を終える迄に相当の手間を要する場合が多い. この欠点を補う意味で二三の簡略化方法を試み良い結果を得たので報告する.

### 2. 深絞り性を知る目安となり得ると思われる実験的, 理論的要素

一般に円錐形ダイスによる深絞り加工に於て, フランジ部に於ける釣合の式は次の如くである<sup>(2)</sup>.

$$\frac{d(\sigma_1, R, t)}{dR} = (1 + \mu \cot \theta) \sigma_3 t \dots\dots(1)$$

ここに  $\sigma_1$ : 半径方向主応力  
 $\sigma_3$ : 円周方向主応力  
 $\mu$ : 摩擦係数  
 $\theta$ : ダイスの開き角



第 1 図 円錐形ダイスによる深絞り加工

この式を簡単に解くために、板厚が加工中不変で、且つ最大主剪断応力  $\sigma_1 - \sigma_3 = k_f$  がフランジ全面について一様に分布して居ると仮定して、第 1 図に示す半径  $R_4$  に於ける半径方向応力は、

$$\sigma_{1(R=R_4)} = KR^{\mu \cot \theta} + \frac{1 + \mu \cot \theta}{\mu \cot \theta} k_f \dots (2)$$

となる。又ダイス肩に於ける摩擦の影響を考慮して、 $R_4$  に於ける絞り込み応力  $\sigma_a$  は、

$$\sigma_a = e^{\mu \theta} \sigma_{1(R=R_4)} \dots (3)$$

となる。(2) 式の  $K$  は境界条件  $R=R_6$  で  $\sigma_1=0$  より求まる積分常数である。これらの式の計算に当つて  $k_f$  の取り方が問題であるが、簡単に、フランジ最外周は純粹圧縮であると考え、この部分に於ける  $k_f$  の値を用ふる事にすれば  $k_f$  は最外周に於ける  $\sigma_3$  と同値である。又塑性域に於ける応力と対数歪の関係を  $\sigma = C \epsilon^n$  ( $\sigma$ : 真応力,  $\epsilon$ : 対数歪  $C, n$ : 材料によつて定まる常数) と置けば、

$$k_f = C \left( \ln \frac{R_6}{R_0} \right) \dots (4)$$

$R_0$ : 素板の変形前の半径

以上の関係を用うれば (3) 式は

$$\begin{aligned} \sigma_a &= e^{\mu \theta} \left( \frac{1 + \mu \cot \theta}{\mu \cot \theta} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{R_4}{R_6} \right)^{\mu \cot \theta} \right\} C \left( \ln \frac{R_6}{R_0} \right)^n \\ &= e^{\mu \theta} \left( 1 + \frac{1}{B} \right) \left\{ 1 + \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)^B \right\} C (\ln \eta)^n \dots (5) \end{aligned}$$

こゝに  $B = \mu \cot \theta, \eta = R_6/R_0, \zeta = R_4/R_0$

となる。

最大絞り力に達した時の  $R_6/R_0$  を  $\eta_m$  と置けば、

最大絞り込み応力  $\sigma_{am}$  は

$$\sigma_{am} = e^{\mu \theta} \left( 1 + \frac{1}{B} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{\zeta}{\eta_m} \right)^B \right\} C (\ln \eta_m)^n \dots (6)$$

である。

(a) 加工硬化指数  $n$  と深絞り性。塑性曲線が  $\sigma = C \epsilon^n$  なる指数曲線で近似的に現わす事が出来れば、冪数  $n$  は材料の加工硬化度を示す指数になる。この  $n$  は簡単な解析にて引張試験に於ける最高荷重時の試験片の対数伸び歪に等しく<sup>(6)</sup>、且つ抗張力  $\sigma_B = C \left( \frac{n}{e} \right)^n$  となる。ポンチ頭部に接する材料の強さが抗張力に等しく、ダイス孔径とポンチ径の差が板厚に等しければ、絞り限界は、

$$\sigma_B = C \left( \frac{n}{e} \right)^n = \sigma_{am} \dots (7)$$

と置く事により求まる。又後述する様に、 $\zeta$  は  $n$  の函数である故に、(6) 式より、 $n$  が与えられれば絞り限界が定まる。従つて加工硬化指数  $n$  は深絞り性を知る一つの要素となり得る。

