

塑性變形する材料の摩擦係數

鈴木 弘

10,000 気壓にも達する高壓力下の摩擦係數、特に一方の材料が塑性變形を起しているとき、この値はどうなるか？この未解決の問題への一つの解決策を提唱し、考え方、實驗方法等の要點を、實例によつて解説する。

1. ま え が き

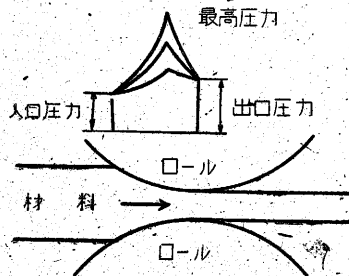
金属材料の塑性を利用して、力を加え形を変えて、希望の形の製品を作る加工法を總稱して塑性加工 (Plastic Working) といつている。鍛造・壓延・引抜きなどはその代表的なものであるが、一工程で相當大きな變形を興えることができる上に、多くは短時間でこの一工程が終るので、大量生産の方法として非常に適している。

最近ではボルトのねじを削るかわりに、特殊の形のねじ形の工具を強く押し込んで、いわゆる轉造方法でねじを一瞬間に作る工作法まで實用に供されている。塑性加工では變形量が多いことは前述のとおりであるが、さらに精密な形を興えることが可能に成つたことを示すよい例といえよう。

金属材料は一般に、壓縮の場合に引張の場合よりも變形能(破壊が起るまでの最大變形量)が大きい。材料内に小さな缺陷があつても、引張應力がこの部分に加えられるとこの傷が原因になつて割れる危険があるが、壓縮應力下ではこれが別段悪影響を及ぼさないことが理由であるが、塑性加工の特長——大きな變形量——を發揮するためには、この性質を考慮に入れて、材料の周圍を工具で取圍んで壓縮して變形させるのが好ましい。精密な形をあたえるためにも、これは好都合な条件である。このような理由から、工具と材料の接觸が不可避となり、この部分で材料が工具の表面を滑るため、いろいろの面倒な問題が起る。滑りに伴う磨耗・發熱・摩擦に打ちかつたための仕事などは、どの一つを採上げても技術上の重要な問題になる。これらの問題を解決する手がかりとして、この面の摩擦係數

を知ることがまず必要になる。

實例を二あげても少し具體的に説明してみよう。第1圖は、壓延中の材料とロールの間で作用している接觸壓力の分布の、大體の傾向だけを示したものである



第1圖 壓延壓力の分布

が、材料がロールにかみこまれると、入口から内へ進むに従つて壓力は次第に高くなり、中性點といわれる位置で最大壓力に達して、それ以後は出口に近づくにつれて減少して行く。必ずこのような山形の壓力分布をとるが摩擦係數の値が大きい程この山の高さが高くなる。この壓力の山が高いと、ロールに加わる力が増して軸受の條件は不利になるし、壓延馬力も増大する傾向がある。ロールの壽命にももちろん關係するものと考えなければならない。壓延される材料が同じであつて、壓延による斷面積減少率などの壓延條件に變りはなくても、材料表面の摩擦條件だけでこれだけの差が出るとすれば、とうてい見のがすわけには行かぬことが明かである。したがつて、豫想し得るいろいろの摩擦條件について、あらかじめ摩擦係數を實驗的に求めることができれば、實際の壓延技術上の利益は非常に大きい。

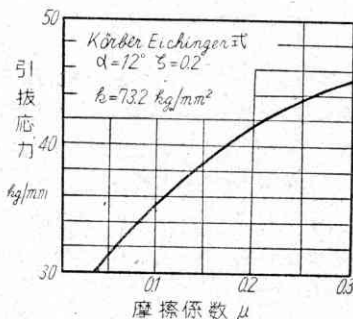
製品の表面の奇麗さまで考慮に入れると、摩擦が塑性加工技術で演じている役割の大きいことはおどろくばかりであるが、實はこのような實際技術の面ばかりでなく塑性加工の理論的研究のためにも摩擦係數を知ることは缺くことのできない要件である。引抜き加工の場合の一例をとつてこれを示そう。

