日本金属学会誌 第47巻 第6号 (1983) 533-538

各種アルミニウム板の深絞り加工における速度効果

花 木 香 司* 加 藤 健 三*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 47, No. 6 (1983), pp. 533-538

Speed Effect in Deep Drawing of Various Aluminium Sheets

Koji Hanaki* and Kenzo Kato*

Eight kinds of industrial aluminium sheet, i.e., 1050, 1100, 3004 and 5052 of both annealed material (O) and half-hard material (H/2), are used.

According to the tensile test by an instron type machine, r value, which is an important property for the press formability, scarcely varies with the strain rate.

Speed dependence of the flow stress is evaluated by m value. The figure of m value for various aluminium sheets is less than 10^{-2} , and the range of these values is narrow. However, m value of these materials apparently decreases with the amount of alloying elements and with the hardness which results from the tempering. This means the decrease of the fraction of thermally activated component in the dislocation motion, for example, cross slip. Flow stress is higher for the material in which the cross slip is more difficult to occur. As a result, m value is inversely correlated to the flow stress through the thermally activated processes.

These m values influence the drawing load and the fracture load in the Swift's cupping test. But LDR defined as the forming limit hardly depends on m value, because strain rates of stretching portion and drawing portion are of the same order; the variation of deformation resistance with drawing speed is the same in both the portions. The relative speed of material to the tool surface in each portion changes by a few orders, contrary to the strain rate. Characteristics of the liquid lubricant vary widely with speed. Material in the drawing portion is better lubricated than that in the stretching portion, because the relative speed of the former is higher than that of the later.

Speed effect of LDR is concluded as speed effect of the lubricant.

(Received February 4, 1983)

Keywords : speed effect, deep drawing, aluminium sheets, m value, thermally activated process, limiting drawing ratio

I. 緒 言

アルミニウムの深絞り性は今も不明な点が多く⁽¹⁾, その解明が待たれている. 互いに矛盾するような報告が生まれる一因として, 工具寸法の違いに基づく加工特性の変化, すなわち寸法効果⁽²⁾, 加工速度の違いに基づく加工特性の変化, すなわち速度効果⁽³⁾に注目する必要がある. 寸法効果は字句の示すごとく実験室的スケールと実作業スケールとの差であり, 幾何学的比例関係の不一致というシミュレーションの仕方の不十分さによる問題にすぎない.

しかし速度効果は, 異なる速度での実験結果の対照の際に補正因子として考慮すべき効果であるにとどまらず, その効果の解明は種々の現象の本質的理解の手助けともなる課題である. 本研究は調質材を含む 8 種類のアルミニウム板の深絞り速度による深絞り加工限界, 深絞り力等の変化を実験により求め, 引張り試験により求めたひずみ速度依存指数 m 値との関連に注意しつつ, その変化の原因を検討した.

II. 実験装置および供試材

本実験に用いた深絞り試験機におけるポンチ荷重およびポンチ行程の測定系の概略図を Fig.1 に示す. ポンチ荷重はポンチを支持するポンチベースにひずみゲージをはり

Fig.1 Outline of drawing apparatus and measuring system.

* 大阪大学工学部金属材料学科 (Department of Materials, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita)

付けポンチ行程はラムと直結した鉄製アームに変位計の鉄芯を固定し、動ひずみ計を介して電磁オシログラフで計測記録した。深絞り速度は、0.8, 10, 530 mm·s⁻¹ の3速度で、以後、低速、中速、高速と呼ぶ。高速試験の際にはアキュムレータを用いた。使用した円筒カップ用工具諸元は **Table 1** に示すとうり、平頭、球頭のポンチ2種による実験を行った。深絞り加工限界は swift cupping test により求めた。潤滑剤は、マシン油 120 番、ひまし油の液体潤滑剤2種類とジョンソン・ワックス 700 番、以後、J.W. (700) と略記する固体潤滑剤1種類である。これら潤滑剤は素板のダイス側、ポンチ側の両面に塗付した。しお押え力は福井の式⁽⁴⁾で計算し、負荷した。深絞り実験は 25±2°C に保った恒温室中で行った。引張り試験はインストロン型材料試験機を用い、JIS 13 号 B 試験片で行った。ひずみ速度依存指数 m 値を求めるために平均引張りひずみ速度 0.005, 0.08 s⁻¹ に該当する2水準の試験速度で引張った。

Table 1 Dimensions of punch and die.

