らなかつた。第 40 図は軸受断面の圧力分布を示すものである。第 40 図 a は給油遮断前の初状態で、この場合の給油量は 7 cc/s であつた。 b は給油遮断後 1 mn, c は 5 mn 後の油圧分布で、この間の圧力状態変化は初めの間極めて速かであり時間の経過するにつれて緩かとなる。 d は 12 mn 後でこの間暫く一定の状態が続いた。 e は 19 mn 後、 f は 25 mn 後でこの間圧力が次第に減少し初期と比較すると相當著しい圧力分布の変化が見受けられる。 g は 31 mn 後、 h は 37 mn 後でこの間、相當に長く一定の状態が続いた。 i は 42 mn 後、 j は 45 mn 後で 40 mn 過ぎより圧力は漸次消滅し始めた。 k は 47.5 mn 後、 l は 50 mn 後の状態でかなり速かに変化してゐる。 l の状態では勿論半液体摩擦の状態にあり、これより後相當に永くかくの如き低圧力が残り或る範囲で昇降しつつ最後に全滅する。尚、油膜圧力の減少につれて軸受の横振が著しくなつた。

4. 結 論

1. 軸が曲げ変形を受ける場合 普通寸法比 ($l/d=1 \sim 1.5$) の軸受に於ては両端における圧力が著しく高くなり、荷重の高い場合、軸受中央に於て圧力低く両端に近く圧力の集中することがある。

2. l/d が極めて小なる軸受に於ては圧力範囲が円周方向

にも軸方向にも狭く、高圧範囲が軸の負荷側中央に生成する。

3. 軸回転速度が小なる程、圧力分布範囲が廣くなり、軸の曲げ変形の影響が著しくなる。

4. 軸回転速度の増加による滑油温度上昇は相當に著しいものであるが、荷重の変化による滑油温度の差異は余り著しくない。

5. 滑油の粘度が高い程油膜圧力が高くなる傾向を有し、且軸の曲げ変形の影響が少くなる。

6. 滑油供給量が多い程、圧力範囲が廣くなり、且圧力分布が緩かとなる。又軸の曲げ変形の影響は給油量が多い程少くなる。

7. 軸受内の高圧部に漏孔を穿け、細管を通じて滑油を漏出せしめる場合、圧力分布は給油量が減少したるかの如くに変化する。但し、その変化は漏孔を有せざる場合に比較して左程著しいものではない。

以上、結論として挙げたものは、何れも定性的事項であるが、本実験の目的の一部が箇々の場合における数量的吟味にもあつたことを特に附記しておく。

本報告は服部報公會の援助を受けて施行中の「軸受の研究」の一部に属するものであり、同會に深甚の謝意を表するものである。

(昭和 13 年 4 月 5 日受付)

金属材料引拔用ダイスの形状に関する研究⁽¹⁾

(昭和 13 年 4 月 10 日 第 15 期定時總會講演會に於て演講)

正 員 山 ノ 内 弘⁽²⁾

摘 要

ダイスに依る引拔加工には相當のエネルギーを要し、従てダイスの形状を適當にしてそのエネルギーを小ならしめることが必要である。茲に引拔線材の変形状態を考察して考案した近似ハイパボリックサイン曲線ダイス 4 種並にダイス壁面角 4° , 8° 及び 12° の円錐形直線ダイスに就て炭素量 0.12~0.8% の鋼線材 4 種、銅線材及びアルミニウム線材を用ひて引拔実験を行ひ、断面縮率に關聯する引拔力及び各引拔材の機械的性質の変化及び顕微鏡組織を比較した。又二次元的ダイス模型を以て濃度一定なる粘性流体を一定の圧力の下に流出せしめて各部における流れ状態を測定して曲線型が良好なることを明かにし、ダイスにおける変形に対する参考とした。本実験の範囲に於ては、引拔材のダイスへの最初の接触角は $6^\circ \sim 12^\circ$ 位を適當とし、引拔仕事量を小にするためには断面縮率少き場合 (約 15~20% 以下) は小なる壁角を用ひ縮率大とする場合は大なる方の壁角とすると有利である。又曲線ダイスは直線ダイスに比較して引拔材を硬化 (脆化) せしむることが少い等の影響を示し得た。適當なる曲線ダイスの形状に就て論及してある。

1. 緒 言

ダイスを以て金属材料が引拔加工される時は可成り多量のエネルギーを要するので、これに用ふるダイスは強固なると共にこのエネルギーを出来るだけ小ならしむることが必要である。而してこのエネルギーは 3 種に大別される。(a) ダイス壁面と金属材料面との接触摩擦エネルギー、(b) 材料の細長

