

539.388.24 : 621.983

金属薄板の純粋張出し性におよぼす摩擦と材料特性の影響*

小林政教**, 黒崎 靖***, 河合 望****

1. ま え が き

フランジ部を完全にクランプして行う張出し成形、いわゆる純粋張出し成形では、1回の加工で到達する限界の張出し深さを可能な限り高めること、すなわち張出し性の向上が一つの重要なねらいとされる。これに対し直ちに指摘しうる影響因子として、ポンチ・材料面間の摩擦、 n 値、 r 値などで表現される材料特性値およびポンチプロフィール形状が考えられる。

ポンチ面の摩擦の大小が材料特性値の影響の仕方に著しい差異を生ぜしめることを示唆する報告はみられるものの^{(5)~(7)(11)}、これらの因子の純粋張出し性への量的影響は必ずしも明らかにされていないようである。

この問題の究明には、まず純粋張出し成形におけるポンチ・材料面間の摩擦係数をできる限り正しく知ることが必要となるが、本報では、そのための模擬摩擦試験装置を試作した。そして球頭ポンチを用いて各種

金属薄板に軸対称純粋張出し成形を加え、限界張出し深さが、ポンチ頭部の摩擦の大小と材料特性値によって、どのように変化するかをひずみ増分を用いた理論と実験の両面から究明することにした。あわせて純粋張出し性向上のための最適条件を明らかにする。

2. 実 験 条 件

2.1 材料および引張り特性値 試験用材料は公称板厚 0.6 mm の各種軟鋼板、工業用純アルミニウム板および銅板の 7 種類である。それらの化学成分および表面あらさを表 1 に、引張り特性値を表 2 に示す。ただし軟鋼板はダル仕上げの板である。

引張試験は JIS 13 号 B 試験片を圧延方向に対し、0°、45° および 90° の 3 方向に採取し、インストロン形引張試験機〔島津オートグラフ IS-5000 形、最大ひょう(秤)量 5 t〕を用いて、引張速度 10 mm/min で行った。

3 種の軟鋼板および工業用純アルミニウム軟質材

表 1 供試材の化学成分および表面あらさ

(a) 軟 鋼 板

	JIS規格相当	C	Si	Mn	P	S	表面あらさ R_{max}
リムド鋼	SPCC-SD	0.007	T_r	0.34	0.013	0.018	7.3 μ
キルド鋼	SPCE-SD	<0.08		<0.04	<0.030	<0.030	6.7 μ
ホロー用鋼		0.004	T_r	0.18	0.007	0.015	5.3 μ

(b) アルミニウム板

	JIS規格相当	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	表面あらさ R_{max}	
工業用純アルミニウム	軟質材*									0.18 μ	
	硬質材	A1050-H18	<0.01	0.11	0.29	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	99.57	0.16 μ
工業用純アルミニウム	半硬質材	A1050-H24	0.02	0.11	0.29	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	99.57	0.16 μ

* 軟質材は硬質材 A1050-H18 を 350°C 1時間焼なましたものである。

(c) 銅 板

	JIS規格相当	Cu	P	表面あらさ R_{max}
りん脱酸銅軟質材	DCuP1A-O	>99.90	0.004~0.015	0.14 μ

* 昭和 52 年 11 月 22 日 第 28 回塑性加工連合講演会において講演、原稿受付 昭和 53 年 2 月 6 日。

** 正員、豊田工業高等専門学校 (〒471 豊田市栄生町 2-1)。

*** 正員、三重大学工学部。

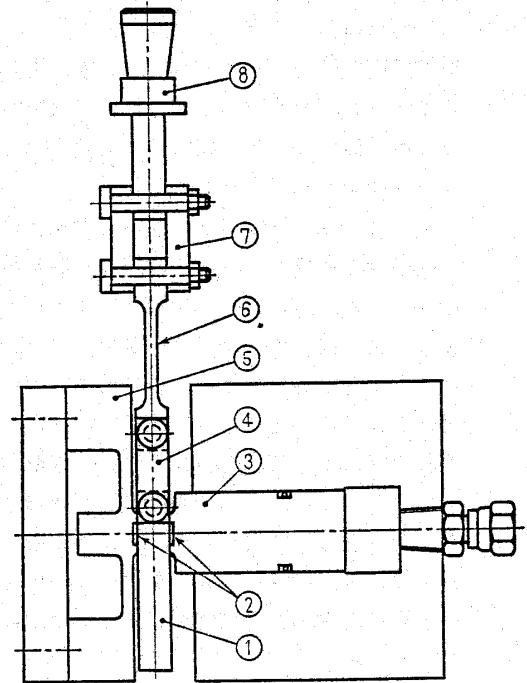
**** 正員、名古屋大学工学部。

は n 値の変化が比較的小さく ($n=0.207\sim 0.265$), r 値が比較的大きく変化する ($r=1.06\sim 1.75$) 材種として選ばれ, また 3 種の工業用純アルミニウムおよびりん脱酸銅軟質材は r 値の変化が比較的小さく ($r=0.79\sim 1.13$), n 値が比較的大きく変化する ($n=0.010\sim 0.382$) 材種として選ばれた。

2.2 摩擦試験装置 張出し成形中におけるポンチ頭部と材料面間の相対すべり速度, すべり距離および面圧は場所と行程の関数として変化し, 従って摩擦係数も同様に变化するものと考えられる。しかし, これを正しく実測した例はなく, 理論による逆算法⁽³⁾⁽¹²⁾および簡単な模擬摩擦試験法⁽⁹⁾が二, 三報告されているにすぎない。