メイスとよんでいる孔のある工具に、孔の斷面積よりも少し大きい材料を通して、無理に引抜いて、希望の形の細長い製品を作るのが、引抜き加工であることはよく知られているとおりだが、引抜く材料の降伏應力・斷面積減少率などの加工上の條件を知つて、これから引抜くために必要な力をあらかじめ計算することができれば、現場技術上得るところは非常に大きい。したがつて引抜力を表わす式を求めようとする研究は從來から非常に多い。得られた式も十指に餘るほどになつているが、引抜力に大きな影響がある肝心の摩擦係數を測る方法がないので、これらの式の價値を判斷することができない。そこで引抜力の實測値と式とをくらべて、摩擦係數の値を逆算して求めて、大體もつともらしい値が出てくると、その式はほぼ正しいと判定する。このような方法が長く採用されてきて、だれもあやしまなかつたのである。あやしまなかつたわけではないかも知れないが、摩擦係數を實測する方法がないので、やむを得ない彌縫策として

いわば公認の形にあつたというのが正しいかも知れない。

しかしこの方法には大きな陥穽があつて、運が悪いと思われぬ失敗をまねく危険が伴う。第 2 圖は十年近くも引拔力式の王座にあつた Körber-Eichinger の式で求めた

引拔力と、その計算に使つた摩擦係数との関係であつて、摩擦係数が變ると引拔力はかなり大幅に變化することがわかる。したがつて上記の彌縫策を採ると、式の構成に相當大きい理論的缺陷があつても、摩擦係数として眞の値と異



第 2 圖 引拔力 (引拔材料の單位斷面積當りの引拔力) と摩擦係数との關係

る値を入れると、實際の引拔力と計算したそれとが、數值的には一應一致するため、理論の誤を是正する途を失う危険がある。

2. 摩擦係数測定のための條件

上に述べたのは代表的な例にすぎない。塑性加工では摩擦はつきものだから、例をあげるに不自由はなく、必要とあればいくらでもあるが、摩擦係数の測定が非常に重要なことは明かになつたと思うから、次にその方法にペンを移そう。

塑性加工に登場してくる摩擦現象は、非常に厄介な性質のものである點にまず注目しなければならない。鋼の熱間加工の場合であれば、鋼材の温度は 1200°C を超える場合が多く、表面の酸化・工具への熱の移動などが伴うため接觸面の物理現象は非常に複雑なものと思われる。鋼帯の冷間壓延の場合は、温度からくる困難は減るが、壓力が非常に高くなる。10,000 kg/cm² 以上の高壓になるため、接觸面の物理現象は未知の性質のものと考えねばなるまい。しかも熱間・冷間を問わず、接觸面では材料が塑性變形を起しているから、新しい結晶面が次々と現れているはずである。このように極度に困難な條件を具えているので、この種の摩擦が起つている場合の摩擦係数を測定した研究例はない。やや関連のあるものといへば、接觸する兩物體とも塑性變形を起さぬ範圍で高壓力を加えた實驗などがあげられる。これはわが國の學者の研究に注目すべきものが多く、軟鋼どうしの摩擦係数に關する竹中二郎教授の研究、材質を異にする金屬材料間の摩擦係数に關する津村氏等の研究、潤滑材料を用いた場合に關しては曾田氏の研究などがある。しかし塑性加工に登場してくる摩擦係数は前述のようにさらに

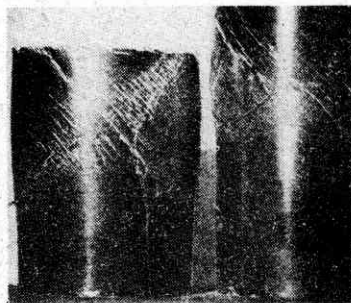
複雑な要素を多くふくんでいる。したがつてこのような條件下にある接觸面の摩擦係数を測定するとすれば、その方法は次のような條件を満したものでなければ役に立たないであろう。

