

# 金属材料の塑性変形抵抗

鈴木 弘・橋爪 伸

## まえがき

金属材料には一般に加工硬化の現象があるが、同時に再結晶の現象もあり、再結晶温度以上では金属は軟化する。この両現象は互に相反する性質であるので、金属をある加工温度である速度で加工した場合、加工速度が再結晶速度より大きい時は、再結晶による軟化が起らず、変形中は加工硬化が起るため変形抵抗は大である。しかし加工温度がさらに高くなり、再結晶速度が速くなつて加工速度より大となれば、再結晶による軟化の現象が起り変形抵抗は少となる。このように変形抵抗は加工温度と速度との両者により影響を受けるから、塑性加工用材料として広く使用される材料については、加工温度と速度の両要素が変形抵抗に及ぼす影響を明かにして置かねばならない。

しかし金属の変形抵抗に及ぼす加工温度、加工速度の影響についての研究は定性的なものに止り、定量的に求めた研究は非常に少い。このため鍛造、圧延、引拔等の熱間塑性加工作業の基準を決定する基礎データがなく、理論的解析にも重要な資料が欠けていることになる。また加工機械設計の場合にも設計の基礎資料がなく、これら作業あるいは機械の設計は、全くこれまでの経験のみによつて行つている。

塑性加工法の急速な進歩にもかかわらず、これら研究が非常に遅れていることは、この研究の困難さに起因すると思われる。理論的解析をするには影響する因子が非常に多い上、変形機構も弾性の場合のような応力、歪の間の簡単な一定法則は存在しないので、ほとんど不可能である。また実験による解析も、高温、高速度試験を行わなければならないため、静的な場合のような応力—歪曲線を求めることは非常に困難である。

しかし熱間塑性加工の基礎となる資料を求めることは、非常に要求せられ、また重要なことなので、著者らは全く完全とはいえないが、この研究のため特に試験機および応力測定装置を製作し実験を行つた。実用の諸金属材料について、信頼するに足る塑性変形抵抗値を広く求めて、塑性加工技術の資料に供するのが当面の目的であつて、さらに変形速度、温度等の諸因子と変形抵抗との一般的関係を明かにするのが第2段の目標である。

## 1. 試験機

現在実際に行われている塑性加工の加工速度はかなり速い。例を冷間圧延にとれば、最高は約 2000 m/min である。これを歪速度に換算すればほぼ  $3 \times 10^4$  %/sec の程度である。このような歪速度は現在あるアムスラー型等の試験機では行うことができず、新たな衝撃試験機を設計しなければならない。

また変形抵抗を求めるための加工法としては種々あり、圧延あるいは捩り等を行つて変形抵抗を求めた研究もあるが、実験後の取扱いを簡単にするためには、なるべく一軸方向の応力で変形することが望ましい。すなわち考えられる変形法としては引張あるいは圧縮の2方法である。

以上の理由から試験機として必要な条件は、引張あるいは圧縮型式の高温衝撃試験機である。

引張による変形法は、軸方向荷重の精度が保証されれば、変形の初期では完全に一軸方向荷重である。しかし変形が進むとくびれ (necking) が起り応力状態は乱れる。しかも高温になるとくびれが比較的早く起る欠点がある。また衝撃の場合には軸方向荷重の精度は、静的の場合ほどには保証できない。

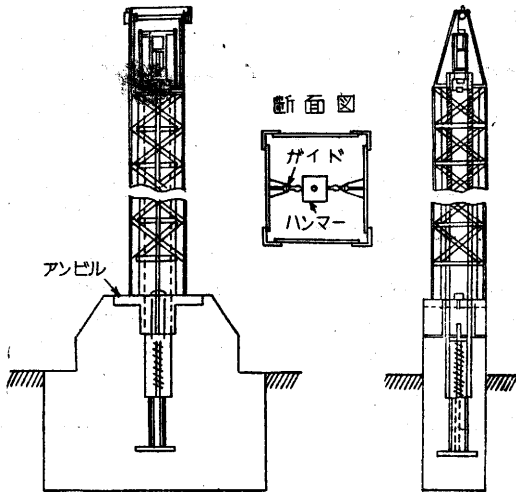
圧縮による変形法では、両端面における摩擦のため応力が完全には一軸方向にならない。もちろん試片と工具の接触面をそれぞれ平滑に仕上げ、優秀な潤滑剤を塗布すれば摩擦の影響を無視することもできるようになるが、熱間の場合にはほとんどすべての潤滑剤が使用できないため、摩擦の影響を無視することはできない。また各温度、各歪速度における試片と工具間の摩擦係数を測定することはほとんど不可能である。