本報では, 張出し成形中のポンチと材料面間の摩擦状態をできる限り近似し得る摩擦試験装置を新たに試作し, 摩擦係数の測定を試みた。図 1 は試験装置の全体図である。図 2 はこれを油圧プレスに取付けて測

定している状態を示す。試験片は素板から削り出された $\phi 9.8\pm 0.03$ mm の円板で, 2 箇所の浅い円状凹部②にはめこまれる。油圧ピストン③にて所定の垂直力



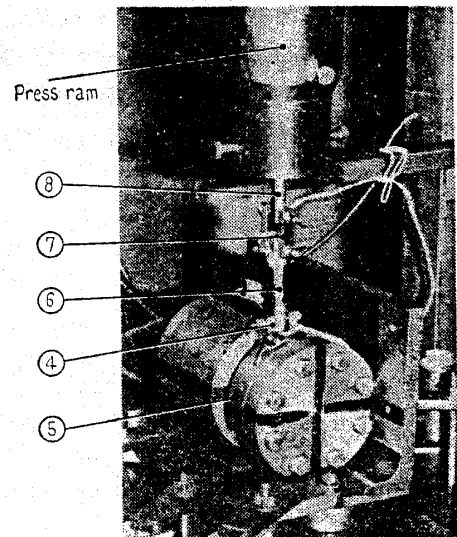
- ① Tools for friction
- ② Hole to insert specimen
- ③ Piston to apply normal force
- ④ Universal joint
- ⑤ Load cell to measure normal force
- ⑥ Load cell to measure frictional force
- ⑦ Universal joint
- ⑧ Shank

図 1 摩擦試験装置概略図

表 2 引張り特性値

試料 公称板厚 0.6 mm	採取方向 (圧延方向 に対して)	r 値	n 値	引張強さ S_r kgf /mm ²	全伸び (公称ひずみ) eit %
リムド鋼	0°	1.05	0.205	34.5	40.9
	45°	1.00	0.207	34.7	39.4
	90°	1.26	0.210	34.7	40.5
	平均	1.08	0.207	34.6	40.1
キルド鋼	0°	1.54	0.220	31.6	43.6
	45°	1.37	0.209	32.9	40.9
	90°	1.80	0.208	31.7	41.3
	平均	1.52	0.211	32.3	41.6
ホーロー用鋼	0°	1.54	0.231	28.8	50.1
	45°	1.62	0.234	29.2	48.1
	90°	2.23	0.232	28.7	47.1
	平均	1.75	0.233	29.0	48.3
工業用純アルミニウム軟質材	0°	0.67	0.257	9.3	32.7
	45°	1.44	0.261	8.2	40.4
	90°	0.68	0.280	8.8	40.1
	平均	1.06	0.265	8.6	38.4
工業用純アルミニウム半硬質材	0°	0.56	0.017	14.9	4.1
	45°	1.17	0.008	14.1	1.9
	90°	0.92	0.007	15.2	4.0
	平均	0.95	0.010	14.6	2.9
工業用純アルミニウム硬質材	0°	0.45	0.016	18.1	3.5
	45°	1.43	0.017	17.5	2.3
	90°	1.22	0.017	18.7	2.5
	平均	1.13	0.017	18.0	2.6
りん脱酸銅軟質材	0°	0.95	0.397	23.4	40.5
	45°	0.63	0.372	23.2	40.4
	90°	0.94	0.386	22.9	40.6
	平均	0.79	0.382	23.2	40.5

各測定値の平均値 $\bar{x} = 1/4(x_0 + 2x_{45} + x_{90})$
 ただし x_0, x_{45} および x_{90} は各試験片の採取方向が圧延方向に対して 0°, 45° および 90° に対する各測定値である。



- ④ Universal joint
- ⑤ Load cell to measure normal force
- ⑥ Load cell to measure frictional force
- ⑦ Universal joint
- ⑧ Shank

図 2 摩擦試験装置

を負荷する。この垂直力はダイアフラム形の荷重測定体⑤にはりつけたひずみゲージで検出される。油圧プレスラムにシャンク⑧を固定し、自在継手④および⑦を介して摩擦工具①を一定速度で引張り、ロードセル⑥で摩擦力を測定する。また別に、インダクタンス形変位変換器をプレスラムに取付け、工具と試験片とのすべり距離を検出する。これら垂直力、摩擦力およびすべり距離はすべて電気量に変換され、ペン書きレコーダに同時記録される。

図3は摩擦力測定用ロードセル⑥および垂直力測定体⑤の検定結果である。それぞれの測定体について、インストロタイプ試験機(島津オートグラフ)により、力の作用する位置に検定用ジグを介して荷重を加える。その時の動ひずみ計の出力をペン書きレコーダに記録することによって検定を行った。そして、この試験機によって加えられる荷重を基準荷重と呼ぶことにする。なお、その際垂直力測定体に摩擦力を負荷し、その垂直力に対する干渉がないことを実験的に確認した。図に示されているように、いずれも負荷、除荷ともに直線性と再現性が確保され十分な測定精度が得られた。

張出し成形中のポンチ頭部・材料面間の接触状態は、後掲の表4に示したような相対すべり速度、すべり距離および面圧になっているものと推定される。そこで、この試験装置では、それらの値をカバーする摩擦条件で摩擦係数を測定しようになっている。本装置では、バルク塑性変形中の摩擦係数 μ を測定しようになっていないが、バルク塑性変形による焼付きが生じない限り、その変形の有無は、摩擦係数 μ には直接影響せず、近似的にクーロン則の成立が確認されている⁽¹⁴⁾。このため本実験装置が張出し加工におけるポンチ・材料面間の摩擦のシミュレーション試験と

