

深絞り加工における速度効果



花 木 香 司*・加 藤 健 三*2

Speed Effects in Deep Drawing

Koji HANAKI and Kenzo KATO

1. は じ め に

プレス速度の遅い液压プレスによる製品が機械プレスの製品と肩を並べて今も共存している事実はプレス成形に及ぼす速度の影響の大きさ、複雑さを示唆している。もちろん、製品によつてはどうしても複動プレスでなくてはならないとか、大きな成形荷重が必要とか等の他条件によつて液压プレスが利用される事情を差し引いて考える必要があるが、圧延機の高速度化ほど、プレス機の高速度化が声高に叫ばれなかつたのも、この辺の事情を反映しているのであろう。しかし製品の中には経験的感覚によつて、あるいは惰性的にプレス機械が選択されているケースも少なくない。低速成形のみを可としてきた製品の中には、現象の本質から高速でも可であり、いやむしろ高速の方が好ましい場合も少なくないと思われる。もちろん、その場合は生産性の立場からも高速成形が推奨される。このように適切なプレス速度の選定は極めて重要である。

また、加工には実操業で処理しうる問題もあれば、実験室で解明せざるを得ない問題もある。後者の場合、実験で得られた結果と実操業の結果とが良好な対応を示さないことがよくある。実験で良かった潤滑剤が実操業では良くなかつた等の例がそうである。このような時には現場プレスと実験プレスとの速度が一致しているかどうかまず注意されねばならない。さらに、速度効果の研究は実操業で生じている種々の現象の本質を理解する上でも有効なアプローチとなる。

ところで、プレス加工において成形された板金製品は、せん断、曲げ等の加工を除くとその変形状態から張出し変形と深絞り変形とに大別される。図1の(a)のように素板の表面積を増加させ素板金属の伸びによつて容器を造るのが張出し成形であり、(b)のように容器の底となる部分を除く素板の外周部をダイス穴内に絞り込ん

で容器とするのが深絞り成形である。結果として張出し容器は肉厚が薄く、深絞り容器は壁部の肉厚が厚い。たいていの板金製品はこれら両変形が同一製品中に共存している複合成形品である場合が多い。代表的なプレス製品である自動車の外板部の主要な全パーツについて変形状態が調査され、まとめられた結果が図2¹⁾に示されて

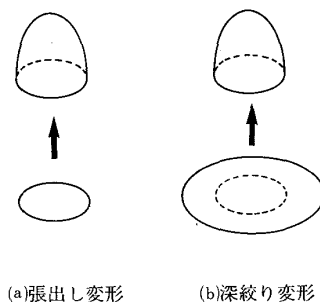


図1 張出し変形と深絞り変形による同一形状製品

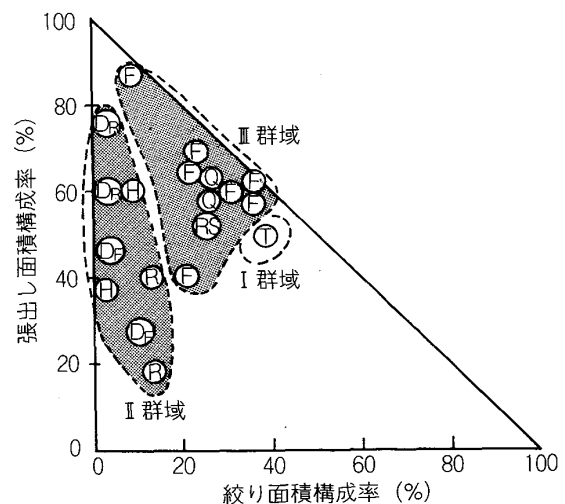


図2 成形の群域図¹⁾

昭和 61 年 8 月 21 日受付 (Received Aug. 21, 1986) (依頼技術資料)

* 大阪大学工学部助手 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

*2 大阪大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University)

Key words: deep drawing; rapidity; hydraulic press; productivity testing; experience configuration; parameter theory; autobody; review.

いる。あるパーツの全面積に占める深絞り変形の割合を横軸に、張出し変形の割合を縦軸に取って、そのパーツの変形状態が示されている。丸印内の記号はパーツ名で、例としてRはリヤドア、Tはトランクである。いずれのパーツも図の左上半域にあり、張出し変形成分の割合が勝っていることを示唆している。しかし成形性、すなわち割れ等が問題となったパーツはⅢ群域の物であり両変形の比率より、深絞り構成率の絶対値が重要であることを示唆している。このように標題で示される課題は深絞りをプレスと読み変えても良い重要な課題である。

2. 現象論的説明

COUPLAND 達はこの課題と本格的に取り組んだ最初の人達である²⁾。それまでは部分的な報告が多く、それゆえ全体像が掴めず逆に混乱を助長していた。破断することなく絞り込み得る最大素板直径を使用ポンチ直径で除した値、すなわち深絞り成形性の指数 LDR が平頭ポンチでは正の速度依存性を示し、球頭ポンチでは負の速度依存性を示す図3の結果を彼等は報告した。図4はポンチ荷重・ポンチストローク曲線の素板直径による変化を示した模式図で、直径の増加と共に最大絞り力が増し、破線で示す破断力に最大絞り力が達する素板直径から LDR が決定される。COUPLAND らは同一直径素板の最大絞り力、加工限界直径素板の破断力の各条件における比較等によつてこれら両ポンチによる速度効果を現象論的に説明している。 LDR 、破断力、最大絞り力の3特性の速度依存性から深絞り加工の速度効果が初めて論じられたのである。ところで図5は筆者らの結果³⁾を示したもの