以上のように両変形法とも一長一短あり、いずれが優れているとも決し難い。このいずれを選ぶかは実験の目的等により当然異つて来ると思われるが、まず従来の研究に使用された例を調べてみたいと思う。

試験機は試片にエネルギーをあたえる方法により、2種類に大別することができる。すなわちハンマーの自由落下による方法と、動力装置をそなえそれによつてエネルギーをあたえる方法である。

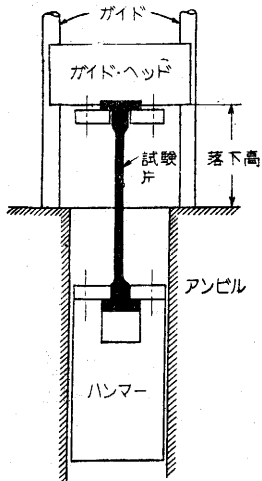
前者は Guillotine Impact Testing Machine といわれるもので、米国ではすでに材料試験機の一つとして

製造されている。大体の構造は第1図に示す通りである。試験機はハンマーのガイドおよびアンビルより成つ



第1図 ギロチン型衝撃試験機

ている。機構はハンマーをある一定高さまで引上げ、ハンマーを自由落下させアンビル上の試片を衝撃するようになってい。この試験機では引張、圧縮両方法とも可能である。圧縮の場合には試片をアンビル上に置き衝撃を加えればよいが、引張の場合には試片がハンマーと一緒に落下するものと、試片をアンビル上に固定して置くものと2方法がある。試片をハンマーと同時に落下させる場合の荷重方式は第2図に示す通りで、この方法を使用



第2図 荷重方式

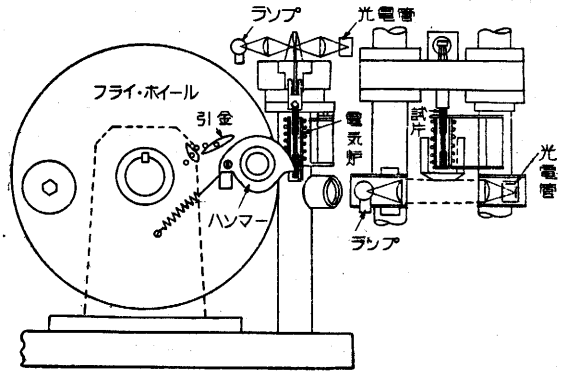
した研究は、Warnock and Taylor<sup>(1)</sup> 等多数あるがいずれも冷間の試験であり、熱間の場合には試片の加熱、落下時の冷却等の点から不可能と思われる。試片をアンビル上に固定する方法は試片の加熱に困難はないから、熱間試験の場合にも可能であると思われるが、衝撃機構が複雑になるためこの方法により熱間の試験を行った例は今の所見当らない。

この型式で圧縮試験を行ったものには池島氏<sup>(2)</sup>の例があり、摩擦の問題の解決さえつけば一番実用的であると思われる。この方法を使用した例はあまりないが、これはこの種の研究が非常に少いためである。

上記の試験機で、速い歪速度をうるためには試験機の高さを相当高くしなければならない。これは場所の関係

から制限をうけるし、また高さに比例して速度は速くならず、空気抵抗、ハンマーとガイド間の摩擦等の影響を考えれば一定の限度があり、歪速度の変化範囲がせまくなる欠点がある。これを補うため、動力を使用してハンマーに初速をあたえた試験機もある。この例としてはW. H. Hoppman<sup>(3)</sup>が銅について歪速度の影響を研究した場合に使用したものがあるが、動力源はpneumatic gunである。同じくE. T. Habib<sup>(4)(5)</sup>も銅について研究を行っているが、この場合には自由落下のエネルギは全然利用せず、試験機を横型にして圧縮空気を使用してハンマーを加速している。両者とも冷間の試験であるが、W. H. Hoppman<sup>(3)</sup>は引張、E. T. Habib<sup>(4)(5)</sup>は圧縮の変形法を採用している。