(b) 外径比と深絞り性。  $n$  の外に深絞り性に関連あると思われるものに、最大絞り力或は破断時に於ける外径比の大小、又はポンチ行程の大小がある。測定には外径比が楽であるし、精度も高い。種々の特性を有する材料を絞る場合、最大絞り力時に於ける外径比は、非常に簡単に考えれば次の如くなる。即ち加工中摩擦係数が変わらなければ

$$\frac{d\sigma_a}{d\eta} = 0$$

の時最大絞り力に達する。故に

$$\frac{d}{d\eta} \left[ (\ln \eta)^n \left\{ 1 - \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)^B \right\} \right] = 0$$

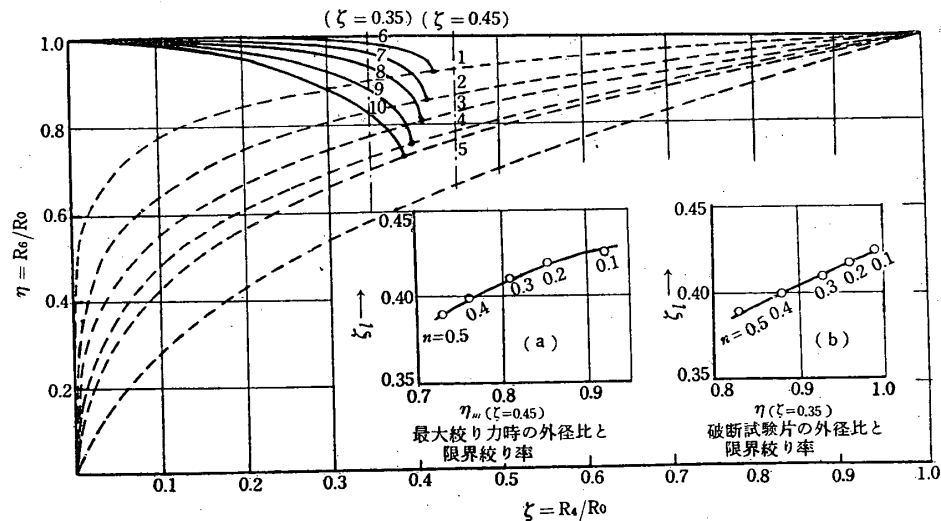
$$\therefore \zeta^B - \frac{n \eta_m^B}{n - B \ln \eta_m} = 0 \dots (8)$$

この式にて、 $\zeta$  なる素板を絞る場合の最大絞り力時に於ける外径比が求まる。又仮りにポンチ頭角に接する材料の応力が、抗張力に等しくなつたら破断すると仮定すれば (5) 式より

$$\left( \frac{n}{e} \right)^n = e^{\mu \theta} \left( 1 + \frac{1}{B} \right) \left\{ 1 + \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)^B \right\} (\ln \eta)^n$$

$$\therefore \zeta^B - \eta^B \left( 1 - \frac{A}{(\ln \eta)^n} \right) = 0 \dots (9)$$

$$A = \left( \frac{n}{e} \right)^n \left( \frac{B}{1+B} \right) \frac{1}{e^{\mu \theta}}$$



第2図 最大絞り力時に於ける外径比と絞り率(点線)並び破断時に於ける外径比と絞り率(実線)の関係  
(点: 線上より  $n=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0$ )  
(実線: 上より  $n=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 最上部実線は  $n=0$  の場合を示す

となりとなる素板を絞る場合に底部が破断した時の外径比が求まる。第2図はこの(8)及び(9)式の関係を図示したもので、実線が(9)式、点線が(8)式の関係である。実線と点線の支点は絞り限界を示すものである。今仮に  $n$  の値 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 を有する5種類の材料に就き、いずれも  $\zeta=0.45$  なる試験片を円錐形ダイスにて絞り加工を行なえば、最大絞り力時に於ける外径比  $\eta_m(\zeta=0.45)$  は 1, 2, 3, 4, 5 で与えられ、限界絞り率  $\zeta_i$  との関係性を求めれば第2図(a)の様に両者は本の曲線にて示される。故に各材料の絞り限界より楽な加工度で、等しい絞り率の素板を円錐形ダイスにて絞り加工を行い最大絞り力時の外径比  $\eta_m$  の大小を知れば、深絞り性の良否を判別する事が出来る。又絞り限界よりきびしい加工度の  $\zeta=0.35$  の試験片を円錐形ダイスで絞り、底部が破断した時の外径比は点 6, 7, 8, 9, 10 で与えられ、限界絞り率との関係は、第2図(b)の様に矢張り両者は一本の曲線に纏められる。従つて絞り限界よりきびしい加工度で等しい絞り率の素板を円錐形ダイスにて絞り、底部が破断した時の外径比の大小も、又深絞り性の良否を比較する要素となり得る。