で図3の速度効果とはかなりその様相が異なっている。図5の0.05~1 m/minで、球頭ポンチでは LDR が増しており、平頭ポンチでは一定である。このような違いは潤滑剤の違いもさることながら主としてダイス肩半径、ポンチ肩半径等の工具諸元の違いによる。実験条件が違えばいろいろな結果が得られそうであり、現実には得られるため、速度効果の研究は疎んじられてきたといつて良い。そこで、まず速度効果を現象論的に把握するために筆者らは図6で示すようにポンチ荷重・深絞り速度図の中に3特性を書き込み、速度効果を分類した。作図のための条件は(1)同一速度で大きい素板の最大絞り力は小さな素板のそれより大きい、(2)同一速度で表した破断力は最大絞り力の上限である、の二つである。図の実線、 $D_1, D_2, D_3, \dots$ は素板直径がそれぞれ $D_1, D_2, D_3, \dots$ の素板の各速度における最大絞り力を結んだもので、等径素板最大絞り力線ともいふべきであるが以

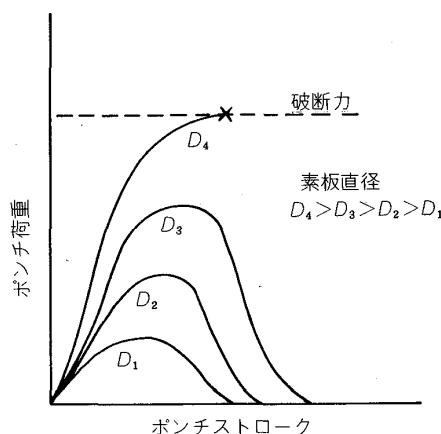


図4 深絞り加工における荷重・ストローク曲線の素板直径による変化と加工限界 (LDR)

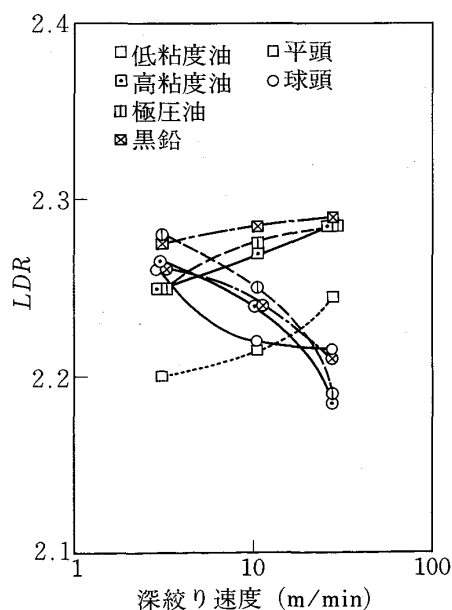


図3 深絞り速度による LDR の変化 (COUPLAND らの結果)

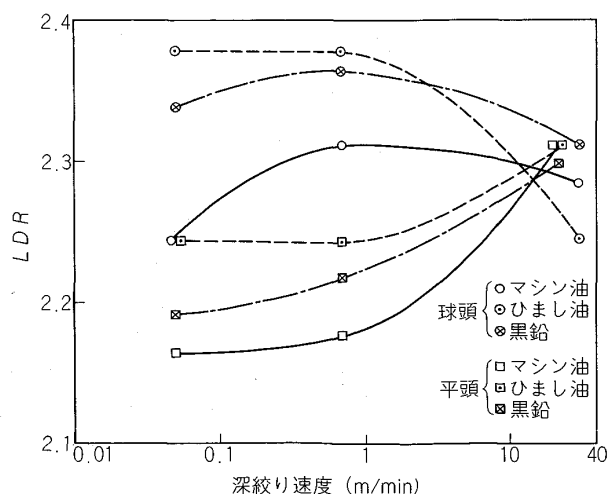


図5 深絞り速度による LDR の変化 (筆者らの結果)

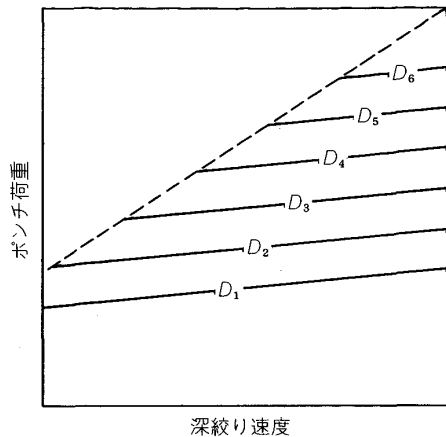


図6 ポーチ荷重・深絞り速度図における LDR , 破断力, 最大絞り力の関係 (-----破断力, ——最大絞り力)

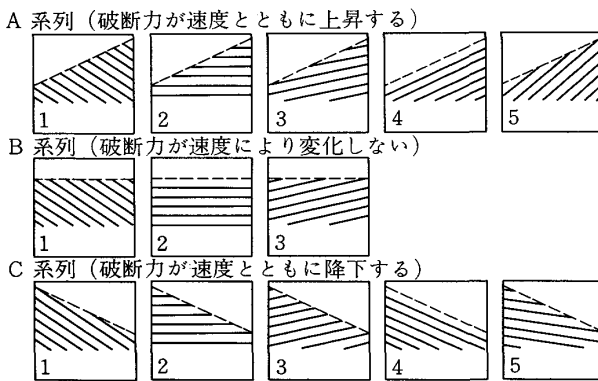


図7 ポーチ荷重・深絞り速度図で考えられる可能な速度効果のタイプ

後最大絞り力線と称する。 D_1 等の記号を添えなくとも上の実線は、下の実線の素板直径より大きい直径の素板の最大絞り力線であることは自明であろう。破線は速度による破断力を示した破断力線である。速度とともに破断力線との交点をなす最大絞り力線は上昇しているから、この図では LDR が速度と共に上昇するケースである。条件 (1), (2) を満たす速度効果の全タイプを示したのが図7である。破断力の速度依存性によつて3系列に区分した。速度とともに LDR が上昇するのは A-1, A-2, A-3, B-1, C-1 である。筆者らの平頭ポンチの結果はどの潤滑剤でも破断力が速度とともに上昇する A 系列で、COUPLAND らの黒鉛潤滑を除く平頭ポンチの結果はいずれも速度とともに破断力は劣化するが、 LDR は上昇する C-1 である。筆者らや COUPLAND らの結果に引用されない A-4, A-5, B-3, C-4 等は単に概念的なタイプでなく、ポンチ頭部には B-1 あるいは B-2 で使用したポンチ形状と潤滑剤を、フランジ側には A-3,

