

論 文

UDC 621.771(.001.57) : 621.74(.001.57) : 666.32.017

圧延および連続鑄造鑄片のシミュレーションに用いる プラスチックの性質*

千々岩健児**・畑村洋太郎**・長谷川信樹***

Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting

Kenji CHIJIWA, Yotaro HATAMURA, and Nobuki HASEGAWA

Synopsis:

Simulation by plasticine is carried out to estimate various stress distributions and deformations of steel in hot rolling and to prevent internal or surface crack of slab in continuous casting.

In this report, first of all, the following dynamic properties of plasticine is treated to establish the foundation of simulation: i) Static properties (stress-strain relation, its reliance on temperature and criterion of yielding etc.) ii) Kinetic properties (reliance of stress on strain rate etc) iii) Friction with metal surface.

From the above investigation, it became clear that, there exists the following relation between stress σ (kgf/cm²), logarithmic strain ϵ , strain rate $\dot{\epsilon}$ (1/s) and temperature T (°K), in the region of $T = 253 \sim 323^\circ\text{K}$, $\epsilon = 0.02 \sim 0.3$ and $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^0$ 1/s;

$$\sigma = 1.15 \times 10^{-5} \epsilon^{0.085} \dot{\epsilon}^{0.12} \exp\left(\frac{3530}{T}\right)$$

Then the above result is compared with the deformation resistance of steel in high temperature (about 1000°C). And it is confirmed that plasticine has enough properties to simulate not only the deformation of steel in high temperature but also the stress distribution.

1. 緒 言

1.1 プラスチシンによるシミュレーションについて

プラスチック (油粘土) を用いて各種の塑性加工のシミュレーションを行うことは従来から広く行われている^{1)~5)}。プラスチックの常温における力学的な性質が高温 (約 1000°C) の鋼とよく似ているためである。しかし現状では、力学的現象のうち加工によつて生じる全体の変形および材料内部の流れを知るためにしか用いられていない。一方、プラスチックの力学的性質を詳しく調べてみると、プラスチックと高温の鋼とは応力-ひずみの関係ばかりではなく、降伏条件・ひずみ速度依存性についても相似であり、適当な潤滑条件のもとでは、加工によつて生じる力学的現象全体のシミュレーションが可能であることがわかる。すなわち、材料の変形の他にも、加工具表面にかかる応力分布・加工に要する力・更

には材料内部に生じている応力分布のシミュレーションが可能であると考えられる。

1.2 本研究の目的

鋼の熱間圧延時の圧延材内部における応力分布や各種の変形挙動の推定および連続鑄造の鑄片の表面割れや内部割れの防止のための力学的な解析を行うことを目標にして、筆者らはプラスチックをモデル材料とするシミュレーションを試みてきた。本研究では、まず、プラスチックと高温の鋼とが力学的にどの程度相似であるかを調べ、次にモデル材料と加工具たるロール表面にかかる応力 (圧力および摩擦応力) の分布およびモデル材料内部に生じる応力の分布を知るための測定器を開発した。またこれらの測定器を用いて、2対のロールによるプラスチックの圧延 (ないしはロールによる引拔) を行い、各種の応力や変形挙動等を明らかにした。

なお、本研究はプラスチックを用いて、高温鋼の変形

* 昭和 51 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 12 月 25 日受付 (Received Dec. 25, 1978)

** 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

*** 東京大学大学院 (現: (株)小松製作所) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Komatsu Co., Ltd.)

や応力分布などをシミュレートしようとするのが目的であるので、直接に圧延や鋳片の破壊のメカニズムまでプラスチシンでシミュレートしようとするものではない。

1.3 本報の内容

本報では、以上の結果のうち、プラスチシンの力学的な性質を調べた結果について取り扱う。すなわち、静的な性質（応力-ひずみの関係・その温度依存性・降伏条件など）、動的な性質（応力のひずみ速度依存性など）、金属表面との摩擦について述べたのち、高温の鋼との対比を行い、モデル実験の基礎的なデータを明らかにする。

1.4 プラスチシンについて

プラスチシンは英国製の油粘土の一種であり、本来は子供の粘土細工の素材である。これが高温の鋼のモデル材料として使われるのは、前述のように力学的な性質が高温の鋼と相似であることが最大の理由であるが、この他にねり返すことで何回も使えること、任意の形状の試料が作れること、内部の変形を見るための着色や切断が容易なこと、主に不揮発性のバインダーが使用されているため一つの実験の期間では、蒸発による試料の硬化が無視できることなど多くの付随的な理由がある。

なお、“プラスチシン”として購入した場合、色やロットによりその性質が異なる場合が多い。その理由は、組成のちがいや、製造してからの日数のちがいなどであろうと思われる。そこで本研究では1つのロットのもので購入後約2年程経過したものを使用した。その組成および物理的性質は次のとおりである。

色：白色

組成：炭酸カルシウム (CaCO_3) を主成分とする微小な土粒子 ($2\mu\text{m}$ 以下) をグリースのようなもので練りまぜたもの

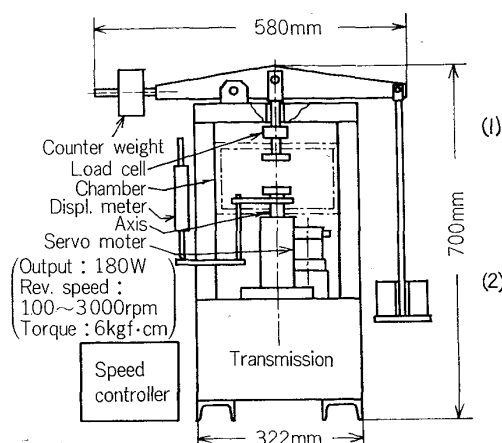
比重：1.92

比熱：0.24 kcal/kg $\cdot$ °C

熱伝導度：0.60 kcal/m $\cdot$ h $\cdot$ °C

2. 試験方法

プラスチシンは1・4に述べたように、バインダーがグリース状の脂肪酸であることの他は通状の土（この場合にはバインダーは主に水である）と変わりはない。そこでプラスチシンの力学的な性質を調べるのに通常の土質試験機を用いることを検討したが、“加工”対象としての特殊な試験（引張試験、ひずみ速度依存性試験、摩擦試験など）を行う必要があるので、本研究に適する万能試験機を新たに設計・製作して、これを使用することにした。試作した万能試験機の概要を Fig. 1 に、またそ