(c) 荷重法。同じポンチとダイスを用いて絞る場合、素板の板厚が変らなければ、最大絞り力は素板直径に略直線的に変化する<sup>(3)</sup>。又絞り限界

以上の素板を絞る場合の破断時に於ける荷重と素板の直径の関係が分れば、両者の曲線が交る個所が絞り限界の素板直径を示す事になる。

以上述べた如く深絞り性の比較、或は絞り限界を求める方法となりうる要素が考えられるので実験的に検討してみた。

### (3) 実験方法並び供試材料

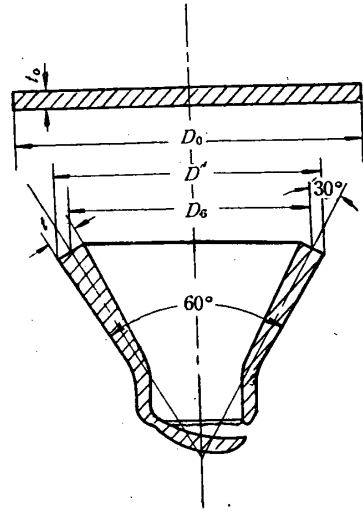
実験に使用した円錐形ダイスは第1図に示した如きもので、ダイス孔直径  $d_2=24.4\text{mm}$ 、ポンチ直径  $d_1=20.64\text{mm}$ 、ダイス肩半径  $r_a=4.0\text{mm}$ 、ポンチ頭部角半径  $r_p=6.0\text{mm}$ 、並びダイス面の開き角  $2\theta=60^\circ$  である。この型を円筒型サブプレスに設置し、材料試験機にて加工を行い絞り力並び破断荷重を測定した。絞り限界を求めるには、絞り込まれる素板直径  $D_e$ 、破断する試験片  $D_f$  の差を出来る丈小さくしてその平均をとり、絞り限界の素板直径  $D_i=(D_e+D_f)/2$  とした。又同一直径で絞れる素板と破断する素板が略等しい様な場合はその素板直径を絞り限界とした。絞り限界の数値的現わし方には、限界絞り率  $(d_1/D_i)$  或は限界絞り比  $(D_i/d_1)$  が普通用いられて居るが、板厚を考慮すればそれぞれ  $\{(d_1+t_0)/D_i\}$  並  $\{D_i/(d_1+t_0)\}$  となる。又ポンチとダイスの隙間が板厚より大きい場合には、解折的見地よりダイス孔直径を基準にした方が良く、且つ変化範囲を

大きくする意味で。

絞り比  $\xi = [D_0 - (d_2 - t_0)] / (d_2 - t_0) = (D_0/d_4) - 1$  として、併せて使用した。第 3 図は直径  $D_0$  の素板が  $D_6 = 2R_6$  なる外径に縮小した時底部が破断した試験片で、

$$\text{外径比 } \eta = (D_6/D_0) = (D' - t \cos 30^\circ) / D_0$$

とした。方向性顕著な材料はこの程度の変形でも耳が出来るので、この場合には耳の部分、谷の部分の各々について直径並板厚を測定して平均した。被試験材は第 1 表に示す様に、アルミニウム、超デュラルミン、6/4 黄銅、7/3 黄銅、銅、軟鋼 3 種の合計 8 種類の焼鈍した圧延板で、板厚は全部 1.0 mm である。尙表に伸率、抗張力、