A-4, A-5 いずれかの潤滑剤を塗付して深絞りすれば B-3 が得られる。筆者らの球頭ポンチでは、0.05~1 m/min の間で A 系列, 1~30 m/min の間で B 系列と二つのタイプからなるように、実際の速度効果は図7で示す13種の基本タイプの適当な組合せにより説明される。

なお荷重低下によるダイス摩耗の軽減というメリット、一方製品の不良率が増すというデメリットのあるケース、すなわち速度増加により荷重が低下すると同時に LDR も低下するというケース、破断力は増すのに LDR は低下するケースなど興味ある事例の存在をこの分類図は示唆している。

3. 応力波と材料の変形

机の上に置かれた物の上端を掴んで持ち上げるとその動きが徐々に下部に伝わり間をおいてその下端が机から離れる現象を目撃した人は誰もいない、上端の動きはあつという間に下端に伝えられ我々にはその物が一体となつて動いたとしか見えない。しかし応力波の伝播速度はいくら早いといつても有限であるため上端での動きが恐ろしく早いと下端の動きがそれに付いていけなくなり、上端は上方に変位しているのに下端は机についたまといふ状況が顕著になり、上端部に伸び歪みが顕在化してくる。そしてますます上端に歪みが局在化し、かつ大きくなり、下端は何の拘束も受けていないのに力の作用点である上端が破断するに至る。衝撃破断問題を定性的に記述すれば上のようなになる。理論による説明は今なお不十分なままである⁴⁾。衝撃問題に重要な力の作用点の加減速に触れず、変位の伝播方程式を解くに当たっては境界条件として速度一定を用いる KARMAN⁵⁾ による手法は現実的とは思われない。解かれた臨界衝撃速度の実験による確認もあいまいである。ともあれ実験による値⁶⁾を臨界衝撃速度としてもクランクプレスによるプレス速度程度の打撃では衝撃変形の問題を考える必要は無い。本来、脆く、それゆえ力の作用点での不均一変形に敏感でおうおうにして被打撃点で破壊しやすい材料が日常多く見られるためにあたかも衝撃問題が身近な問題であるように錯覚されやすい。まずは材料の問題、材料の歪み速度依存性が問われなければならない。

金属の変形の素単位というべき転位の運動は熱的に活性化される過程であるが故に温度すなわち速度の材料特性に及ぼす影響は重要である。リュースダース帯あるいはそれに関与する下部組織等が複雑な熱活性化過程である C, N 元素を固溶する炭素鋼は、微妙なところで複雑な速度依存を示す⁷⁾ ので注意がいるが、普段プレスしない金属それも BCC や HCP 結晶構造の金属をプレスする以外はクランクプレス程度の速度での伸び不足による製品不良を心配することはない。

歪み速度依存指数 m 値は、超塑性では結晶粒界の粘弾性挙動を反映し、普通の金属では粒内の転位の運動の

速度依存あるいは熱活性成分の大きい転位のクロススリップの容易さを反映する⁸⁾など、そのよつてのメカニズムは種々さまざまである。しかし超塑性状態のみならず普通金属の引張試験におけるくびれ伸びをも m 値は良く表す⁹⁾。もちろん、 m 値が求められていれば液圧から機械プレスにその材料を供した時の変形抵抗の上昇率を推測できるのはいうまでもない。超塑性材料では m 値自身が歪み速度依存を示し、低速で m 値が大で高速で小となる。冷延鋼板では歪み速度とともにくびれ伸びが増すという報告¹⁰⁾からするとその m 値は歪み速度とともに増していると思われる。

図8は5種類の板金材について深絞り性の指標となる r 値の歪み速度依存を示す。室温における歪み速度のアップは室温以下での低温引張りで見なせる故に新たなすべり系が活動するとは考えられず、 r 値の変化は Zn

で若干認められる程度である。Zn の変化は双晶変形の増加によつてい。

いずれにしても引張試験などの基礎試験により材料特性の歪み速度依存性を把握しプレス速度を選定することが好ましい。

ところで引張試験でクロスヘッド速度が分かつたところでその試片の歪み速度が決まらないのと同様に、深絞り速度が分かつても素板の歪み速度は決まらない。しかし引張試験のデータをいかすためには素板の歪み速度を知る必要がある。理論解析¹¹⁾によると最終的に最も変形するのはカップ口縁部でこの部分は素板外周長さからカップ口縁部長さへの一軸圧縮変形なのでこの歪みを深絞り所要時間で除して歪み速度とすることができる。その際、与えられた直径のカップ高さを素板の表面積とカップ表面積とが同じとして求め、それをポンチ速度で除して所要時間とすれば良い。