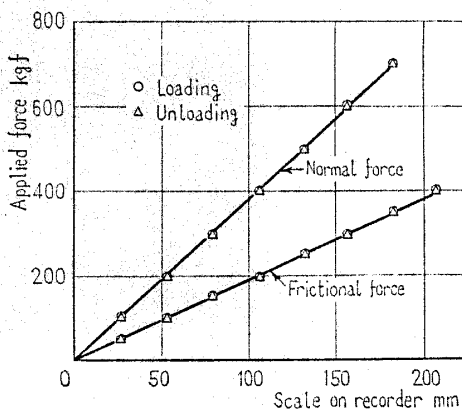
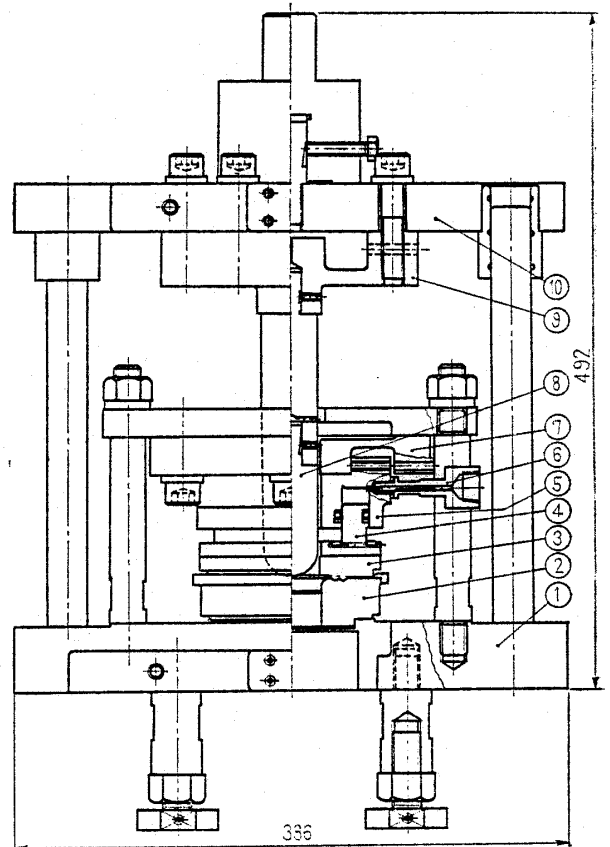


図3 摩擦力測定用ロードセルおよび垂直力測定体の検定線図

して有効と考えられる。

工具には張出し用ポンチと同じ材種のSK5および同じ仕上げ方法を用いることにした。その仕上げには、ホワイトアランダム#1200、#4000および#8000の順にラップ剤を細粒としてラッピング加工を施した。そして実験中、潤滑材の変更ごとに、ホワイトアランダム#8000でラッピング加工を行う。なお、実験はすべて室温(19~25°C)において行った。

2.3 純粹張出し実験 図4はダイセットに組み込まれた純粹張出し用実験装置の主要部を示すものである。ポンチ③は、ポンチ力測定用のダイアフラム形測定体⑨を介してダイセットのポンチホルダ⑩に取付けられる。ダイセット①に取付けられたダイス②に対し、板押さえ工具③と油圧加圧部④⑤⑥によって、板押さえ力が負荷されるようになっている。フランジ部



- ① Die bed
- ② Die
- ③ Blank holder
- ④ Piston to apply the clamping force
- ⑤ Cylinder
- ⑥ Attachment for hydraulic oil hose
- ⑦ Load cell to measure clamping force
- ⑧ Punch
- ⑨ Load cell to measure punch force
- ⑩ Punch holder

図4 純粹張出し用実験装置

のできるだけ内側を完全にクランプすることによって純粹張出し成形を達成するために図5に示すような形状寸法の板押さえ工具が用いられる。上記ダイセットを油圧プレスによって駆動する。成形中、ポンチ力はダイアフラム形のポンチ力測定体⑨にはったひずみゲージにより、ポンチ行程はダイセットのポンチホルダに取付けたインダクタンス形変位変換器により、それぞれ電氣的に検出され、X-Yレコーダに同時記録される。板押さえ力はダイアフラム形の測定体⑦にはったひずみゲージで電氣的に検出される。図6は、これらポンチ力測定体⑨および板押さえ力測定体⑦の検定結果を示すものである。いずれも、負荷、除荷ともに直

線性と再現性が確保され、十分な測定精度が得られた。ポンチ行程測定用変位変換器の検定結果を図7に示す。検定には、ブロックゲージによってコアを移動させ、その時のレコーダ目盛を読みとる方法を用いた。その結果は、きわめて良好な直線性を示している。

純粹張出し実験における加工条件を一括して表3に示す。本実験では直径40mmの球頭ポンチを用いる。素板の破断状態を確認するため破断直後にポンチを直ちに止め得るようにポンチ速度を約0.15mm/sとかなりの低速度にした。

限界の張出し深さの測定には、ポンチ力-ポンチ行程の記録線図上で、ポンチ力が急激に低下するポンチ行程を読みとることによって行った。このポンチ力が低下する点はめいりょうに識別でき、ほぼ0.2mm以内の精度で測定されている。

