

鍛造および押出加工に関する塑性力学的研究

第2報 平面ひずみ問題の実験

工 藤 英 明

概 要

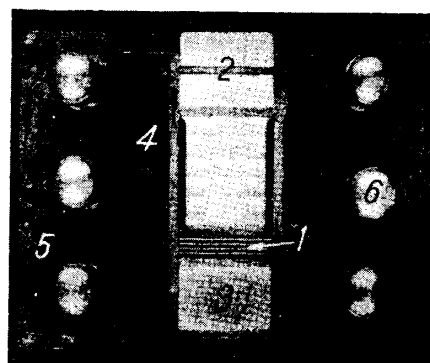
各種平面ひずみ鍛造および押出加工における材料の内部変形模様を鉛を用いて調べ、第1報において解析的に求めた材料内速度場の適否を比較検討した結果、両者の間に十分よい一致のあることが見出された。

緒 言

本研究第1報においては種々の平面ひずみ鍛造および押出加工問題を簡単に解析する方法を考案しこれを実際の幾つかの問題に応用した。これらの問題の内すでに剛塑性体に関する迂り線場の理論によって解かれているものについてはその解と本研究の解を比較し、両者がかなりよい一致を示すことを見出した。これらの結果はさらに実験結果と比較することは、前報の方法が実用目的に適するか否かを確認することは必要なことであるが、すでに前報緒論でも述べたように平面ひずみ加工問題に関する実験は数が非常に少い上、前報の解析結果と直接比較できるようなものはほとんど見当らない。このため本報においては平面ひずみ圧縮、押込、開放型盛上、作頭、押出、穿孔、押出鍛造、組合せ押出および押出鍛造ならびに密閉型圧印加工等についてそれぞれ代表的な場合について実験を行った。しかし実験は後にも述べるように主として材料の内部流れに関してであり、加工力については正確なデータを得ることができなかった。このようにして求めた材料の流れ模様と、前報で得た最も低い加工圧力を与える速度場とを比較し、前報の解析方法がどの位真実に近い結果を与えるかを調べた。

2.1 実験方法

本実験には著者がすでに報告した内部変形透視器[1]を使用した。この詳細は省略するが、第2.1.1図にその内部構造を示す写真を掲げてある。使用に当ってはこの上に厚さ16mmの強化ガラスをのせ、その上から23×23mmのぞき窓を有する厚さ15mmの抑え板と締付ボルト、ナットによって強く締付ける。すでに報告したように、この装置を用いれば、黒化した鉛素材面上に鉛地肌が現われるように刻んだ格子線ははげしい変形の後でも明瞭であり、また



第2.1.1図 内部変形透視器

- 1: 被加工鉛素材, 2: 上型, 3: 下型
4: コンテナ, 5: ハウジング, 6: 締付ボルト

非定常過程の観察は一々取出す必要がないため非常に楽である。しかし一方においては、材料が鉛に限られるということと、工具とガラス板の間にばりが出やすく、これを防ぐためガラス板を強く締付けると上型が前進する際の摩擦抵抗のため測定した加工圧力は実際よりもかなり高くなるということが短所である。鉛しか使えないという点については、背の高い素材の圧縮や半無限体への押込のような、素材表面の工具による拘束面積の割合が小さな加工においてはかなり欠点になるであろうが、ここで行ったような、拘束条件の多いような加工においては、余り気にする必要はないように思われる。例えば Thomsen および Frisch [2] は、押出加工で鉛およびアルミニウム素材の変形模様が実験誤差内で一致することを見出している。

他方、加工圧力測定値の誤差については今の装置ではかなり高かった。例えば単純な圧縮加工のように真の加工所要力が低いものでは、測定値はその倍近くなることが見られた。このためここに行った実験においてはすべて変形についてのみ解析と比べ、力については参考程度にした。本装置はコンテナ巾が 20 mm に対し、奥行は 10 mm であるが、この奥行をもっと大きくすることにより、この誤差はかなり低下させうるであろう。

工具と材料との間の摩擦条件は第1報の解析との比較のために摩擦がまったく無い条件と材料と工具が完全に附着する条件を与えるようにした。前者のためには素材の型に当る面にあらかじめピンで細い溝をつけ、ラノリンを塗布した。しかし後にも示すように、実験を行って見ると型の面の仕上の十分でないためと、はげしい変形によって材料の表面積が拡大するために潤滑層が切れやすく完全に摩擦を無くすることはできなかった。他方、型と材料を附着させる条件を作るために、型と材料をベンジンおよびトリクロール・エチレンで注意深く洗滌したが、これも中々思うように行かなかった。これは素材前面とガラス板の間、および素材背面とコンテナ底面の間は常に潤滑する必要があるため一層難しかった。これは型の面を粗くすることによって解決できると思われるが、本実験においては滑および粗二つの条件を前後して与えるようなスケジュールが必要だったので、そのたびごとに型面を磨いたり粗くすることはできなかった。したがって摩擦条件について十分な厳密さは与えられなかった。

実験は型の前進速度を 0.01 mm/s とし連続的に加工しながら、適時写真機のシャッターを切って行った。加工速度もここで行ったような加工では変形模様に影響しないようである [3][4]。このようにして撮った写真から、材料内の速度場を厳密に計算するには、わずかの時間を置いて撮った2枚の写真から、材料内の各点の速度を調べなくてはならない。他方、第1報で用いたような剛性三角形速度場において、最初に記した直角格子線が有限変形後どのような模様になるかについて Hodge [5] が計算法を示している。しかしながら本研究においては実験の数が多く、上の方法で結果を整理することができなかったため、一定段階における格子線の変形模様と、加工圧力上界を最低とする速度場の形とを対照し、直観的に比較を行うにとどめた。この場合、剛性三角形内に含まれる刻々の剛性領域と、最初からある段階まで剛性を保つ領域とは異った模様を呈し、後者においてのみ格子線は完全に最初の形を保つ。なお実験に際し鉛に刻んだ格子線間隔は 0.5 または 1 mm である。

2.2 開放型による鍛造および押込加工

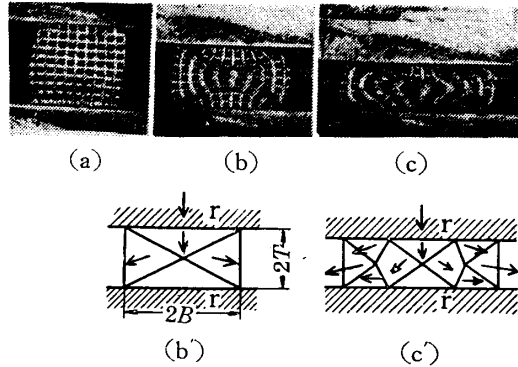
2.2.1 圧縮

素材巾より広い巾をもつ平行型による圧縮時の変形についてはすでに実験も広く行われているが、ここでは、型と材料間の摩擦を調べるために一応繰返し実験を行った。その結果は第 2.2.1~3 図に示されている。



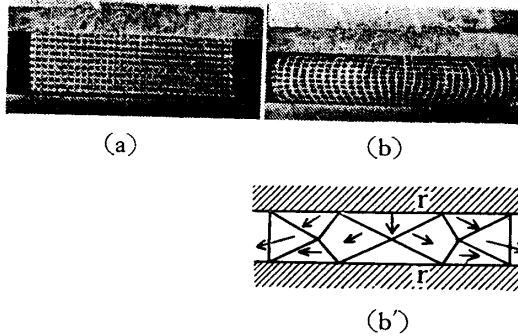
第 2.2.1 図 潤滑せる平行型による圧縮

第 2.2.1 図は摩擦がないようにしたものであるが、図から明らかなように格子線は直線を保たず、場所によってはかなりの摩擦のあることを示している。他方脱脂して圧縮した第 2.2.2 および 2.2.3 図においては 1.2.1 の解析から求めた最低上界の速度場 (b'), (c') と変形模様はよく似ており、この場合は型と材料の間の摩擦抵抗は十分大きいことを示している。しかしこれにしても例えば第 2.2.2 図 (c) からわかるように、素材中心の最初からまったく変形しないはずの楔形領域は上型に接するものの方が明瞭であり、下型に接する方はいくらか変形している。すなわち下型面のこの位置では、材料と型の附着が完全でないことを示す。以下実験例においてもそうであるが、型と材料の間の摩擦がまったくなければ、型面に垂直な格子線は相対送り後も接触面上では垂直を保つし、また両者が完全に附着していればこの垂直線の端の点は、最初の型面上の位置から動かないはずである。なお写真で材料側面が変形後、解析による予想に反して直線を保たないのは、材料の加工硬化のためと思われる。



第 2.2.2 図 脱脂せる平行型による圧縮

第 2.2.2 図 (c) からわかるように、素材中心の最初からまったく変形しないはずの楔形領域は上型に接するものの方が明瞭であり、下型に接する方はいくらか変形している。すなわち下型面のこの位置では、材料と型の附着が完全でないことを示す。以下実験例においてもそうであるが、型と材料の間の摩擦がまったくなければ、型面に垂直な格子線は相対送り後も接触面上では垂直を保つし、また両者が完全に附着していればこの垂直線の端の点は、最初の型面上の位置から動かないはずである。なお写真で材料側面が変形後、解析による予想に反して直線を保たないのは、材料の加工硬化のためと思われる。

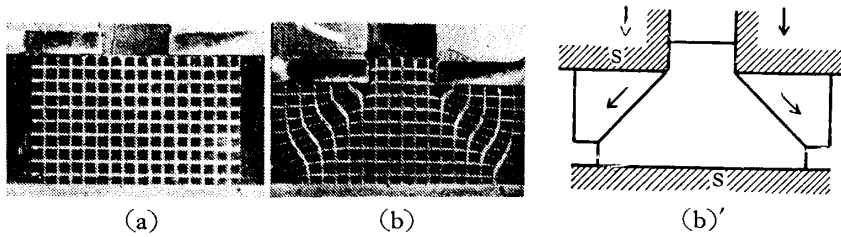


第 2.2.3 図 脱脂せる平行型による圧縮

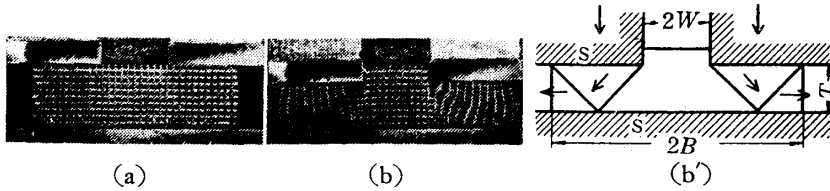
第 1 報 1.2.2 で取扱った盛上げ加工の二三についての実験結果は第 2.2.4~6 図に解析による速度場と比較してある。図より両者がよく一致していることは明らかである。とくに上下型面を潤滑した場合は第 2.2.4, 2.2.5 および 2.2.6 図 (b) に見られるように、上型口の下材料はほとんど変形しないのに対し、上型面を脱脂した第 2.2.6 図 (c) では盛上げが行われている点は解析結果と一致して興味深い。第 2.2.4 図の変形は上型を直角バイトとし

