

冷間における開放型ダイス押出加工

福 井 伸 二
清 野 次 郎

Studies on the Cold Open-die Extrusion of Metals

By

Shinji FUKUI & Jiro SEINO

Abstract: The relation between working pressures and extruded heights in the cold open-die extrusion was expressed analytically, applying an E. Siebel's equation originally proposed for compression. The calculated results thus obtained were compared with the experimental ones obtained using a testing machine, under various experimental conditions, that is, dry or smooth frictional conditions between tools and metals and various dimensions of test pieces and tools. The tested materials were work hardened 2S aluminium and 65/35 brass, and annealed 2S aluminium. The metal flow patterns on the central sections of worked pieces were also studied. These experimental results were in good agreement with those obtained from the equations except for annealed metal and for dry conditions of the surfaces of the upper dies.

概 要

開放型ダイスによる押出加工における加工力と盛り深さの関係を、簡単な E. Siebel の式を応用して計算してみた。一方 2S アルミニウム、65/35 黄銅の加工硬化材および焼鈍材を用いて材料試験機による実験を行ない、種々なる条件による計算結果と比較検討を行なった。その他材料の流れ模様、硬さ分布、欠陥等についても言及した。

その結果、硬化材においては計算とよい一致を示したが、焼鈍材および上型面を無潤滑にした場合は多少相違する場合があった。

1. 緒 言

円孔を有する開放型を上型として、円柱または円板を軸方向に圧縮し型下部材料を外側に張出す加工は*、小型機械部品の加工法に多く使用されている。筆者等 [1] はボルト頭部を製作する据込加工において、この盛り加工を応用しようと試みた。

この加工に関しては古くは Pomp, Munker および Lueg [2] が軸対称上下方向の盛り型鍛造実験を行っており、彼等はそこで加工速度、工具形状、材料流れ等を 0.07% 炭素鋼を用いて調べている。最近では筆者等研究室の工藤 [3] が、平面歪問題として速度場を用いて盛り加工をも解析的に研究した。

* この加工は開放型ダイスによる押出加工であるが、ここでは盛り加工と名付ける。

本報告では、円柱の圧縮加工において、端面摩擦を簡単に取扱うことによって圧縮力を求める E. Siebel [4] の方式を盛り加工の解析に適用し、材料の変形抵抗は加工中一定として、上下面の摩擦の非常に少ない場合と、上面は無潤滑で下面は摩擦のない場合の二種について計算を行なってみた。計算結果を吟味するため、変形抵抗が一定に近い加工硬化させた 2S アルミニウム、65/35 黄銅と、一方焼鈍した同じアルミニウムを用い、開放型ダイスの孔径、試片高さ、摩擦条件を変えて実験を行ない、計算結果と比較検討を加えた。またこの加工法によりおこる一二の製品欠陥、材料の流れ、硬さ分布等についても言及した。

2. 計算方法

この加工法の解析に使用した計算方法は、E. Siebel が 1932 年に最大剪断応力説を使用し、端面摩擦のある円柱の圧縮力を求めたやり方を踏襲した。それを示すと (1) 式のごとくである。

$$P = K_{fm} \cdot F \cdot \{1 + \mu \cdot (2r/3h)\}, \quad (1)$$

ここで

P : 圧縮力, μ : 端面摩擦係数,
 F : 圧縮面積, h : 円柱高さ,
 r : 円柱の半径, K_{fm} : 材料の平均変形抵抗.

この (1) 式を盛り加工に適用する場合、第 1 図 (b) において中心の $bcfg$ は変形せず、かつ $bb'cc'$ 面は工具との摩擦がないものと考え、リング状部分 $abefcdgh$ が変形後に $a'b'e'fc'd'gh'$ になると仮定して盛り力 P を求めると、(1) 式から

$$P = \pi \cdot K_{fm} \cdot \{(r_2^2 - r_1^2) + (2\mu/3h)(r_2^3 - 3r_2r_1^2 + 2r_1^3)\} \quad (2)$$

となる。ゆえに K_{fm} , μ を適当に選んでやれば盛り力は (2) 式から簡単に求められる。

また下型面を摩擦がなく滑らかとし、上型面が無潤滑と仮定する場合は、 eh 面を対称にした $2H_0$ の試片が上下から盛り上がると考えればよく、無潤滑面は最大剪断応力が働くことと仮定すると、この場合の盛り上がり力は次式のごとくなる。

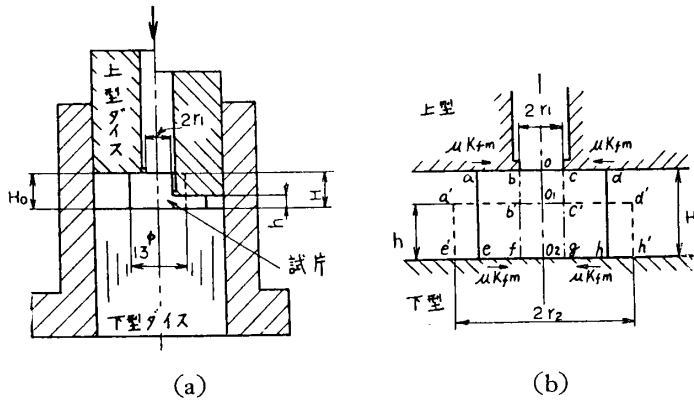
$$P = \pi \cdot K_{fm} \cdot \{(r_2^2 - r_1^2) + (1/6h)(r_2^3 - 3r_2r_1^2 + 2r_1^3)\}. \quad (3)$$