く変形するに必要なエネルギー、(c) 材料内部における分子の滑りに因る附隨エネルギー即ち内部損失とであつて、(a) は外部摩擦エネルギー、(b) は変形エネルギー、(c) は内部摩擦エネルギーである。これ等を正確に分離することは困難であり又色々の誤差が起り易い恐れがある。故にダイスを使用して実際に仕事をする場合に関聯する諸条件即ちダイスの特性 (ダイスの材質、引拔加工材の種類等)、ダイスの形状、ダイスの耐久性、潤滑剤、引拔速度等を基として実験的に解決せんと

(1) Studies of die Shapes for Metal Drawing. (2) Hiroshi YAMANOUCHI, Member, Waseda University. 早稲田大學。

又一方には或る仮定（変形中各横断面上の應力は一様に分布する）の下に理論的に研究されつゝある。

本研究は引拔加工に依て材料中の各部の変形状態を考察して、その変形に最も適合するダイスの形状に就て攻究するにある。従てダイスの形状以外の諸条件は或る一定の下に於て実験を行ふことにした。

2. 引拔加工における変形状態

若し第1図のイよりロに示す様に变形するのみであ

れば前述の变形エネルギーを要するのみである。然るに実際の引拔変形は第2～4図に示す如くであり⁽³⁾、3者共に焼鈍した鋼材を断面縮率36%に引抜いたものであるが、使用したダイス壁面が夫々 12° 、 24° 、及び 40° であつてダイス最小径は20mmである。即ちこの3本の引拔鋼材の延率は相等しきも各部の滑りは中心に対して外縁に行く程稍大である。従て外縁部は中心部に比べて引拔方向に於て遅れてゐる。この変形状態はダイス壁角の大なるもの程甚だしく更に壁角が大なるときは所謂過剰引拔となつて中心部に切離を生じ、次で滑離を生じて漏斗状裂疵を中心部に生ずるに至

り、比較的延性の少き材料程その影響は鋭敏である（例へばアルミニウム線材に於て）。第5図aのダイス内の変形部分の格子線を外側よりI～IVとし、各線の縦方向の変形及び滑りを測定せるものは第5図bであつて、これ等の変形総和は線材末端部の変形量と大差がない。その変形主軸の方向を決定して主歪應力線を描けば第6図を得る。

又この変形状態を組織学及びX線廻析法⁽⁴⁾に依ても測定されて力の方角への変形は中心部最も大にして外縁部は小であることは明かにされてゐる。

3. ダイスの形状

引拔材に加へられた引張力の一部はダイス壁の傾斜によつて圧縮應力に変化して連続的に変形を生ぜしめるから、この圧縮應力は変形中に適當に分布されねばならぬ。この分布状態はダイス孔の形、ダイス材質、潤滑剤の効果、引拔断面縮率等に関係し、複雑な関係にある。

又外部摩擦の影響は一般に引拔加工に要した全エネルギー

の相當量を占めてをり、その摩擦係数は多くの場合未知であり又引拔中における係数の変化も不明である。Sachs⁽⁵⁾はダイス孔面の研磨度及びダイスを回転せしめた結果が引拔力に及ぶ影響を実験的に明かにしてをる。又別に潤滑剤の不良なる場合並にダイス孔細長過ぎに接触面が大なるために摩擦力を増大した点も実験的に明かにされてをる。

第1図

若し摩擦係数大なるときはダイスの入口近くの圧縮應力に摩擦の影響が集中され易く、この部分に引掛りを生ずる恐れあり、又圧縮應力の分布が出口に向ふに従て急劇に減少するとき

は引拔材の直径はダイスの孔径よりも小となることもある。然るに潤滑が良い時には反てダイス孔の最小径の部分が早く磨耗する場合もあり、乾式潤滑の場合に生じ易いことは他の実験で明かである。

以上の諸現象を考察すれば、ダイスの形状は潤滑の条件を加味して、ダイス壁からの圧力が引拔材の入口部から漸次に減少して出口に於て殆ど零となるのが理想的である。

又E. Siebel⁽⁶⁾等の実験によれば、(a)適當なダイス壁角は断面縮率の増すと共に小なる角（約 6° ）から更に大となり、(b)壁角の大なる程外部摩擦仕事は少く、変形仕事（内部損失）は増大する、(c)引拔力に及ぶ引拔速さの影響は左程大でなく甚だ低速なれば稍急速に増加するが $0.001 \sim 0.4 \text{ m/s}$ の間では殆ど一定であると提唱されてをる。