第 3 図 破断試験片

第 1 表 供試材料

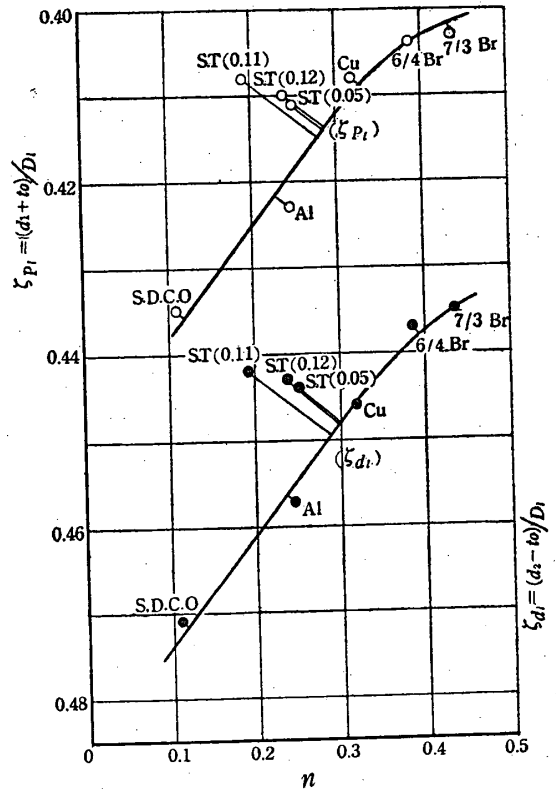
材 料	板 厚 mm	硬 度 V.H.N	抗 張 力 kg/mm <sup>2</sup>	伸 率 %	$n$	限界絞り率 $D_i/d_1$	限界絞り比 $\zeta_l = (D_i/d_4) - 1$
Al	1.0	26.0	96.5	33.5	0.246	0.403	1.188
S.D.C.O	1.0	53.0	18.3	19.0	0.110	0.415	1.124
Cu	1.0	43.2	23.5	53.0	0.341	0.389	1.269
7/3 Brass	1.0	66.4	34.2	70.1	0.439	0.384	1.299
6/4 Brass	1.0	94.7	38.7	49.3	0.386	0.385	1.290
ST. (0.05)	1.0	94.7	34.3	—	0.247	0.392	1.252
ST. (0.11)	1.0	93.6	33.4	—	0.194	0.390	1.264
ST. (0.12)	1.0	106.0	37.2	—	0.240	0.391	1.256

硬度、並引張試験にて求めた加工硬化指数  $n$  等を示した。

(4) 実験結果並び考察

(a) 加工硬化指数と深絞り性。

この関係については既に C, Arbel の実験が発表されて居る<sup>(4)</sup>。彼は銅、黄銅、不銹鋼並びアルミニウムにて実験を行い、 $n$  と絞り限界の間には一本の曲線にて統一される関係があつて、指数が大きいもの程深絞り性が良いという結果を得て居る。第 4 図は著者等の実験結果である。 $\zeta_{pl}$ ,  $\zeta_{dl}$  はポンチ並びダイス孔直径を基準にして限界絞り率を表わしたものでそれぞれ  $\zeta_{pl} = (d_1 + t_0) / D_i$ ,  $\zeta_{dl} = (d_2 - t_0) / D_i$  で示されるもので、ポンチとダイスの隙間が板厚に等しければ  $\zeta_{pl} = \zeta_{dl}$  である。著者等の実験に於ても非鉄金属については、C, Arbel の実験結果と同じ傾向を示して居るが軟鋼については必ずしも  $n$  が大きい程深絞り性は良いと云う事は出来ない。むしろ逆の傾向すら見られ、 $n$  の大小にて総ての材料につい



第 4 図 加工硬化指数  $n$  と限界絞り率  $\zeta_{pl}$ ,  $\zeta_{dl}$  の関係

ての深絞り性を比較する事は危険である。この原因として考えられる事は、ポンチ頭部角に接する材料の強さが抗張力に等しくなく、複雑に変化するのではないか、又  $n$  が小さい材料程最大絞り力に達するポンチ行程が短いので、ポンチ頭部角に材料が接する有効半径  $R_3$  が  $d_2$  に対して違つた割合になる等が考えられる。事実ポンチ頭部角に接する材料は曲げを受けて居て、更

に歪が二次元的であり、ポンチ頭部角と材料の間の摩擦も影響して居る。此の様な諸因子の影響を調べる簡単な目安として、絞り限界の素板を絞つた場合の最大絞り力を製品断面積で除した  $\sigma_{rm} = P_m / \pi(d_1 + t_0)t_0$  並び有効接触半径  $R_3$  と接触角  $\alpha$  にて補正した  $\sigma'_{rm} = P_m / 2\pi \left( R_3 + \frac{t_0}{2} \right) t_0 \sin \alpha$  を求めた。又抗張力  $\sigma_B$  に対する比も求めて第2表に示した。 $R_3$  は試験片に塗料を塗つてポン