2.2.2 盛上加工

第 1 報 1.2.2 で取扱った盛上げ加工の二三についての実験結果は第 2.2.4~6 図に解析による速度場と比較してある。図より両者がよく一致していることは明らかである。とくに上下型面を潤滑した場合は第 2.2.4, 2.2.5 および 2.2.6 図 (b) に見られるように、上型口の下材料はほとんど変形しないのに対し、上型面を脱脂した第 2.2.6 図 (c) では盛上げが行われている点は解析結果と一致して興味深い。第 2.2.4 図の変形は上型を直角バイトとし



第 2・2・4 図 潤滑せる開放型による盛上加工

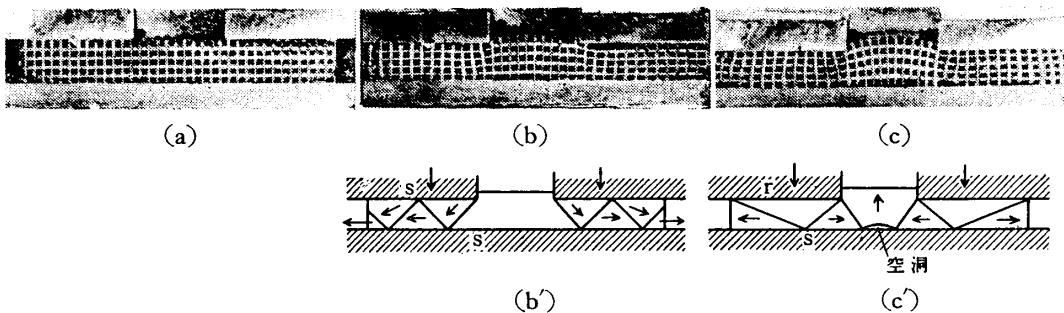


第 2・2・5 図 潤滑せる開放型による盛上加工

たときの切削時の変形と同じである。なお、写真において剛性および塑性領域境界がはっきりとせず、材料側面がなだらかな曲線となるのはやはり上述のように、材料の加工硬化の影響であろう。

2・2・3 作頭加工

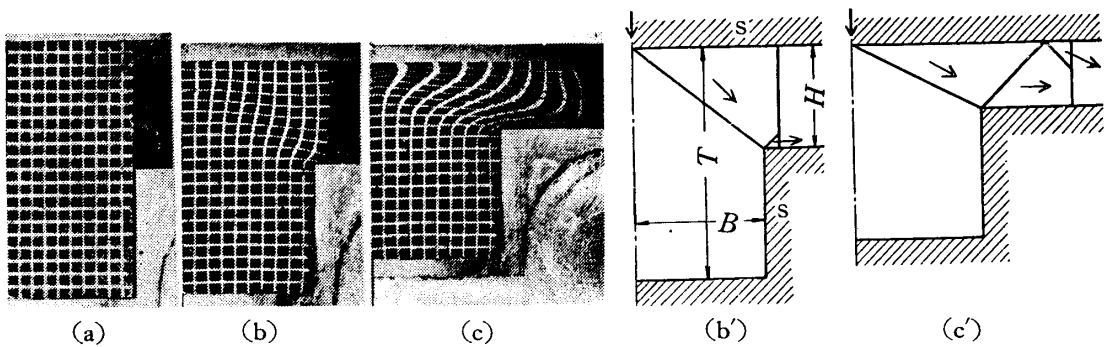
第 2・2・7~14 図は



第 2・2・6 図 開放型盛上加工

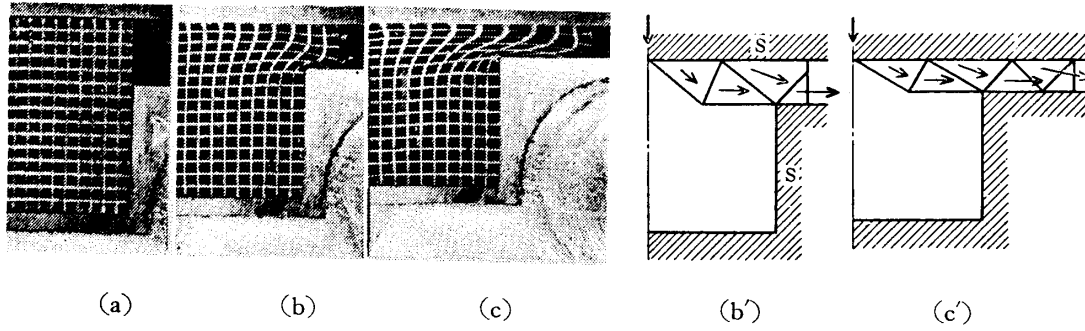
(b) (b) は上下型潤滑, (c) (c) は上型脱脂, 下型潤滑

1・2・3 で解析した作頭加工における変形模様と最低上界速度場の比較である。実験は対称軸の片側についてのみ行った。第 2・2・11 図 (c) 以外は解析上は素材底部に剛性領域が残るはずであるが、いずれも左下隅の線がひずんでいるのは、一つはコンテナ左側面と、下型左側面の間に隙間があって、ここに材料がぱりとなって流出したことと、実験では都合上コンテナと上型が停止し、下型が前進する方式をとったため、コンテナ側壁と材料間の摩擦の作用によるものと思われる*。そこで写真においては、垂直線が右の方に曲りはじめたところが

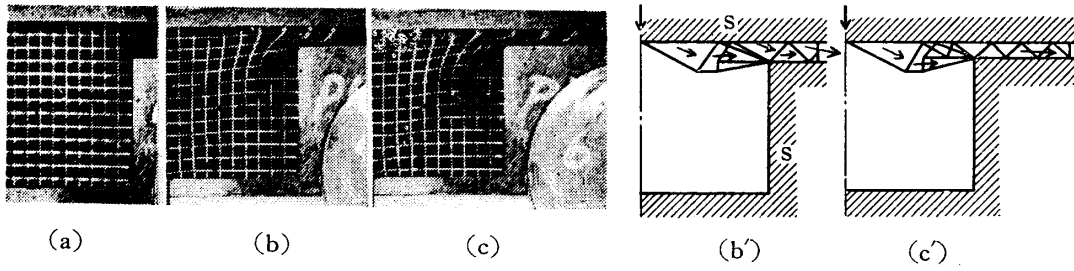


第 2・2・7 図 潤滑せる型による作頭加工

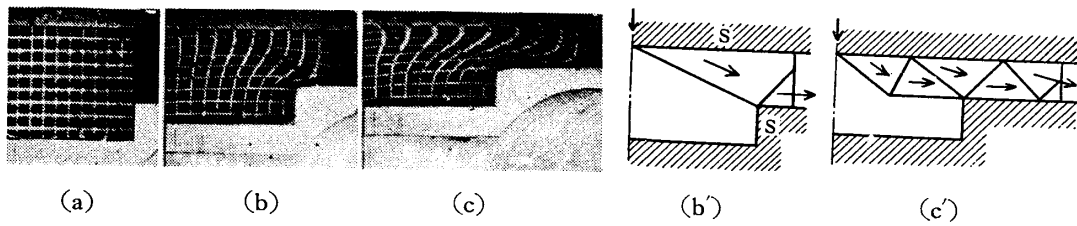
* このようなトラブルは加工対称軸の両側を一体化したような工具を作って実験すれば解決するはずである。



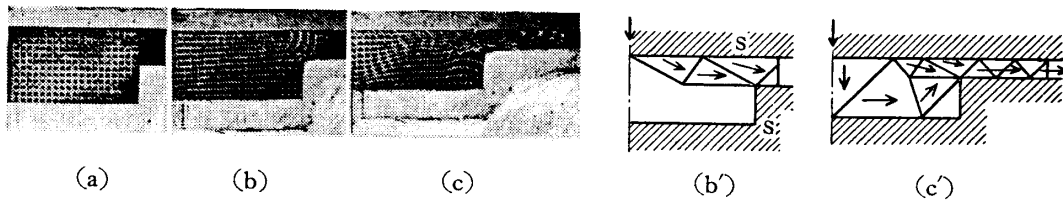
第 2・2・8 図 潤滑せる型による作頭加工



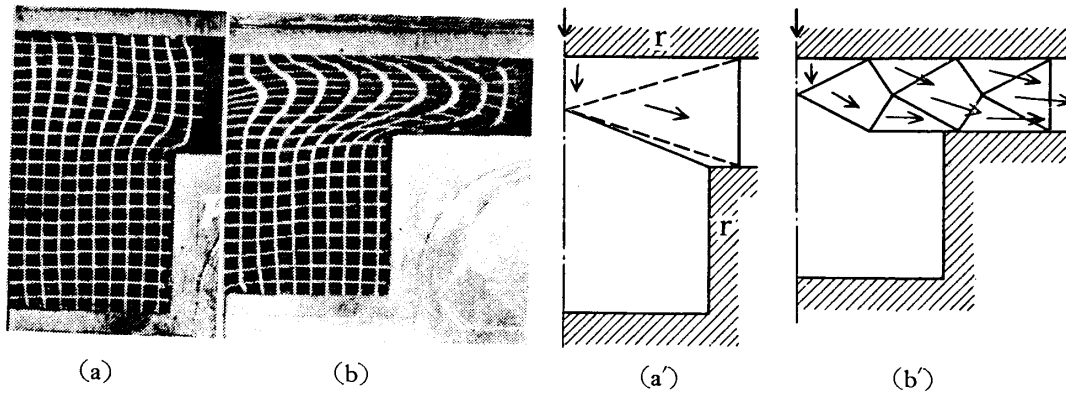
第 2・2・9 図 潤滑せる型による作頭加工



第 2・2・10 図 潤滑せる型による作頭加工

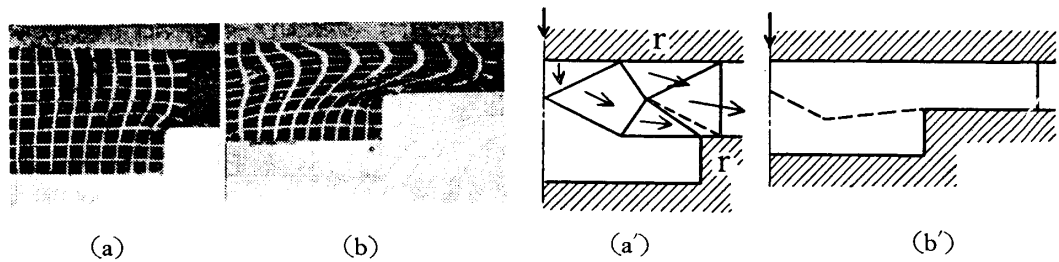


第 2・2・11 図 潤滑せる型による作頭加工

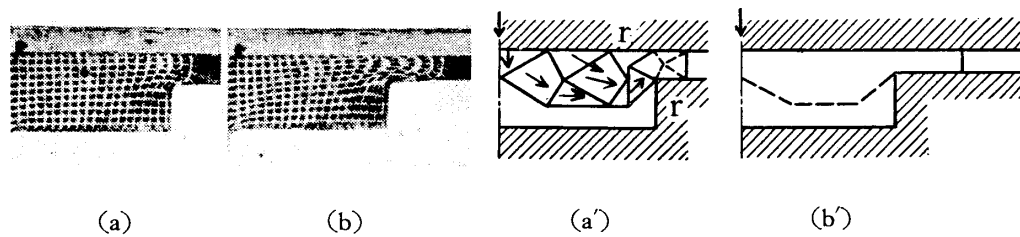


第 2・2・12 図 脱脂せる型による作頭加工

剛塑性境界に当たると見てよいであろう。第 2・2・11 図 (c) では予測されるように素材全体が変形している。しかしこの場合の解析による速度場は第 1・2・15 図のごときものよりも領域 ① と ②, ③ の相対すべりをより少くした第 2・2・11 図 (c') のようなものの方が写真と一致するようである。この速度場ではまた領域 ① の左側面は一様に動かず, ③ と接する境界の方が速く動く。事実この速度場の方がより低い上界を与えるようであるが, とくに計算によって検討は行わなかった。第 2・2・13 図 (b) および第 2・2・14 図 (b) においては予想と異り, 材料が底面まで変形しているが, これは一つは加工硬化のため, もう一つには下型凹み底面上の摩擦の不足によると考えられる。後の原因は底面上の垂直格子線端が最初の位置からずれていることからわかる。以上のことを考慮すれば, 解析から得られた速度場は, 実際の変形をかなりよく表わしていると言えよう。なお粗い工具に対する第 2・2・12~14 図においてすべての場合については速度場を計算せず, 予想される不連続線と剛塑性境界を破線で示すにとどめた。