3. 理論的検討

工具・材料面間の摩擦係数および材料特性値(r 値、 n 値など)の限界張出し深さにおよぼす影響を系統的に予測するため、まず軸対称ポンチ張出しの理論解析を行ってみた。実際の純粹張出し加工では、行程の進行とともに素板とダイラジラス部の接触開始部半径は減少してゆく。 $ds_0=0$ となる実質クランプ半径は、ほぼこの位置になる。表3の工具寸法と本実験で

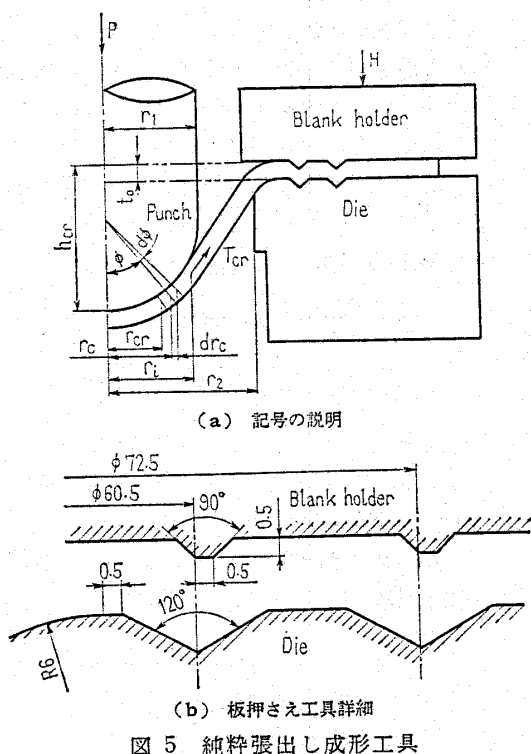


図5 純粹張出し成形工具

表3 純粹張出し実験における加工条件

ポンチ直径	$2r_1$	$\phi 40$ mm
ポンチプロフィール半径	r_p	20 mm (球頭)
ポンチ表面あらさ	R_{max}	0.2~0.4 μ
ダイス内径	$2r_2$	$\phi 42.5$ mm
ダイス肩半径	r_d	6 mm
クランプ力	H	4t
ポンチ速度		約 0.15 mm/s
室温		19~25°C

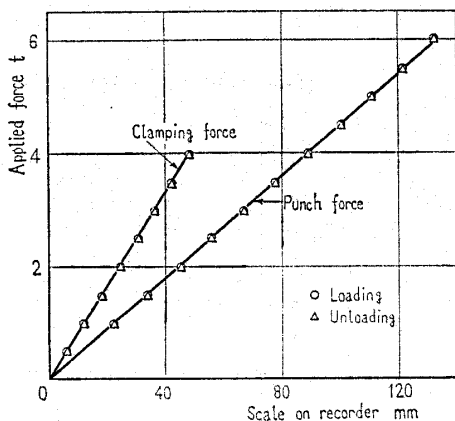


図6 ポンチ力測定体および板押さえ力(クランプ力)測定体の検定線図

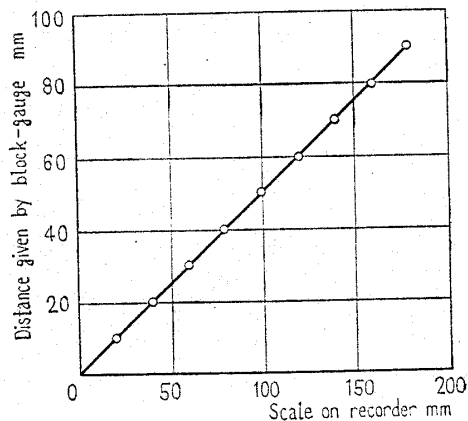


図7 変位変換器の検定線図

測定された限界張出し深さ 8~20 mm の範囲では、このクランプ半径位置はおよそ 25 mm となることがわかったので、図 8 に示すようなダイス内径 50 mm の幾何学的モデルについて計算を行った。解析の方法は河合らの方法⁽¹³⁾に準じたが、以下にその概要を述べる。薄膜理論によるつりあい式、ひずみの適合条件式、面内等方性を仮定し、 r 値表現した Hill の異方性降伏条件式⁽¹⁾ および応力-ひずみ増分関係、相当応力と相当ひずみ間に n 乗硬化式を適用する。計算に用いた式をまとめて以下に示す。

ポンチプロフィール部におけるつりあい方程式

$$d(t\sigma_\phi) = t(\sigma_\theta - \sigma_\phi) dr_c / r_c + \mu t(\sigma_\theta + \sigma_\phi) d\phi \dots\dots\dots (1)$$

オーバハング部 (ポンチに接触していない壁部) では式 (1) において $\mu = 0$ とおけばよい。

体積一定則

$$\varepsilon_\phi + \varepsilon_\theta + \varepsilon_t = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ひずみの定義式

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\phi &= \ln \{ dr_c / (dR \cos \phi) \} \\ \varepsilon_\theta &= \ln (r_c / R), \quad \varepsilon_t = \ln (t / t_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) を式 (2) へ代入して次式を得る。

$$d(r_c^2) = \frac{t_0}{t} \cos \phi d(R^2) \dots\dots\dots (4)$$

r 値表現した Hill の降伏条件式 (面内等方, 平面応力条件)

$$f = \sigma_\phi^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_\phi \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_{eq}^2 \dots\dots\dots (5)$$

応力-ひずみ増分関係

$$\frac{d\varepsilon_\phi}{(1+r)\sigma_\phi - r\sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_\theta}{(1+r)\sigma_\theta - r\sigma_\phi} = \frac{-d\varepsilon_t}{\sigma_\phi + \sigma_\theta} = \frac{1}{1+r} \frac{d\sigma_{eq}}{\sigma_{eq}} \dots\dots\dots (6)$$