- Main specification
- (1) Compression or tension test
Max. load: 50kgf
Strain rate: $10^{-4} \sim 1/s$
(Max. displ. speed: 120mm/s)
Dimension of specimen: Dia; 35.7mm, Height; 80mm
 - (2) Friction test
Max. vert. pressure: 2kgf/cm²
Max. fric. stress: 2kgf/cm²
Frictional speed: 0.1~30mm/s
Dimension of frictional ring: Outer dia; 65mm, Inner dia; 55mm, Height; 12mm
- Fig. 1. Universal testing machine to investigate the properties of plasticine.

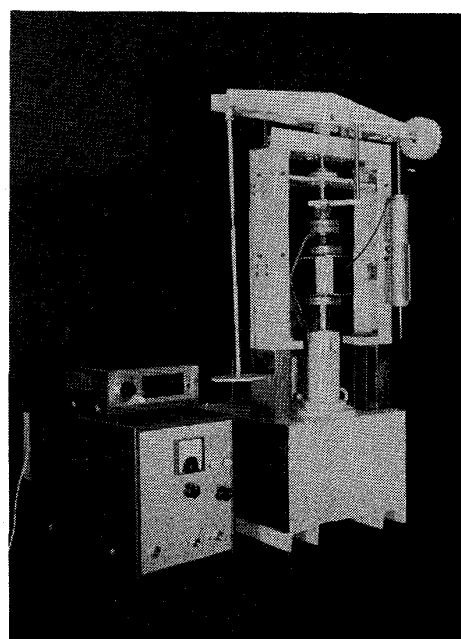
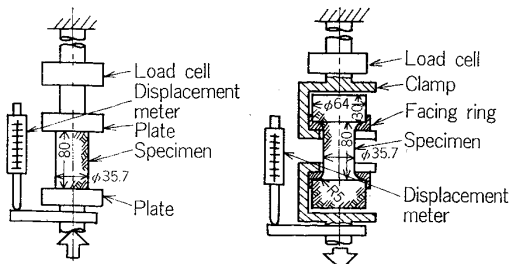


Photo. 2. Out view of the universal testing machine.

の外観を Photo. 1 に示す。この試験機は 180W の直流サーボモーターを動力源とし、1 段当たり 10:1 の減速比の歯車の組み合わせにより最大 10^{-4} 倍まで減速され出力軸に力が伝えられる。この出力軸は上下運動により試料の圧縮・引張試験ができる他、回転運動に切り換えて摩擦試験をも行い得る。なお、その他の主な仕様は図



(a) Constant speed compression test (b) Tension test
Fig. 2. Testing method of static properties of plasticine.

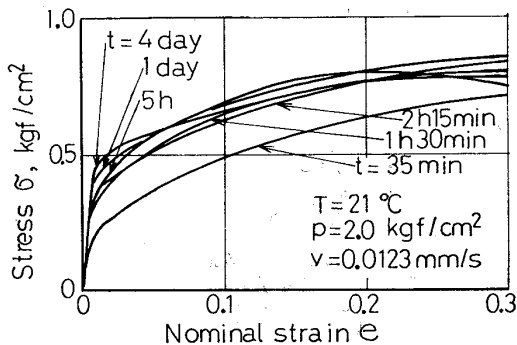


Fig. 3. Change of stress-strain curve of plasticine with time after remolding.

中に示したとおりである。

3. プラスチシンの静的な性質

3.1 応力-ひずみの関係

土については通常、圧縮試験しか行われませんが、“加工”という面から見ると引張試験が不可欠である。それゆえプラスチシンの応力-ひずみの関係は、圧縮および引張の双方について調べる必要がある。そこで Fig. 2 に示すような圧縮試験用および引張試験用のアタッチメントを用いて試験を行った。圧縮試験の方法は通常のものである。引張試験は、次のように行った。試料を図のような亜鈴形にワイヤーカッターを用いて切り出し、座を間にはさんで上下のクランプ間に挿入する。下のクランプを下方に引張ると試験片の平行部ははじめほぼ均一にのびるが、途中よりくびれを生じそこから切れる。くびれを生じるまでの荷重と全体の変位量を計測し、それから引張による応力-ひずみ曲線を求める。

プラスチシンは、繰り返して試料を成形してからの時間により、その変形挙動が違っている。試料作製後の時間のちがいによる応力-ひずみの関係の変化を Fig. 3 に示す。成形後間もない試料は、常温の純アルミニウムや純銅などのような変形挙動 (ϵ の増加にともない σ が増加する挙動) を示すが、ある程度 (1 日程度) 以上たつたものははじめの立ち上がり部分が長くな

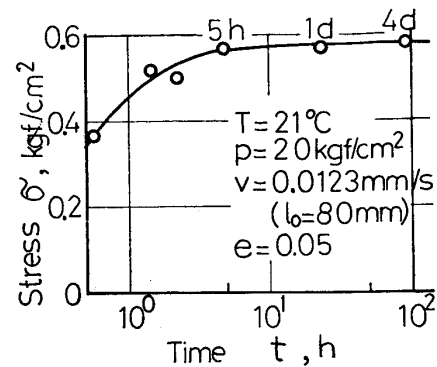


Fig. 4. Age-hardening of plasticine.