Tool name	Diameter/mm	Profile radius/mm
Flat punch	45	5.0
Spherical punch	45	22.5
Die	49	5.0

Table 2 Chemical composition of specimens. (mass%)

Material	Al	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
1050	99.77	0.01	0.07	0.14	Tr.	Tr.	Tr.	Tr.	0.01
1100	99.16	0.13	0.11	0.56	0.02	0.01	Tr.	Tr.	0.01
3004	97.14	0.13	0.18	0.50	1.00	1.00	0.02	0.01	0.02
5052	97.01	0.03	0.09	0.25	0.03	2.40	Tr.	0.18	Tr.

伸びは手製の伸び計⁽⁵⁾により計測記録した。用いた材料は板厚 0.8 mm の 1050, 1100, 3004, 5052 の軟質材 (O 材) と半硬質材 (H/2 材)、計 8 種類の市販アルミニウム板である。供試材の化学組成を **Table 2** に示す。

III. 引張り試験結果

チャック間距離は一定で、試験速度も一定下での引張りであるが、2水準の試験速度におけるひずみ速度には材料によって有意差が認められたので、それらの値を含めて機械的特性値を示したのが **Table 3** である。1条件につき5枚の試片を引張り、圧延方向、45° 方向、90° 方向の結果を平均して示した。 m 値は公称ひずみ 5% における流れ応力の二つのひずみ速度における σ_h, σ_1 より $m = \ln(\sigma_h/\sigma_1) / \ln(\dot{\epsilon}_h/\dot{\epsilon}_1)$ で計算した値である。 r 値は、ひずみ速度による有意的变化が認められなかったので平均値で示した。

Table 3 Mechanical properties of specimens.

Material	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	Yield strength σ_Y/MPa	Tensile strength σ_B/MPa	n^*	C/MPa^{**}	m^{***}	$\bar{r}$
1050 (O)	0.005	27	77	0.28	144	0.012	0.89
	0.066	29	80	0.28	150		
1050 (H/2)	0.006	106	106	0.07	131	0.009	1.49
	0.088	106	112	0.06	141		
1100 (O)	0.004	40	97	0.27	181	0.009	0.91
	0.067	31	100	0.26	184		
1100 (H/2)	0.006	119	127	0.09	175	0.008	0.84
	0.077	116	130	0.10	181		
3004 (O)	0.005	81	178	0.19	296	0.002	0.79
	0.061	82	179	0.19	297		
3004 (H/2)	0.005	209	234	0.10	362	0.001	1.17
	0.100	202	234	0.10	370		
5052 (O)	0.005	103	206	0.22	322	0.002	0.80
	0.063	106	204	0.24	327		
5052 (H/2)	0.006	190	256	0.13	385	-0.002	1.33
	0.091	162	255	0.15	400		

*, **, *** indicate the respective variables in $\sigma = C\dot{\epsilon}^n \epsilon^m$.

試験速度が同じでも、ひずみ速度がことなるのは試片形状が、比較的均一変形しやすい短冊状試片ではなく、チャック部と平行部の幅が異なる試片であるため、標点間内のひずみとそうでない箇所のひずみのレベルが材料特性によって異なるためである。 n 値の大きい O 材ではつかみ部の移動による変形量は試片全体のひずみでカバーされるが、 n 値の小さい材料では試片平行部近辺に変形が集中する。ために引張り試験速度が同じでも、標点間内ひずみ速度は材料によって、特に n 値によって異なるのである。

ところで上述の各種材質について変形抵抗の指標としての引張り強さ σ_B と m 値との関係をプロットすると Fig. 2 のようになった。微妙な材料間の比較ではないので、ここでは引張り強さ σ_B を変形抵抗の目安とした。超塑性材の m 値と比較して問題にならぬほど小さな m 値であるが、 σ_B との間かなりの相関がある。明らかに m 値は σ_B の増加とともに減少している。この結果は次のように説明できる。一般に変形応力に占める熱活性化成分の割合が小さいほど応力のひずみ速度依存指数は小さくなくなると考えられる⁽⁶⁾。また合金元素の増加や加工による変形抵抗の増加は、転位のクロススリップ等で代表される変形応力の熱活性化成分の減少につながっている。従ってこれら熱活性化成分をパラメータとして σ_B と m 値の逆相関が見られたのである。

Fig. 2 Correlation between flow stress represented by tensile strength σ_B , and m value.