動力装置によりエネルギーをあたえた例は、Nadai, Manjoine<sup>(6)(7)</sup>が使用した方法があり、第3図に示す通りである。すなわちモーターによりフライホイールを



第3図 フライホイール型試験機

回転し、フライホイールがある回転数に達したときハンマーが頭を出し試片を衝撃している。この方法ではモーターの回転数の変化により歪速度を広い範囲に変えることができる利点があり、Nadai, Manjoine<sup>(6)(7)</sup>は $9 \times 10^4$  %/sec までの歪速度をえている。

以上のように各種の試験機があるが、いずれも一長一短あり、どれがすぐれているともいい難い。要するにどの試験機を採用するかは、各場合によつて他の条件から相違してくると思われる。

著者らの実験においてはハンマーの自由落下型の試験機を使用することにし、変形法としては圧縮型式を採用することにした。詳細は後述することにする。

## 2. 測定装置

変形抵抗を求めるには、衝撃時の応力—歪曲線を求めなければならない。衝撃時の現象は非常に速いので、測定に機械的方法を用いることは困難であり、どうしても電氣的計測を行わなければならない。しかし電氣的計測法を用いても、衝撃時の現象はほぼ $10^{-4}$  sec で完了

するので、特殊な装置が必要である。電気抵抗線式歪計を試片あるいは試片につけた弾性棒に張付け、変形時の応力を測定した例<sup>(1)(6)</sup>もあるが、これは冷間の場合であり、熱間となれば試片に歪計を張付けることはもちろん不可能で、弾性棒を使用したとしても熱源に近い温度条件が乱れ、ほとんど不可能であると思われる。

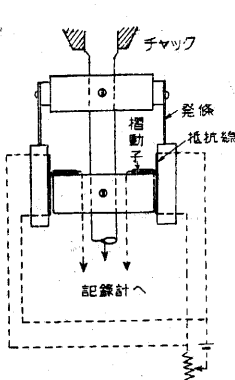
直接応力を求める方法は、現在上記の電気抵抗線式歪計あるいは種々の歪計を使用して既知の応力による変形を測定して変形時の応力を求める方法もあるが、試片の加熱のため温度上昇の影響をうけ、試験機によっては使用できない。

よつて本実験においては強いて変形過程を求めず、試片が吸収したエネルギーを求めて、それより変形抵抗を計算することにした。

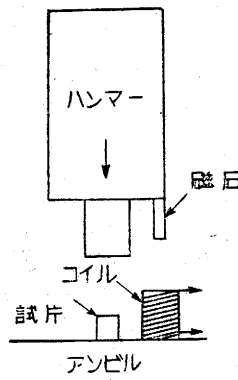
試片に吸収されたエネルギーを求めるには、ハンマーが試片を衝撃する直前のハンマー速度、ハンマーの跳返速度、試片以外に吸収されるエネルギーを測定しなければならない。試片以外に吸収されるエネルギーとしては、アンビルに吸収されるエネルギーであるが、ハンマーにくらべてアンビルの重量が相当大きい時は、アンビルの運動によつて吸収されるエネルギーは非常に小さく、無視することができる。結局ハンマーの速度のみを測定すればよいことになる。

ハンマーの速度測定装置として今まで用いられたものは、摺動抵抗器を使用する方法、インダクタンスを使用する方法、光電管を使用する方法等がある。

摺動抵抗器を使用する方法は第4-A図に示す通りで、抵抗器上をハンマーで摺動させ、抵抗器の抵抗値変化を利用して測定している。インダクタンス利用の方法は第4-B図に示す通りで、ハンマーあるいはハンマーと同じ



第 4-A 図



第 4-B 図

動きをする物体（磁性体であることが必要）をインダクタンス中に入れ、その時インダクタンスに生ずる起電力が挿入した物体の速度に比例するという原理を利用したものである。光電管を使用する方法は第2図の衝撃試験機と同時に示してあるように、光電管に投ずる光を遮断