相当応力-相当ひずみ関係 (n 乗式)

$$\sigma_{eq} = F \left(\int d\varepsilon_{eq} \right)^n \dots\dots\dots (7)$$

ここに、各記号は図 5 に示した以外、次のようである。

る。

$\sigma_\phi, \sigma_\theta$: 子午線および円周方向応力

$\varepsilon_\phi, \varepsilon_\theta, \varepsilon_t$: 子午線, 円周および板厚方向ひずみ

$d\varepsilon_\phi, d\varepsilon_\theta, d\varepsilon_t$: 子午線, 円周および板厚方向ひずみ増分

$\sigma_{eq}, d\varepsilon_{eq}$: 相当応力および相当ひずみ増分

R, r_c : 要素の変形前および後の半径位置

t_0, t : 要素の変形前および後の板厚

μ : ポンチ・材料面間の摩擦係数

f : 塑性ポテンシャル

r : r 値

n : n 値 (加工硬化指数)

F : 塑性係数

上式を逐次近似法により、各ステップごとに、ひずみおよび応力分布を求める。ステップには頂点における板厚ひずみ増分を用い、 -0.02 もしくは -0.01 おきとした。各ステップにおいて、クランプ位置で $d\varepsilon_\theta = 0$ となるように接触部半径 r_c (図 8 参照) を決定する。そして、200 に分割した要素のいずれかにおいて初めて Hill の拡散くびれ発生条件⁽²⁾

$$\frac{1}{\sigma_{eq}} \frac{d\sigma_{eq}}{d\varepsilon_{eq}} < \left\{ \sigma_\phi \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_\phi} \right)^2 + \sigma_\theta \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta} \right)^2 \right\} / \left\{ \sigma_\phi \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_\phi} \right) + \sigma_\theta \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta} \right) \right\} \frac{\partial f(\sigma_{eq}, 0)}{\partial \sigma_{eq}} \dots\dots (8)$$

を満足した時の張出し深さを限界張出し深さの理論値とする。使用した計算機は名古屋大学大型計算機センターの FACOM 230-60 である。

影響因子の計算範囲として、ポンチ頭部・材料面間の摩擦係数 μ は 0~0.4, r 値は 0.5~2.0, n 値は 0.02

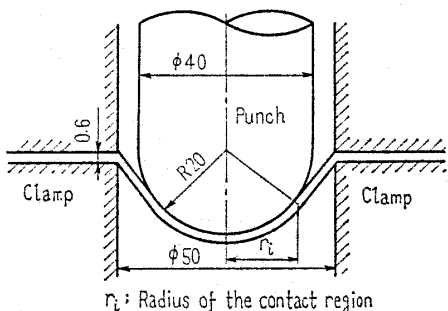


図 8 数値計算に用いた工具の幾何学的モデル図

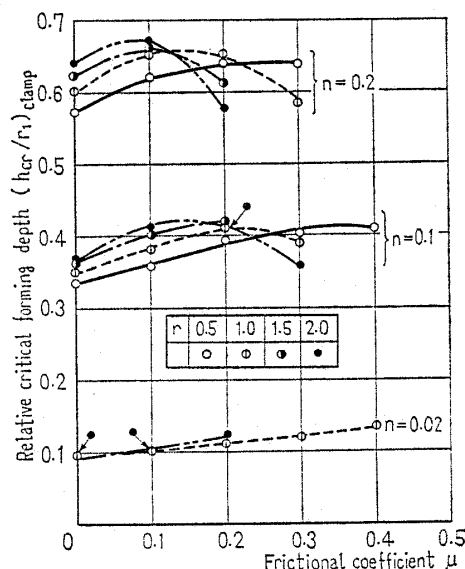


図 9 限界張出し深さにおよぼす μ, n, r の影響 (理論値)

~0.2 を採用する。図 9 および 10 に計算結果を示す。以後、特にふれない限り図 5 (a) に示した記号を用いることにする。図 9 は相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプ (ここに r_1 はポンチ半径) と摩擦係数 μ との関係を示す n 値および r 値をパラメータとして示したものである。図 10 は相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプと r 値との関係を n 値および μ をパラメータとして示したものである。これらの図から次の事実が読みとれる。

(1) 相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプ が最大値を示す摩擦係数 μ が存在し、その μ の大きさは $n = 0.1 \sim 0.2$ の場合、 $0.1 \sim 0.2$ の範囲にある。

(2) 同一の n 値に対し r 値が大きくなる程、また同一の r 値に対し n 値が大きくなる程相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプ が最大値を示す摩擦係数 μ はしだいに小さくなる。

(3) n 値が大きくなると相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプ は著しく増加するが、 r 値の影響は特定の摩擦係数 μ を境として逆になっている。すなわち、相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプ は摩擦係数 μ の小さい範囲では r 値が大きい程大きくなり、摩擦係数 μ がある程度大きくなると r 値が小さい程大きくなる。

r 値および摩擦係数 μ の限界張出し深さへの影響の程度は n 値のそれに比較してかなり小さい。

ここで上述の結果が示される意味について若干の考察を行うことにする。そのため計算結果を次のように整理してみる。図 11 は $n = 0.2, r = 1.0$ の場合につ