り、それ以後の塑性域では ϵ の増加に対し σ があまり増加しない剛塑性体の挙動に近付く。

試料成形後の時間 t と一定ひずみ ($\epsilon = 0.005$) における応力 σ との関係を求めたのが Fig. 4 である。 t の増加とともに σ も増加するが、 $t = 1$ 日以降はほとんど増加していない。すなわち圧延材や鋳片などのモデル材料を作るときには、成形してから 1 日おいて実験を行えば安定した性質が得られることがわかる。

なお、長期的に見た場合、プラスチシンには、使用開始後、バインダー中の揮発成分の飛散、実験中の潤滑剤の混入などに起因する硬化の現象がある。前者によるものは、約 2 年間程放置すると安定するようである。また後者によるものは、実験ごとに表面をかきぬぐうなどして防ぐしかない。

プラスチシンは土粒子とグリース状のバインダーとから成る人工的な土である。バインダーの粘性が温度に敏感であることから、プラスチシンもまた温度に対し極めて敏感である。種々の温度におけるプラスチシンの応力-ひずみの関係を Fig. 5 に示す。応力-ひずみ線図はどの温度でもほとんど相似な形をしているが、温度が低いと応力は大きく、温度が高くなるにつれて応力は著しく減少することがわかる。

Fig. 5 で降伏していると見られる一定のひずみ ($\epsilon = 0.05$) でその応力が温度によつてどのように変化するかを求めたのが Fig. 6 である。このグラフから、降伏応力が温度によつて大きな影響を被っていることがわかる。たとえば室温 ($20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) 付近では、 20°C での降伏応力は 0.6 kgf/cm^2 であるが、 1°C の温度変化に対して $0.037 \text{ kgf/cm}^2/^\circ\text{C}$ の変化、すなわち $6\%/^\circ\text{C}$ の強度変化が生じていることがわかる。

これらのデータから、プラスチシンを用いたモデル実験では試料温度を一定値にしかも均一に保つことが特に重要であることがわかる。また逆に、プラスチシンの変

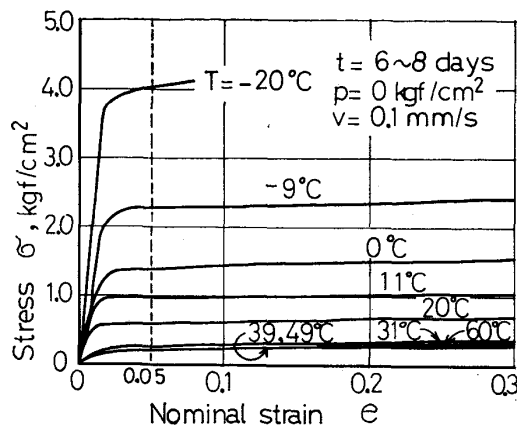


Fig. 5. Change of stress-strain curve of plasticine with temperature.

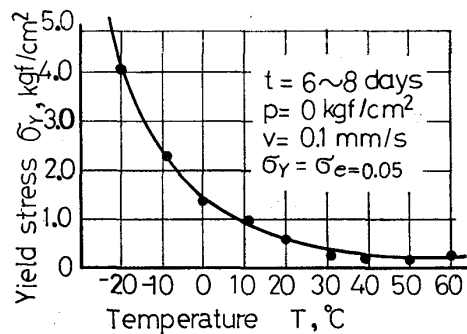


Fig. 6. Reliance of yield stress of plasticine on temperature.

形能が温度に敏感であることを利用して、連続鋳造のインゴットや熱間圧延の圧延材などのように内部の温度差による強度差のある材料のモデル化も可能になる⁴⁾。

圧延にせよ連続鋳造の引抜などにせよ、ロールが材料に力を加えているとき、材料の内部では圧縮変形ばかりが起こるわけではなく引張による変形も起こる部分がある。そのためプラスチックの変形能が圧縮と引張で等しいかどうかを調べる必要がある。これを調べたのが Fig. 7 である。図よりプラスチックは引張のときも圧縮と同様の応力-ひずみの関係をもっていること、および温度上昇に伴い応力が低下すること等がわかる。しかしこのデータでは温度ごとの傾向にいくちがいのあるものなどがあり、あまり正確な値とはいえない。その原因は引張試験のクランプへの装置の問題および引張によるくびれの発生のためである。

3.2 降伏条件

1000°C 前後の高温の鋼の加工を考えると、その材料は塑性体として考える。塑性材料としての基本は(i)降伏条件が静水圧に依存せず、偏差応力が一定値になったとき (Tresca の条件) またはそれらを組み合わせたものが一定値になったとき (Von Mises の条件) 降伏が起

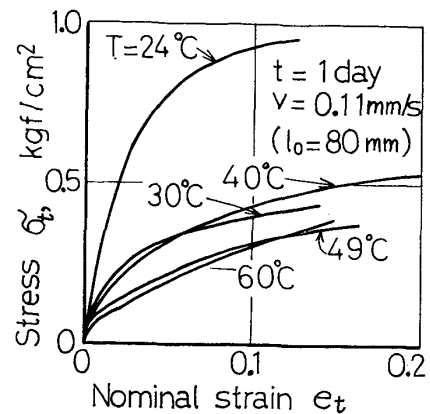


Fig. 7. Stress-strain relation of plasticine obtained by tensile test.

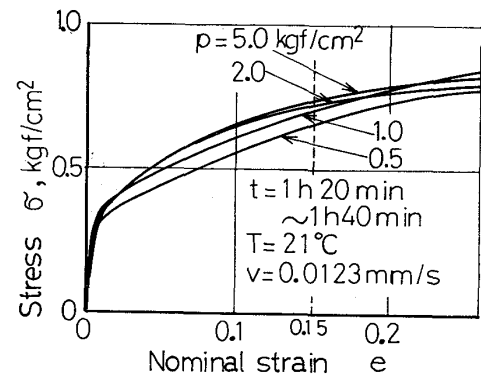


Fig. 8. Change of stress-strain curve of plasticine with hydraulic pressure.