することによりハンマーの速度を求めるものである。

以上3型式は、いずれも電流としてえられ、これを電磁あるいは陰極線オシログラフに入れて記録する。

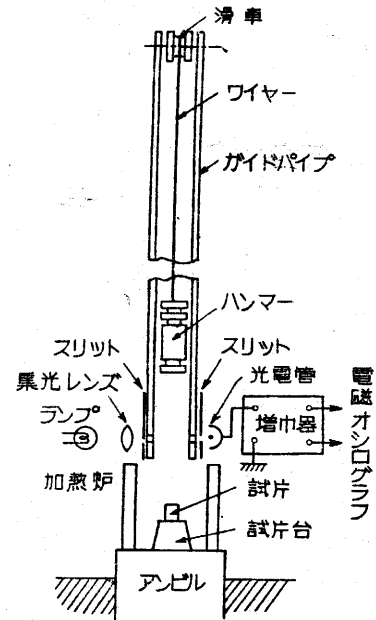
第1の方法は P. G. Jones and H. F. Moore<sup>(8)</sup> が使用しているが歪速度が比較的遅い場合であり、これを高速試験の場合に使用することは摺動の部分の接触到難点があり、また機械的強度の点にも疑問がある。第2の方法は池島氏<sup>(2)</sup> が使用しているが、速度と起電力の関係を求めることが困難である。第3の方法は Nadai, Manjoine<sup>(6)(7)</sup> の使用したもので、充分実用になると思われるが、電流の振巾を利用している点、電源事情の悪いわが国では相当注意して使用する必要がある。

本実験においては光電管を使用して測定することにしたが振巾を利用することはさけた。

### 3. 本実験に使用した装置

#### 試 験 機

本実験に使用した衝撃試験機は第5図に示す通り、Guillotine Type の衝撃圧縮試験機で、最高落下高はほ



第 5 図 本実験の試験機

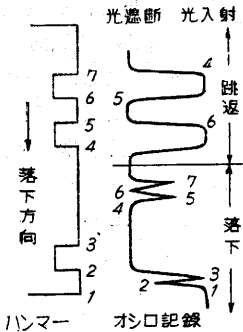
ぼ5mであり、相当する初衝撃速度は空気抵抗、ハンマーとガイド間の摩擦抵抗等を見ればほぼ9.9m/secである。ハンマーは最大5Kgを使用したので、試験機の最大容量は25Kg-mである。

ハンマーのガイドには2" のガス管を使用し、ハンマーはガス管中を落下する。アンビルは推定重量450Kgで、最大ハンマーとの比は1:90である。アンビル上には試片の加熱炉を取付けてある。加熱炉の熱源はニクロム線で、容量2KW、試片を加熱しつつ衝撃するように

なっている。加熱炉には自動温度制御装置をつけ、試験中温度変化が僅少なるようにした。

### 測定装置

ハンマー速度の測定装置の原理は第6図に示す通りである。ハンマーに数箇所溝をきり、溝では光電管に光が入射するようにし、ハンマーの2~6間の部分が光電管に入る光を遮断する時間を求め、相当するハンマーの長さ(2~6間)を測定することによりハンマー落下速度を求めた。跳返速度も同様にハンマーの7~5間の長さを、オシログラフ記録7~5間の時間で割って求めた。光電管の電流変化は直流増幅1段を行って、電磁オシログラフA型振動子に入れて記録した。



第6図 オシログラフ記録

は直流増幅1段を行って、電磁オシログラフA型振動子に入れて記録した。

### 4. 実験条件

#### 試片

試片は直径 12 mm、高さ 15 mm の円筒形である。高さ、直径の比は  $15/12=1.25$  になり、静的試験の場合に比べて小さいが、これはバックリングの影響をさけたためである。

試片の材質は電気銅で、純度 99.9% 以上である。試片にする材料は直径 14 mm まで冷間引拔を行い、その後 400°C で 30 分焼鈍し、空冷後所要寸法に削り出した。試片の両端面は 06 番のエメリー・ペーパーで研磨し摩擦が最小になるようにした。

#### 潤滑剤

潤滑剤としては鱗状黒鉛を用いた。鱗状黒鉛は水にかして試片に塗布した。

#### 試験温度

試験温度は試片が銅であるため最高を 500°C にし、室温より 500°C まで 100°C おきに、6 種の温度で実験を行うことにした。試験温度はアルメル・クロメル熱電対を試片に接触させて測定した。試験中温度の変化は各温度において  $\pm 3^\circ\text{C}$  以下である。