1. 實際の塑性加工と摩擦係数の測定の場合とで、接觸する兩材料の材質・加工履歴・表面仕上條件を等しくすること。
2. 同様に温度條件を等しくすること。
3. 接觸壓力は十分大きくして、材料の塑性變形が進行している状態で摩擦係数を測定すること。
4. 接觸壓力は、ある範圍で變化させることができても實際の塑性加工の際の壓力範圍を包含すること。摩擦係数が接觸壓力によつて變化するような場合には、この條件を無視することはできない。

このような條件を満す測定方法を実現することは容易ではない。だからこそ摩擦係数の實測結果がないわけであるが、端面を圓錐面に仕上げた圓柱の壓縮試験で、大體上記の條件を満して、摩擦係数を測定することができるので、この方法の理論的根據と、實驗結果とを簡単に述べて、この方法の利用を提唱し度い。

3. 圓錐面による圓柱の壓縮

兩端が平な圓柱狀の試片を金属材料で作つて、これを軸方向に壓縮すると、第 3 圖のように、中央部が一番膨れて、ビール樽のような形になる。端面では摩擦があるため材料の外方への移動がさまたげられて、自由に外へ材料が移動できる中央部に



第 3 圖 圓柱形の材料の壓縮による破壊

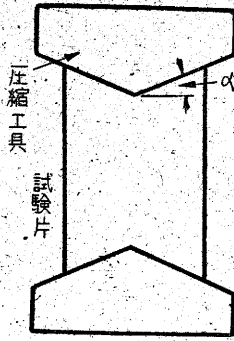
くらべると、直徑が小さくなる。端面を中心が凹んだ圓錐狀に仕上げ、これと一致する形の圓錐面で壓縮すると、斜面が材料を外へ押出す作用があるため摩擦の影響が相殺されて、樽形になる傾向が少くなる。圓錐面の傾斜角が大きいと、摩擦の影響よりもこの方が強く影響してかえつてつみ形になる。この現象を利用して摩擦係数を測定することができる。もつとも、摩擦は一般に壓力によつて變化して一定ではないから、圓錐面の傾斜角と摩擦角とを等しくとりさえすれば、壓縮試片が圓柱形を維持して變形するといつた簡單なものではない。ある程度の工夫が必要である。

第 4 圖のように傾斜角度 α の圓錐面で壓縮する場合を採上げて考へてみる。摩擦係数は低壓では一般に壓力が

變ると僅かながら増減することが知られているから、この場合も摩擦係数を壓力の函数として下式のような関係があるものと假定しておこう。

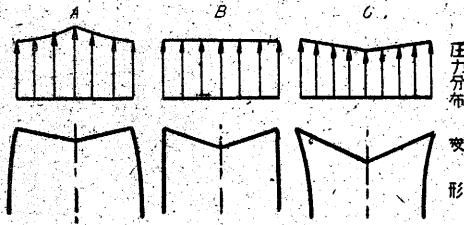
$$\mu = a + bp$$

μ が摩擦係数、 p は壓力であつて、 a, b は常數である。 a と μ とのどちらが大きいかに b が正であるか負であるかに従つて、端面の壓力分布が變



第4圖 圓錐面壓縮

る。第5圖Aのように、中央の壓力が最大になる。これと反對にCのように中央の壓力が最小になる。Bのように壓力が一様になるの3種の場合がある。實はAは $\mu > a$ の場合であつて樽形になり、Cは $\mu < a$ でつづみ