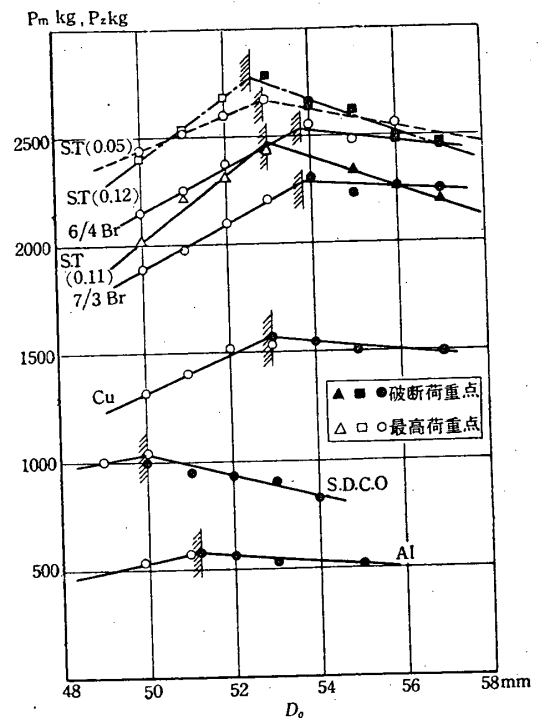
第 2 表

材 料	$\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	平 面 ダ イ ス				円 錐 形 ダ イ ス			
		$f\sigma_{rm}$ kg/mm <sup>2</sup>	$f\sigma'_{rm}$ kg/mm <sup>2</sup>	$f\sigma_{rm}/\sigma_B$	$f\sigma'_{rm}/\sigma_B$	$c\sigma_{rm}$ kg/mm <sup>2</sup>	$c\sigma'_{rm}$ kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{rm}/\sigma_B$	$\sigma'_{rm}/\sigma_B$
SDCO	18.3	16.8	18.4	0.92	1.00	14.5	21.1	0.79	1.153
Al	9.65	9.42	9.8	0.98	1.01	8.2	11.1	0.85	1.15
Cu	23.5	25.0	25.7	1.07	1.09	21.5	30.4	0.92	1.29
6/4 Br	38.7	—	—	—	—	36.7	47.9	0.95	1.24
7/3 Br	34.2	36.5	36.7	1.07	1.07	32.8	42.6	0.96	1.25
ST.(0.05)	34.3	41.9	42.9	1.22	1.25	40.0	53.8	1.17	1.57
ST.(0.11)	33.4	35.8	36.9	1.07	1.10	36.2	49.0	1.08	1.47
ST.(0.12)	37.2	41.5	43.3	1.12	1.17	38.0	52.4	1.02	1.41

チと材料が接触する最大半径を実験的に求め、 $\alpha$  は図的に求めた。表に於て  $c\sigma_{rm}$  及び  $c\sigma'_{rm}$  は前記円錐形ダイスによる絞り実験にて求めたもので、 $f\sigma_{rm}$  及び  $f\sigma'_{rm}$  は  $d_2=19.9\text{mm}$ ,  $d_1=17.5\text{mm}$ ,  $r_p=r_d=4.0\text{mm}$  の平面ダイスにての実験結果である。この結果より  $\sigma_{rm}/\sigma_B$ ,  $\sigma'_{rm}/\sigma_B$  共に材料によつて違つて居り、ポンチ頭部角に接し破断する場所の材料の強さに影響を及ぼす諸因子が複雑に作用して居ると思われる。斯様にポンチ頭部角の試験材の強さが抗張力に対して一率の倍率を示さない事が、間接試験法で深絞り性を正しく判断出来ない主なる原因である。 $\sigma_{rm}$  が平面ダイスと円錐形ダイスによる場合で違つて居るのは、隙間の違いにより有効接触半径  $R_3$  及び接触角  $\alpha$  が異なる結果である。 $\sigma'_{rm}$  の両ダイスによる実験結果の違いは、春日氏<sup>(6)</sup> も指摘された様に、接触半径  $R_3$  のポンチ直径  $d_1$  に対する比が違つたためと考えられる。