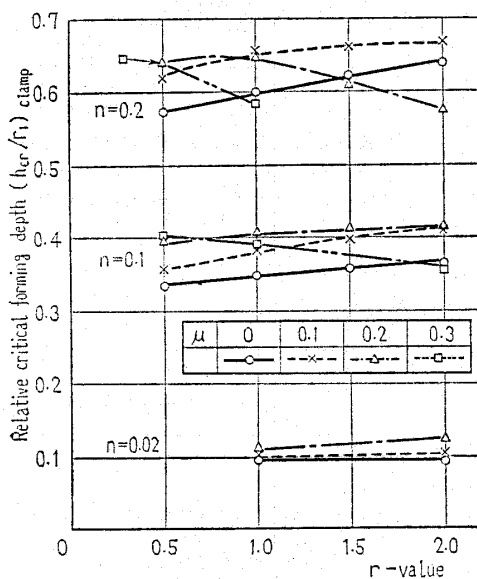


図 10 限界張出し深さにおよぼす r 値の影響 (理論値)

いて拡散くびれ発生直後における子午線方向ひずみ ϵ_ϕ の子午線方向分布を摩擦係数 μ をパラメータとして、初期半径位置に対して示したものである。図には拡散くびれ発生条件を満たした分割要素範囲が示されているが、その範囲が多少広いように見える。しかし、一つ前のステップは成形深さで 0.4 mm 以内にあり、最大 0.4 mm の誤差で限界張出し深さが求められたことになる。摩擦係数 μ が大きいと比較的外側にひずみが集中し、 μ が小さいと中心側にひずみが集中しやすくなることが看取される。 μ が中程度の適当な大きさをとる時 (図では 0.1) 全体的に ϵ_ϕ が大きくなり、ひいて、限界張出し深さが最大になったものと考えられる。図 12 は $n = 0.2, \mu = 0.1$ の場合について、 ϵ_ϕ の子午線方向分布を、 r 値をパラメータとして初期半径位置に対して示したものである。 r 値が大きくなる程拡散くびれ発生位置は外側に移動している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ここには示さないが同様な傾向は n 値についてもみられる⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。従って、 r 値、 n 値が大きくなる程 μ を適度に小さくして拡散くびれ発生位置を中心側にもどすことが、限界張出し深さを高める要因となるのである。

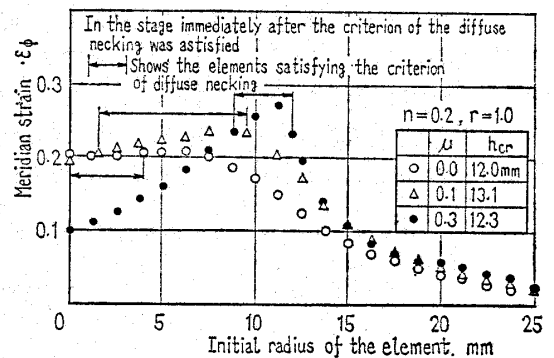


図 11 ϵ_ϕ の分布におよぼす摩擦係数の影響 (理論値)

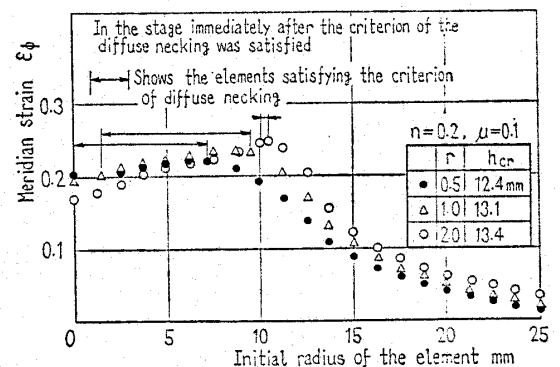


図 12 ϵ_ϕ の分布におよぼす r 値の影響 (理論値)

4. 摩擦係数の測定結果

3章で述べた計算結果を実験的に検証するに先立ち、純粹張出し成形におけるポンチ頭部と材料面間の摩擦係数を推定する実験を行う。摩擦係数の大きさは主として温度、相対すべり速度、すべり距離および面圧によって支配されるものと考えられる。本実験では、温度は19~25°Cと変動が比較的少ないので、温度以外の因子がとりうる量的範囲を理論計算の結果から推定してみる。

ポンチ速度を実験で用いた0.15 mm/sとし、拡散くびれ発生時期までの張出し深さ、円周方向ひずみ、ポンチと材料面間の接触角、円周方向応力および子午線方向応力を用いて上記因子を理論から算出すると表4に示すようになる。

潤滑材としては表5に示す4種類を用い、できる限り広い摩擦係数範囲を実現しうるように工夫した。図13は表4の条件に近い相対すべり速度0.03 mm/s、面圧2 kgf/mm²における摩擦係数 μ のすべり距離に対する変化をみたものである。松脂潤滑材を除けば、0.5~1 mm以後のすべり距離では摩擦係数 μ はほぼ一定の値となり、かなり安定した値が得られる。これに対し松脂潤滑材の場合には、実験中、摩擦係数 μ は変動しやすく定常値を求めるのは困難であったが、すべり距離として、およそ2 mmをとることとした。図14は牛脂黒鉛混合剤を例にとって、相対すべり速度0.03 mm/sおよびすべり距離2 mmの場合について、

表4 ポンチ頭部の摩擦面条件 (理論値)

相対すべり速度	0.01~0.04 mm/s
すべり距離	0.8~3.6 mm
面 圧	1.6~1.8 kgf/mm ²

表5 摩擦係数値 (実測)