そこでこの (2), (3) 式を用いて各種条件下の盛り力 P を計算してみた。それが第 3 図から第 7 図の曲線である。

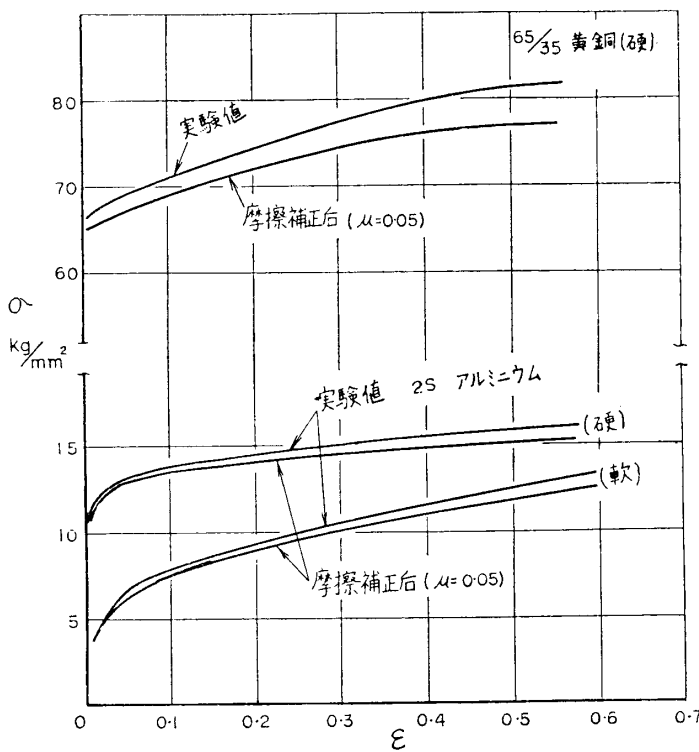
3. 実験方法

実験に用いた工具形状は第 1 図 (a) のごとくであり、試験はすべて材料試験機を用い静的に行なった。使用した材料は 2S アルミニウムの焼鈍材および加工硬化材と、65/35 黄銅の加工硬化材である。

これら材料の平均変形抵抗を求めるために、円柱圧縮試験を行ない、(1) 式を用いて端面摩擦を補正した。その応力-歪関係を示したものが第 2 図である。潤滑剤として、Johnson's Wax #111 を用いたので、今まで筆者等 [5] 研究室においてこれら金属における塑性加工時の摩擦係数を測定した結果から、 μ の値を 0.05 とし計算を進めて行った。変形抵抗の平均の求め方は種々あるが、ここでは盛り加工の圧縮歪の半分に相当する圧縮応力を第 2



第1図 盛り加工用工具および変形様式



第2図 アルミニウムおよび黄銅の圧縮応力-歪線図

第1表 使用材料の諸性質

材 料	ビッカース硬さ	平均変形抵抗	備 考
2S アルミニウム(軟)	22	10 kg/mm ²	350°C, 1h 焼鈍
〃 〃 (硬)	46	14 〃	予加工率 60%
65/35 黄銅 (硬)	190	73 〃	〃 30%

粗くし、型および試片共ベンジン、トリクロールエチレンでよく脱脂を行なって実験した。このようにして行なった実験結果を、盛り力 P を対数目盛で縦軸に、盛り高さ $H_0 - h$

図から求めることにした。平均変形抵抗、試片硬さ、予加工率、焼鈍条件等は第1表に示してある。

第1図の上型孔径 $2r_1$ は、5, 8, 10 mm の三種にして、孔の盛り部近辺は 1mm くらいの平行部をもうけ、その先は逃げることにより試片との摩擦をへらすようにつとめた。

試片寸法は直径をすべての試片において 13 mm として、最初の高さをば 2, 4, 6, 12 mm と変えて行ない、黄銅のみ 12 mm をやめ 8 mm にした。初めに試片を工具にセットする時は、よくその中心を上型の中心に合わせて行ない、盛り過程の荷重と盛り高さ $(H_0 - h)$ 、および刻々の全高さ H を測定した。