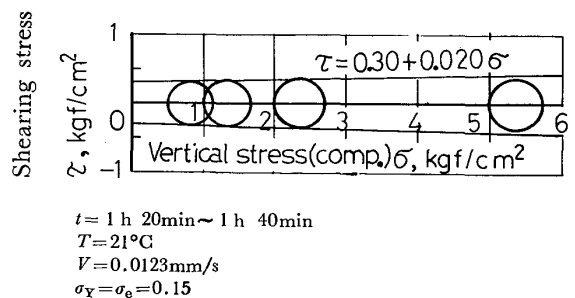


Fig. 9. Reliance of yield stress of plasticine on hydraulic pressure (Mohr's stress circle).

くること、(ii)塑性変形に伴う体積変化が無視し得る程小さいこと、などである。

プラスチックの降伏条件を明らかにするために、試験片に静水圧を加えながら一方向に圧縮する三軸圧縮試験を行つた。その結果を Fig. 8 に示す。静水圧 p をいろいろに変えても、それぞれの公称ひずみ e に対する偏差応力 σ は変化しない。すなわち、静水圧を変えても(偏差) 応力 σ -ひずみ e の曲線は変化しないことがわかる。

Fig. 8 のひずみが一定値 ($e = 0.15$) のところで切つ

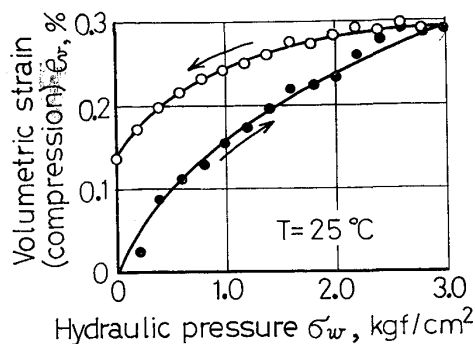


Fig. 10. Volumetric change of plasticine by hydraulic pressure.

て垂直応力 σ とせん断応力 τ との関係を求めモールの応力円の形で示したのが Fig. 9 である。この図からモールの破壊円の包絡線(破壊線)を求めると、 $\tau = 0.30 + 0.020 \sigma$ (kgf/cm²) となり、降伏(または破壊)せん断応力 τ は垂直応力 σ にほとんど無関係であることがわかる。

静水圧を加えたときに生じる体積ひずみ(圧縮)を、Fig. 10 に示す。体積ひずみ ε_v は静水圧 σ_w の増大とともに増加するが、 σ_w を逆に零にもどしても履歴現象があるため ε_v は零にならない。なお、圧延などのモデル実験(常温)では、ロール表面上での圧力の最大値はたかだか 3 kgf/cm² 程度であり(詳細は別報に発表の予定)、従つて静水圧成分はこれ以下であるので、モデル実験で生じる体積変化は一応 $\sigma_w = 3$ kgf/cm² に対応した $\varepsilon_v = 0.3\%$ 程度と、微小であることが推測される。

4. プラスチシンの動的な性質

4.1 応力のひずみ速度依存性

圧延その他の塑性加工では、材料内部で相当広範囲のひずみ速度が生じている。すなわち材料内の塑性流動域では大きなひずみ速度が、またそれ以外のところでは極めて小さなひずみ速度が生じている。材料の内部に生じている応力はひずみ速度に大きく左右されることは、周知のとおりである。そこでプラスチシンについて、応力のひずみ速度依存性の試験を前述の万能試験機を用いて次のように行つた。すなわちひずみ速度が $10^{-5} \sim 10^0$ 1/s の範囲については前述の減速機を用いて一定速度で圧縮した(Fig. 2(a)参照)。また $10^{-2} \sim 2 \times 10^1$ 1/s の範囲については、Fig. 11 に示した落下式の圧縮試験を行い、おもりの落下中の時々刻々のひずみとひずみ速度を求め、それに対する応力を測定することで、応力-ひずみ-ひずみ速度の関係を求めた。なお $10^{-2} \sim 10^0$ 1/s の間は両方の方法で圧縮を行い、同一の値が得られることを確認した。

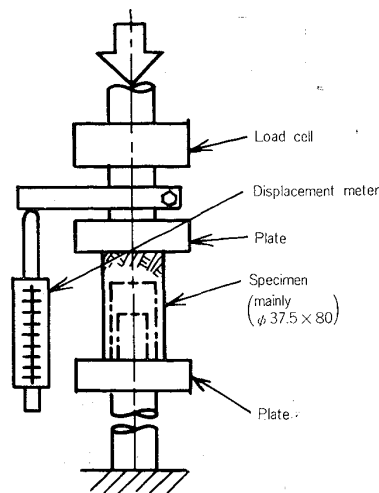


Fig. 11. Testing method of dynamic property of plasticine (Compression by dropping weight).

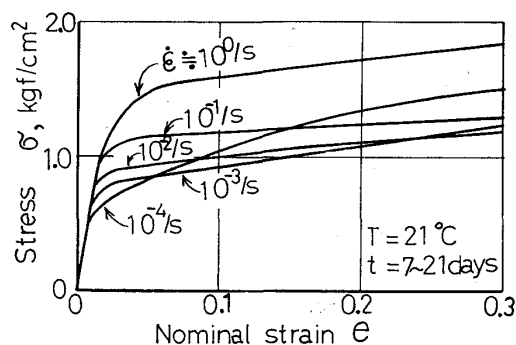


Fig. 12. Change of stress-strain curve of plasticine with strain-rate (obtained by constant speed compression test).