彼の靱性に富む材料の引張試験片を引張つて部分的断面縮小を生ぜしめた後には長手方向と横方向に應力を生じ、その断面上の應力分布は一様でなく、外周部は中心部に比較して自由に塑性変形をなして中心部と傾角をなし中心部の軸方向への変形を妨げるので、應力は中心部最大である⁽⁷⁾。Linicus⁽⁸⁾は部分的断面縮小を生じた試験片を円筒状に仕上げて引張つたが、なほ更に應力を加へて延し得た。又ダイスを以て引拔材の外皮部を相當深く削去して中心部の強さを測定したが、ダイス壁面の大小の影響は少く、單に引張力を加へて同一程度に断面縮率をなしたものとその強さの変化は殆ど同一であつた。

この事実から引拔材の中心部は單に引張変形した場合と同様に考へられ、外皮部は相當の深さ迄ダイスからの圧縮力

第2図

第3図

第4図

第5図 a

第5図 b

第6図

(3) E. Siebel und H. Hühne, Miff. aus dem K.-W.-I. für Eisenf. 13 (1931) 43/62, A. Pomp und U. Schylla, Miff. aus dem K.-W.-I. für Eisenf. 16 (1934). 51. (4) E. Schmidt, G. Wassermann, Z. f. Metallk. 19 (1927), 329, その他。

(5) G. Sachs, V.D.I.Z., 76, (1932), 49.

Stahl u. Eisen, 48 (1929), 561

(6) E. Siebel, 著者, 機械学会誌. 34, 165 (昭和6年) 1~20. (8) W. Linicus, Z. f. Metallk. 23 (1931). 205.

を受けて変形しをるから、ダイスの作用の適当なるかはその変形度に依て引張及び圧縮変形の大小に関係するものと考へられる。而して引張変形には相當の時間を要し又位置に依るのであるが、ダイスはこの断面縮小を極めて迅速に且連続的に繰返させ定常の連続的な流れ変形を生ぜしめる。故に若

引拔を生ぜしめ易い。故に引拔引張應力 ($\sigma_0 = P/A_0$) が引拔材の弾性限度を超えない最小の引拔力となる様にダイス壁角を選ばべきである。又その全接触面を余り大とせず、その面は十分研磨すべきである。

若し ダイス における磨耗が傾斜面のみに生ずるものとす

第 7 図

第 8 図

第 9 図

第 10 図

し部分的断面縮小を生じた引張試験片における流れ変形の最も自由なる部分の外形に適した変形を迅速に引拔材に與へる様な ダイス の形状とせば変形仕事を最小にし得べく、各種材料の引張試験片の断面縮小部の外形に共通なる曲線 $y = \text{arc cosh} (\sin x / \sin x_0)$ を採ることにした⁽⁹⁾。第7及び8図に種々の形状となした本曲線ダイスを示す。但し一般に凸状曲線ダイスではダイス入口の処に大なる圧縮應力を生じ(即ち引拔力を P 、壁面を ϕ とすれば壁面への直角分力 $N = P \sin \phi$ は ϕ の大なるために大となる)、摩擦の影響を集中させ易く、又同時に潤滑不充分のときは引拔材の中心部が先進して過剩

第 11 図

れば孔の後部には殆ど磨耗を生ぜず従て孔径の擴大されることが遅いのであるが、実際には引拔材の弾性により生ずる圧力は孔の後部に作用するから磨耗を生じてをる。故に後部には円筒状孔を附加する必要がある。第7図に示すものはこの円筒部長きに失して孔径を正確に保持すれども反つて摩擦力を増して力を消費してゐるから、第8図に示す様に円筒部の長さは孔径の1/2以下にとつた。

その結果は次の実験に示す様に良好である。

4. 引拔実験結果の比較に使用した計算式

(a) 引拔工事の式 (i) 外部摩擦を考へない時の変形第1図仕事は Fink⁽¹⁰⁾ の式を用ひた。

$$U_0 = A_1 l_1 k \log_e (A_1/A_0) \dots \dots \dots (1)$$

但し A_1 と l_1 は材料の引拔前の断面積及び長さ、 A_0 と

⁽⁹⁾ 著者、機械学会誌、34,172 (昭和6) P 及び特許第 111623 号 (昭和10)。

⁽¹⁰⁾ C. Fink, Z. Bergwes, Preuss. 22 (1870) 200.

l_0 は引拔後の断面積及び長さで、容積不変の仮定の下に $A_1 l_1 = A_0 l_0$, k は引拔変形抵抗で引張又は圧縮の変形抵抗に等しと仮定し、主應力の差即ち最大剪断應力の2倍に等しとし、降伏点應力をとつた。又 σ_{h0} を引拔後の断面上の軸方向の平均引張應力とすれば、