4. カップ表面と摩擦

材料特性の評価に次いで避け難い厄介な塑性加工における問題は使用される工具と被加工材料の界面における摩擦の問題である。もちろんここでは摩擦そのものの話ではなく、速度によるその変化について述べる。写真1は素板を絞り抜かないでポンチを途中止めしたときのカップの写真である。左は液圧プレスに該当する低速における、右は機械プレスに該当する高速での結果である。フランジ平坦部にあつて最も肉厚が厚いためにしわ抑え力が集中したフランジ外縁部とダイス肩部に光沢があるのが低速カップには認められる。一方高速カップには肉眼で見る限りこの写真のように光沢部は見られなかった。速度増加によつて著しく潤滑効果が高められたのである。写真2は速度による表面の変化を光学顕微鏡観察した写真である。絞り比 1.91 (= $\phi 86$ mm) のアルミニウムの結果である。工具との接触を示す白地が速度とともに減少し、同じ速度なら粘いひまし油の方がマシン油より白地が少い。ところでこの低速ではひまし油の最大絞り力の方がマシン油のそれより大きかつた。写真か

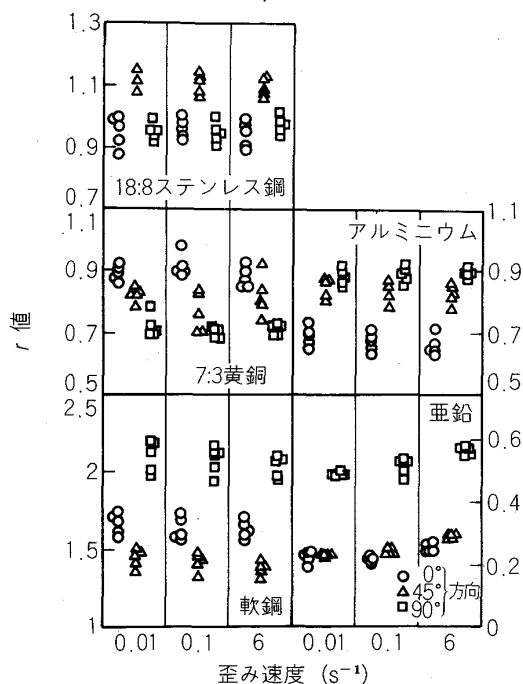


図8 各種材料の r 値の歪み速度依存性

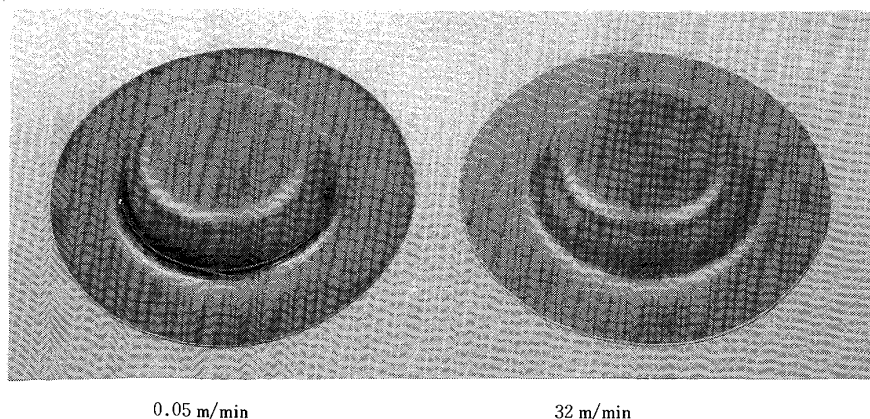


写真1 半絞りカップの外縁部とダイス肩部における光沢の速度による変化 (18:8 ステンレス鋼・ひまし油潤滑)