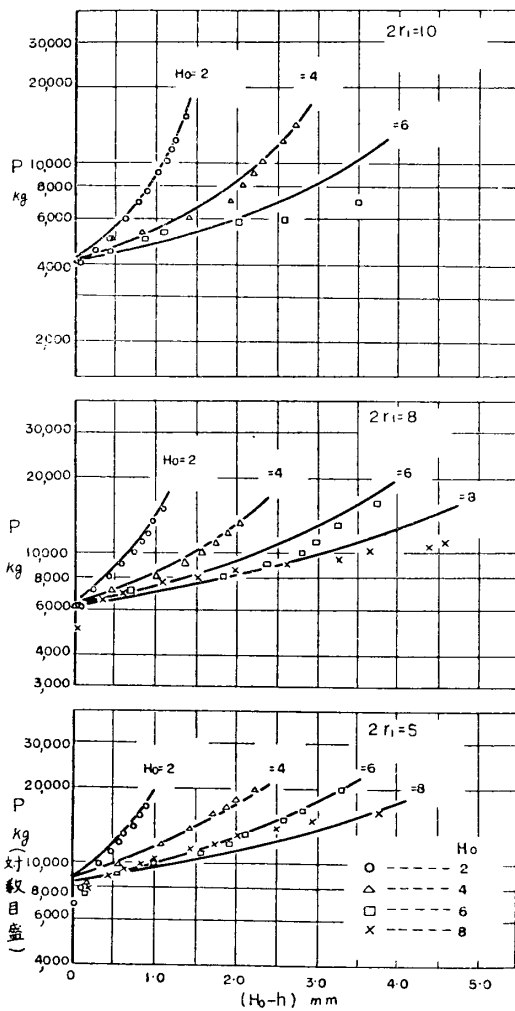
盛り加工の潤滑剤はやはり Johnson's Wax #111 を用い、無潤滑にする所以外は加工途中の測定後にもそれぞれ塗付してなるべく良好な潤滑状態を保つようつとめた。また上型面のみ無潤滑にする時は、その型面をヤスリ紙で

を横軸にとり、孔径 $2r_1$ と最初の試片高さ H_0 ごとにそれぞれプロットしたのが第3図～第7図である。最初の試片高さ、盛り上り過程の全高さの比 H/H_0 を縦軸にとって、他は同じパラメータとしたのが第8図～第12図である。

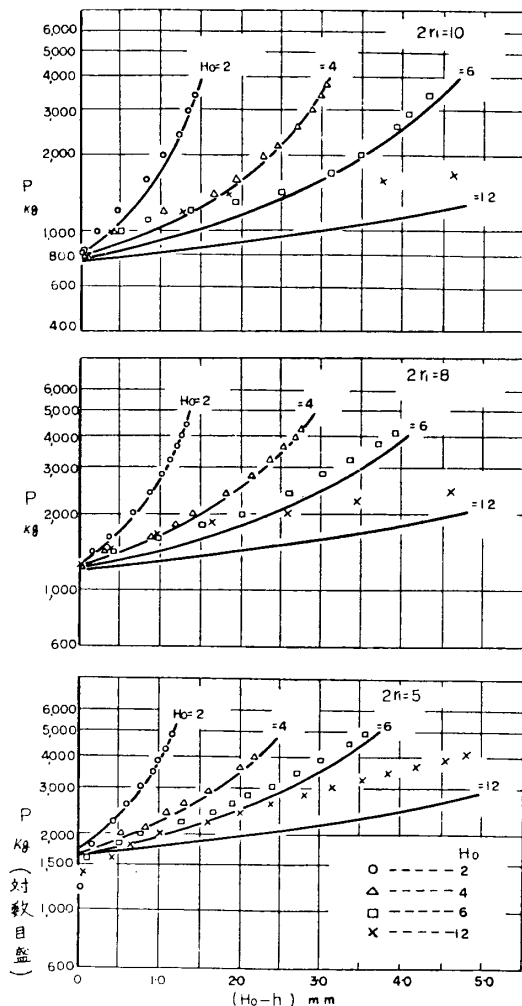
各材料の盛り上り加工した製品から適当に選んで中央断面をとり、その硬さ分布を示したのが第13図であり、いずれもビッカース硬さである。この場合の測定荷重はアルミニウムが5kgで、黄銅が10kgである。

第14図の写真は、この盛り上り加工による製品の一部を掲げる。すなわちアルミニウムの焼鈍材と加工硬化材の上下面潤滑した場合、および加工硬化材の下面のみ潤滑して上面無潤滑にした場合である。