第 12 図

第 13 図

第 14 図

第 15 図

$$\sigma_{h0} = U_0 / A_0 l_0 = k \log_e (A_1 / A_0) \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{引拔力 } P_0 = \sigma_{h0} A_0 = A_0 k \log_e (A_1 / A_0) \dots \dots \dots (3)$$

(ii) 摩擦を考へた場合の変形仕事の式は Siebel⁽¹²⁾をとれば、これより引拔材に及ぶ引張應力は次の式となる。

$$\sigma_0 = k(1 + \mu \cot \phi + \mu \tan \phi) \log_e (A_1 / A_0) \dots \dots \dots (4)$$

但し摩擦係数は未知であり、ダイス壁角 ϕ は種々異なる故これを変じて、

$$\sigma_0 = k' \log_e (A_1 / A_0) = P' / A_0 \dots \dots \dots (5)$$

P は引拔に要する力ととり、 k' は材料の変形及び摩擦抵抗とした。純変形仕事に実際に費された仕事との比をダイス効率 η と呼ぶことにした。即ち、

$$\eta = k/k' \dots \dots \dots (6)$$

5. 引拔実験

(a) 実験範囲 ダイスの形状による引拔の影響を考察する目的を以て、前述の近似ハイパボリック曲線ダイスを4種(0.2, 0.5, 0.8, 及び 0.3 曲線ダイス)と円錐形直線ダイスを3種(壁面角 8°, 4° 及び 12°)を作製し、引拔実験に使用せし線材は炭素量 0.12, 0.4, 0.6 及び 0.8% の鋼線材と純度 99.89% の銅線材と、純度 99.3% のアルミニウム線材とである。但し鋼材は全部 ソルバイト組織で引拔加工を行ひ、連続引拔の線材は普通組織のものである。又各線材の直径は断面縮率を種々に変する必要上種々の寸法のものを用ひ、所要直径には夫々研磨落しをなした。これ等線材の引拔力を測定し引拔加工を比較すると共に引拔線材の性質を比較し、各種ダイ

スの作用を比較した。又別に粘性大なる流体を以て流れの状態を実測し、実際の引拔作用の比較の参考とした。

(b) ダイス材料 各種ダイスは一様の材料より製作しその硬度及び壁面状態も同一ならしめるため第7図に示すものは窒化鋼を用ひてダイス孔を穿つた後 500°~580°C で 60

~68 h 窒化を施しショアー硬度約 70 である。第8図に示すものは、材料不足のため炭素鋼にて作製し焼入したものである。従て引拔材の比較に於ては別に取扱つてある。

ダイス孔の形状寸法を測定するため ヲット合金をダイス孔内に熔かし込んでこれが外形を平行光線の下に撮影し、各部寸法を測定した。図面寸法と多少異なるものもあるが図面寸法で所要の計算を行ふた。

(c) 引拔実験の結果 10t アムスラ材料試験機を用ひ、0.2 cm/s の速さで引抜き、潤滑には グリース を用ひた。引拔荷重 P は第11図に1例を示す様に一定値に達したものを取つた。実験結果は各炭素量毎に夫々線図を以て示すことにし、A 群は 焼入鋼ダイス をで又 B 群は 窒化鋼ダイス での引拔結果を示し、窒化鋼ダイスは研磨不充分なること、孔後部の円筒部の長きために、摩擦の影響著しく表はれてをる。

引拔引張力 σ_0 と断面縮率 q との関係は第12~15図に示され、A 群では縮率少い間は壁角小なるダイスが引張應力比較的少きことを示し、即ち変形仕事の小なることを示し、縮率大となると逆に壁角大なるダイスが引張應力比較的小となる。これは小壁角ダイスに於て摩擦の影響大なるため変形仕事の比較的大なる大壁角ダイスよりも引張力を増すためである。B 群はその摩擦の影響大なるために縮率の大小に拘らず壁角大なるものが引張應力小である。茲に適當なる壁角は 8°~12° であつて、0.3-5 ダイスは 12° ダイスと殆ど同様の結果を示してをるがなほ摩擦面積大なるために引張應力は稍大となつてをる。

単位断面縮率に要する引拔應力の関係は第16~19図に示され、断面縮率の増すと共に急降しをるは摩擦力の影響を顕著に示してをり、曲線の急降の終つた点に相當する断面縮率が経済的引拔であつてこの場合は低炭素鋼で約 20% 附近で