実験条件: すべり距離 2 mm
相対すべり速度 0.03 mm/s
面 圧 約 2 kgf/mm²

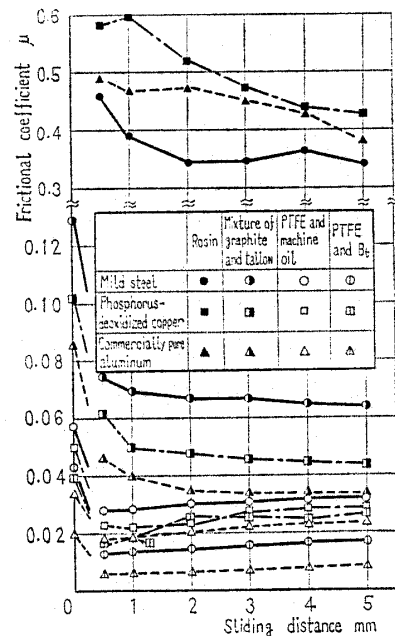
潤滑材	軟鋼板	アルミニウム板	銅板	
PTFE* +Bt**	変動範囲	0.006~0.007	0.020~0.025	
	平均値	0.014	0.007	0.023
PTFE* +マシン油	変動範囲	0.030~0.035	0.016~0.023	0.023~0.032
	平均値	0.033	0.020	0.028
牛脂黒鉛混合剤 (3:1)	変動範囲	0.047~0.067	0.031~0.055	0.048~0.053
	平均値	0.057	0.043	0.051
松 脂	変動範囲	0.268~0.391	0.473~0.586	0.508~0.520
	平均値	0.330	0.530	0.514

* PTFE (テフロン) 膜 厚さ 0.05 mm

** 高粘度鉱油 Bt (ブライトストック)

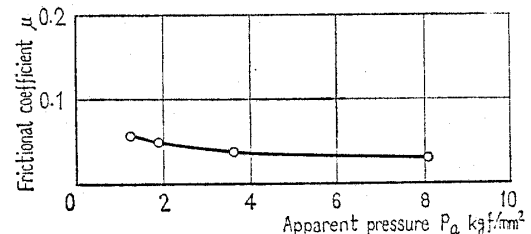
面圧の摩擦係数におよぼす影響をみたものである。面圧の小さい領域で摩擦係数 μ は多少増大する傾向はあるものの、その量はわずかで、みかけの平均面圧 p_a の値で2 kgf/mm²をこえればおよそ一定の値を示すことがわかる。他の潤滑材についてもおよそ類似の傾向が示された。

結局、上述の表4に示した摩擦条件範囲における実験を行って見た結果、相対すべり速度0.03 mm/s、すべり距離2 mm および面圧2 kgf/mm²とすれば、球頭ポンチによる純粹張出しの摩擦面条件に近似し、しかも、いずれの潤滑材に対しても摩擦係数を比較的安定して精度よく測定しうることがわかった。よって以後は、この条件における値を用いることとする。表5にその結果得られた摩擦係数 μ の変動範囲および平均値を示す。



Conditions: Relative sliding velocity 0.03 mm/s
Normal pressure about 2 kgf/mm²

図13 摩擦係数の測定



Conditions: Metal commercially pure aluminum sheet
Sliding distance 2 mm
Relative sliding velocity 0.03 mm/s
Lubricant: Mixture of graphite and tallow

図14 摩擦係数への面圧の影響

5. 純粋張出し実験結果

図 15(a) および (b) は各種材料について 4 章で述べた手法で測定した摩擦係数 μ の平均値と相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプとの関係を示すものである。同図 (a) は n 値が比較的大きく変化する材料群について、また同図 (b) は r 値が比較的大きく変化する材料群について示したものである。また図 16 は相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプに対する r 値の影響を示すものである。図 15 には張出し深さの測定値の変動範囲が示してある。温度、湿度など摩擦係数 μ に影響をおよぼす因子が実験日によって変動するため限界張出し深さのある程度のばらつきはまぬがれないようである。しかし短時間の間にまとめて行った実験の再

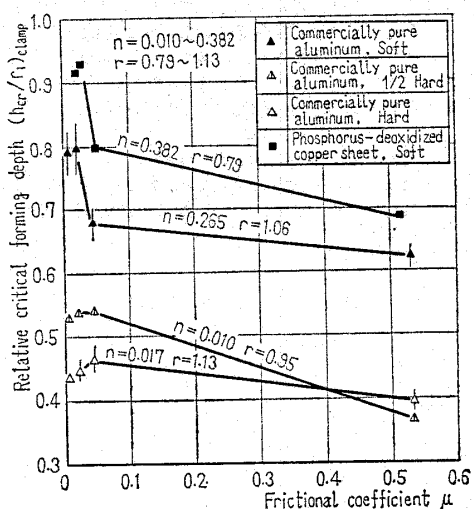
現性はきわめて良好であった。これらの図から以下の事実がわかる。

(1) 相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプが最大となる摩擦係数の存在が実験によっても確認された。従来この事実が実験によって確認された例を聞かないが、この場合の摩擦係数値は非常に小さく 0.01~0.03 の範囲であることがわかる。前述の計算結果の 0.1~0.2 に比べると 1 けた低い。理論における仮定および計算プロセスから生ずる誤差は、多少ともまぬがれたいが、これが絶対値の低い摩擦係数に比較的大きな影響をおよぼしたための食違いと考えられる。