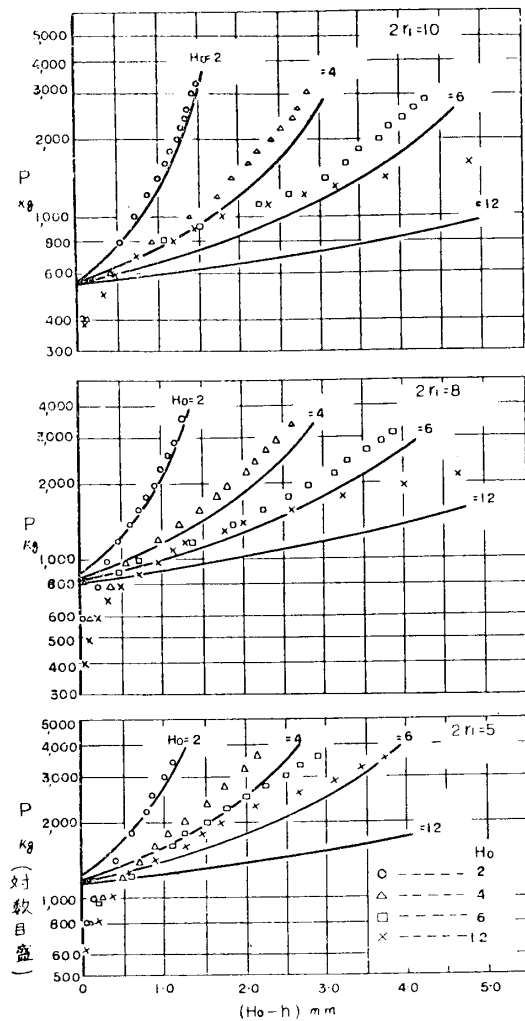
一方この加工による材料の流れを見るために、硝酸と氷醋酸を75:25の割合で混じた液中に65/35黄銅を入れて、その繊維流れを見たのが第15図の写真である。