(12) E. Siebel (Z. f. tech. Phys., 7. (1926). 335) は引拔前後の体積は不変、引拔行程にある各断面は平面であり(第9図)、この断面上の引張及び圧縮應力の σ_h と σ_n とは一樣に分布し、これ等の應力の変化は一次的であり(第10図)、ダイス壁面上では摩擦係数一定値であり、両應力の和は一定値であるとの仮定の下に引拔力と傾角と摩擦係数と変形抵抗との関係式を求めた。その後 Francis 及び Thomson Institute of Metals, (1931-9) や、Horsburgh 並に Sachs, (V.D.I., Z., 76. (1932), 49) も算定式を求めてをるが、実験値とは相當に差違を生じてをる。

(12) 若鉛 50, 錫 27, 鉛 13, カドミウム 10% より成る。

あり、高炭素鋼で 25% 附近である。これ以上の縮率にて変形仕事が多く関係することになり、特に 4° ダイスの如き曲線の上昇する傾向のあるは更に摩擦仕事の増大するためと思はれる。

摩擦及び変形抵抗としての k' (第 5 式) と断面縮率との関係は第 20~27 図に示してある。A 及び B 群曲線は第 16~19 図と同じ傾向を示し、急降下の終る点附近が摩擦損失の影響を小ならしむる経済的断面縮率である。約 20% 附近である。

効率 η (第 6 式) と断面縮率との関係は第 20~23 図に A 群を第 28~29 図に B 群を示してある。断面縮率 20% 以上では次第に緩かな上昇曲線となり、 $k'-q$ 曲線と対照すれ

ば、各ダイスの性能は一層明かである。

以上の実験範囲に於ては、各ダイス共に断面縮率約 20% で外部摩擦の影響を最小になし得て、これ以上の縮率に対してはダイス壁角は 4° 以上なるを要し、8°~12° のものは各炭素鋼に対して良好な結果を得てをる。

なほ摩擦力は接触面積に関係があるから各ダイスにおける接触面積と断面縮率との関係を第 30~31 図に示し、4° ダイスは特に面積の増大又変形仕事はダイス壁角度に関係するから曲線ダイスにおける断面縮率と最初に接触する位置における壁角度との関係を第 32 図に示した。0.3 ダイスと 0.5 ダイスと殆ど一致したのは実物の寸法に依たためである。2.0~5 ダイスは 3°~8° の間にあり、0.3 及び 0.5-5 ダイスは

第 24 図

第 25 図

第 26 図

第 27 図

第 28 図

縮率 15% 以上は 12° よりも大である。

各種ダイスの引拔引張應

第 29 図

第 30 図

第 31 図

第 32 図

力と壁角度との関係は第 33~34 図に示され、又単位伸歪 $\epsilon_1 = (l_0 - l_1)/l_1$ に対する引拔應力 $\sigma_1 = P/A_1$ の比と壁角度との関係は第 35~36 図に示してある。同じ断面縮率の点を結んで見ると各炭素鋼共に A 群では 12°, B 群では 8° が最小値を示してをる。

(d) 引拔鋼線の機械的性質の変化 引拔材の引張強さの断面縮率に依る変化は第 37~38 図に示し、摩擦影響

第 33 図

第 34 図

第 35 図

用の大なる傾向あるダイスを使用することは注意すべきである。

引拔材の引張降伏点應力の断面縮率による変

第 36 図

昭和 13 年 8 月]

化は第 43~45 図に示され、0.3-5 ダイスは直線ダイスに比較しその変化度合が緩やかな傾向にある。尚各炭素量の線材は

引抜前に
は夫々降
伏点應力
32.5, 35.8
42.3, 48.3
kg/mm²
であつ
た。尚又
各ダイス
壁角度と
引抜材の

第 37 図

第 38 図

第 39 図

第 40 図

引張結局強さとの関係は
第46~47 図に示され、引
抜材の伸張率との関係は
第48図に示してある。各
ダイスにおける断面縮
率は夫々同一程度に取つ
たのであるが多少の差違
があるのでこれ等の線図
中で同一断面縮率の点を
結び得ない(第 33~36 図
に於ては同一断面縮率の
ものに実験曲線から訂正
したのである)。

第 41 図

第 42 図

第 43 図

(c) 連続引抜実験 第
7 図の 0.2-0 より 0.2
-6 ダイス まで連続引
抜を行ひ、又同種類の
材料で夫々 0.5-1 より
0.5-6 ダイス まで、又 0.8-1 より 0.8
-1 ダイス まで、各連
続引抜を行ふた。引抜
速度は前と同様にして
材料は銅線材、アルミ
ニウム 線材、0.12% C
鋼線材を用ひた。但し

第 44 図

第 45 図

第 46 図

0.3 型 ダイスは其の壁の
接触し始める 角度大に過
ぎ、引抜き得たるもの少
きを以て省略した。この
連続引抜実験における各
引抜断面縮率は其の引抜
仕事が同一な様に選定さ
れ、各引抜後に一定温度
で焼鈍した。従て各実験
線図の横軸座標は縮率の
和より成つてをる