#### 変形エネルギー

歪速度が変形抵抗に及ぼす影響を求めめるため、変形エネルギーは一定とし、衝撃速度すなわちハンマーの落下高およびハンマーの重量を変えて実験を行った。最初変形エネルギーを 5 Kg-m に計画し、各ハンマーによつて歪速度は 5 種類に変化する。

### 5. 実験方法

試片は所要寸法を測定後、両端面を 06 番のエメリー・ペーパーで研磨する。試片台およびハンマーの圧縮面も 06 番のエメリー・ペーパーで研磨する。次に試片の両端面に潤滑剤として鱗状黒鉛をぬり、試片台の中心上におく。試片を所定温度にするため加熱する。試片が所定温度になつて以後 30 分間試験温度に保持する。

以上で実験準備を完了し、測定装置が動作するよう準備してハンマーを所定の高さから落下させる。

### 6. 変形抵抗の求め方

測定装置より試片の圧縮に使用したエネルギーが求まるので、変形仕事から圧縮力を求め、圧縮応力を求めた。変形仕事は、

$$Fh' = \frac{m}{2g}(v^2 - v'^2)$$

$F$  は平均圧縮応力、 $h'$  は試片の縮み、 $m$  はハンマーの重量、 $v$  はハンマーの落下速度、 $v'$  は跳返速度、 $g$  は重力の加速度である。上式より平均圧縮力が求まるので、 $F$  を最終断面積で割り平均圧縮応力を求める。

$$\sigma = F/A$$

$A$  は最終断面積で、体積変化がないものとして計算より求めた。

圧縮応力が求まれば、Siebel の摩擦補正式を使用して変形抵抗  $K_T$  は

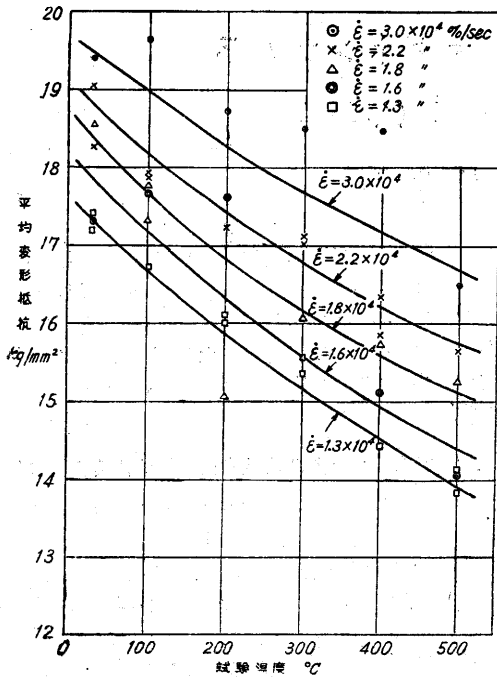
$$K_T = \sigma \left( 1 + \frac{2}{3} \mu \frac{d}{h} \right)$$

で求められる、 $h$  は試片の最初の高さ、 $d$  は試片の最初の直径、 $\mu$  は摩擦係数で、円錐圧縮試験の結果<sup>(9)</sup>から 0.1 と仮定した。

### 7. 実験結果

以上のようにして求めた実験結果から第 7~9 図に示してある。圧縮エネルギーは最初 5 Kg-m になるように計画したが、ハンマーの落下高さの相違、あるいはハンマーとガイド間の摩擦等の影響のため、ハンマーの落下速度が低下し、特に軽いハンマーにおいては甚しく、圧縮エネルギーに変化を生じた。このため各実験間の比較が困難になつたので、別に圧縮エネルギーの相違する実験を行い、変形抵抗——変形エネルギー曲線を描き、この曲線から各実験を圧縮エネルギー 5 Kg-m の値に補正した。また図に見られる歪速度は、試片の変形中変形速度をハンマーの初衝撃速度から 0 まで直線的に変化すると仮定して、ハンマーの初衝撃速度の 1/2 をとり、それより求めた。