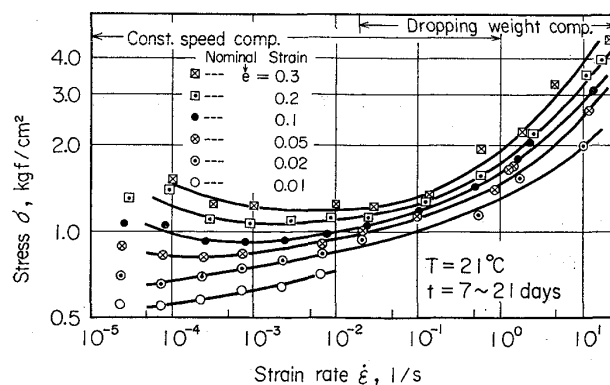
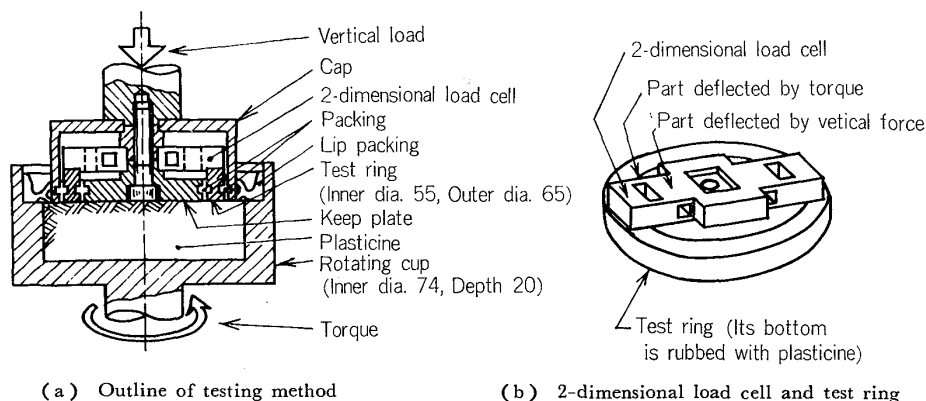


Fig. 13. Relation between stress and strain-rate of plasticine.

定速式の圧縮試験で速度を変えたときの応力-ひずみ曲線の変化を Fig. 12 に示す。図には、一定速度に対応するおおよそのひずみ速度の値をパラメータとして記入してある。この図から一般的にいって、ひずみ速度が増すと応力は大きくなるといえる。

定速式と落下式の双方の試験の結果を併せて記入し、



(a) Outline of testing method

(b) 2-dimensional load cell and test ring

Fig. 14. Testing method of friction between plasticine and metal.

応力に対するひずみ速度の影響を求めたのが Fig. 13 である。これからわかるように、プラスチックでは $10^{-5} \sim 2 \times 10^{-1}/s$ の広い範囲にわたり、一般的にはひずみ速度の大きい程応力は大きくなっている。ただし大ひずみ ($\epsilon = 0.1$ 以上) でひずみ速度が小さい ($10^{-3}/s$ 以下) 場合には、時効硬化の影響のため、かえってひずみ速度が小さい方が応力が大きくなる部分がある。

5. プラスチシンと金属表面との摩擦

加工による変形や加工に必要となる力の決定には被加工物自体の力学的な性質の他に、加工工具と被加工工具との間の摩擦条件が大きく関与していることは周知のとおりである。そこで金属表面とプラスチックとの摩擦を調べる実験を行つた。

試験の方法を Fig. 14(a) に示す。プラスチックを入れたカップを前述の万能試験機の出力軸に取り付け、回転させる。円環状の試験板は 2 方向ロードセルに取り付けられている。2 方向ロードセル (Fig. 14(b)) は、2 組の互いに直交する平行板機構を用いたもので、一つのブロックでプラスチックに対する押し付け力と摩擦トルクの双方が同時に測定できるようになっている。

プラスチシンと金属板表面との間に潤滑剤を用いた場合、塗布の方法は次のようにした。すなわち、粉状の潤滑剤を入れた箱の中でフェルト質のローラーを転がし、フェルトの中に粉を含ませる。次に薄いせんべい状のプラスチックを作つて、その上をローラーを 1 回だけ転がして通過させる。するとプラスチック表面に潤滑剤がうすく塗布される (炭酸カルシウムの場合 2.83 mg/cm^2 、タルクの場合 0.75 mg/cm^2 程度になる)。このプラスチックをあらかじめカップ中に埋め込んだプラスチック上に押し付けて密着させ、さらに試験板上から押し付け、直ちに試験板の回転を開始し、測定を行つた。このような方法にしたのは、粉体による潤滑は極めて微妙で

あり、一定の塗付量にすることがまず難しく、更に試験板の押し付け方や押し付けてからの時間などにより潤滑状態が変化してしまう等の難しさがあるので、できるだけモデル実験の潤滑状態を本試験のそれと同一にしようとするためである。

一定のすべり速度 v ですべりを開始し、直後の過渡現象がすぎたところで鉛直圧力 p に対応した一定摩擦応力 f が生じるようになる。このようにして、 p と f との関係を求めたのが次の Fig. 15~17 である。すなわち、滑らかな鋼板 (表面あらさ $s=5\mu\text{m}$) とプラスチックとの

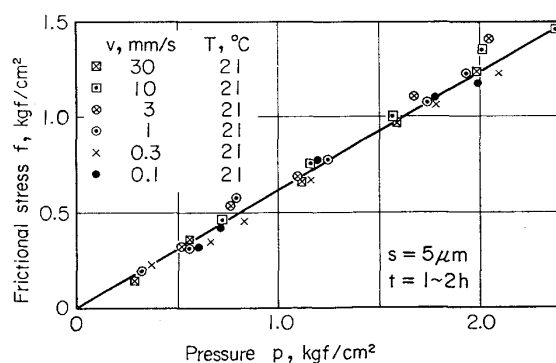


Fig. 15. Friction between plasticine and smooth steel plate lubricated by calcium carbonate powder.