第 47 図

第 48 図

が、これは便宜上の示し法であつて焼鈍せずに連続引抜いた場合とは異なるものである。

引抜いた各回毎の引抜引張應力 $\sigma_0 = P_0/A_0$ 、引抜應力 $\sigma_1 = P_1/A_1$ 及び引抜材の引張結局強 σ_2 とその引抜断面縮率との関係を第 49~51 図に示す。又引抜伸率 $\varepsilon_1 = (l_0 - l_1)/l_1$ 、單

倍とその減少度が少い。

6. 粘性 大なる流 体を以て の實驗

(a) 實驗裝

置 Tresca⁽¹³⁾, St. Venant⁽¹⁴⁾ 等の實驗から、相當に大なる應力の下に金属の塑性變形する状態は強い粘性体の流れ變形状態と本質的に同一であると認められてゐる。一般に流体の流線は最初からな流線であつても圧力が増加につれて渦

流になるが、粘性大なるものはこの流線の渦流に変ずるのではなく粘性に應じて大なる圧力を要する。金属の流線變形は全く渦流を呈しない。而して流体の薄い層における流線(二次元的)は対称の場合に於て計算により得る不粘性流体の二次元的流線と形に於て同一であること(Winterbottom⁽¹⁵⁾等)に依て見出されてゐる。Stokes⁽¹⁶⁾ もこの事實を認めてゐる。故に對稱形の場合の變形状態の研究に於て、完全流

位引抜伸率に対する引抜應力の比 $\beta = \sigma_1/\varepsilon_1$ 、並に引抜材の引張結局伸率即ち伸張率 ε' とその都度の引抜断面縮率との関係を第 52~54 図に示し、又各實驗値とダイス壁の接触し始める点の角度との関係を第 55~57 図に示してある。

この實驗に於ても断面縮率小なる間は 0.2 型ダイスの方引抜應力小なるが縮率大となると 0.5 型ダイスの方が小となつてをり、その引抜材の引張結局強さ及び伸張率の変化した有様からは 0.2 型ダイスが 0.5 型ダイスよりも稍良好と思はれる。これは 0.5 型ダイスの接触角度の大なるためである。又鋼とアルミニウムは断面縮率の多くなるに従て可成り急激に變形仕事量が少くなるが(第 16~19 図参照)、鋼は前二者に比

(13) Tresca, Comptes Rendus des Séances de l'Académie française I, 1877. (14) St. Venant, Comptes Rendus des Séances de l'Académie française 1868-1872. (15) A. B. Winterbottom, The J. of the Iron and Steel Inst., 11, 1935, 170. (16) Stokes, British Association Reports, 1898, 113-144, 1901.

体の流れと相似である場合は二次元的模型内の粘性流体の対称の流れの状態を適用し得る。但し模型内の流れの断面積縮小甚だしきとき及び対称でない場合は多少の誤差を生ずる。この主旨の下に二次元的模型を 1897 年に Hele-Shaw⁽¹⁷⁾ が作り、又 Thompson⁽¹⁸⁾ が実験してをる。

ダイスを以ての引拔変形の様に全く対称にして断面縮率も左程でない変形状態にあるものには粘性流体のこの二次元的模型における流れ変形状態を研究するの有利なるを思

第 58 図

ひ、第 58 図に示す模型を製作した。図中、*A* は空気圧縮機、*B* は圧縮空気槽、*C* は赤色の粘性流体槽、*D* は白色の粘性流体槽、*M* は圧縮機用電動機、*K* は圧力調節用 コック、*L* 及び *N* は管接手、*E* は模型箱であつて 2 枚の硝子板から

成り製図紙で輪廓を作つた模型 *F* を挟み左端には噴射孔を有する黄銅製箱を取付け、硝子板の周圍に締付用金具を附す。全装置は第 59 図に示してある。

粘性流体には種々のものを試用した結果、うどんこ糊を使用すること

第 60~63 図

第 59 図

第 64, 65 図

第 1 表

図面 番号	ダイス角	壁面の角	断面縮率 %	粘性流体 の圧力 atm	流出孔よ りダイス 迄の距離 cm	平均流 速度
60	33°	16.5°	42.7	1.5	25	
61	33°	16.5°	42.7	1.5	25	
62	18°	9°	30.7	2.0	25	別記
63	15°	7.5°	30.0	2.0	25	別記
64	15°	7.5°	40.0	2.0	25	19.7
65	0.2-5 型	約 7.7°*	30.0	2.0	25	別記
66	0.5-5 型	約 20°*	30.0	2.0	25	別記

* 最初の接触点の角を示す

(17) H S Hele-Shaw, Trans. of the Inst. of Naval Architects, 39, (1897), 145. Ibid, 40, (1898), 21. Annual Report of the British Assoc. (1898), 136. (18) Herbert and Thompson, J. of the Iron and Steel Inst. No. 11. (1935), 117. Engineering (1935) 347.