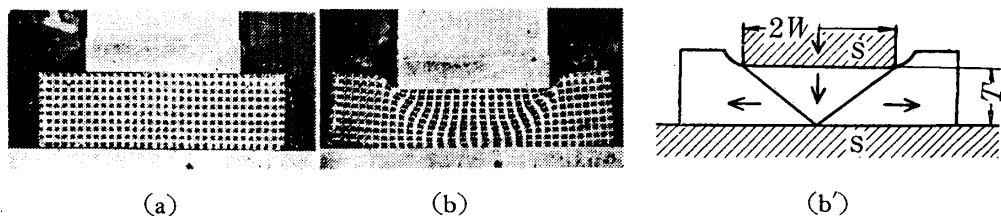
第 2・2・13 図 脱脂せる型による作頭加工



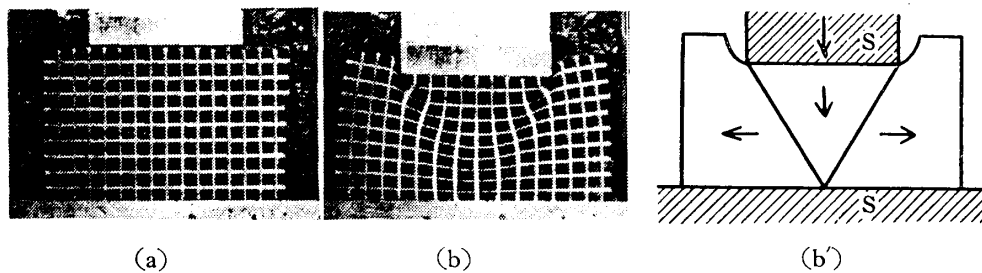
第 2・2・14 図 脱脂せる型による作頭加工

2・2・4 押込加工

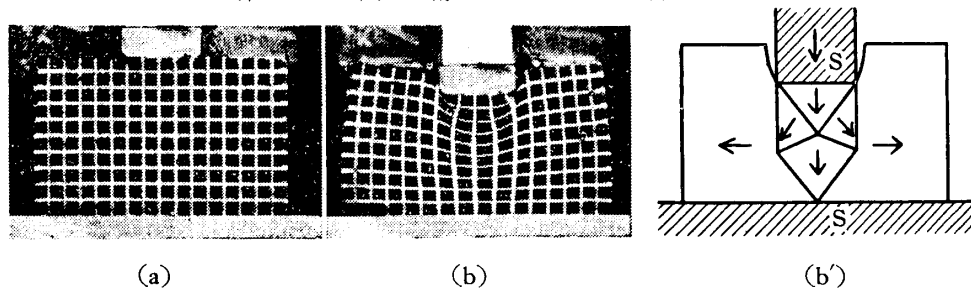
素材厚さが押込ポンチ巾あるいはそれ以上の場合の押込について適当な実験結果が見当らなかつたので二三の実験を行った。これらは第 2・2・15~17 図に示すがこの場合も図に見られるように上界極小の剛性三角形速度場との比較の結果は良好である。



第 2・2・15 図 潤滑せるポンチによる押込加工



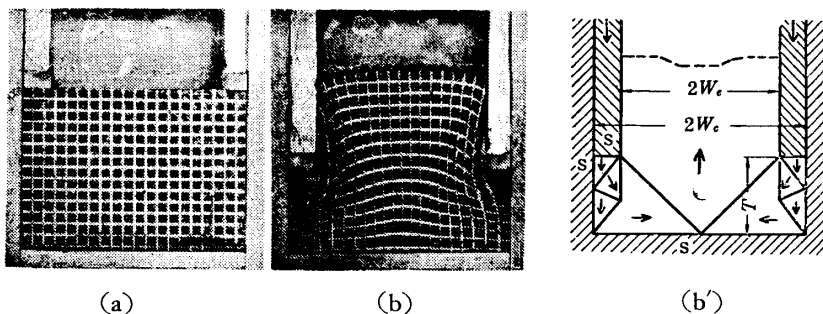
第 2.2.16 図 潤滑せるポンチによる押込加工



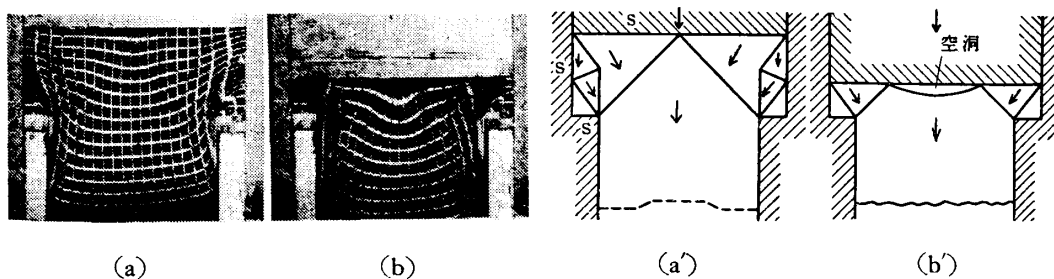
第 2.2.17 図 潤滑せるポンチによる押込加工

2.3 押出, 穿孔および押出鍛造

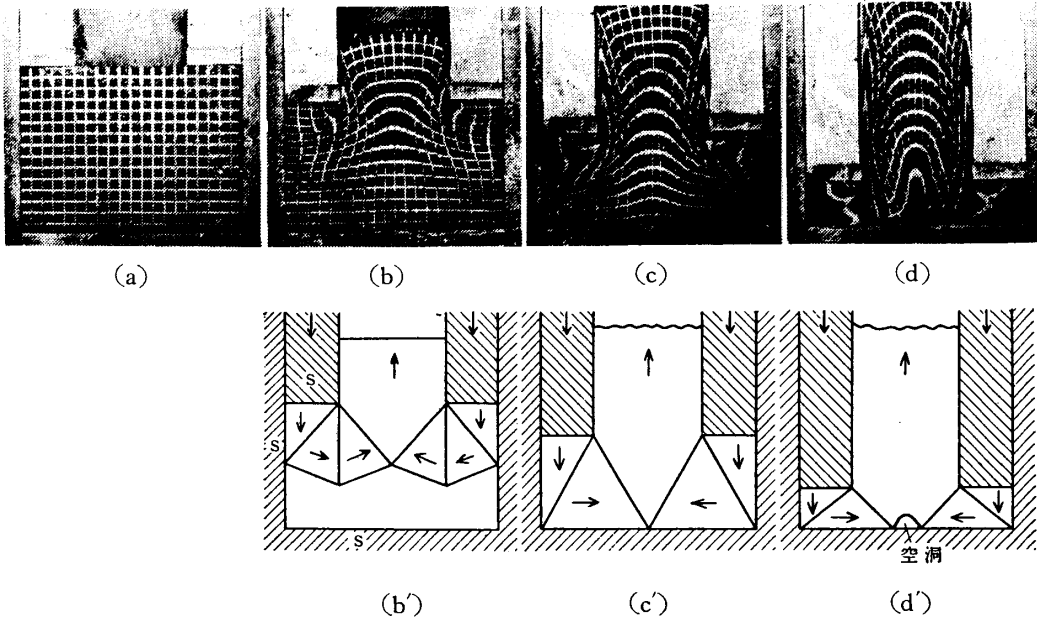
平面ひずみ押出加工に関する実験はプラステイシオン [3], 鉛 [4][6] およびアルミニウム [6] を用いたものなど行われているが, 本章においては, 定常から非定常過程の移り変りの状況をも知る必要上から, 断面減少比 0.25, 0.50 および 0.75 について押出および穿孔加工の実験を行い, その終りの段階として押出鍛造中の変形をも調べた. 第 2.3.1~5 図は押出加