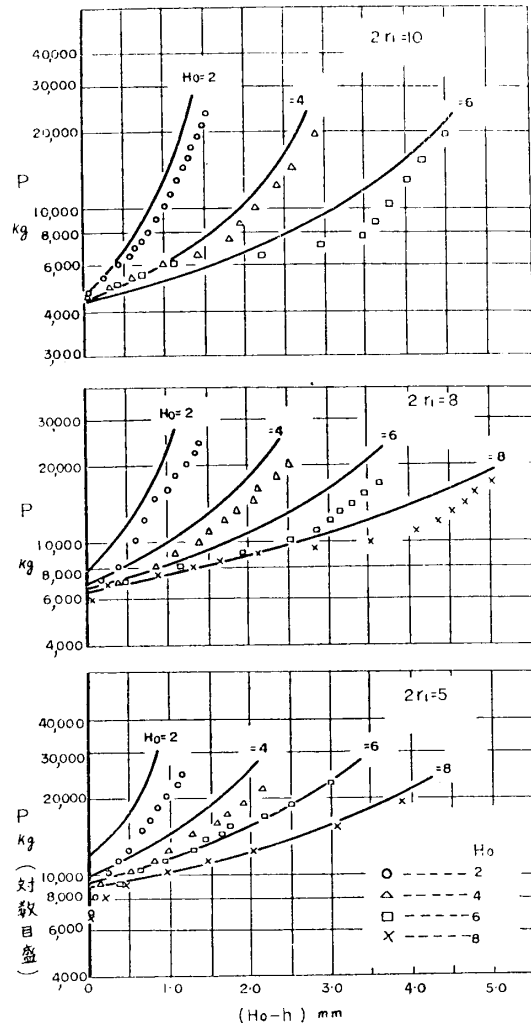
第3図 硬い黄銅の上下面潤滑における盛り上り力と盛り上り高さの関係



第4図 硬いアルミニウムの上下面潤滑における盛り上り力と盛り上り高さの関係



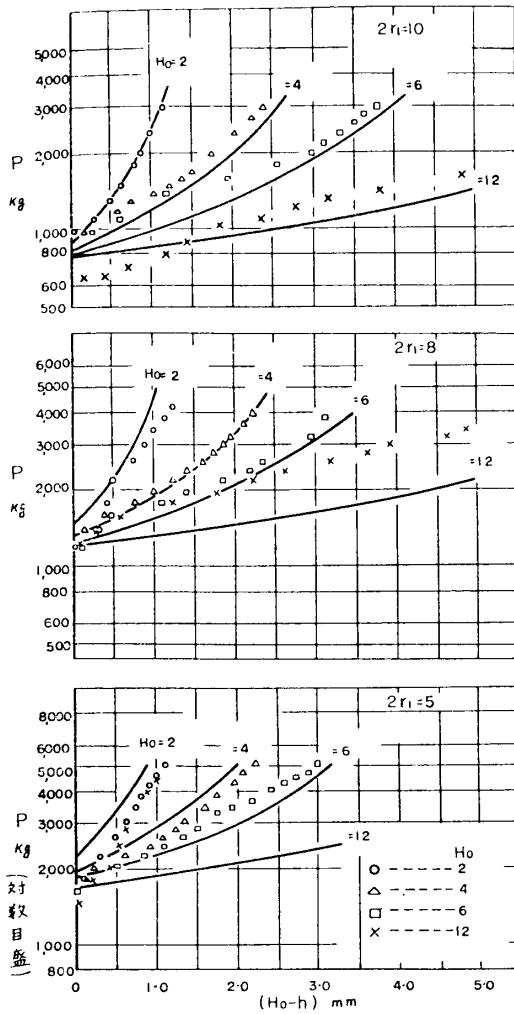
第5図 軟かいアルミニウムの上下面潤滑における盛り力と盛り高さの関係



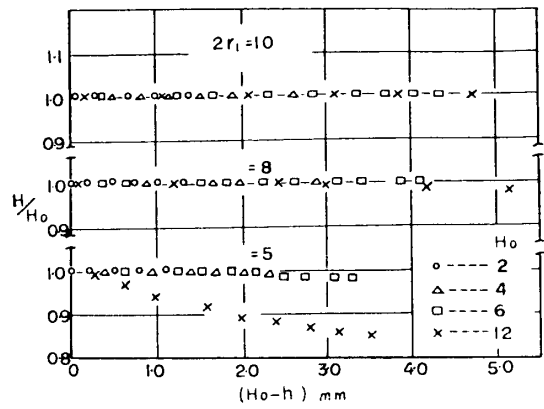
第6図 硬い黄銅の上面無潤滑における盛り力と盛り高さの関係

4. 結果の検討

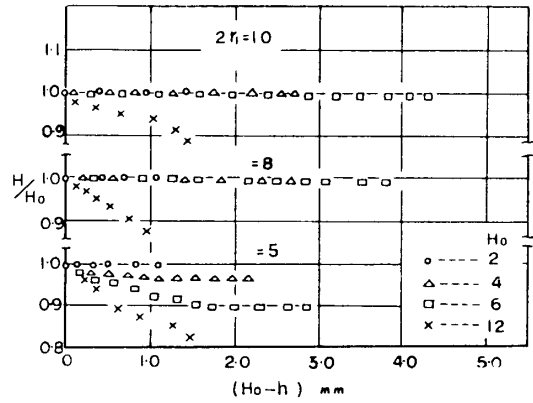
ここで扱った円孔を有する開放型による冷間盛り加工において、その盛り力と盛り高さとの関係を吟味してみる。第3図、第4図の結果から上下面潤滑されているアルミニウムと65/35黄銅の加工硬化材は、計算結果と実験結果が $H_0 = 6$ まではよく一致した。焼鈍したアルミニウムの両面潤滑では、実験結果は計算値よりも一般に高い盛り力を示し、下面のみ潤滑して上面を無潤滑にした硬化した両種金属では、幾分低い盛り力を示す傾向にある。いずれの場合でも試片高さ H_0 と $(r_2 - r_1)$ の比 $H_0 / (r_2 - r_1)$ が約 1.5 以上になると、上型直下の局所的な変形が起りやすく、変形の一様性が失われてくる。この極端な一例は第16図の写真であり、これは $2r_1$ が 10 mm, $H_0 = 8$ mm, 試片直径が 13 mm の場合である。また上面のみ無潤滑にした場合第14図(b)の写真で少しわかるように横の



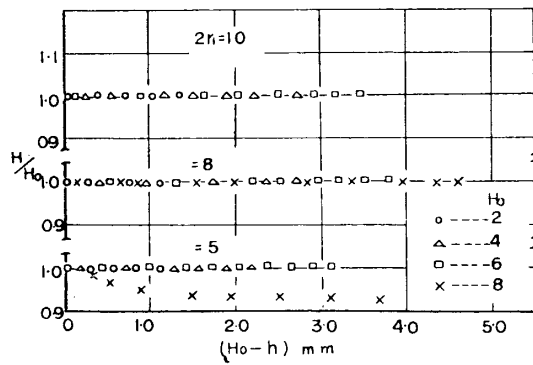
第7図 硬いアルミニウムの上面無潤滑における盛り力と盛り高さの関係



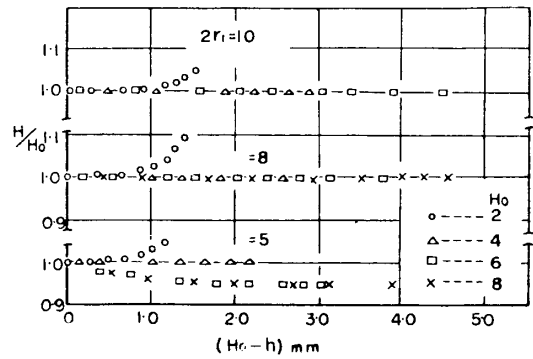
第9図 硬いアルミニウムの上下面潤滑における H/H_c と (H_0-h) の関係



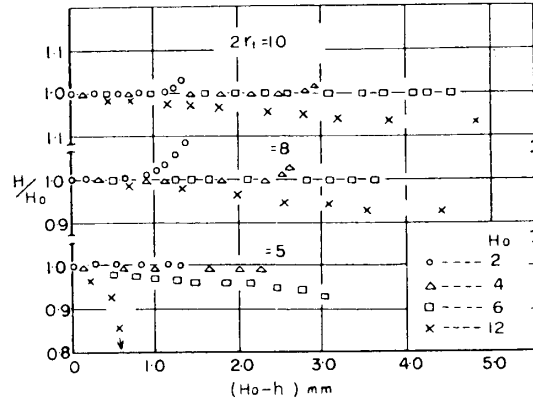
第10図 軟かいアルミニウムの上下面潤滑における H/H_0 と (H_0-h) の関係