第 2 表

図面 番号	停止までの時 間 6.4 s にし て各点迄の 距離 mm	流れ 平均速度 mm/s	図面 番号	a~i までの時 間 0.4 s にし て各点迄の 距離 mm	流れ 平均速度 mm/s
第 62 図	a 356	55.7	第 63 図	a 140	14.6
	b 357	55.8		b 132	13.8
	c 355	55.4		c 128	13.3
	d 400	62.4		d 135	14.0
	e 360	56.3		e 153	15.9
	f 364	56.8		f 130	13.6
	g 363	56.7		g 124	12.9
				h 130	13.6
				i 134	13.9

にした。各試験毎に一定の濃度及び粘性を保たしめるために、傾斜落球粘度計を用ゐて 200 ポイズ程度となし、又糊を赤色とするために独逸 IG 製 パーマネント レッド 2B の着色インキを用ひ、浸透性少く又糊の粘性度にも影響がなか

つた。

模型用紙は厚さ約 1 mm の白ボール厚紙を用ひ、流体の接触する面には蠟を整つて摩擦を少くした。模型は種々の傾向及び曲線ダイスに相当するものを作製して実験を行ふた。

(b) 実験例 第61～65 図並に第1～2表に粘性流体の流れ状態を示す。

而して流速分布の算定には、体積不変の仮定の下に、各点の流速は流線間の関係距離を測定して求めることにした。断面縮率 30

% に対して第 66 図は 0.2-5 ダイス模型における各断面上の流速分布を示し、第 67 図は 7.5° ダイス(前述の 8° ダイスに相当するもの)型におけるもの、第 68 図は 0.5-5 ダイス型における流速分布を示してある。又参考として第 69 図は 0.5-5 ダイス型にて面積縮小率約 40% の場合に出口部の流路の左右を約 1 cm 擴げた模型における各断面上の流速分布を示し、第 87 図の流速分布状態に比して尚ほ一層均等である⁽¹⁹⁾。

各模型内の流れに於て、この中心部は殆んど同じ状態にあるが外側部はダイスの影響を受ける度合が異なるから、先づ外

第 66 図

第 67 図

第 68 図

側部の流れを見るとダイスへの入口と出口とにおける流速の差即ち速度の増加が大となるのは 0.5-5 ダイス型、7.5° ダイ

ス型、0.2-5 ダイス型の順となる。これは外部摩擦抵抗の小なることを意味する。即ち各部分の流速の差の比をとつて見ると第 3 表の如くであつて、0.5-5 ダイス型の外側部の流れは最も良好であり、0.2-5 ダイス型は出口近くに於て摩

第 3 表

ダイス型 の種類	(外側部におけるダイスの 中間流速と入口流速との 差)と(中心部におけるダ イスの中間流速と入口流 速との差)との比	(外側部におけるダイスの 出口流速と入口流速との 差)と(中心部におけるダ イスの出口流速と入口流 速との差)との比
0.5-5 ダイス	$4.6/0.4 = 11.4$	$6.8/0.8 = 8.5$
0.2-5 ダイス	$4.8/1.3 = 3.69$	$5.3/6 = 1.39$
7.5° ダイス	$4.2/3.6 = 1.17$	$8.4/4 = 2.1$

第 4 表

ダイス型 の種類	中心部の 流速 mm/s	外側部の 流速 mm/s	流速の差の割合
0.5-5 ダイス	20	18	$(20-18)/20 = 0.1$
0.2-5 ダイス	34	25	$(34-25)/34 = 0.26$
7.5° ダイス	55.5	40	$(55.5-40)/55.5 = 0.28$

第 69 図

(19) 山ノ内弘、化学機械協會年報、第 1 巻、(昭和 13-6) 107 頁参照。

撥を増し、7.5° ダイスタイは殆ど一様の摩擦係数を有するものと考へられる。更に又中心部と外側部との流速の差をとれば第4表の如くなり、流れの状態に於ても0.5-5ダイスタイ最も良好であり、0.2-5ダイスタイと7.5°ダイスタイとは大体に同じである。

これ等の相違の生ずる主要原因の一つはダイス壁の傾角であつて、ダイスタイ入口の傾角は0.5-5ダイスタイが最大にして他の二つは大体に相等しい。然し0.2-5ダイスタイの長さは最も長いので第3表に示す様な結果となつてをる。