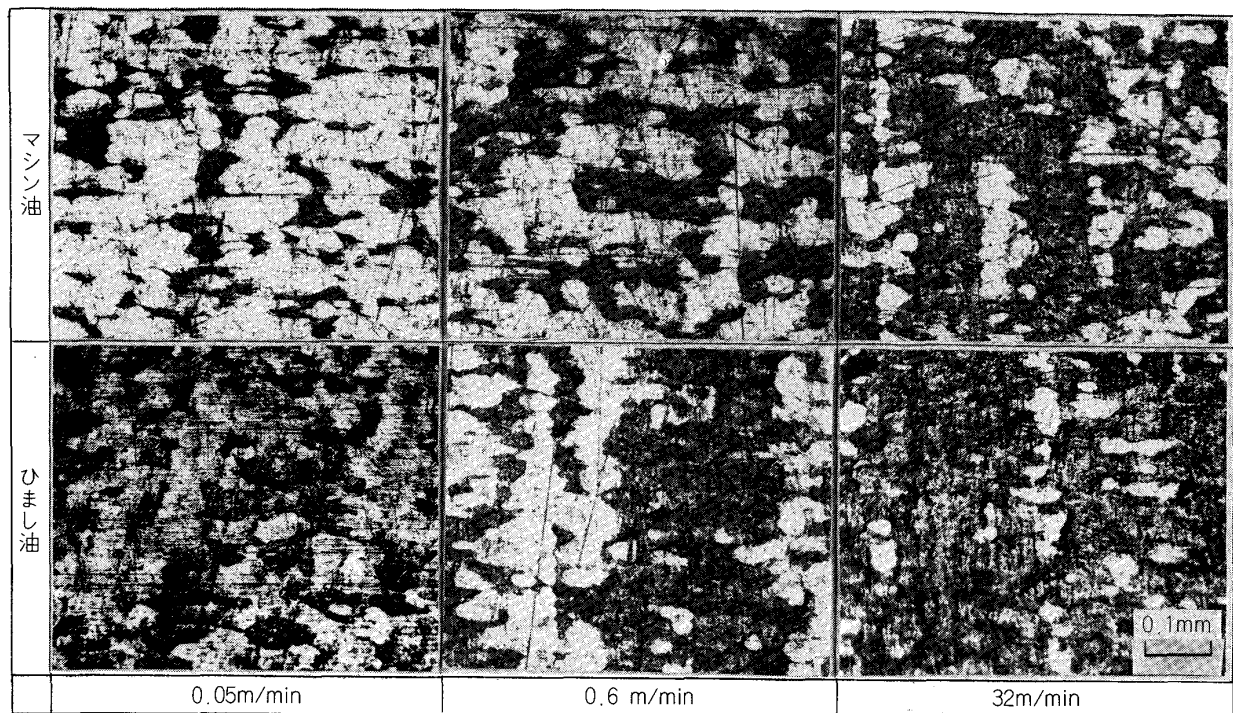


写真2 カップ壁部表面の潤滑剤・深絞り速度による変化

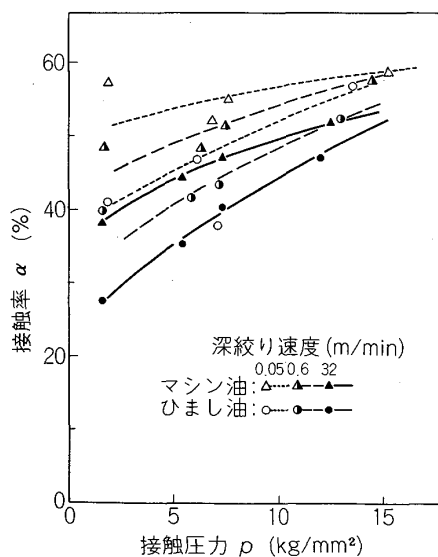


図9 潤滑剤・深絞り速度をパラメーターとした時の接触率と接触圧力の対応

ら見てひまし油の接触率はマシン油より小さいにもかかわらず、しかしひまし油の白地には無数の傷が認められる。混合潤滑状態では接触率および接触部の潤滑性すなわち境界潤滑性の両者が重要である。

図9はアルミニウムから18:8ステンレス鋼と変形抵抗の異なる4種類の材料について2種類の潤滑剤の下に3水準の速度で深絞りした結果をその時の工具との面

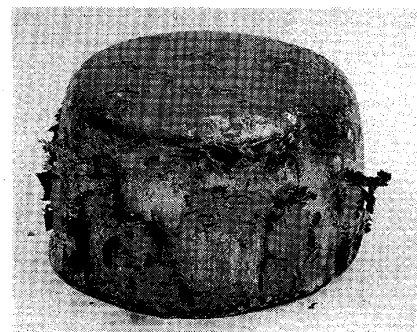


写真3 潤滑剤である黒鉛膜をまとう絞り抜けカップ

圧に対して接触率をプロットした図である。面圧は半実験的に求めた値である¹²⁾。同速度、同潤滑剤のデータがそれぞれ曲線で結んで示されている。マシン油の低速では圧力が減つてもほとんど接触率は小さくならないが、高速では明らかに小さくなり、ひまし油では低速で既に面圧の減少にともなう接触率の減少が生じている。これは工具と素板の間に生じる油溜りの油に、速度が早くなると、そして油の粘度が増すと圧力が生じそして増加することを示唆している。また圧力が増すにつれてある接触率に漸近していく傾向がある。いずれにしても速度による潤滑性能の向上は明らかである。写真3はコロイド状黒鉛の原液中に素板を浸漬し乾燥後深絞りした

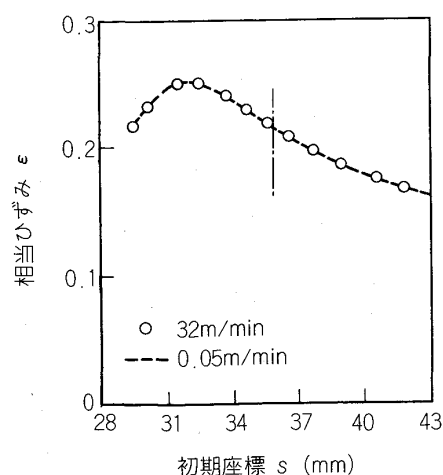


図10 カップの歪み分布におよぼす速度の影響

カップの写真である。黒鉛膜が下地素板の深絞り変形に追従できず排除されることなく平坦フランジからカップ壁へと運ばれている。物理的ならびに化学的吸着能いずれも無くただ素板とダイスの間に介在しているだけの小粒は最も排除されやすいはずである。しかし面圧がかかり相対すべりが生じている状況下では異物のさらなる粉碎そして散逸はあつても排除はむずかしい。潤滑膜の厚みに比べて接触面の広さが極めて大きい加工法においては潤滑剤は被加工材と工具の間にトラップされるというより、むしろ排除され難くて残つているというべきであろう。ちなみにアルミニウムの黒鉛潤滑においてはアルミニウムの表面の変形後の粗度は自由表面の粗度に近い、にもかかわらず最大絞り力他他の条件のそれより大きく、アルミニウム板および黒鉛膜、両者の深絞りになつてたものと思われる。

ところで図10は変形抵抗の歪み速度依存性の大きいZn素板のフランジ部の歪み分布のプレス速度による影響を見た図だが、まったくその影響は認められない。となるとプレス製品の寸法形状の違いは主に摩擦の違いに起因したものであり、同一工具における製品形状の違いから摩擦状況を知ることができる。

5. 速度による昇温効果

18:8 ステンレス鋼の同径素板の最大絞り力そしてLDRにおける破断力は速度とともに明らかに減少する図6のC-4である。しかし図9の接触圧力が12~15 kg/mmの18:8 ステンレス鋼の接触率の速度による変化の少なさは、速度による潤滑状態の向上ではなく材料の速度による軟化を示唆している。18:8 ステンレス鋼は室温近くでも加工誘起マルテンサイトを生じオーステナイト状態より硬くなる、速度による最大絞り力や破断力の低下は、速度にともなう断熱昇温効果によりMd点より素板温度が上昇しマルテンサイト生成が抑えられた