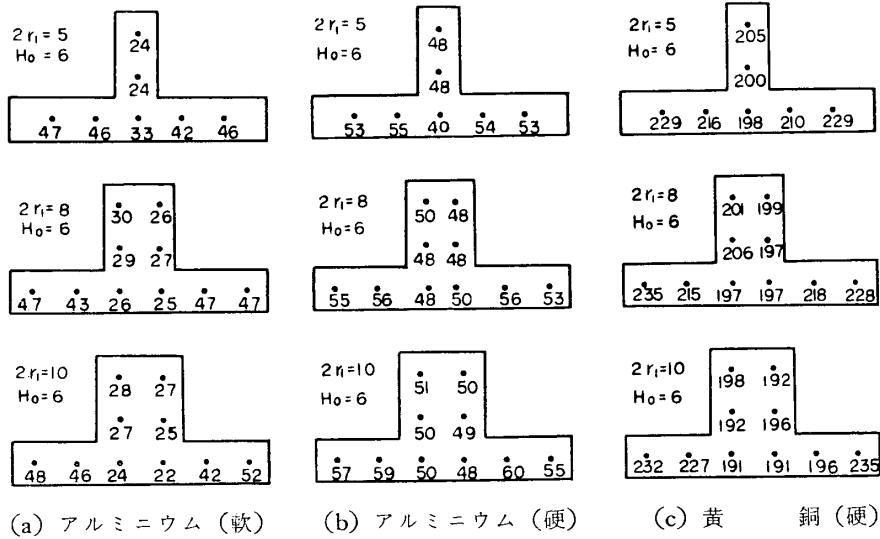
第8図 硬い黄銅の上下面潤滑における H/H_s と (H_0-h) の関係



第11図 硬い黄銅の上面無潤滑における H/H_0 と (H_0-h) の関係

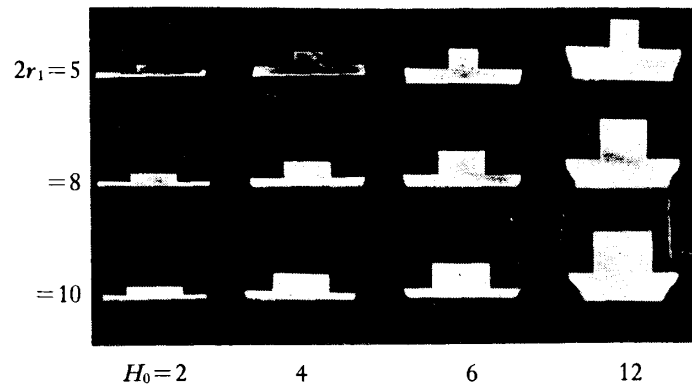


第12図 硬いアルミニウムの上面無潤滑における H/H_0 と (H_0-h) の関係

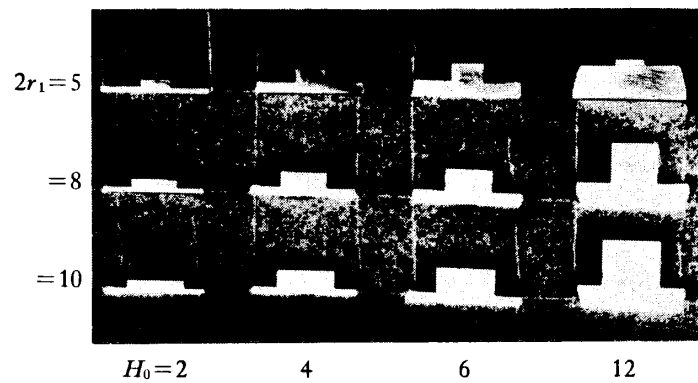


第13図 盛り加工品の中央断面における硬さ分布

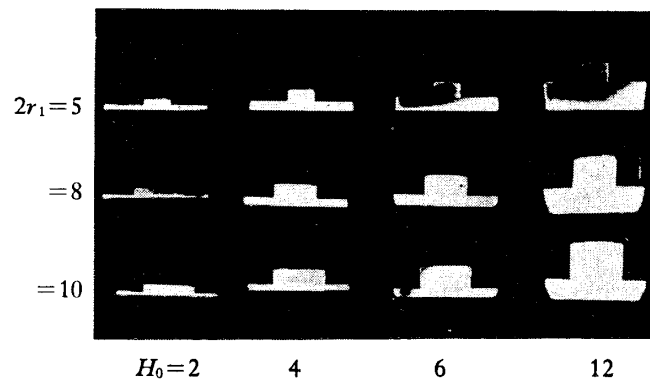
張出し部が薄くなるとその部分の摩擦効果が大きくなって、材料は外側ばかりでなく中心に向っても流れる。これは第1図 (b) において、 $b'o_1fo_2$ 部が薄くなった時に外側より中心に向い圧縮されると挫屈を起こす方が、この部分を圧縮して全体を上方に盛り上げるより仕事量が小さいので、下型との間に空孔が生じ盛り上がる。これは普通棒材の押出等において、押出完了近くにダイス内で見られる現象と同じである。そのためこの空間が生じるとそれ以後は、型にはさまれた材料は主として中心部に向い益々盛り上がりをする。このことは第11図、第12図の H/H_0 の比が 1.0 以上になっているところはこの現象が現われているところであり、その時の試片を見ると下側に空孔が認められる。もちろん上下面潤滑した場合は、このような空孔は全然起こらない。この場合、両種金属において計算値が実験値と少し離れている。これは上面の摩擦面が無潤滑のため、その面の摩擦力を $K_{fm}/2$ として (3) 式で計算したのに問題があるか、実験が完全な無潤滑面を作成しなかったかで差が起こった