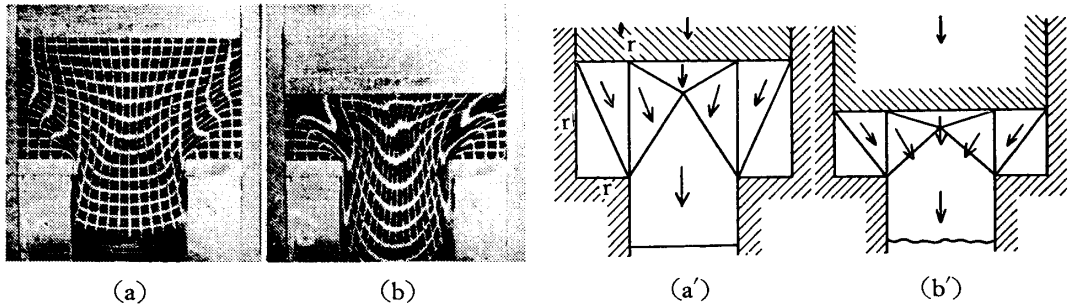
第 2.3.1 図 潤滑せる型による後方押出. $R=0.25$



第 2.3.2 図 潤滑せる型による前方押出. $R=0.25$



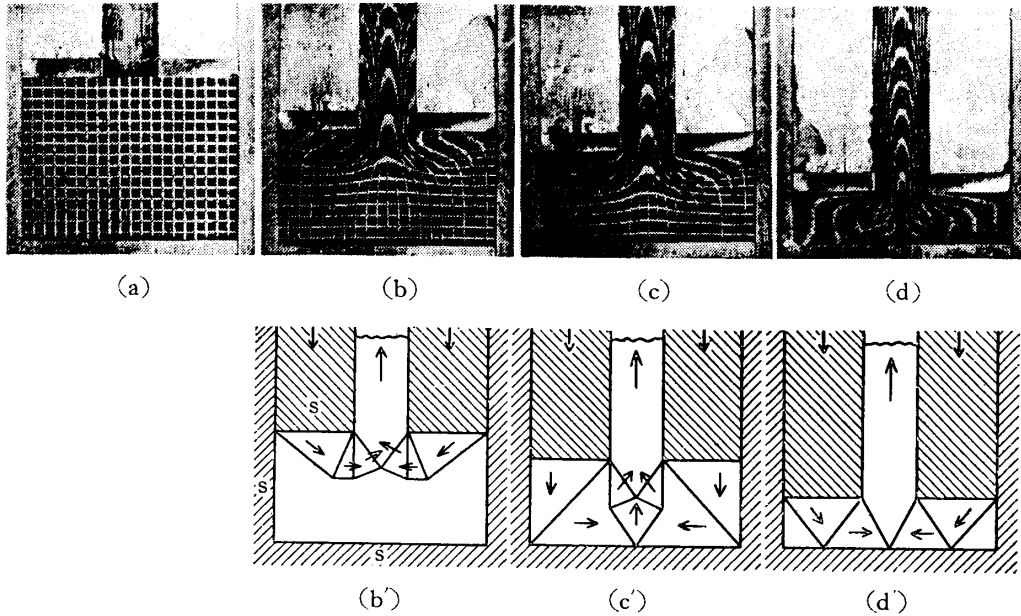
第 2・3・3 図 潤滑せる型による後方押出. $R=0.50$



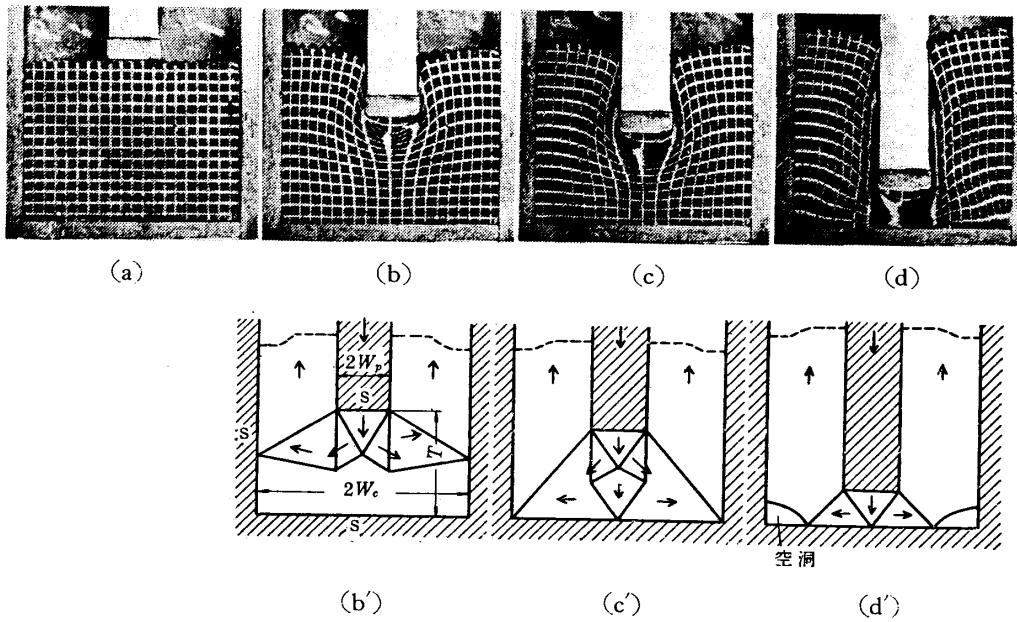
第 2・3・4 図 脱脂せる型による前方押出. $R=0.50$

工変形模様の写真と最適上界速度場を示す。解析によれば滑らかな工具で断面減少比 0.25 および 0.50 の場合はダイス面下にデッド・メタルが附着するはずであるが、第 2・3・1 および 2・3・3 図ではそれは明らかでない。これらは潤滑を行ったものであるが、後方押出であるためにコンテナ面上の摩擦の作用ならびにダイスとコンテナ間のわずかなばり流出の影響を受けて、デッド・メタルが分りにくくなったものと思われる。事実、同じく潤滑して前方押出を行うと第 2・3・2 図のようにデッド・メタルがはっきりした。この点を除いては変形模様、剛塑性境界、ラム面上の素材が動き出す非定常過程の開始の時期、素材下部の持上り等は、解析結果とよく一致している。例えば第 2・3・4 図は全工具面が粗い条件で前方押出を行ったものであるが、この場合には変形領域が深く、解析結果と一致して使用した厚さ 15mm の素材では加工開始時から非定常過程を示している。

第 2・3・6～10 図は穿孔過程を示す。コンテナが完全に滑らかなときはすでに前報 1 4・2 で述べたように押出過程と穿孔過程は同等になるので、第 2・3・6 と 2・3・1 または 2・3・2 図、第 2・3・7 と 2・3・3 図、第 2・3・8 と 2・3・5 図は同じ模様を示すはずである。事実全体としては両者は一致したが断面減少比 0.25 と 0.5 の穿孔におけるポンチ直下のデッド・メタル

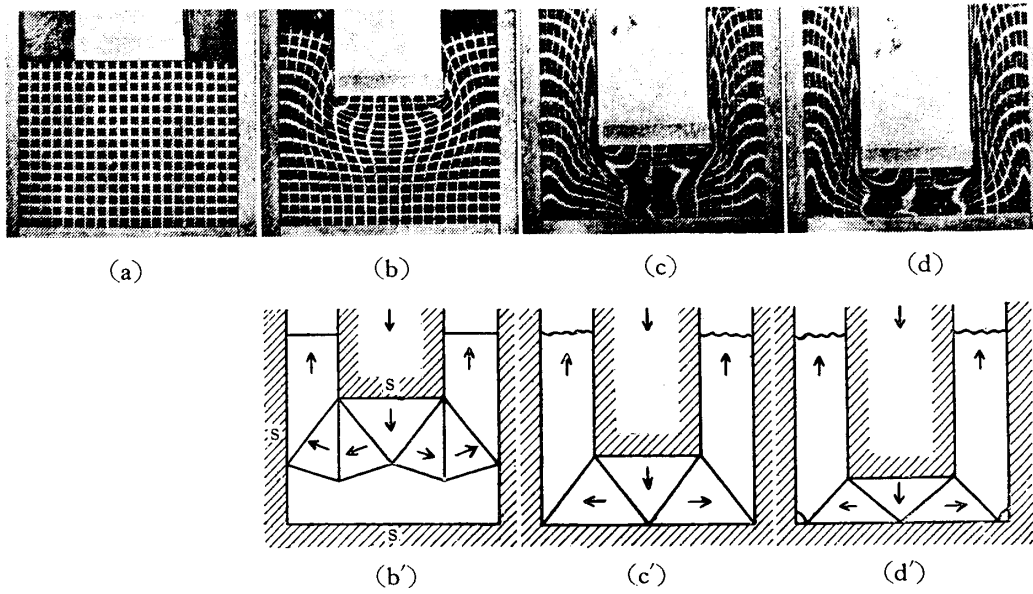


第 2-3-5 図 潤滑せる型による後方押出. $R=0.75$

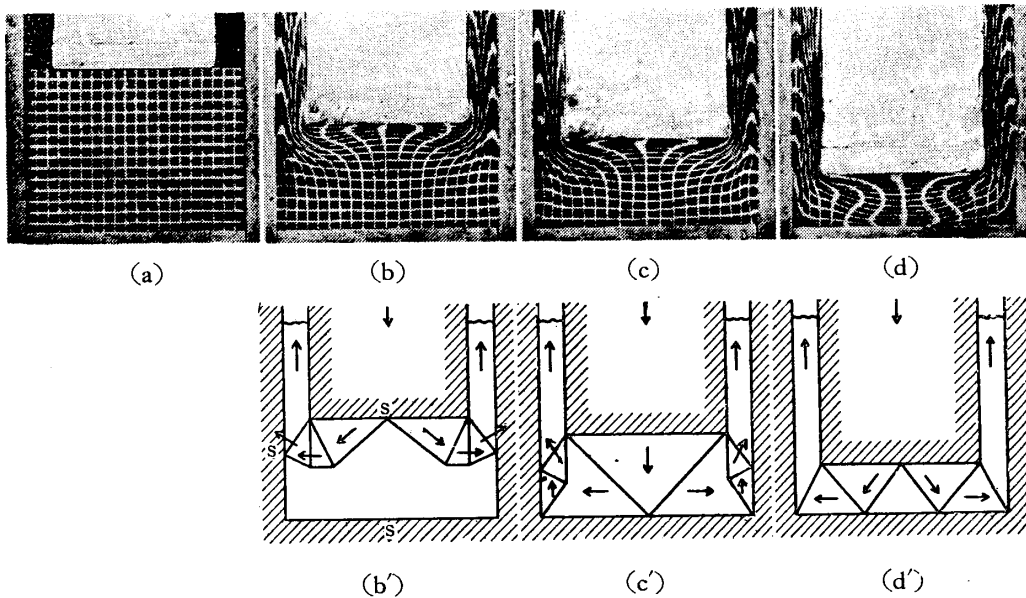


第 2-3-6 図 潤滑せる型による後方上昇穿孔. $R=0.25$

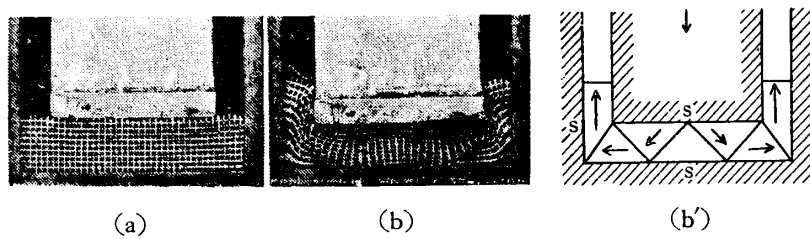
は非常に明瞭である。これは上に押出について述べたデッド・メタル形成を乱す原因がないためである。しかし一方、押出の中心軸に相当する穿孔コンテナ壁上では、摩擦のために水平格子線が後に引かれているし、また穿孔後期に至っても同じ理由から素材下角部の持上りは生じなかった。これらの点を除けば穿孔の場合も全体的な変形模様、剛塑性境界、定常から非定常に移る時期は実験と解析結果とよく一致していることは図より明らかである。例えば脱脂したポンチによる $R=0.75$ の穿孔は (第 2-3-10 図)、潤滑した $R=0.75$ のポンチによるもの (第 2-3-8 図) と異り、デッド・メタルが附着しており解析結果に対応してい