IV. 深絞り試験結果

深絞りポンチ速度に対して、深絞り加工可能最大素板直径をポンチ直径で除した値、すなわち限界絞り比 LDR をプロットしたのが Fig. 3 である。上半分の (a) は平頭の、下半分の (b) は球頭の結果である。図中の 3 区分は 3 種の潤滑剤に対応している。左から、マシン油、ひまし油、J.W. (700) の結果である。平頭、球頭とも液体潤滑剤では速度とともに LDR は上昇し、固体潤滑剤 J.W. (700) では速度とともに LDR は下降、あるいは一定となっている。液体潤滑剤における結果は、ポンチ形状に対して異なる LDR の速度効果を示した軟鋼⁽³⁾における場合とは違って

いる。また平頭では材料による LDR の水準に大きな差はないが、球頭では材料による差が大きい。この事象については後で検討する。

素板直径が絞り比にして 1.91 となる同直径素板を用いて各種潤滑剤、各種速度において深絞り加工を行った時の最大絞り力をまとめたのが Fig. 4 (a), (b) である。(a) は平頭、(b) は球頭の結果で、球頭における 2 種類の材料とその他のデータの欠落は、絞り比 1.91 が LDR に近いため、5 枚の内、4 枚以上の素板が絞り抜けなかったためである。材料による絞り力の大小は Table 3 の σ_B の大小、すなわち変形抵抗の大小とよく対応している。球頭の値が平頭の値より若干小さいのは軟鋼⁽³⁾と同様であり、速度依存にはポンチ形状の影響が認められない。液体潤滑剤における、速度上昇による絞り力の減少は、混合潤滑に占める流体潤滑成分の増加⁽⁷⁾に基づく潤滑特性の大幅な改良による。J.W. (700) では液体潤滑と異なり速度にともなう絞り力の低下は見られない。絞り力レベルの大きいアルミニウム材は速度増加による絞り力増加も小さくなる傾向を示しており、変形抵抗の大きいものほど m 値が小さくなることと符号している。もちろん潤滑特性の速度依存分を実測絞り力より差し引けばよりこの傾向がはっきりすることは明らかである。Fig. 5 は LDR における破断力を平頭、球頭について示したものである。破断力は限界直径より大きな素板になると急減するのでバラつきやすく絞り力ほど詳細な検討を加えられない。しかしポンチ形状の破断力に及ぼす影響は絞り力の場合とことなり歴然としている。材種の違いによる破断力の開きは、平頭では絞り力と同様に大きいが球頭では小さく、材種による準位も平頭の場合と

Fig. 3 Variation of LDR of various aluminium materials with drawing speed, lubricant and punch shape.

Fig.4 Variation of drawing stress $P_m/(S_0\sigma_B)$ of various aluminium materials with drawing speed, lubricant and punch shape, where P_m is maximum punch load, S_0 cross sectional area of cup.

Fig.5 Variation of fracture stress $P_f/(S_0\sigma_B)$ of various aluminium materials with drawing speed, lubricant and punch shape, where P_f is fracture load.

異なっている。LDR は、平頭では材種による差が小さく球頭では大きいので破断力の場合の話とは逆であり矛盾しているように見える。破断しにくい、すなわち破断力の大きいものほど LDR が大きいと考えられるからである。これを Fig.6 で説明する。変形抵抗の異なる各種材料の絞り比・絞り力曲線において LDR が同じ、すなわち破断線

Fig.6 Load-drawing ratio diagram showing variation of fracture load with mode A and B of forming limit line.

A の場合、材種による破断力のレベル差は絞り力と同様である。LDR が材種によって異なる 1 点鎖線 B の場合、材種による破断力のレベル差はほとんどない。本材料の平頭の場合は A タイプであるが、球頭の場合はそうではない。

球頭の場合、硬質材の破断力が平頭の場合の値より急落しているのが特長である。これは球頭が張出し性の強い変形をしいるために伸び不足の硬質材の破断力低下を招いたとは単純に言い切れない。なぜならフランジ部はポンチ部の伸びで絞り込まれるのではなく、強度で絞り込まれるからである。球頭では、その形状よりポンチ中央部から変形が開始されその部分が硬化して、ついで隣接円周部に変形が及びその部分が硬化し……、というメカニズムでポンチ部全体が硬化し、その硬化とバランスする力でフランジ部が絞り込まれるということをミクロ的には繰り返しながら絞り加工は進行すると考えられる。ポンチ部において隣接円周部を変形させるに要する素板中央部要素の硬化に必要な変形量は低 n 値材ほど大きくなり、本来伸びの少ない低 n 値材は容易に破断してしまうのである。平頭ではポンチ平底部全域に素板が最初から接触しており、硬化して隣接部を変形させなくてはならない領域はポンチ肩部とダイスの間隙という狭い帯状域だから低 n 値材でも問題は少なかったのである。