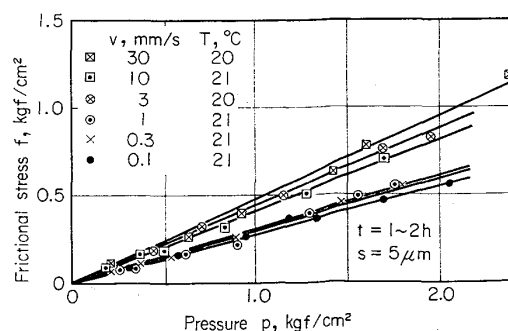


Fig. 16. Friction between plasticine and smooth steel plate lubricated by talcum powder.

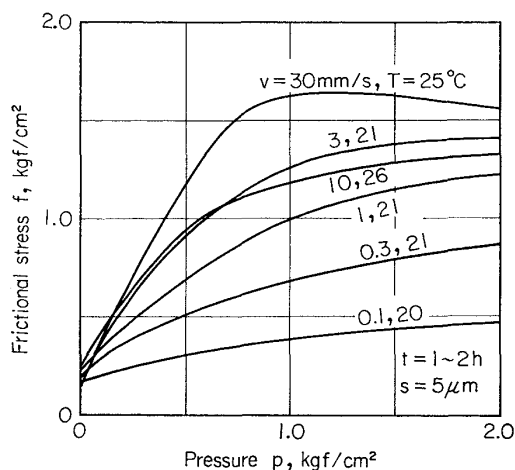


Fig. 17. Friction between plasticine and non-lubricated smooth steel plate.

摩擦で炭酸カルシウム (CaCO_3) を潤滑剤としたものが Fig. 15, タルクを潤滑剤としたものが Fig. 16, 新潤滑のものが Fig. 17 である。

炭酸カルシウムを潤滑剤とする摩擦では, Fig. 15 に示すとおりすべり速度によらず f は p に比例すること, しかもそのときの摩擦係数は 0.6 と一定であること等が特徴的である。

タルクを潤滑剤とする摩擦では Fig. 16 に示すとおり, f は p に常に比例するが, その比例係数 (摩擦係数) は v の小さいときには約 0.3, v の大きいところでは約 0.45 程度となつている。この原因は潤滑剤がプラスチックの中に吸収され, 潤滑状況が変化することと, 金属表面に接触したプラスチックの薄層内の変形のひずみ速度の影響であろうと考えられる。

無潤滑状態での摩擦では Fig. 17 に示すとおり, $p=0$ であつてもある程度の f の値 f_0 があることが特徴的である。 p が増加すると f も増加し, $f=f_0+\mu p$ の関係にあるが, ある程度の大きさになると f は飽和するようになる。また一般的にすべり速度 v が大きい程 f の値は大きくなる。従つて無潤滑では, 炭酸カルシウムやタルクによる潤滑のときのような“摩擦係数一定”の概念を用いることはできないことがわかる。

すべり速度の違いによる摩擦応力の違いを明らかにするため, Fig. 15~17 の結果を $p=2 \text{ kgf/cm}^2$ のときについて整理したのが Fig. 18 である。なお図中温度 21°C でないものは, Fig. 6 の温度による強度変化のグラフを用いて修正が行つてある。この図から, すべり速度が変わつても炭酸カルシウム潤滑およびタルク潤滑では摩擦係数 μ は, それぞれおおよそ 0.6~0.7 および 0.3~0.4 の範囲であまり変化しないが, 無潤滑ではこのようなことはなく, v の増大に伴い μ は 0.25~1 と急

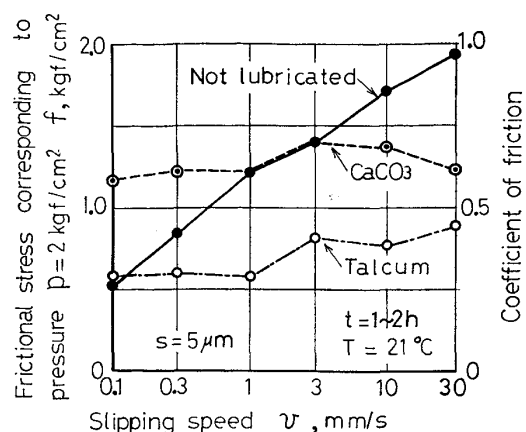


Fig. 18. Difference of frictions between plasticine and smooth steel plate occurred by various kinds of lubricants and their dependence on slipping speed.

激な増加を示していることがわかる。

以上の摩擦の試験から次のことがわかる。すなわち, プラスチシンを用いたモデル実験では, 摩擦係数 μ を約 0.6 程度にしたいときには炭酸カルシウムを用い, μ を 0.3 程度にしたいときにはタルクを用いてすべり速度を小さく ($v \geq 1 \text{ mm/s}$) すればよい。それぞれこの範囲ではすべり速度の影響を無視してよい。無潤滑状態の実験はスティック状態のモデル化のとき以外は用いない方がよい。

6. プラスチシンと高温の鋼との対比

6.1 プラスチシンの力学的性質の数式化

プラスチックの種々の力学的な性質を 3~5 で調べて来た。プラスチックを塑性学的に取り扱う場合に前提となることは, 降伏条件が静水圧成分によつて左右されないこと, および塑性変形に際して体積変化がないことの二つであるが, これら二つの条件はほぼ満足されていることは, 3.2 に述べたとおりである。

次にプラスチックの力学的な特性を示すために, 高温鋼の変形抵抗を表わす近似式にならい, その変形抵抗を次式の形で表してみよう。

$$\sigma = A \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(B/T) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, σ : 真応力 (kgf/cm^2)

ε : 対数ひずみ

$\dot{\varepsilon}$: 対数ひずみ速度 ($1/s$)