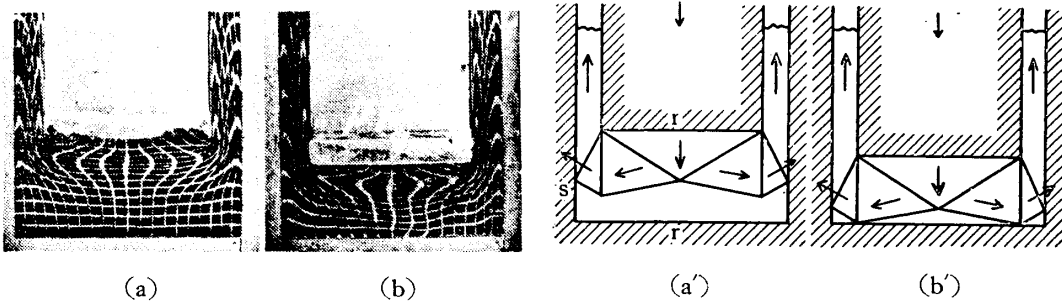
第 2・3・7 図 潤滑せる型による後方上昇穿孔. $R=0.50$



第 2・3・8 図 潤滑せる型による後方上昇穿孔. $R=0.75$



第 2・3・9 図 潤滑せる型による後方上昇穿孔. $R=0.75$



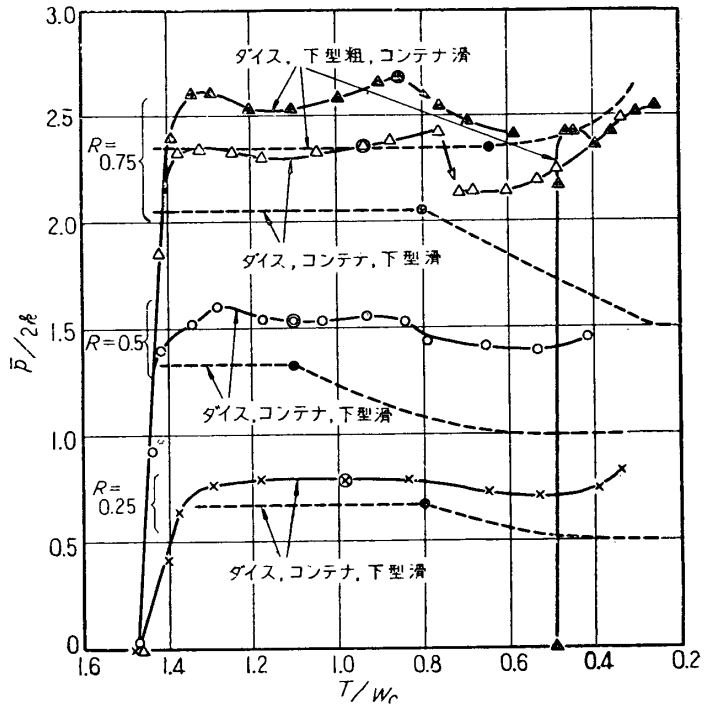
第 2・3・10 図 脱脂せるポンチ，下型および潤滑せるコンテナによる後方上昇穿孔. $R=0.75$

る。なお第 2・3・9 図および第 2・3・10 図の写真において、ポンチとガラス板の間に薄い鉛のばりが出たが、変形模様は中心軸より対称な点から見て、この位のガラスと工具間のばりは変形模様にはほとんど影響しないことがわかった。

加工圧力は測定誤差がかなり大きいことはすでに 2・1 において述べたが第 2・3・11 図には参考までに穿孔実験における圧力の経過と、解析から予想される値（破線）とを対比して示した。横軸の T は材料押し残り部高さ、 W_c はコンテナ巾の半分である。図中縦座標は、素材断面に関する平均加工圧力 \bar{p} と、材料の平面ひずみ圧縮降伏応力 $2k$ の比とした。

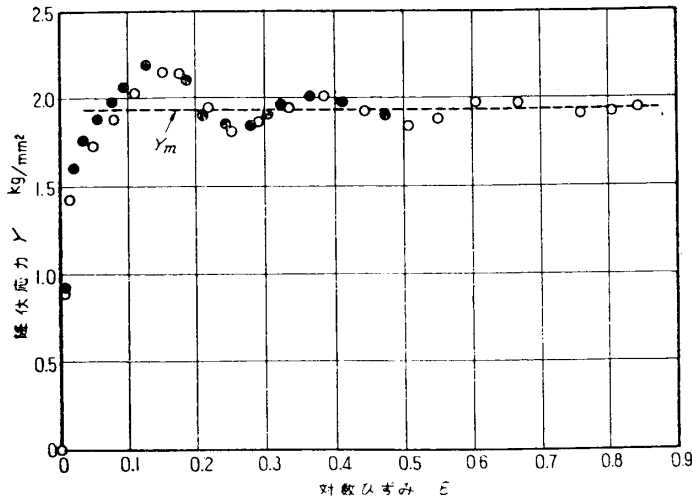
$2k$ の値を求めるためには直径 12 mm、高さ 15 mm の鉛試験片の端面にピンで同心円の溝をつけ、ジョンソン・ワックス #111 を塗布乾燥後さらにラノリンを塗って 2 枚の厚ガラス板の間で圧縮試験を行った。圧縮速度は加工実験と同じく 0.01 mm/s である。ガラス板を用いたことにより試験片端面の摩擦は非常に低下させることができ、測定を行った圧縮対数ひずみ約 0.8 までは試験片側面が端面にまわり込んだ形跡はほとんどなかった。圧縮降伏応力と対数歪の関係は第 2・3・12 図に示すが、曲線は波打っていた*。これから一軸圧縮平均降伏応力 Y_m として 1.94 kg/mm² を得、さらに鉛は Mises の降伏条件に従うとして第 1 報 (1・1・4) 式から $2k$ として 2.24 kg/mm² を得た。

すでに述べたように移動する型に働く摩擦抵抗、型と型の間に出る鉛のばりによる抵抗および型と鉛素材間の不完全な潤滑等のために、第 2・3・11 図の実験点はずね



第 2・3・11 図 鉛の平面ひずみ穿孔加工における加工圧力の実験（実線）および解析（破線）値。実験点を○で囲んだ点および解析曲線上●印は定常、非定常転移点を表わす。

* この波打は測定系の特性か材料の特性かは未だ調べてない。



第2・3・12 図 鉛の一軸圧縮降伏応力曲線

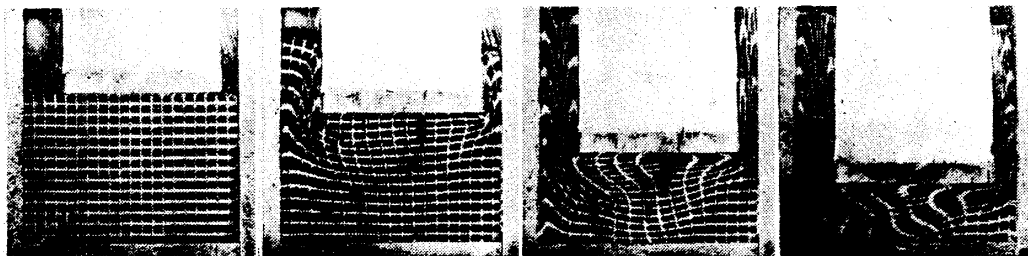
的に解析による圧力上界値よりもかなり高い。また図中●および○はそれぞれ解析および写真観察による定常、非定常転移点である。不完全な潤滑または脱脂条件のために滑らかな型の場合では転移は解析による予想より遅れて起り、粗い型の場合には早期に起ることが考えられ、他方材料の加工硬化は転移を早めることを考えに入れば、転移点に関する解析と実験結果は比較

よく一致していると言えよう。なお実験曲線で途中に段があり矢印で結んであるのは、押出された材料が長くなって工具肩にぶつかったため、素材を一たん取出して押出部を切断し、再潤滑を行ったことを示している。

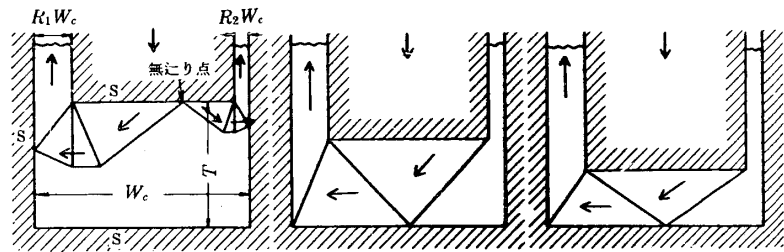
2・4 特殊押出および押出鍛造

2・4・1 並列押出および押出鍛造

本節に示す実験は第1報 1・4・3・1 および 1・5・2・3 で取扱った並列押出および押出鍛造で第1・4・9 図および第 1・5・17 図 (a) のような過程の対称軸より片方のみについて行ったものである。勿論これは非対称穿孔 (第 1・4・9 および第 1・5・17 図 (b)) とも考えてよい。押出



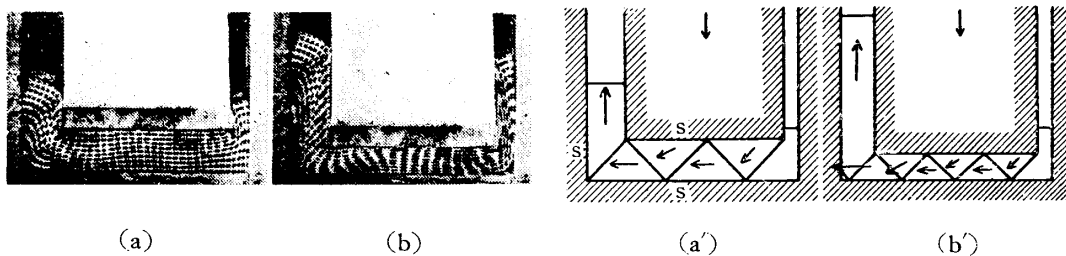
(a) (b) (c) (d)



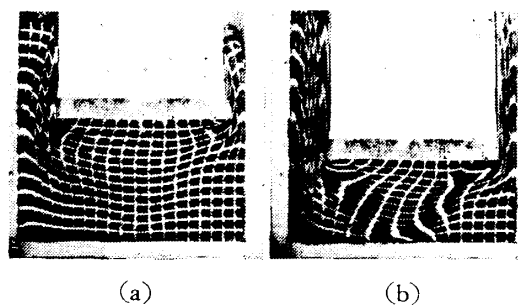
(b') (c') (d')

第2・4・1 図 潤滑せる型による並列組合せ後方押出。 $R_t = 0.75$

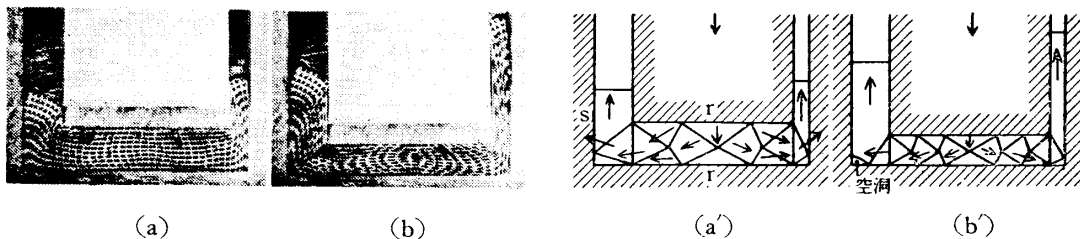
口の中は左側が 3.48, 右側が 1.61 mm で前の記号に従えば R_1 と R_2 はそれぞれ 0.83, 0.92 で全断面減少率 R_t は 0.75 である. 撮影した変形模様と対応する速度場は第 2.4.1~4 図に示した. 第 2.4.3 図の脱脂したポンチと下型による実験に対しては速度場は計算してない. またこの実験では下型面は完全には脱脂されてないようである. 今の場合についても最低上界速度場と変形模様はよく一致している. 例えば第 2.4.1 図では最初は両押出口から同じ速度で押出が行われ, 非定常過程に入るとほとんど左の口からのみ押出が行われるのが見られるがこれは解析から予想される通りである. 第 2.4.2 および第 2.4.4 図の比較はとくに興味がある. 前者は潤滑した工具を用いたもので, 第 1 部の解析結果によれば左側の方からもっぱら押出しが行われ, 右側では素材の最初の高さを保持するに過ぎないはずである. 実際には摩擦のために右側からいくらか押出が行われているが, 左側から押出された材料の方が長い. これに対して粗いポンチおよびラムにおいては無送り点が速度場の図から明らかのようにポンチ中央近くにくるため, 押出長さは狭い押出口の側の方が長い.