第5圖 壓縮試片の端面の壓力分布

形になり、Bは $\mu = a$ で圓柱形のまま壓縮される場合に相當する。しかし金屬材料は冷間加工をうけると一般に硬化するから、壓縮が進行するにつれて、壓力 p は次第に増して、摩擦係数も次第に變化する。もしも壓縮の進行とともに、摩擦係数が減つていくものとする、 a は變化は起らないから、最初には $\mu > a$ であつたものが、次には $\mu = a$ になり、最後には $\mu < a$ になることも考えられる。はじめの間は樽形の變形が起つていたものが、途中から兩端部の外への張り出しが起つてくることを意味する。しかし壓縮段階を細分して、その一段階では平均壓縮壓力一定と考えられる程度に分ければ、A・B・Cの3種類の變形は明瞭に區別される。

したがつて、端面の傾角だけが異い、ほかの條件はまつたく等しい壓縮試験片を數個用意して、壓縮過程を同様に細分して次々と壓縮を進めて、一回毎の壓縮の間に起つた變形を精密に測定して比較すれば、端の部分と中央部分との外への張り出しが等しい場合の α の値がわかるから、このとき $\alpha = \mu$ の條件が成立するものとして、平均壓縮壓力と摩擦係数 μ との関係が求められる。次節でこの實驗の具體的方法を説明しよう。

4. 壓縮試験から摩擦係数を求める實驗の方法

上に述べた考え方を應用して、接觸する兩材料の一方が塑性變形している場合の摩擦係数を求めるためには以下に述べるような實驗をすればよい。同一材料で、直

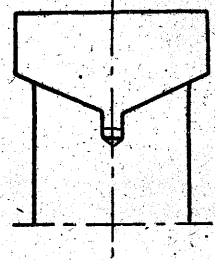
徑・高さ・仕上條件も等しく、ただ兩端面の圓錐狀のくぼみの傾角だけが異い壓縮試験片をいくつか用意する。この圓錐面に正しく一致する壓縮用の工具も同數だけ用意することはいうまでもない。

工具の表面と壓縮試験片の表面の仕上條件、潤滑の條件などは、摩擦係数の測定が要求されている實際の課題の場合に一致するよう考慮をはらつておくことはもちろんである。また大いの場合には摩擦係数の値は、大體の見當はつけられるから、傾角 α の範圍は μ の値を中心にはさむように選ぶ。たとえば摩擦係数 μ の値が、0.1~0.2 の程度と思われる場合には、 α の値を 0.05~0.3 位いいかえれば、3°~17° 位の範圍に選べばよい。できれば少し幅廣く採つておけば變形の傾向がよくわかつて實驗は樂になる。

これらの試験片の壓縮に際しては、壓縮がある程度進行する度に、壓縮を中止して試験片の寸法を測定するわけだが、實例で説明する方がわかりやすいから、著者の實驗の一つの場合を例に採つて述べよう。實驗の條件は下記のとおりである。

- a. 材料 ダイス用硬鋼と電氣銅 (Cu 99.94%)、もちろん變形するのは電氣銅であるが、100°C 25 分間の完全燒鈍状態である。
- b. 試験片の寸法 直徑 30 mm、高さ 45 mm、兩端面の傾角 α は 6°, 10°, 17°, 27° の4種類。
- c. 仕上 形ゲージを使つて、最初に壓縮工具の面を仕上げる。傾角の精度は $\pm 20'$ 、次に試験片の端面はこれに磨合させて作り、傾角は正確に一致させる。接觸する面は、工具も試験片も 04 番研磨紙仕上である。

試験片と工具とを重ねて壓縮試験機で壓縮する。工具と試験片の中心を正しく一致させることと、正しく軸方向に壓縮するのが肝要、第6圖のように工具と試験片との中心に小さいはまりこみをつけてあると、傾角 α が小さい場合にもずれるおそれがない。正しい軸方向の荷重を加えるためには、壓縮試験の場合によく使用するサブプレスを使うのがよい。