T : 絶対温度 ($^\circ\text{K}$)

n : 加工硬化指数

m : ひずみ速度依存指数

A : 材料によつて定まる定数

である。

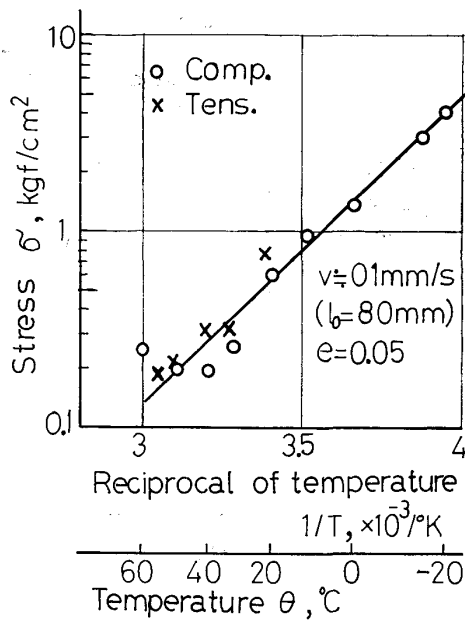


Fig. 19. Reliance of tensile and compressive yield stress of plasticine on temperature.

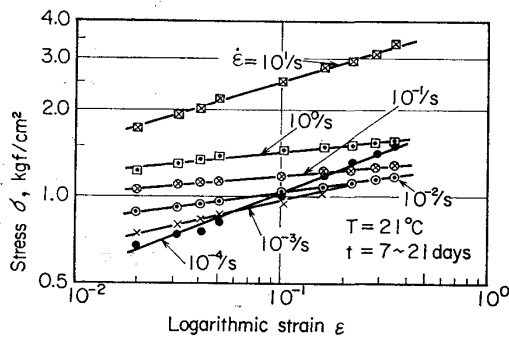


Fig. 20. Relation between logarithmic strain and stress of plasticine.

まず(1)式の B の値を定めるため、プラスチックの圧縮および引張における降伏応力の温度依存性のグラフをFig. 19に示す。圧縮のデータはFig. 6から、引張のデータはFig. 7から取ったものである。このグラフから、プラスチックは圧縮および引張のいずれの場合もほぼ同じ変形能をもち、しかもそれらの温度依存性も変わらないこと、および図中の点がほぼ一直線上に載ることから、応力 σ と温度 T の間には、ひずみ $\epsilon = 0.05$ ($\epsilon = e$ とした)で

$$\sigma = 3.54 \times 10^{-6} \exp(3530/T) \quad (2)$$

の関係があることなどがわかる。すなわち、 $B = 3530$ (°K)である。

次に応力 σ と対数ひずみ ϵ ・ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を求めよう。このため ϵ をパラメータとし σ と $\dot{\epsilon}$ との関係を示しているFig. 13から、 σ と ϵ との関係を $\dot{\epsilon}$ をパラメータとして書き直したのがFig. 20である。図中 ϵ

$= 0.02 \sim 0.3 \cdot \dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^0$ 1/sの範囲のものは、 $\dot{\epsilon}$ をパラメータとした $\log \sigma$ と $\log \dot{\epsilon}$ との関係が直線でも平行である。このことから、この範囲では3本の直線の傾きの平均をとり

$$\sigma \propto \dot{\epsilon}^n \quad n = 0.085 \quad (3)$$

であることがわかる。また σ と $\dot{\epsilon}$ との関係を求めるにはFig. 13を用い、 $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^0$ 1/s・ $\epsilon = 0.02 \sim 0.3$ の範囲の曲線を見る。これらの曲線はほぼ平行であり $\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ 1/sのところでの接線を求めて、この範囲の曲線(実は直線近似している)の傾きをとると

$$\sigma \propto \dot{\epsilon}^m \quad m = 0.12 \quad (4)$$

であることがわかる。

以上の(2)、(3)、(4)から

$$\sigma = A \cdot \epsilon^{0.085} \dot{\epsilon}^{0.12} \exp(3530/T)$$

となるが、 A を求めるためもう一度Fig. 12のグラフから、 $T = 21^\circ\text{C} = 294^\circ\text{K}$ 、 $\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ 1/sのとき $\sigma = 1.18$ kgf/cm²であることを用いると

$$A = 1.15 \times 10^{-5} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

となる。

すなわち、プラスチックの変形抵抗(応力) σ (kgf/cm²)は、試料作成後1週間以上たつたもので(1日以上たつていればほとんど同じである)、次のように表される。

$$\sigma = 1.15 \times 10^{-5} \epsilon^{0.085} \dot{\epsilon}^{0.12} \exp(3530/T) \quad (6)$$

ただし、 $T = 253 \sim 323^\circ\text{K}$ ($-20 \sim 50^\circ\text{C}$)

$$\epsilon = 0.02 \sim 0.3$$

$$\dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^0 \text{ 1/s}$$

の範囲に限る。

6.2 プラスチックと高温の鋼との比較

高温の鋼の変形抵抗は(1)式の形式で表すと、ほぼ次のように表されるという⁵⁾。

$$\sigma = 1.05 \exp(0.126 - 1.75C + 0.594C^2) \cdot \epsilon^{0.21} \cdot \dot{\epsilon}^{0.13} \cdot \exp\left(\frac{2851 + 2968C - 1120C^2}{T}\right) \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (7)$$

ただし、 $T = 123 \sim 1473^\circ\text{K}$ ($750 \sim 1200^\circ\text{C}$)

$$\epsilon < 0.5$$

$$\dot{\epsilon} = 30 \sim 200 \text{ 1/s}$$

$$C \text{ (炭素含有量, \%)} < 1.2$$

この式に軟鋼の炭素含有量として、 $C = 0.2(\%)$ を代入すると

$$\sigma = 86.1 \epsilon^{0.21} \cdot \dot{\epsilon}^{0.13} \exp(3400/T) \text{ kgf/cm}^2 \quad (8)$$

となる。

プラスチックによる実験の結果を実物の現象に当てはめるために、相似則による初歩的な検討を行う。

Table 1. Similitude between plasticine and steel in high temperature.