第 2.4.2 図 潤滑せる型による並列組合せ後方押出鍛造. $R_t=0.75$



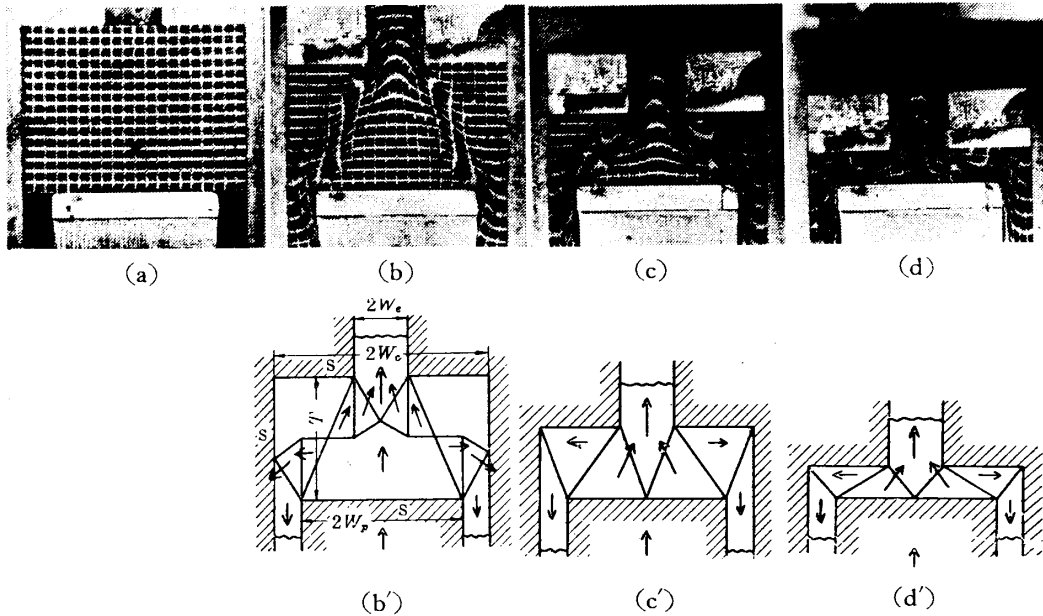
第 2.4.3 図 脱脂せるポンチ, 下型および潤滑せるコンテナによる並列後方組合せ押出. $R_t=0.75$



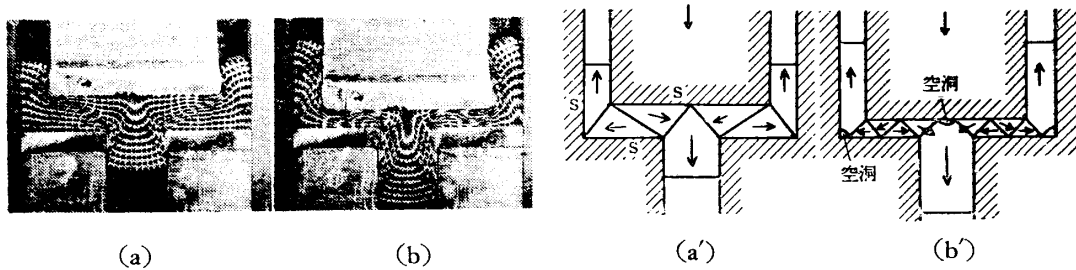
第 2.4.4 図 脱脂せるポンチ, 下型および潤滑せるコンテナによる並列組合せ後方押出鍛造. $R_t=0.75$

2.4.2 向合押出鍛造

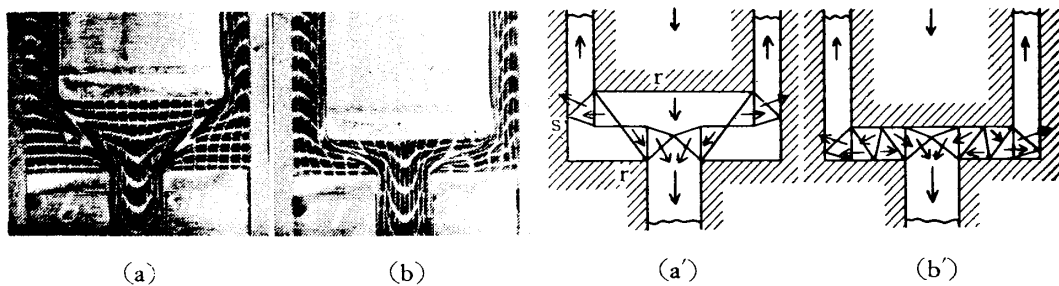
一方の型が押出ダイス，他方の型が穿孔ポンチの向合押出-穿孔鍛造（第1報1.5.2.2）の実験写真および解析速度場を第2.4.5~8図に示す．これらの変形模様も，最低上界速度場から生じるものときわめてよく一致している．また第2.4.9図には $\bar{p}/2k$ と T/W_c の関係の実測値および解析値を示してある．これらもやはり実測値がかなり高いが，両者の傾向はよく一致している．また図中の L/W_c は上下押出口から出た材料の長さ L とコンテナ半



第2.4.5図 潤滑せる型による向合押出-穿孔鍛造. $R_1=R_2=0.75$

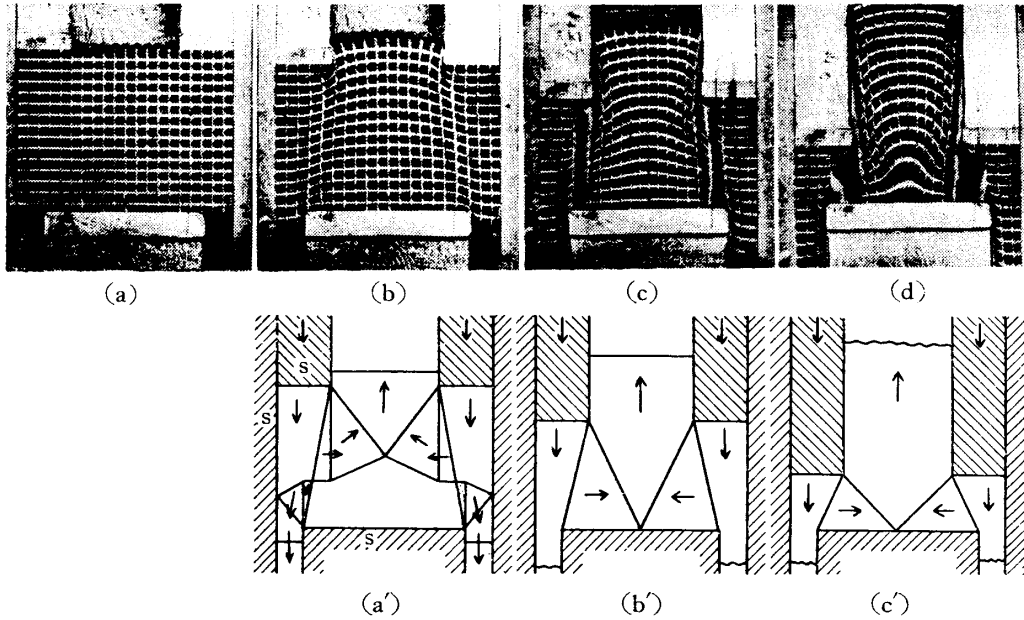


第2.4.6図 潤滑せる型による向合押出-穿孔鍛造. $R_1=R_2=0.75$



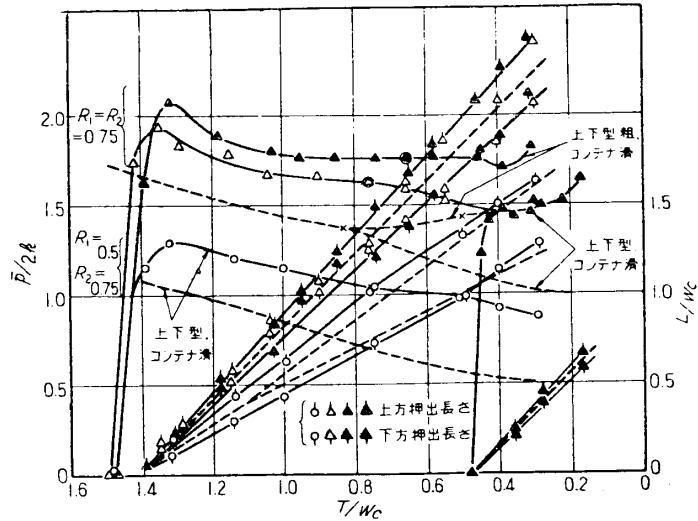
第2.4.7図 脱脂せるポンチ，ダイスおよび潤滑せるコンテナによる向合押出-穿孔鍛造. $R_1=R_2=0.75$

巾 W_0 の比であるが、穿孔側の押出材料は押出側の押出材料に比べてより大きな割合で摩擦抵抗を受けることを考えに入れば、解析結果と実験点の一致は良好である。さらに $R_1 = R_2 = 0.75$ に対する破線中の \times 印および実験点を \circ で囲んだ点は、第 2.4.8 図 (b') の速度場より (c') に移るところのそれぞれ解析予想点と実験結果であるが、両者も割合よく一致している。



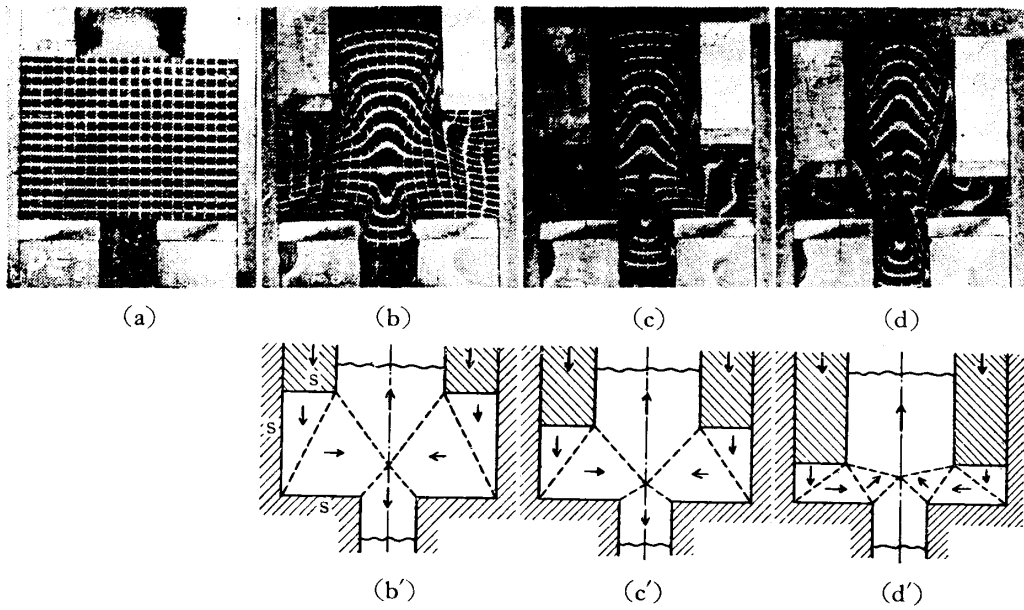
第 2.4.8 図 潤滑せる型による向合押出-穿孔鍛造. $R_1 = 0.50, R_2 = 0.75$