(a) アルミニウム (硬) 上下面潤滑



(b) アルミニウム (硬) 上面無潤滑

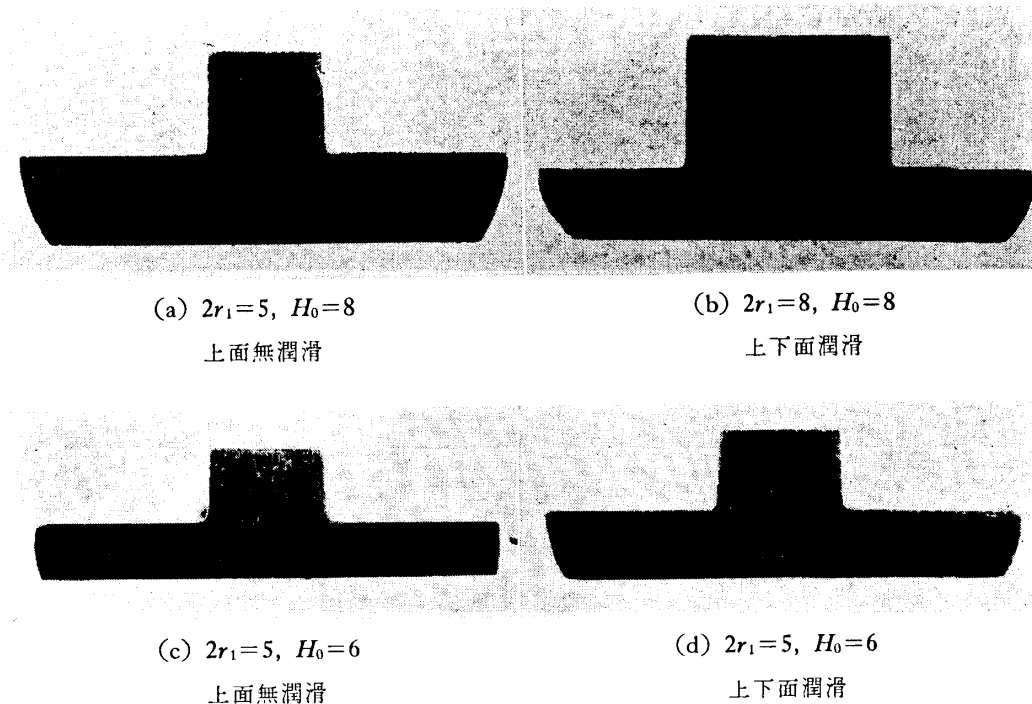


(c) アルミニウム (軟) 上下面潤滑

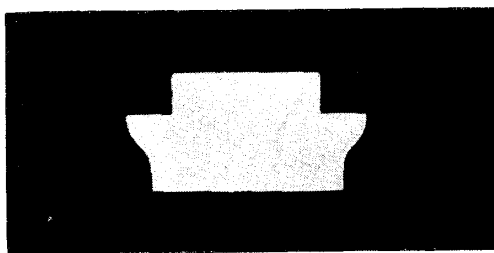
第 14 図 アルミニウム盛り加工の各種形状

と考えられる。

焼鈍したアルミニウムの上下面潤滑した場合，ある程度の計算と実験は一致を見た．一般に焼鈍した材料における平均変形抵抗の値は，第 2 図の応力-歪線図から見てもわかるように，加工硬化材よりも歪によって応力が大きく違うため，加工中変形抵抗一定という仮定の実験には焼鈍材は向かない．この場合 $2r_1=5\text{ mm}$ で $H_0=4\text{ mm}$ 以上では， H/H_0 が 1 以



第15図 黄銅の盛り加工における材料の流れ模様

第16図 盛り加工における局部変形の一例
($2r_1=10, H_0=8$)

下となり、中心部分が加工中低下を始めて最初の試片高さより低くなる。こうなると計算値との開きも大となることは第5図からも明らかである。同様なことが上面無潤滑にした硬いアルミニウム、黄銅で、 $2r_1=5\text{ mm}$ においても認められた。そしてこの場合も H_0 が大になるほど H/H_0 は (H_0-h) とともに小さくなる。これは上型が材料に食い込む場合、中心部材料が多少引張り込まれることにより、中心が高さ方向に変形するためと思われる。 $2r_1$ が小なるほど、かつ焼鈍材の方がこのような引張り込まれの影響は大きくきて来て、中心部は盛り上がりを示しにくくなっている。