(b) 荷重法。

前述の様な深絞り加工に於ける特別な因子の影響を満足する試験方法としては現在の処円錐形ダイスを用いて絞り加工を行う方法が簡単で正確である。第5図はこの方法の簡略化の一つの試み



第 5 図 素板直径  $D_0$  と最大絞り力  $P_{max}$  並び破断荷重  $P_2$  の関係 [荷重法]

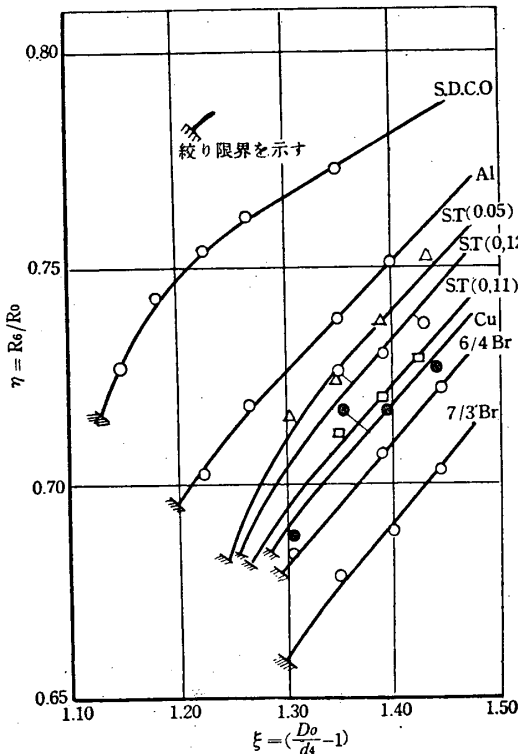
である荷重法についての実験結果である。横軸に素板直径をとり、縦軸は最大絞り力並び破断荷重である。破断荷重は、素板直径の増大と共に破断

時に於けるポンチとの接触半径  $R_3$  が小さくなるので減少し、実験を行つた範囲では略直線的に減少すると見做しうる。それで素板直径に対する最大絞り力を示す直線と、破断荷重を示す直線との交点に相当する素板直径と、従来の方で求めたものと比較すると両者は殆んど完全に一致する。故にこの方法にて絞り限界を求める事が出来る。実験を行うに当つては、絞り限界以内と以外の直径の素板を最小限各々 2 種類づゝとり、一種類の素板を 3 枚準備するとすれば大体 12 枚にて最大絞り力、並びに破断荷重を示す直線が得られ時間的に従来の方法に比して早く絞り限界を求める事が出来る。

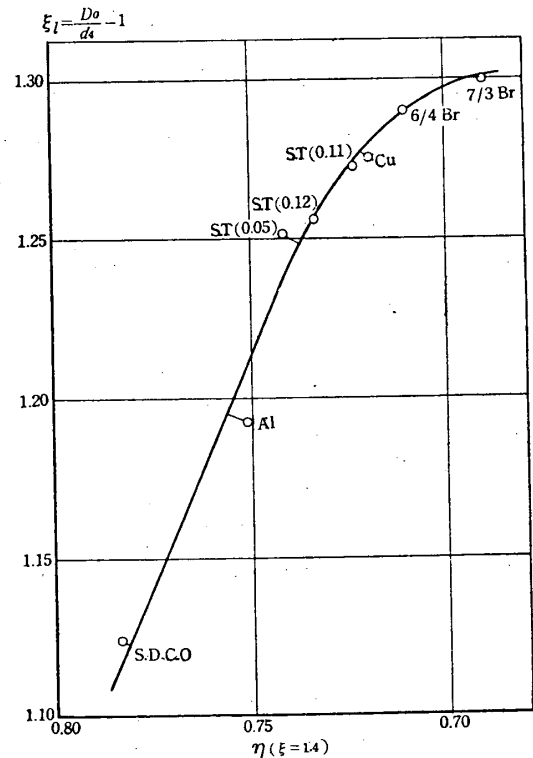
(c) 外径比法

絞り限界以内に於ける素板の絞りに於ての最大絞り力時の外径比は  $n$  の大小によつて定まつてしまうので、これは (a) に於て述べた如く不適當である。破断時に於ける外径比を用うれば、底部の深絞りによる強度特性が加味されて居るので、破断試験片の外径比を以つて、深絞り性の比較をする方が適當である。第 6 図は各材料の破断時に於ける外径比  $\eta$  を縦軸に、絞り比  $\xi$  を横軸にとつて示した実験結果である。各材料の  $\eta$  と