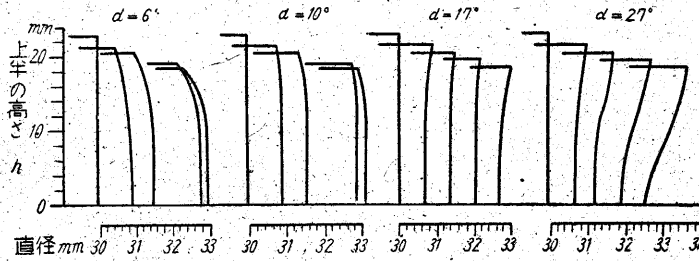


第6圖

壓縮距離は 1/100 mm 目盛のダイヤルゲージで測定して、約 2 mm 壓縮するたびに試験片の形の變化を測定する。このためには最初に試験片の高さを 10 等分する位置で、試験片の周圍に細い線をけ書いておいて、壓縮の度ごとに、これ等の線の間隔と、その部分の外徑を測る。この測定には測微顯微鏡とマイクロメーターを併用するとよい。第1表は壓縮實驗の大體の経過を示したものであつて、第7圖は外形の變化の傾向を示したもので

第 1 表 壓縮過程

圓錐面傾角 α	6°		10°		17°		27°	
	全高 mm	壓縮荷重 t	全高 mm	壓縮荷重 t	全高 mm	壓縮荷重 t	全高 mm	壓縮荷重 t
第 1 回	43.10	8.75	42.41	9.53	43.15	8.63	43.18	8.52
第 2 回	41.23	13.13	41.12	13.46	41.50	12.70	41.66	12.11
第 3 回	38.30	18.62	38.35	18.56	39.98	15.84	40.17	15.13
第 4 回	37.80	19.40	37.70	19.55	38.27	18.86	38.77	17.63



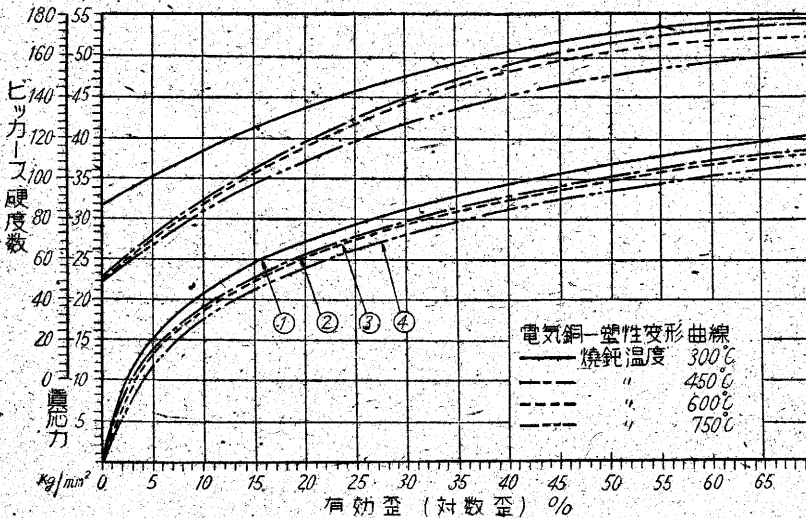
第 7 圖 壓縮變形の過程

ある。變形狀態がよくわかるように、直径の單位は高さの 5 倍にとつてある。

5. 實驗結果の整理

1 塑性變形曲線 實驗結果からまず塑性變形曲線を求める。塑性變形曲線は Ludwik 氏が Fließkurve とよんで、材料の塑性を表わす方法として提唱したものであつて、表現方法にはその後 Nadai 氏らの修正もあるが、要するに材料の眞降伏應力と歪とを兩軸にとつて、加工硬化状態を示す線圖と考えてもよい。この場合は眞壓縮應力を縦軸にとり、對數歪を横軸にとつて示す方針をとる(第 8 圖参照)。