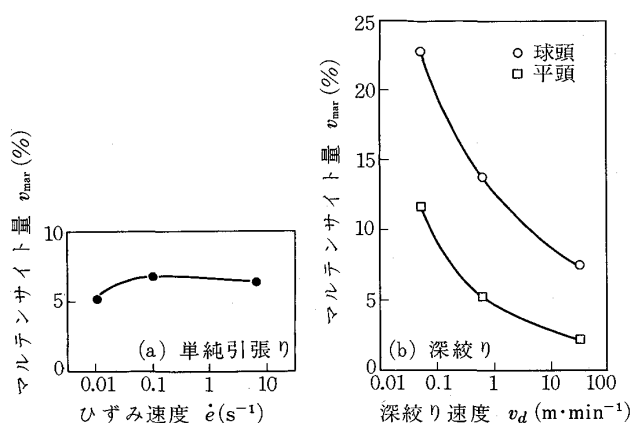


図11 18:8 ステンレス鋼の引張りと深絞り加工において生ずる加工誘起マルテンサイトの生成量とその速度依存

と考えれば説明できる。そこで破断部についてマルテンサイト量をX線回折法によりチェックしたのが図11である。左の引張試験では変化はないが、右の深絞り変形の破断部ではポンチの形状のいかんを問わず速度とともにマルテンサイト量が急減している。耐応力腐食割れ性の向上など、材料サイドからすれば18:8 ステンレス鋼の成形は明らかに高速が好ましい。問題は潤滑剤にある。素板が大きくなり荷重が増すと高速では昇温のため製品、工具とも焼付きの痕跡がはつきりしてくる。極圧添加剤の入った油あるいはエマルジョンタイプの潤滑剤などの使用によりこの問題は解決されるであろう。

ところで任意のある素板位置におけるある瞬間での素板の発熱増分と工具への伝熱による消散熱減分との和である熱により生じる素板の温度上昇を記述する温度の時間と素板の位置に関する偏微分方程式を解いて、素板や工具に生じる温度を推測するのが一般的である。しかし素板の各場所における塑性仕事と摩擦仕事の増分を塑性力学の助けを借りて求めるこのようなやつかいな手法は感心しない。適当なデータから推測できる最大絞り力と最大ポンチストロークから荷重・ストローク曲線を正弦関数で近似しそのストローク増分に対する仕事増分から発熱増分を求める方がよい。近似曲線には理論で決定し難い摩擦仕事は既に含まれているからである。それでも工具への放熱減分については工具の温度分布が絡んでくるため簡単ではない。また金型は毎回室温まで冷却され使用されることはないから、金型の昇温を考慮した解でなくてはならない。むしろ工具への伝熱を無視し、断熱状態として素板や工具における温度の上限値を知ることの方がプレス現場では重要である。

荷重 F をストローク X の正弦関数で近似

$$F = P_m \cdot \sin(\pi x / h) \dots\dots\dots (1)$$

ここで P_m は最大絞り力、 h は絞り抜けまでの最大ポンチストローク

ポンチがなす仕事 W は

$$W = \int_0^h Pm \cdot \sin(\pi x / h) dx = 2h \cdot Pm / \pi \quad \dots\dots\dots (2)$$

この仕事はすべて素板のフランジ部の絞り込みに消費されたとして昇温量 ΔT を求める.

$$\Delta T = W / A / (c S_0 t_0 \rho) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで A : 熱当量, c : 素板の比熱, S_0 : 初期フランジ部面積, t_0 : 初期板厚, ρ : 素板の密度

上式で板厚 0.8 mm の 18:8 ステンレス鋼の絞り比 2 ($=\phi 90$ mm), 最大絞り力 9 330 kg, カップ高さ 34 mm の昇温量は 128°C となつた. 18:8 ステンレス鋼の比熱, 密度はそれぞれ 0.51 J/g·K, 7.93 g/cc とした. 室温を 20°C とすると素板の達する温度は 148°C となる. この実験の潤滑剤は 120 番マシン油で引火点は 150°C, それゆえこの実験における油の焼けた臭と油煙が計算温度の妥当性を裏付けている.

また, このように大きな昇温は材料の速度依存性の検討に温度効果を常に考慮する必要性を示唆している. 歪み速度の増加を温度の低下とする結晶塑性学的検討に移る前に断熱昇温効果がクリアされなくてはならない.

6. 深絞り加工限界 (LDR) の速度依存

ところで速度による加工限界素板径の変化, すなわち LDR の速度効果は材料効果なのか潤滑効果なのか.

材料の重要なプレス成形特性 r 値は図 8 で示されるようにほとんど速度依存を示さない今, 破断が生じるポンチ部とフランジ部における板金材の歪み速度の違いに由来する材料効果が考えられる. もし深絞り速度に対してポンチ部の歪み速度がフランジの歪み速度以上に大きく変化するなら, そして m 値が正で変形抵抗が歪み速度とともに上昇するなら LDR は深絞り速度とともに増加する. すなわち深絞り速度が増すとフランジ部の板金要素もポンチ部の板金要素とともにその変形抵抗を増すものの, フランジ部に対するポンチ部の相対強さが勝るからである. もちろん m 値が負なら LDR は深絞り速度の上昇につれて劣下する.

ポンチ部におけるカップ破断歪みは HILL の不安定条件¹³⁾ よりおよその見当がつく.