$\xi$  の関係は理論曲線第 2 図と略同じ様な傾向を示して居る。絞り限界近くでは素板直径の違いによる外径比の変化が大きいが、限界より数 % 大きい直径になると略一定した変化を示す様になり直線と見做し得る様になる。故に試験片は絞り限界より数 % 以上大きい直径の素板を使用した方が実験並びに測定が楽である。然し余り大きくなると  $R_3$ ,  $\alpha$  等が大きく影響して来て材料独自の特性が少なくなつて来るし、又円錐形ダイスも不必要に大きいものとなり、しわの発生の懸念も生ずる。故に試験片直径の選定範囲は、材料の違いによる絞り限界の差も考慮して、絞り限界の素板直径より数 % ~ 20% 程度が適當と思われる。第 7 図は  $\xi = 1.4$  ( $\xi$  にして約 0.37) の試験片の破断時の外径比  $\eta(\xi=1.4)$  を横軸に、限界絞り比  $\xi_l$  を縦軸にとり図示したものである。この関係では  $n$  と絞り限界では著しくはずれて居た軟鋼 3 種も含めて総ての材料につき一本の曲線にて統一して示す事が出来る。従つて種々の材料より同じ直径の試験片を削り出し、破断時の外径比の大小の順序を求めれば絞り限界の順序を求めた事になる。この様にこの方法は試験片が一種で済むし、時間的



第 6 図 破断試験片の絞り比  $\xi$  と外径比  $\eta$  の関係



第 7 図 破断試験片の外径比  $\eta$  と限界絞り比  $\xi_l$  の関係 (外径比法)

にも、材料的にも節約になり、非常に簡単に早く深絞り性を正しく比較する事が出来る。尙この方法と、荷重法を併せて実験を行い予め限界絞り比と外径比の関係を求め置けば、次からの試験では外径比のみを求めて限界絞り比を逆に推定出来るので、深絞り性の比較のみならず、絞り限界値も求める事が出来る方法となる。注意しなければならない事は同一寸法の円錐形ダイスにて板厚の違ったものを絞る場合は得たる外径比をそのまま深絞り性の判定にする事は危険である。即ち板厚が異なれば隙間の板厚に対する比率が違い  $R_3$ ,  $\alpha$  等が変つて来るため正しい結果を与えない。これ等事項の寸法効果については次の報告に譲る。

### (5) 結 言

深絞り加工に於てはポンチ頭部角に接し破断する個所の材料の強度特性が絞り性に大きい影響を及ぼす。故にこれらの影響を含む試験方法でなければ、深絞り性の正しい比較、判断は出来ない。このためには現在の処円錐形ダイスを使用する深絞り性試験が最も適當である。この試験方法を次の如く簡略化して使用すれば簡単に且つ迅速に結果を得る事が出来る。

1) 絞り限界以内に於ては素板直径の増大と共

に最大絞り力は直線的に増加する。又絞り限界以外では、破断荷重は素板直径の増加と共に略直線的に減少する。故にこの両直線の交点をもつて絞り限界とする。

2) 同一直径の素板を用いた破断試験片の外径比の大小によつて深絞り性の良否の正しい判定が可能である。又 1) の方法と組合せて行えば絞り限界も数値的に求める事が出来る。

以上本研究に際しては文部省科学研究費の援助を受けた。又材料の御便宜を与えられた。日本アルミニウム工業株式会社、並びに新理研工業株式会社に御礼申上げる。

### 参照文献

- 1) 福井, 三国, 工藤; 理工研報告 第1巻 第2号 [1947年2月] p. 27~30.
- 2) S. Fukui; *I.P.C.R.* Oct [1938] p. 1434.
- 3) 福井, 吉田, 阿部; 理工研報告. 第6巻 第2号 [1952年4月] p. 105~110.
- 4) C. Arbel; *Sheet Metal Industry*. Dec. [1950] p. 926.
- 5) 春日保男; 機械学会論文集 第16巻 53号 [昭和25年] p. 144~148.
- 6) H. I. Fufeld; *J.A.P.* Vol. 20, Nov. (1949)

(1952年12月10日受理)