いずれにしても硬質材の破断力低下は Fig.6 のケース B のような材種による LDR の変化と対応している。

V. 深絞り加工限界 (LDR) の速度依存

Table 3 の結果よりプレス成形特性、 r 値、 n 値がひずみ速度によってほとんど変わらないとすれば、残された期待される速度効果は深絞り速度に対する材料のポンチ部とフランジ部のひずみ速度の違いである。もし深絞り速度に対してポンチ部のひずみ速度がフランジ部のひずみ速度以上に大きく変化するなら、そして m 値が正であり変形抵抗がひずみ速度とともに上昇するなら LDR は大きくなる。すなわち深絞り速度が増すとともにフランジ部材料もポンチ部材料もともに硬くなるが、フランジ部材料に対するポンチ部材料の相対強さが増すからである。逆に m 値が負の場合はフランジ部とポンチ部の挙動が逆となり、深絞り速度とともに LDR は劣化する。そこでポンチ部とフラン

ジ部のひずみ速度を検討したのが **Table 4** である。フランジ部のひずみ速度はひずみ増分理論によるフランジ部の解析⁽⁸⁾により計算した値である。実用的には十分大きい絞り比 1.91 における時の値で、最大荷重点のフランジ各部における相当ひずみ速度分布のダイス上の絞り方向に対する面積平均値である。ポンチ部における値は実測値で、以下の手法による結果である。円形平板素板にスイレ・ゲージをはり付けて絞ったのではひずみが大きいためにゲージはく離してしまう。そこで最大ポンチ荷重点手前の半絞り製品をあらかじめ準備し、絞り方向に対して傾角 45° となるポンチ肩中央に標点間距離 4mm のひずみゲージをはり付け、各深絞り速度で試験し子午線方向伸びひずみ速度を検出した結果である。ゲージはり付け場所を除いて素板全面を J.W. (700) 潤滑、絞り比 2.044 における 1050 材の結果である。各種深絞り速度でポンチ部もフランジ部も同オーダーのひずみ速度で変形することがわかる。ポンチにかぶさったままであるポンチ肩中央部の高ひずみ速度は意外な結果に思われる。しかし、これは前述したミクロな変形機構、すなわち変形は各箇所と同時に起こっているものではなく、拡散くびれ発生までの 1 軸引張りの変形機構と同様に深絞り加工でも不均一に変形が伝ばしていくことを考えれば容易に理解される。すなわちフランジを若干引き込み、その変形によりフランジが加工硬化して変形が停止する、次に張り出し部に変形が集中し、張り出し部に変形硬化する。すると今度はフランジ部が引き込まれるという両部分の交互変形を考えるのである。となると両部分のひずみ速度がオーダのみならず数値的にもかなり近い値であると考えても支障あるまい。その結果、深絞り速度の増加にともなうポンチ側、フランジ側のひずみ速度による材料の硬化は同じであり、材料効果はほとんど期待できない。

残りの検討項目はポンチ側とフランジ側の潤滑特性の速度依存度の違いである。カップ表面の光学顕微鏡観察⁽⁷⁾より、本研究の条件では液体潤滑使用時の潤滑状態は混合潤滑状態であり、 μ 値は油の粘度 η 、素材板金の工具に対する相対速度 V 、板金・工具間に作用する面圧 p によりほぼ決められる。本研究は両面潤滑であり、ポンチ側もフランジ側も同じ η であり、作用・反作用によりポンチ側とフランジ側の総力はほぼ同じであり面圧 p も両工具ではほぼ同

Table 4 Variation of strain rates in stretching portion and drawing portion of blank with drawing speed.