壓縮中に試験片は樽形やつづみ形に變形するが、その程度は甚しいものではなくて、兩端から多少離れた中央



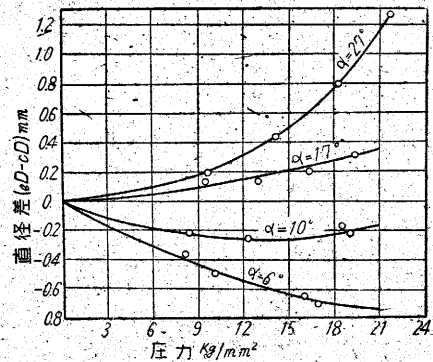
第 8 圖 電氣鋼の塑性變形曲線

部分は、ほぼ圓柱形を維持して變形するから、中央部の斷面積で壓縮荷重を割つた値は、眞壓縮應力とみてよい。またこの中央部の斷面積の、最初の値 A_0 と、變形中の値 A とから、 $\ln(A/A_0)$ を求めればこれが横軸の對數歪になる。

2 直徑差——接觸壓力 前述のように、端部と中央部との直徑差から、 α と μ との關係を判斷するが、摩擦係数を壓力の函數として表わすためには、端面で作用している接觸壓力を知る必要がある。第 5 圖のように端面

での壓力分布は均一ではない上に、その分布の形も壓縮の條件で變るから、どの部分の壓力に着目するかが一應問題になる。

しかし著者の研究の結果から、最外縁の接觸壓力は降伏應力に等しいことが分つたので、接觸面の直徑の變化からこの部分の對數歪を計算して、得られた歪値を第 8 圖の塑性變形曲線の横軸に入れると、これに對應する塑性變形應力、したがつてまた接觸壓力が得られる。このような手續で求めた壓力と、直徑差との關係を第 9 圖に示す。直徑差は、端部にくらべ



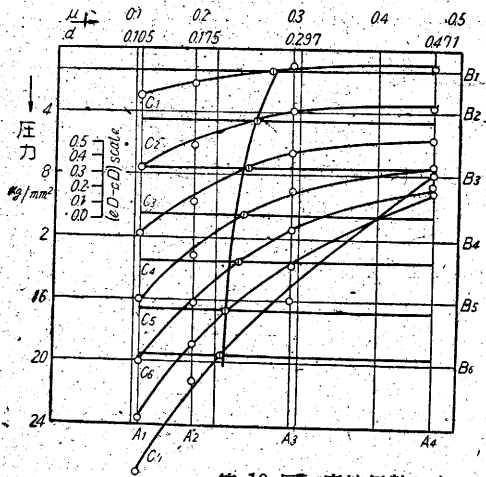
第 9 圖 直徑差と壓力との關係

て中央部の方が小さい場合を正にとつてあるから、角度 α の大きい場合の曲線が正の側に出ている。

3 接觸壓力——摩擦係數 摩擦係数を壓力の函數として求めるためには、壓縮過程を細かく階段的に分割して、その間に生ずる歪を觀察する必要があることを前に述べたが、壓縮の途中で何回か荷重を除去して變形を實測しているのので、この實際の區分に從うのも一方法である。しかし α の値の異なる試験片は、皆それぞれ壓縮の過程が少しづつ異なることは、第 1 表第

7 圖から見られるとおりであるから、そのままでは使えないことがわかる。むしろ第9圖を利用して、壓力が一定値だけ増す度ごとに、區分して變形量を考察するのがよい。

第9圖の横軸の區分毎に、0-3 kg/mm²、3-6 kg/mm²……と壓縮階段を分けて考えることとすれば、その間の平均壓力は、それぞれ 1.5 kg/mm²、4.5 kg/mm²、……となる。 α の値のちがう各曲線から、各壓縮段階中に起つた變形を讀み取つて、これらが樽形とつづみ形とどちらの變形を起す傾向になつてきているかによつて、 α の値と μ の値とが等しくなる場合を求めるのである。しかしこの場合は、各壓縮段階中の變形量のかわりに、壓縮の最初からの變形の總量を採つても結果には大した差はない。またそうすれば第9圖の縦座標の値が歪としてそのまま採用できるから簡單でもある。