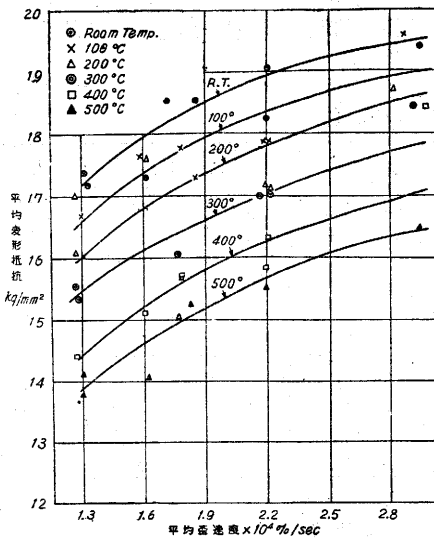
第 7 図は平均変形抵抗——試験温度曲線で、縦軸に変形抵抗、横軸に試験温度、パラメーターを歪速度にして



第7図 平均変形抵抗—試験温度曲線

曲線を画いた。図からわかるように変形抵抗は温度が高くなるにつれて、再結晶のため小となることわかる。

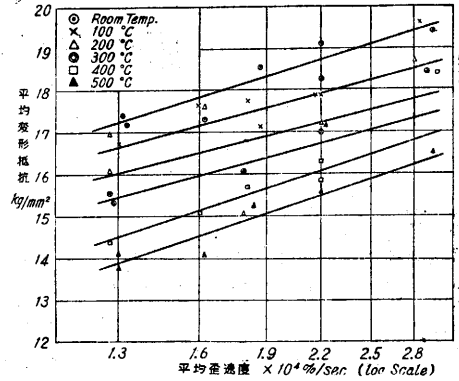
第8図は平均変形抵抗—平均歪速度曲線で、縦軸は平均変形抵抗、横軸は平均歪速度、パラメーターは試験



第8図 平均変形抵抗—平均歪速度曲線

温度である。図から試験温度のいかにかわらず歪速度が大になるにつれて変形抵抗が増大している。室温ではこれまでこの程度の歪速度の変化では、変形抵抗は影響をうけないといわれていたが、図からわかるように高温の場合同様歪速度の影響をうけているのは注目される。

第9図は縦軸に平均変形抵抗、横軸に平均歪速度の対数、パラメーターとして試験温度をとつたもので、各試



第9図 平均変形抵抗—対数平均歪速度曲線

験温度においてほぼ直線となり、変形抵抗と平均歪速度の間には対数関係が成立することが見られる。

歪波の伝播については、試片の測定を行つたがその影響をみることはできなかったが、この程度の速度では現われないことが従来の諸研究からも推察される。

### 8. 結 論

以上の結果を総合して

1. 変形抵抗は試験温度が高くなれば減少し、歪速度が遅くなれば同じく減少する。
2. 試験温度が低くなれば変形抵抗は増大し、歪速度が速くなれば増大する。
3. 変形抵抗と平均歪速度の間には対数関係が成立する。
4. この程度の歪速度では歪波の影響は表われない。

一般的傾向について以上のような結論を得たが、歪速度が変形中直線的に変化すると仮定した点については疑問があり、これを解決するには変形過程を追及する必要がある。これについては目下計画中である。また試片とハンマーの摩擦係数0.1を仮定したが、これは常温において静的に試験した場合に得た値で、高温衝撃の場合にこれの値を使用してよいかどうかについては研究の余地があると思われる。しかしながら電気銅の熱間塑性変形抵抗の一応の資料を得て、この方面の設計技術および加工技術のデータを提供するには役立つものと考えている。(1953. 6. 27)

### 文 献

- (1) Warnock, Taylor: Proc. Inst. Mech. Engr. 1950. War Emergency Issue.
- (2) 池島: 高温度における鋼の変形抵抗に関する研究
- (3) W. H. Hoppman: Proc. A.S.T.M.
- (4) E. T. Habib: Appl. Mech. 7 1947.
- (5) E. T. Habib: Appl. Phys. 9 1948.
- (6) Nadai, Manjoine: Proc. A. S. T. M. Vol. 40, 1940, Appl. Mech. 1941.
- (7) Manjoine: Appl. Mech. Sept. 1944.
- (8) Jones, Moore: Proc. A.S.T.M.
- (9) 鈴木: 生研報告 Vol. 1. No. 3. 1950-12.