Drawing speed/mm·s ⁻¹	Strain rate/s ⁻¹		
	Punch shoulder portion		Flange portion
	Flat punch	Spherical punch	
0.8	0.01	0.04	0.03
10	0.15	0.3	0.3
530	3	5.7	12

じオーダであるため、 μ 値が異なるとすればポンチ側の V_p とフランジ側の V_f の違いが主因ではないかと考えられる。そこで Table 4 の $\dot{\epsilon}$ よりポンチ側とフランジ側における相対速度を推測して見た。すなわちひずみ速度は $\dot{\epsilon} = \Delta L / \Delta t \cdot 1 / L_0$ であるから、Table 4 の実測ひずみ速度に着目要素長さをかけてやると一端固定時の他端移動速度となる。ところで球頭のポンチ中央、あるいは平頭の平底部から肩部に移る点は一応、固定端と見なせるから、これら境界点からポンチ肩部中央点までの距離を標点長さとする要素を考え、その長さ l_0 を Table 4 のひずみ速度にかけやるとポンチ肩部中央点の上限相対速度が求まる。本研究では l_0 の値は平頭では 3.9 mm、球頭では 17.7 mm である。これらポンチ面に沿う速度と計算により求めたフランジ部の平均移動速度を対比して示すと **Table 5** のようになる。ただし絞り比は 2.67 の素板の結果である。上限相対速度と呼称したのはポンチ中央から肩中央まで **Table 4** のような実測ひずみ速度で変形することなく、ポンチ肩中央素板要素のポンチ面に対する実際の速度はこの値以下と考えられるからである。ところで混合潤滑域で μ が相対速度 V の増加とともに小さくなることはそのまま深絞り加工における絞り性の向上にはつながらない。絞り速度の増加に対して素板のポンチに対する速度 V_p が素板のダイスあるいはしわ押えに対する速度 V_f と同様に变化するならば絞り性の向上は期待出来ないからである。**Fig. 7** は工具に対する素板の速度を Table 5 を参考にして模式的に示したものである。Table 5 の結果は次のことを示唆している。素板のポンチ面に対する速度は平頭ポンチより球頭ポンチが、ポンチ面よりフランジ部が 1 桁ずつ大きくなっている。そして深絞り速度に対する、相対速度の変化の最も大きいのもフランジ部そして球頭ポンチ部、

Table 5 Variation of relative speed of stretching portion and drawing portion to tool with drawing speed.

Relative speed to tool surface/mm·s ⁻¹		
Punch shoulder portion V_p		Flange portion V_d
Flat punch	Spherical punch	
0.04	0.45	0.8
0.59	3.39	10
11.7	64.4	417

Fig. 7 Relative speed of stretching portion V_p to punch and that of drawing portion V_f to die.

平頭ポンチ部の順である。すなわち深絞り加工の速度効果における LDR 向上の第 1 因はフランジ部の μ の速度による減少である。ポンチ面上の μ も減少するとは言え、相対速度の変化はフランジ部の半分以下である。球頭の高速で破断力が中速より劣化し、LDR も同様に下る軟鋼のような例⁽³⁾は本アルミニウム材では見られなかったが、Table 5 の高速の球頭ポンチ面上での相対速度値の大きさから軟鋼での結果を理解しうる。すなわち軟鋼のように LDR が高くて十分ポンチ面になじむ材料ではポンチ接触面上での潤滑効果すなわち速度の影響が一層強調されるからである。

以上の結果ならびに考察より本報告での速度効果は、フランジ部とポンチ部における素板の相対速度の、深絞り速度に対する変化の違いに基づく潤滑効果であると結論しうる。

VI. 結 論

各種工業用アルミニウム板は、硬い材料ほど m 値が小さく、変形抵抗の速度依存性が小さくなる傾向を示す。ために材料面からの、深絞り加工における速度効果への独特の

寄与が考えられた。しかしそれでは説明され得ず、深絞り加工の変形機構にからんだ潤滑特性の速度効果であると判明した。

終わりに本実験の遂行に御協力いただいた当時院生の英 晃之君(現在：(株)中山製鋼所)と青木 彦治君(現ブラザー工業(株))の両君に謝意を表します。

文 献

- (1) アルミニウム材料のプレス成形性(シンポジウム)昭和 50 年 8 月 26 日 軽金属学会・日本塑性加工学会共催。
- (2) J.F.Wallace : J.Iron Steel Inst., **184**(1956), 144.
- (3) H.T.Coupland and D.V.Wilson : Sheet Metal Indust, **35**-370(1958), 85.
- (4) 福井伸二, 吉田清太, 阿部邦雄 : 東大理工研報告 8-1(1954), 23.
- (5) 花木香司, 加藤健三 : 塑性と加工, **20**-217(1979), 138.
- (6) 井村 徹 : 結晶の強度, 材料科学講座 **3**, 橋口隆吉, 近角聡信編, 朝倉書店, (1968).
- (7) 花木香司, 加藤健三 : 塑性と加工, **22**-240(1981), 49.
- (8) 花木香司, 加藤健三 : 塑性と加工, **21**-232(1980), 422.