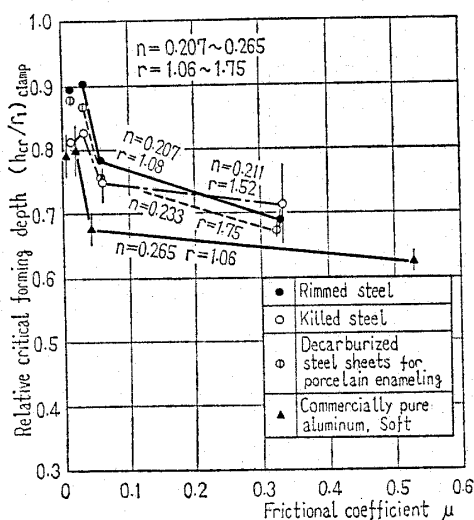
(2) 素板の n 値が大きくなる程相対限界張出し深さ (h_{cr}/r_1) クランプが最大を示す摩擦係数 μ は小さくなる傾向がうかがえる。しかも、 n 値が比較的大きい場合 ($n=0.207\sim0.382$)、摩擦係数 μ が 0.02~0.05 の範囲において限界張出し深さは急激に増大している。実際の現場で張出し加工を行う際、ほとんどの場合 n 値が 0.2 より大きな材料が使われ、またポンチ頭部・材料面間の摩擦係数 μ は 0.05 より大きい場合が多いと思われるので、潤滑をよくすれば限界張出し深さは著しく増大することが期待される。

(3) 図 16 に示すように r 値 (平均の r 値) の影響については、 n 値 (平均の n 値) も同時にいくらか変化しているため、かなりのばらつきがみられその影響は明らかではない。しかし図 10 に示された計算結果と矛盾するような傾向はみられないようである。

以上のように、計算結果は実験結果と定性的には良い一致を示すことが結論される。実験では n 値、 r 値

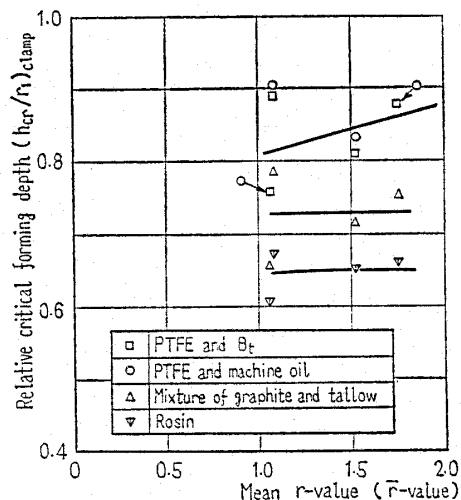


(a) n 値の影響



(b) r 値の影響

図 15 限界張出し深さにおよぼす摩擦係数の影響 (実験値)



Conditions: Metals Mild steel and commercially pure aluminum
 $n=0.207\sim0.265$

図 16 限界張出し深さにおよぼす r 値の影響 (実験値)

の変化範囲が独立に自由に選べないため材料特性値と摩擦係数 μ の影響が必ずしも明らかにされない部分もあるが、上記の計算と実験の定性的一致からみて計算によって示された前述の定性的結論は実際にもほぼ成り立つものとみて大きな間違いはないものと考えられる。

6. む す び

各種金属薄板の摩擦試験および純粹張出し実験を行って限界張出し深さにおよぼす工具・材料面間の摩擦係数および材料特性値(n 値, r 値)の影響を理論と実験の両面から検討し、以下の結論を得た。

(1) 限界張出し深さの実測値は一般に摩擦係数 μ が減少するに伴い増加してゆくが、摩擦係数 μ が0.01~0.03以下になると多少低下する。すなわち限界張出し深さの向上にとって最適の摩擦係数が存在する。この傾向は理論によっても確認された。

(2) 上述の最適摩擦係数 μ は n 値, r 値が大きくなる程小さくなる傾向を示す。

(3) 限界張出し深さは n 値が増せば例外なく増加するが、 r 値の影響は複雑である。限界張出し深さと

r 値の関係は摩擦係数 μ がある程度低い場合(計算では $\mu \leq 0.1 \sim 0.2$)正相関, μ がある程度高い場合逆相関となることが計算結果から推定される。この結果は実験で確認されるにはいたらなかったが、少なくとも実験結果と食違うことはないようである。しかしその影響度合いは比較的小さい。

(4) n 値が0.2より大きい材料では摩擦係数 μ が0.05より小さくなれば限界の張出し深さの格段の向上が期待される。

文 献

- (1) Hill, R., *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, **193** (1948), 281.
- (2) Hill, R., *J. Mech. & Phys. Solids*, **1** (1952), 19.
- (3) 山田, 東京大学生産技術研究所報告, **13-7** (昭 36), 217.
- (4) 吉田・ほか 8 名, 理化学研究所報告, **41-5** (昭 40-9), 208.
- (5) 吉田・宮内, 機誌, **69-568** (昭 41-5), 591.
- (6) 小森田・ほか 2 名, 理化学研究所報告, **42-4** (昭 41-7), 139.
- (7) 宮内・ほか 2 名, 塑性と加工, **9-86** (昭 43-3), 139.
- (8) 日本機械学会塑性加工研究会, 塑性と加工, **9-87**(昭 43-4), 262.
- (9) 林, 塑性と加工, **10-107** (昭 44-12), 917.
- (10) 河合・ほか 2 名, 機論, **36-284** (昭 45-4), 681.
- (11) 田辺, 第 42 回塑性加工シンポジウム, 塑性加工学会関西支部(昭 48-2), 33.
- (12) Kaftanoglu, B., *Wear*, **25** (1973), 177.
- (13) 河合・ほか 2 名, 機論, **40-338** (昭 49-10), 2956.
- (14) 河合・ほか 2 名, 機論, **39-326** (昭 48-10), 3181.