第10圖 摩擦係数を求めた例

第10圖はこのような考え方で、實驗結果から摩擦係数を求めたものである。まず縦軸に壓力(圖では下向きにとつてある)を、横軸に圓錐面の傾斜角 α (單位はラジアン) をとる。 $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4$ の4本の縦線はそれぞれ $\alpha = 6^\circ \cdot 10^\circ \cdot 17^\circ \cdot 27^\circ$ をあらわし、横線 $B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \dots$ は、それぞれ平均壓力 1.5 kg/mm²、4.5 kg/mm²、7.5 kg/mm²……に相當する。次に線 B_1 を規準線にして、縦線 $A_1 \cdot A_2 \dots$ 上に直徑差を適當な單位で測つて記入する。この單位は圖の縦軸の壓力の單位とは全く無關係に採つてもよい。この場合は圖中に記入してあるスケールに従う。この圖では端部の直徑が大きい場合が上向になるように記入してある。

このようにして得られた點を結ぶ曲線 C_1 が、規準線と交わる點は、試片が圓柱形を維持して變形することを示すから、この點の α の値が摩擦係數に等しい。同じような手續で順に曲線 $C_2 \cdot C_3 \dots$ 等を求めて行くと、それぞれの壓力に應じて、摩擦係數の値が求められる。これ等の點を結んで、横軸を μ に讀み換えると、壓力と摩擦係數の關係を表わす曲線が求められる。圖の結果で

は壓力が高くなるに従つて摩擦係數は減少することがみられる。このように接觸する材料の中の一方が塑性變形する場合については、摩擦係數を測定した研究例がないので、比較することはできないが、壓力が増すにつれて摩擦係數が減少する點は、一般の經驗にも一致する。なお著者はこの方法で、黒鉛・磷酸亞鉛・グリース・機械油以外の種々の油についても、摩擦係數を求める實驗と、ダイスを通して引抜き加工する時にこれ等の潤滑材料を使用して、その際の引抜き力を測定する實驗とを平行に行つて、その結果を比較したが、摩擦係數が小さいとの結果の出た潤滑材料を使うと、引抜き力も小さくなつていてこの方法の有効なことが間接に證明される。

6. 塑性加工の潤滑材料

熱間加工の潤滑材料については、まだほとんどわかつていない、というのが實情であつて、あげて今後の研究をまつ事情にある。冷間加工だけに問題をかぎつても、潤滑材に對して要求される條件は少くない。主なものを列挙してみると、

- a. 素材や工具の面によく擴ること。
- b. 強い壓力をうけながら、両面が滑動しても取去られないで附着して、金屬面の直接觸れるのを防止できること。
- c. 面を傷ける堅い粒子をふくまないこと。
- d. 用済後簡単に除去することができて、加工後の着色やメツキなどに支障を生じないこと。

等の條項が考えられるが、この中でははじめの2條項がおそらく摩擦係數に影響するのであろう。

一方が塑性變形する場合の摩擦を、直接測定した研究は外にはないので、摩擦係數の實測値の一覽表のようなものが見られないのは残念だが致し方がない。しかし引拔・壓延・深絞りなどの實驗的研究結果を綜合すると、おぼろげながら大體の傾向が推測されないでもない。これによると、數千氣壓に達するこの種の場合には、固體の潤滑材料が最も摩擦係數が低い。特に鱗狀黒鉛・磷酸亞鉛・滑石粉末・優良な粉石鹼などがすぐれている。結晶は概して扁平なものがよい。材料の面への塗布の必要があるから、グリースなどの粘着劑をまぜる必要はもちろんある。同じ固體でも牛脂などは必ずしもよくない。液狀の油の中には、これにまさるものが相當ある。油では概して、植物性油が最もよく、動物油がこれに次ぎ、鑛物質のものは最も劣る。しかしこれは大體の傾向であつて、例外もあれば、場合によつては2種以上を混合するとよい結果を得られる場合もあつて、決定的な結論の得られるのは、まだまだ將來のことであらう。

文獻 E. Siebel, A. Pomp, K-W-Inst. f. Eisenforsch., 1927
鈴木弘, 生研報告, Vol. I, No. 3.