$H_0/(r_2-r_1)$ が大になると局部変形も第16図の写真のごとく大きくなり、盛り力とその深さの計算値からは大分離れていくが、盛り深さが大となって変形が下面に及べば、第14図の写真で $H_0=12\text{ mm}$ のごとく局部変形も外見上それほど目立たなくなる場合もある。

加工後の全断面の硬さ分布は、焼鈍材では中心部は加工前の硬さに近く、型にはさまれた部分のみかなり硬くなっている。硬化材では全体がほぼ様な硬さを示している。もちろん潤滑条件によっても、硬さ分布には変化は認められないのは当然である。このように硬化材を素材に使えば、製品の硬さ不均一はまぬがれる。

この種加工法においては材料の流れがまた問題となる。この点につき黄銅硬化材を例にとり、その流れ模様をしらべたのが第15図の写真である。 $2r_1=5\text{ mm}$, $H_0=6\text{ mm}$ においては、上下面潤滑と、上面のみ無潤滑の場合には明らかに流れ模様が異なり、無潤滑面では摩擦大なるため流れは拘束され、全体としては上下面潤滑より繊維の曲りが少ない。これが $H_0=8$ となると、局部変形がはげしく繊維は大きく曲がっている。潤滑条件により多少異なるが $2r_1=5, 8\text{ mm}$ では $H_0/(r_2-r_1)$ が小さい所でも上下型間材料は、完全に平行変形して外方に張り出さず、下型に接する中心部に近い三角形の領域は、写真で見ると未変形に近いことがわかる。硬さ試験においてこの部分を測定したところ、張り出した先端近くよりも低い結果を示すことは前記の事実よりみて当然である。

5. 結 論

中心に円孔を有する開放型ダイスによる冷間盛り加工において、その加工力と盛り深さの関係を解析的に求めるため、簡単な E. Siebel の式を用いて計算を行なってみた。一方この結果を検討するため加工硬化した 2S アルミニウム、65/35 黄銅および焼鈍した同じアルミニウムを用い、孔径、試片高さ、潤滑条件を変えて材料試験機による実験を行なった。その結果、加工硬化した両種金属で上下面潤滑の場合には、試片高さが (r_2-r_1) に比して小さい範囲では、このような計算方法でも満足できる一致を見た。

一方下面のみ潤滑して上面無潤滑の場合には、計算結果は多少実験と違いを示した。これは計算の仮定か実験方法に問題があるためと思われる。また上面無潤滑の場合、平面歪問題では中心部が加工頭初から上方に盛り上がるが、軸対称の場合にはそのようなことが起らず、ただ上下型間が薄くなった時に中心部下が持ち上がる。これは軸対称における方が平面歪の場合より材料拘束が多いためと考えられる。

焼鈍材を用いた場合の計算との開きは、平均変形抵抗のとり方に本質的な無理があることと、上型孔部の所における工具による材料の引張り込みの影響のため、中心部が変形を起こして仮定と大きく違うためである。

この加工における材料繊維の流れ模様は、計算の仮定としては上下型間の材料は中心に向かず、すべて外方に平行変形すると考えたが、実際には第15図のごとく一部完全に未変形のところもあり、また幾分曲がっているところもある。このように材料内部が変形していても、盛り力とその深さの関係は一二の場合を除きある程度計算に乗ることがこの研究からわかった。

本研究を行なうに当たって航空研究所河田幸三助教授、工業技術院機械試験所工藤英明両氏に種々御討論いただいたことを厚く御礼申し上げます。工具製作には岩崎通信機株式会社亀谷成君の御協力を得、材料の点については紀長伸銅所の御援助を得たことを記し併せ御礼申し上げます。本研究の一部は文部省総合科学研究費によるものである。終りに実験に協力していただいた市田和夫君ならびに研究室の各位に感謝の意を表する次第である。

1960年5月12日 材 料 部

文 献

- [1] たとえば, 福井伸二, 清野次郎: 日本機械学会ほか 5 学会共催, 塑性加工講演会前刷 (1958); 塑性加工講演会前刷 (1959).
- [2] Pomp, A., Munker, T., Lueg, W.: Mitt. K.-W.-I., Eisenf., 20 (1938), p. 265.
- [3] 工藤英明: 東京大学航空研究所集報, 第 1 卷第 1 号 (1958), 第 1 卷第 2 号 (1958), 第 1 卷第 3 号 (1959), 第 1 卷第 4 号 (1959).
- [4] Siebel, E.: "Die Formgebung in bildsamen Zustand", Verlag Stahleisen m. b. H., Dusseldorf, 1932.
- [5] たとえば, 福井伸二, 工藤英明, 滝田 巖: 日本機械学会ほか 5 学会共催, 塑性加工講演会前刷 (1957).