第 1 報 1.5.2.1 で取扱った向合押出鍛造の上下押出口の巾が異なる場合は解析ができなかったが、どのような変形を行うかを見るために上型の $R = 0.5$, 下型の $R = 0.75$ として実験した。第 2.4.10 図の写真はこのときの変形模様であるが、図にはこの写真から推定される剛性三角形速度場をも画いてある。速度場 (b'), (c') では材料は上下両出口より押出されるが、段階 (d') では下の口からの流出はとまる。このことは第 2.4.11 図中の L/W_0 の実験値からもうかがわれる。なお図中の $\bar{p}/2k$ の実験値は、 $R = 0.5$ の普通押出の場合のそれと比べてほぼ等しいが、 T/W_0 が小さくなると、下側のすでに押出された材料より

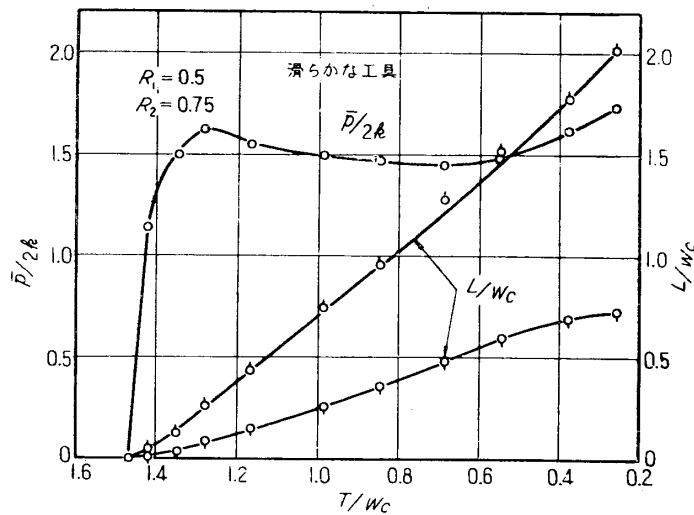


第 2.4.9 図 鉛の平面ひずみ向合押出-穿孔鍛造における加工圧力と押出長さの実験および解析結果の比較。実験点を \circ で囲んだ点および解析線上の \times 印の点は素材全体が変形を始める点。

の拘束によって、いくらか高くなるようである。



第 2.4.10 図 潤滑せる型による非対称向合押出鍛造. $R_1=0.50, R_2=0.75$



第 2.4.11 図 非対称向合押出鍛造における加工圧力と押出長さの実験値

2.5 密閉型による圧印

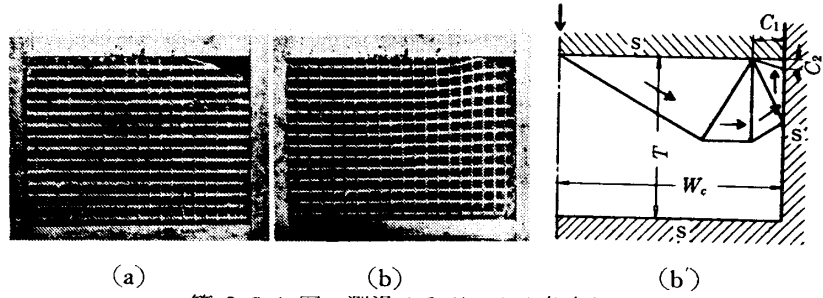
2.5.1 平らな工具による角出

圧印における変形を調べたものとしては型面に楔形凹みを有する工具で盛上げ圧印を行う際の変形を Green [3, a)] がプラスチックによって実験した位のものである。そこで本節では第 1 報において考えた平らな工具による角出加工の実験を行った。第 2.5.1~3 図には変形模様と第 1 報で用いた最低上界速度場の比較を示す。変形がわずかであるために、直観的比較は難かしいが、図中の速度場は大体正しいようである。第 2.5.4 図の $\bar{p}/2k$ につ

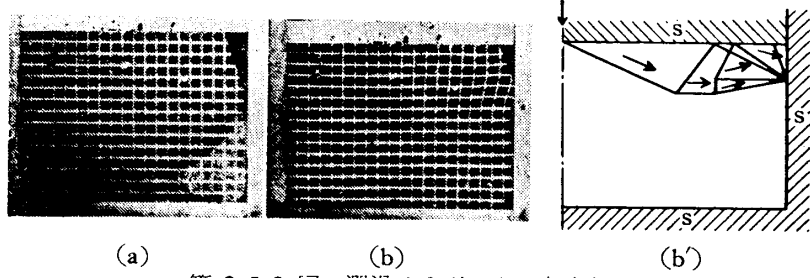
いては、実測値は第1報でこの過程を押出または作頭として解析した結果(破線)に比べて低い。これはおそらく角出過程では変形および変形速度がわずかなため鉛の降伏応力は上述の値よりかなり低かったためと考えられる。また図中の C_1/C_2 は、材料の上型との未接触長さ C_1 とコンテナ壁との未接触長さ C_2 の比であるが全過程を通じほぼ一定を保った。このことは前に考えた速度場と矛盾していない。

2.5.2 凹みを有する型による圧印

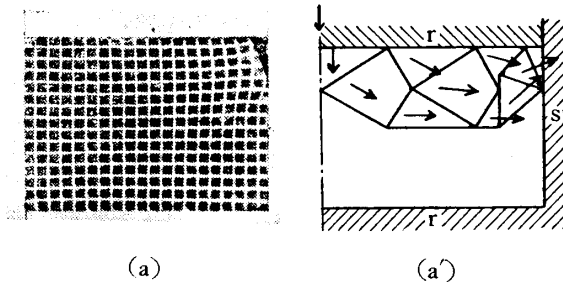
第2.5.5および6図には第1報1.6.2において考察した凹みを有する型による圧印加工における変形模様を示す。第2.5.5図(c')には最低上界速度場を示してあるが、第2.5.6図の凹み内の角出過程に対しては、押出に対する速度場をそのまま用いても構わないが、凹み深さが浅いので圧力上界をもっと低くする他の剛性三角形速度場が存在するはずである。図(b'),(c')中の破線はこのような速度場の推定図である。な



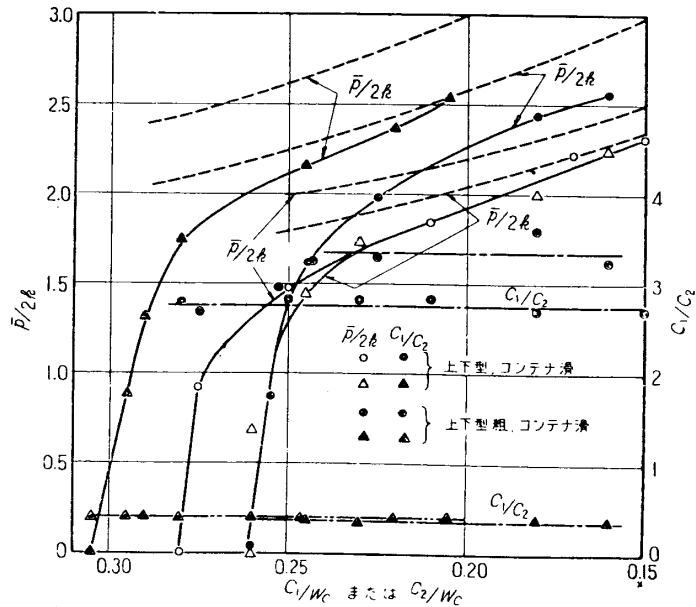
第2.5.1図 潤滑せる型による角出加工



第2.5.2図 潤滑せる型による角出加工



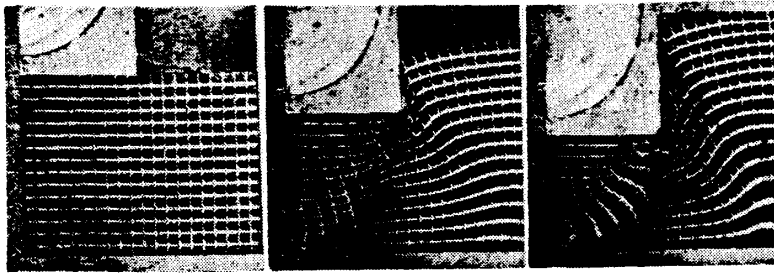
第2.5.3図 脱脂せる上下型、潤滑せるコンテナによる角出加工



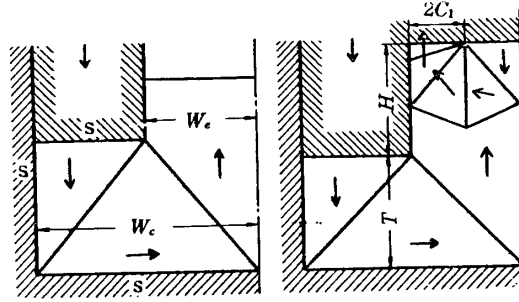
第2.5.4図 平らな型による角出加工における加工圧力と変形様式の実験および解析結果

お第2・5・6図(c)において、材料が型凹みの底に頭をおつけてないものとすれば当然右下隅は持上るはずである(第1報1・5・1参照)。

しかし図のように凹み底に頭がぶつかった条件では底が持上りにくくなる。このことは次のようにして数式化することができる。第2・5・7図で第1報で行ったように領域を①, ②, ③に分ち、領域③の角出過程に対しては凹みの巾当り \bar{p}_e なる圧力が必要であるとすれば、素材断面の平均圧印圧力上昇比は

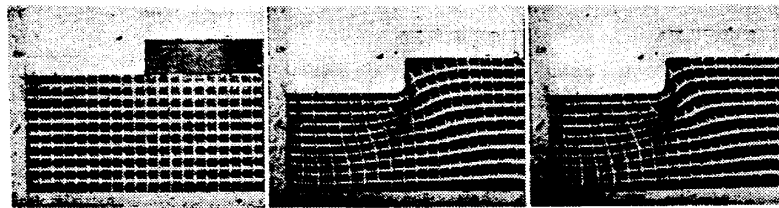


(a) (b) (c)

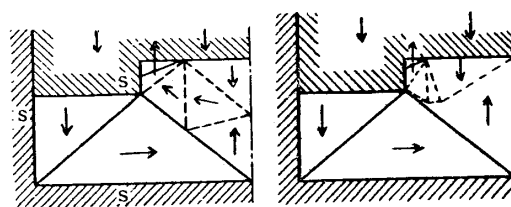


(b') (c')

第2・5・5図 潤滑せる型による圧印加工

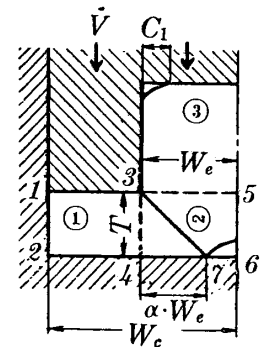


(a) (b) (c)



(b') (c')

第2・5・6図 潤滑せる型による圧印加工



第2・5・7図 押出頭部が型にぶつかったとき素材下側に凹み形成される条件の考察。

$$\frac{\bar{p}}{2k} = \left(1 - \frac{W_e}{W_c}\right)(e_1 + e_2) + \frac{\bar{p}_e}{2k} \left\{ \left(1 - \frac{W_e}{W_c}\right)\alpha + \frac{W_e}{W_c} \right\} \quad (2.5.1)$$