不安定歪みは

$$\epsilon = \frac{\left(x^2 - \frac{2r}{1+r}x + 1\right)^{\frac{3}{2}}}{(x+1)\left\{x^2 - \frac{(2r^2+4r+1)}{(1+r)^2}x + 1\right\}} \cdot n \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる. ここで x は応力比, n は n 値, r は r 値である. 球頭ポンチでは破断該当部は等 2 軸応力状態, 平頭ポンチでは平面歪み状態として, それぞれ $x=1$, $x=r/(1+r)$ を上式に代入する. 結果として

$$\text{球頭ポンチでは} \quad \epsilon = \sqrt{2(1+r)} \cdot n \quad \dots\dots\dots (5)$$

表 1 3 水準の深絞り速度におけるポンチ張出し部とフランジ部の歪み速度の対比

深絞り速度	歪み速度 (s^{-1})				
	ポンチ張出し部				フランジ部
	平 頭		球 頭		絞り比 2.67
	理論	実測	理論	実測	理論
0.05 m/min	0.02	0.01	0.02	0.04	0.03
0.6 m/min	0.18	0.15	0.19	0.3	0.3
32 m/min	5.6	3	8.7	3.7	12

$$\text{平頭ポンチでは} \quad \epsilon = \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \cdot n \quad \dots\dots\dots (6)$$

ちなみに上式に該当 r 値, n 値を代入した 18:8 ステンレス鋼の球頭ポンチ, 平頭ポンチでの値は 0.99, 0.57 となり, 図 11 のマルテンサイト量のポンチ形状による大小関係と良く対応し, 上式による不安定歪みの値がかなり妥当であることを示唆している. ついで LDR の破断カップについて負荷開始から破断までの所要時間によりこれら不安定歪みを除し平均歪み速度を求めた結果が表 1 の理論と称する値である. 一定深絞り速度, 一定工具条件の下では材料による歪み速度の違いはほとんど問題にならないので, 表では 5 種類の材料の平均値が示されている. 実測はアルミニウムにストレンゲージを貼付して求めた結果である. フランジ部における値は最大絞り力点でのダイス面絞り方向に沿うフランジ部における歪み速度分布の面積平均値で, 理論解析¹¹⁾ に基づいている. 張出し部もフランジ部も同オーダーの歪み速度である. フランジ部はダイス穴へと絞り込まれなくてはならず, 歪み速度は深絞り速度に比例して大きくなる. しかし張出し部はポンチに張り付いたままであり意外な感がする. これは以下のように考えれば納得できる. 最初にポンチ部が張出されて変形硬化しフランジ部がその強度にバランスして絞り込まれ変形硬化して停止, 次にポンチ部に変形が集中し張り出されて硬化しそれに見合つてフランジ部がまた絞り込まれるという両部分の交互変形を考える. そうすると両部分の歪み速度が同オーダーであつても不思議はない. またポンチ部とフランジ部の歪み速度が同オーダーであることは材料の機械的特性が歪み速度により大きく変化しても, それはポンチ部でもフランジ部でも同様に生じ結果として LDR の速度依存が起きないことを示唆している.

材料効果が否定された今, 残るは潤滑効果であり, そして深絞り速度に対するポンチ部の潤滑効果とフランジ部の潤滑効果になんらかの差が生じていると考えざるを得ない.

写真 4 は変形抵抗の大きい 18:8 ステンレス鋼と小さいアルミニウムの表面状況をポンチ側から見た光学顕微鏡写真である. ポンチ側は伸び・伸びの 2 軸張出しでフランジ側は縮み・伸び変形であるため写真 2 の表面と

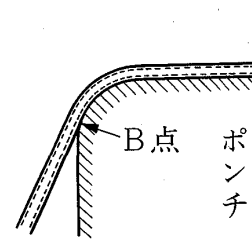
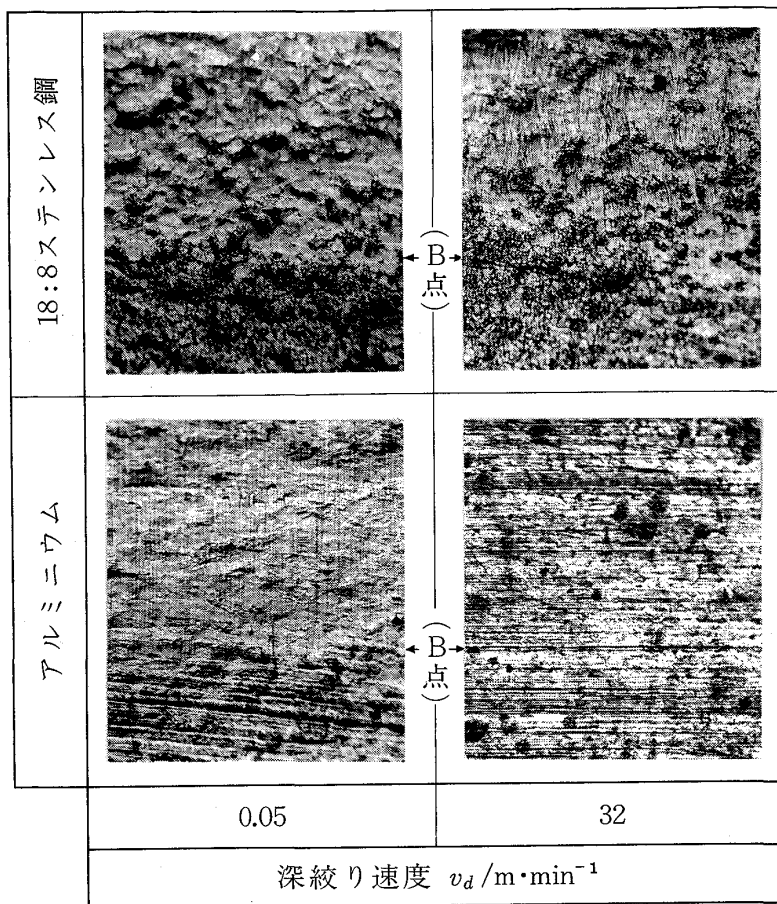