(c) 粘性流体の実験と金属の引拔実験との比較、粘性流体の実験に於ては流体をダイスから圧出せしめてをり、金属の場合は引拔である。而してThompsonは流体をダイスから圧出せしめた場合と出口側から吸ひ出さしめた場合とを比較して、この断面縮小の程度の変形では殆んど同一の流線を得てをる。尚ほ流体力学上でも純流線状の流れに於ては圧出でも吸出しにてもこの流線の性質に影響を與へないことになつてをる。

第63図に示される様に流体の中心部はダイスタイに這入る以前に既にこの影響を受けて前進しをることは金属の引拔でも同様で、第5図に示されてをる。而して流体がダイスタイに這入る以前の流速は外側部に於ては減退するがダイスタイに這入ると次第に増大してダイスタイの出口まで増速を続けており、中心部はこの減速がなく次第にその流速を増してダイスを通過するまで増速を続ける。故に等流速線を画けば中心部は外側部に対して前方に曲つてをる。この点も亦金属引拔の場合と同じ状態にある。

仮令ダイスとの接触面に於ては金属の引拔の場合と流体の場合とは全く同一とは言ひ難いにしても、全変形に対しては以上の事実から金属材料の引拔中に生じた流れ線に注目し、粘性体の流れ線が金属の変形の工程に於てその移動状態を見るために使用することが出来る。

結 論

引拔部の変形状態を考察して考案した近似ハイパボリックコサイン曲線ダイス4種並にダイス壁面角4°、8°及び12°の円錐形直線ダイスを用ひソルバイト組織とした鋼線材(0.12, 0.4, 0.6及び0.8%C)を以て引拔実験を行ひ、1回の引拔加工による種々の断面縮率に關聯する引拔力を一定速さ(2 mm/s)の引拔の下に測定し又一類のダイスを用ひ0.12%C鋼、銅及びアルミニウム線材を以て連続引拔実験を行ふた。各引拔材は、その機械的性質及び顕微鏡組織を調査

した。又二次元的ダイス模型を以て濃度一定なる粘性流体の流れ状態と比較し、本実験の範囲に於ては次の如く結論する。

1. 引拔仕事量を小にするためには断面縮率少なき場合(約20%以下)は小なる壁角のダイスを用ひ縮率大なる場合は大なる壁角ダイスを用ふる方有利である。

2. 引拔材のダイスへの最初の接触角は6°-12°位にとる。

3. 引拔回数を減少して作業する場合は断面縮率大となるを以て角の大なる方を取り、正確に寸法を仕上げる場合は角の小なるものを用ひ、又潤滑剤に対する他の実験を参照するとその作用良好なる乾潤滑剤を用ふるときは角を小にとり、又湿潤滑剤を用ふるときは角を稍々大にとると有利である。

4. 本実験に於ては低炭素鋼は断面縮率約20%高炭素鋼は約25%で外部摩擦の影響を最小とし、これ以上は変形仕事の影響が大となる。然し壁角小に過ぐるときは(例へば4°)、低及び高炭素鋼共に再び摩擦の影響も亦増大する恐れがある。

5. 銅及びアルミニウム材には壁角小なる方有利である。

6. 外部摩擦の影響は引拔材を一層硬化せしめる。

7. 断面縮率約24-25%までは縮率の増加と共に引拔材は急速に硬化(脆化)され、それ以上は硬化(脆化)の増大は緩かである。

8. 直線ダイスはその断面縮率の大なるときは曲線ダイスよりも引拔材を一層硬化(脆化)せしむる傾向を有してをる様に認められる。

9. 粘性流体の流動状態は曲線ダイスが直線ダイスよりも良好と認められる。

10. 引拔材は相當に強化しても尚ほ脆化の影響少きものを肝要とするを以て、曲線ダイスに依る方が良好と認められる。

11. 適當なる曲線ダイスの形状を選ぶ一方法としては引拔試験片が所要断面縮率となるときの部分断面縮小部の外縁曲線に適應した近似ハイパボリック曲線となし、その最初の接触角を6°-12°位の範囲内($x_0=0.25$ rad程度)にとる。又外部摩擦を小にするために接触面積を小となる様注意し、後部円筒部は引拔材の弾性圧縮圧力に堪ゆる程度に取つて孔径の約1/2位の長さとなせば充分と思ふ。

本実験に対し財團法人服部報公會より研究補助費を交附され、東京製鋼株式会社並に飯笹鋼業所飯笹小四郎氏より材料又はその加工に關して特別の厚意を受けた。茲に謹んで感謝する次第である。(昭和13年6月2日受付)