ここで e_1 は領域①に対する内部エネルギー消費率係数であり、領域②の内部エネルギー消費率係数 e_2 は図のような速度場で滑らかな下型の場合にはすでに求めたように(前報(1・1・68)式参照)

$$e_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha \cdot W_e}{T} + \frac{T}{\alpha \cdot W_e} \right) \quad (2.5.2)$$

で与えられる。(2.5.2)式を(2.5.1)式に代入し α について微分して0とおけば

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{T}{W_e}\right)^2 + 2 \frac{T}{W_e} \cdot \frac{\bar{p}_e}{2k}} \quad (2.5.3)$$

を得る。上式で、材料が上型凹み底に達する以前に対しては $p_e = 0$ であるから $T < W_e$ においては

$$\alpha = \frac{T}{W_e} \quad (2.5.4)$$

であり、領域②内の速度不連続線は下型面に対し 45° に傾き前報1.5.1で述べたように材料の下で凹みができる。しかし材料が上型凹みに接し始めると \bar{p}_e はある値をもつため $T < W_e$ に対しても不連続線の下型面に対する傾きは 45° より大きい。もし(2.5.3)式で与えられる α が1またはそれを越すような場合には材料下部の持上りは起らず、不連続線は6の点で終る。上型突起部による押出鍛造の過程で押し上げられた材料の表面が加工硬化および上型凹み側壁上の摩擦のために丸味をもつが、これは純粋な解析からは予測できない。このため角出過程がいつ始まるかも予想は不可能である。

総 括

材料の内部変形直接連続観察器(第2.1.1図)を用い、鉛素材断面上に引いた格子線が平面ひずみ加工中どのように変形するかを写真にとった。加工の種類は平行型による圧縮、平面ポンチ押込、開放型による盛上加工、定常押出および押出鍛造、定常上界穿孔および穿孔鍛造、並列押出および押出鍛造、向合押出鍛造、向合押出-穿孔鍛造、平面型による角出圧印、突起を有する型による密閉型圧印等でそれぞれについて二三の代表的な場合を選んだ。また潤滑条件としてはラノリンによる潤滑を施した場合と、脱脂を行った場合を選んだ。実験によって得られた流れ模様と第1報で得た最低上界を与える剛性三角形速度場の比較を行った結果、変形領域、定常から非定常過程への転移点および外形変形等はほとんどの場合、両者の間で良好な一致が見出された。不一致の原因も主として鉛材料が実際にはいくらか加工硬化を行うのに対し、解析は材料を加工硬化しない剛塑性体と仮定した点と、工具と材料の間の摩擦条件は実際には完全に滑または粗になしえなかったのに対し、解析では完全に滑または粗と仮定した点にあるものと思われる。変形の詳細についての比較は行わなかったが、上の比較によって、第1報で導いた簡単な解析方法が実用上十分な精度を有し、またそこで得られた解析結果は実際加工上の知識をかなり正しく与えるものであることを確かめることができた。

なお本実験では装置の関係上、加工所要力については十分な精度のデータを得ることができなかったが、この点については今後の問題にしたい。

謝 辞

以上の研究を通じ、始終、御指導、援助ならびに激励を賜った東京大学航空研究所福井伸二教授に厚く御礼を申し上げます。また研究室の清野次郎、滝田巖君および岩崎通信機株式会社亀谷成君には実験および原稿校正にあたって多大の援助をいただき感謝いたします。

さらに厄介な実験装置の製作に当られた本所工作部の方々に感謝いたします。また本研究の費用の一部は文部省総合科学研究費に負うものであります。

1958年9月3日 材料部

文 献

- [1] a) Kudo, H.: *Rep. Inst. Sci. Tech., Univ. Tokyo*, **11** (1957), p. 148.
 b) 工藤英明: 機械の研究, **10** (1958), p. 49.
 [2] Thomsen, E.G., Frisch, J.: *Trans. A. S. M. E.*, **77** (1955), p. 1343.
 [3] Green, A. P.: a) *Phil. Mag. Ser. 7*, **42** (1951), p. 365.
 b) *Jr. Mech. Phys. Solids*, **3**(1955), p. 189.
 [4] Purchase, N. W., Tupper, S. J.: *Jr. Mech. Phys. Solids*, **1** (1953), p. 277.
 [5] Hodge, P. G.: *Jr. App. Mech.*, **17** (1950), p. 257.
 [6] Johnson, W.: *Jr. Mech. Phys. Solids*, **4** (1956), p. 269.

Abstract

Hideaki KUDO, *Study on Forging and Extrusion Processes. Part 2 — Experiment on Plane Strain Problems.* In the present part, the flow patterns on lead billet section during plane strain forging and extrusion processes at room temperature were photographed by the use of an apparatus (Fig. 2.1.1) specially constructed for direct and continuous observation of internal flow. Each of the flow patterns thus obtained was compared with the rigid triangle velocity field which had been obtained in Part 1 of the present work as the lowest upper bound velocity field for particular working condition. In almost all cases, their agreements were found fairly well. The discrepancies existed between them might be attributed to the actual work-hardening of the lead billet and the actual imperfect 'smooth' and 'dry' conditions on the boundary surface between work tool and billet, which had not been accounted for in analysis.

Any reliable experimental data on the working pressure was not obtained because of the large friction between sliding die and its guide groove of the experimental apparatus.

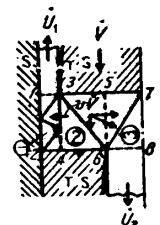
鍛造および押出加工に関する塑性力学的研究 第1報

(第1巻 第1号 所載)

正 誤 表

頁	行	誤	正
40	15, 16	(1.1.5) 式中の λ は	すべて $\dot{\lambda}$ とする
"	24	また λ は正の……	また $\dot{\lambda}$ は正の……
42	9, 10	z 軸 (紙面に直角) の厚さは……	z 軸(紙面に直角)方向の厚さは……
47	第1.1.9 図(c)	$\frac{1}{a} \sum_0^{n-1} b_i, \frac{1}{a} \sum_0^n b_i$	$\frac{1}{a} \sum_0^{n-1} b_j, \frac{1}{a} \sum_0^n b_j$
49	3	次に $f_{13}=f_{24}$ のとき……	次に $f_{13}=f_{24}=1/2$ のとき……

頁	行	誤	正
50	12	しかも側面 34 上で f_{12}, f_{34} の……	しかも f_{12}, f_{34} の……
52	第 1・1・1 表	$srsr^{(ii)}$ $ssrr^{(i)}$ 欄の右端の図を右のように改める	
53	第 1・1・1 表	$rrsr^{(i)}$ 欄の左から 3 番目の図を右のように改める	
"	"	$rrrr^{(i)}$ 欄左端と右端の $n \geq 3$	$n \geq 2$
56	19	$B/T \geq 0.5$	$B/T \leq 0.5$
57	2	$B/T \geq 1$	$W/T \geq 1$
58	第 1・2・8 図(a)	図中の下型が r になっているのを	s に改める
"	下から 10 行	$\bar{p}/2k = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot A_i (\dot{V}_i/B) \dot{V}$	$\bar{p}/2k = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot A_i \cdot \dot{V}_i / (B \cdot \dot{V})$
62	第 1・2・14 図(b)	上り線場理論解	下り線場理論解
63	5	(ii), rrs と rrs に	(ii), rsr と rrs に
63	下から 6	$(1-H/T)$	$\times(1-H/T)$
64	下から 6	$H/\xi \cdot B > 0.72$	$H/(\xi \cdot B) > 0.72$
66	12	度場 1・1・2・3 で	度場 1・1・2・3 で
66	下から 13	$\bar{p}/2k = (\sum_{i=1}^2 e_i \cdot A_i \cdot \dot{V}_i) / W \cdot \dot{V} = e_1 + e_2$	$\bar{p}/2k = (\sum_{i=1}^2 e_i \cdot A_i \cdot \dot{V}_i) / (W \cdot \dot{V})$ $= e_1 + e_2$
"	下から 8	$(F-W)/G = 4\sqrt{7}$	$(F-W)/G = 4/\sqrt{7}$
67	2	$D/W = 4/\sqrt{7}$	$G/W = 4/\sqrt{7}$
"	下から 11	$\bar{p}_i/2k = \dot{E}_i/2k \cdot W \cdot \dot{V} = \bar{p}_n/2k$	$\bar{p}_i/2k = \dot{E}_i/(2k \cdot W \cdot \dot{V}) = \bar{p}_n/2k$
68	下から 4	$a_2 = G/(W_c - W_p)$	$a_2 = (W_c - W_p)/G$
69	20, 21	$\bar{p}/2k = 2\sqrt{(1-R)/R} \times (e)_{a=\sqrt{(1-R)/R}}$	$\bar{p}/2k = 2(e)_{a=\sqrt{(1-R)/R}}$
73	14	第 1・4・4 図に □ と × 印で示す。	第 1・4・4 図に □ 印で示す。
74	14	$\bar{p}/2k,$	$\bar{p}_1/2k,$
76	16	$\dot{E} = 2k \cdot \bar{p}_1/2k \cdot (1-\rho) W_c \cdot \dot{V}$ $+ 2k \cdot \bar{p}_2/2k \cdot \rho W_c \cdot \dot{V}$	$\dot{E} = 2k \cdot (\bar{p}_1/2k) \cdot (1-\rho) W_c \cdot \dot{V}$ $+ 2k \cdot (\bar{p}_2/2k) \cdot \rho W_c \cdot \dot{V}$
"	18	$\bar{p}/2k = \dot{E}/2k W_c \dot{V}$ $= \bar{p}_1/2k \cdot (1-\rho) + \bar{p}_2/2k \cdot \rho$	$\bar{p}/2k = \dot{E}/(2k W_c \dot{V})$ $= (\bar{p}_1/2k) \cdot (1-\rho) + (\bar{p}_2/2k) \cdot \rho$
77	16	$\dot{U}_1 = (R_1 - \rho)/(1-R_1) \cdot \dot{V},$ $\dot{U}_2 = (\rho - 1 + R_2)/(1-R_2) \cdot \dot{V}$	$\dot{U}_1 = (R_1 - \rho) \dot{V}/(1-R_1),$ $\dot{U}_2 = (\rho - 1 + R_2) \dot{V}/(1-R_2)$
78	15	このようにして第 1・2・16 図 (b)	このようにして第 1・2・14 図 (b)
80	2	でラムが粗い	で下型が粗い
83	5	第 1・4・4 図には、定常から非定常過程に移る T/W_c を示してある。	第 1・4・4 図の粗い下型における G/W_c はまた 定常から非定常過程に移る T/W_c を示す。

頁	行	誤	正
84	第1・5・10図の 説明および第 1・5・11図の中	向合押出-押出鍛造	対称向合押出-鍛造
86	第1・5・14(b)	を右図のように改める	 <p>(b)</p>
87	7	第 1・1・1 表から a_2 のみの	第 1・1・1 表から e_2 は a_2 のみの
"	8	なら $e_1 > e_3$,	なら $e_1 > e_3$,
"	9	$e_1 < e_2$ となる.	$e_1 < e_3$ となる.
"	13	がともに 1 以下になる……	がともに 1 以上になる……
"	15	他方 R_2 が比較的大きい……	他方 R_2 が比較的小さい……
95	23	Shield	Shield
96	14, 26	deviding	dividing