写真4 ポンチ側から見た表面に対する面圧・速度の影響

は様子がちがうが、ポンチ側でも同じような現象が生じていることをこの写真は示唆している。18:8 ステンレス鋼でもB点以下のポンチと接触していない表面に高速になるとB点以上の接触部の表面が近づく傾向が見え、アルミニウムでは低速のB点以上のポンチによる圧下修正面は高速では消え、素板の圧延模様すら保存されるに至っている。しかしこのことは、即、摩擦力が同じであることを示唆するものではない。

一般に流体あるいは混合摩擦状態では $\eta V/P$ 数が重要な変数であり、その値の増加とともに摩擦係数は小さくなる¹⁴⁾。筆者らの実験はポンチ部もフランジ部も同じ潤滑剤が塗布されている両面潤滑条件下のものであり、両部での粘度 η は同じである。またそこを通つて素板がダイス穴へ絞り込まれるダイス肩における圧力 P と素板をダイス穴へと押し込む圧力は作用、反作用によりほぼ等しい。それ故、 $\eta V/P$ 値が異なるとすれば、図12で示されるポンチ側で素板が張り出されて移動する速度 V_p と素板のフランジ部がダイスあるいはしわ抑えに対して動く速度 V_f の違いであろう。そこでストレージによる歪み値から割り出したポンチ部における上限速度と理論解析から求めたフランジ部の速度をまとめたのが表2である。フランジ部の大きな速度変化に対してポンチ張り出し部の速度変化は平頭ポンチ、球頭ポンチ

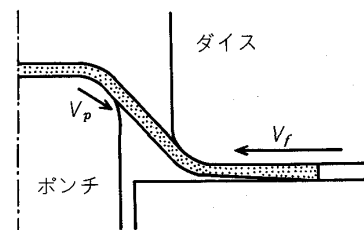


図12 素板ポンチ部とフランジ部の工具面に対する相対速度の定義

表2 3水準の深絞り速度における工具面に対する素板各部の相対速度

深絞り速度 (m/min)	速度 (mm/s)		
	ダイス側 V_f	ポンチ側 V_p	
		平頭	球頭
0.05	0.8	0.04	0.45
0.6	10	0.59	3.39
32	417	11.7	64.4

とも1/4程度でありフランジ部の潤滑効果が速度により大幅に改善されることが分かる。また球頭ポンチにおける速度は平頭ポンチより常に大きく、すなわち平頭ポンチ

より常に良潤滑状態であり、フランジ部からの力が摩擦により遮蔽されず素板ポンチ部に伝わるため破断力が低下し高速では *LDR* が劣下することが分かる。すなわち素板各部の工具に対する相対速度の違いが摩擦の違いとなり、*LDR* のさまざまな速度効果が惹起されるのである。

ところで、このような議論は現状の機械プレス速度範囲をしのぐ高速プレスが利用されるに至っても根本的には同じである。既述したごとく材料特性の大きな変化があつてもそれはポンチ部、フランジ部のいずれか一方に生じるのではなく、両部に生じ材料効果は相殺されてしまうからである。ただし爆発成形速度に近づきすべり変形に対する双晶変形の割合が増し、その結果 r 値が変化するなら *LDR* は変化するけれども、それゆえ $10^2 \sim 10^3/s$ 程度のひずみ速度を材料に生じしめる高速プレスでは、高速成形下での断熱昇温による油膜の焼損を含む潤滑効果の速度依存に依然として支配されるであろう。

7. 総 括

深絞り加工における速度効果はポンチ部とフランジ部の両者の競合によつて律せられるこの独特の加工法からんだ潤滑効果の速度依存によつてゐる。速度とともに加工限界が向上するもの、劣下するもの、ポンチ荷重が増すもの、減るもの等、13 種類ものタイプの速度効果があり、生産現場ではどのタイプに担当プレス品が該当するか見きわめ適切な速度を選ぶ必要がある。あるいは潤滑剤の変更、製品形状の修正等により、より好ましい

タイプに近づけるよう努力すべきである。熱活性化過程が多少複雑で材料特性の歪み速度依存がはつきりせず機械プレス程度の速度でも伸びが急減しそうな材料以外は高速成形は推奨される。特に断熱昇温による軟化が起こる 18:8 ステンレス鋼では速度増加によるポンチ荷重の減少そして成形後の品質上からも高速でプレスすることが好ましい。

終わりに、結晶塑性の歪み速度依存について有益な助言を承つた大阪大学工学部金属材料工学科、山口正治助教授にお礼申し上げます。

文 献

- 1) 小林徳夫, 村田庫一, 石垣秀生: 塑性と加工, **9** (1968), p. 451
- 2) H. T. COUPLAND and D. V. WILSON: Sheet Metal Industry, **35** (1958), p. 85
- 3) 花木香司, 中川 晃, 松村光展, 加藤健三: 塑性と加工, **17** (1976), p. 45
- 4) W. J. M. TEGART: 金属の力学的性質 (1966), p. 39 [丸善]
- 5) T. V. KARMAN and P. DUWEZ: J. Appl. Phys. **21** (1950), p. 987
- 6) 福井伸二, 河田幸三, 清野次郎: 東京大学航空研究所集報, **3** (1963), p. 361
- 7) 周藤悦郎, A. HANSSON: 塑性と加工, **11** (1970), p. 351
- 8) 花木香司, 加藤健三: 日本金属学会誌, **47** (1983), p. 533
- 9) A. K. GHOSH: Trans. ASME, **7** (1977), p. 264
- 10) 酒井賢一郎: 塑性と加工, **13** (1972), p. 542
- 11) 花木香司, 加藤健三: 塑性と加工, **21** (1980), p. 422
- 12) 花木香司, 加藤健三: 塑性と加工, **22** (1981), p. 49
- 13) R. HILL: J. Mech. Phys. Solids, **1** (1952), p. 19
- 14) 例えば H. CHRISTENSEN: Proc. Instn. Mech. Engrs, **186** (1972), p. 421