	Physical quantities	Plasticine	Correspondence	Steel in high temperature
Fundamental physical quantities	Length	l_p	$l_s = l^* l_p$	l_s
	Time	t_p	$t_s = t^* t_p$	t_s
	Force	F_p	$F_s = F^* F_p$	F_s
	(Temperature)	T_p	$T_s = T^* T_p$	T_s
Induced physical quantities	Stress	σ_p	$\sigma_s = \frac{F^*}{l^{*2}} \sigma_p$	σ_s
	Strain	ϵ_p	$\epsilon_s = \epsilon_p$	ϵ_s
	Strain rate	$\dot{\epsilon}_p$	$\dot{\epsilon}_s = \frac{1}{t^*} \dot{\epsilon}_p$	$\dot{\epsilon}_s$

プラスチシンの物理量に p , それに対応する高温の鋼の物理量に s をそれぞれ添字として付け, また両者の対応を表す相似比には $*$ を付けることにする. 基本の物理量として長さ, 時間, 力, 温度をとり, またこれらから誘導される物理量として応力, ひずみ, ひずみ速度を考えると, 各々の物理量の対比は Table. 1 のようになる. いまプラスチシンの実験を行い, 応力が σ_p , ひずみが ϵ_p , ひずみ速度が $\dot{\epsilon}_p$, 温度が T_p であると, これらの間には (6) が成り立っているはずである.

$$\sigma_p = 1.15 \times 10^{-5} \cdot \epsilon_p^{0.085} \cdot \dot{\epsilon}_p^{0.12} \exp(3530/T_p) \quad \dots\dots\dots (6)'$$

ところで, プラスチシンの変形抵抗と高温の鋼の変形抵抗とが相似であり, それらの物理量の間には Table 1 の関係があるものとすれば, (6)' に Table 1 の関係式を代入して次式を得る.

$$\begin{aligned} \frac{l^{*2}}{F^*} \sigma_s &= 1.15 \times 10^{-5} \cdot \epsilon_s^{0.085} (t^* \dot{\epsilon}_s)^{0.12} \exp\left(\frac{3530}{T_p}\right) \\ \therefore \sigma_s &= 1.15 \times 10^{-5} \times \frac{F^*}{l^{*2}} \\ &\cdot t^{*0.12} \epsilon_s^{0.085} \dot{\epsilon}_s^{0.12} \exp\left(\frac{3530}{T_p}\right) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで温度の関与する項については, T_p をそのまま用いた. その理由はプラスチシン内の温度分布とそれに対応する強度分布が, 高温の鋼のそれらと相似であることが要求される場合の他は, $T_s = T T_p$ といった相似関係は全く不必要であるためである. このプラスチシンから求めた (9) 式ともとの高温の鋼の変形能を表す (8) 式とは等しいはずである. 両者を等しくするには, 次の 3 つの式が成り立たねばならない.

$$\begin{aligned} 1.15 \times 10^{-5} \times \frac{F^*}{l^{*2}} t^{*0.12} \exp\left(\frac{3530}{T_p}\right) \\ = 86.1 \times \exp\left(\frac{3400}{T_s}\right) \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\epsilon_s^{0.085} = \epsilon_s^{0.21} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{\epsilon}_s^{0.12} = \dot{\epsilon}_s^{0.13} \quad \dots\dots\dots (12)$$

まず (11), (12) 式について検討しよう. この式は当然のことに, 成立するわけではない. 左辺と右辺の差は, プラスチシンと高温鋼との応力-ひずみまたは応力-ひずみ速度曲線の形の差からくるものである. 従つてこれによる相似性の欠如はいかんともし難いものであるが, 一応それらの量的な比較をしてみる. 指数だけみると, 両者の差は大きく見えるが数値そのものはそれ程には大きくない. ϵ の小さいところでは, 両者の差は大きい, 右辺は左辺に対し $\epsilon = 0.1$ では約 25% 増, $\epsilon = 0.3$ で約 14% 増, $\epsilon = 0.5$ で約 8% 増となつている. 従つてこの程度の大ひずみの生じる加工のモデル実験であれば, 応力-ひずみを近代式で示すことの誤差や弾性回復・摩擦条件などによる実験誤差を考慮に入れば, 一応 (11) 式の左辺を右辺とは等しいものとして差し支えないものと考えられる. また (12) 式のひずみ速度の項の左辺と右辺は指数が極めてよく一致しており, 両者を等しいものと見なしても全く問題がない.

さて以上の検討により, 成立しなくてはならないのは (10) 式だけである. これを力の相似比 F^* についてとくと

$$\begin{aligned} F^* &= \frac{86.1}{1.15 \times 10^{-5}} \exp\left(\frac{3400}{T_s} - \frac{3530}{T_p}\right) \\ &\times \frac{l^{*2}}{t^{*0.12}} \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

となる. また応力の相似比 F^*/l^{*2} は (13) からただちに

$$\begin{aligned} \frac{F^*}{l^{*2}} &= \frac{86.1}{1.15 \times 10^{-5}} \exp\left(\frac{3400}{T_s} - \frac{3530}{T_p}\right) \\ &\times \frac{1}{t^{*0.12}} \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

となる. すなわち, 力または応力について (13) または (14) が成立するなら, プラスチシンと鋼とは変形能について相似であることが保証される. 逆にプラスチシンで行つた力や応力の実験の結果に, (13) または (14) の相似

Table 2. Example of the relation between model experiment by plasticine and corresponding actual experiment

(i) Comparison of experimental conditions

	Model	Actual object	Scale factor necessarily determined
Diameter of roll	200 mm	400 mm	$l^*=2$
Rolling speed	$V_p=1\text{ cm/s}$	$V_s=200\text{ cm/s}$	$l^*/t^*=200$
Temperature	$T_p=20^\circ\text{C}$ ($=293^\circ\text{K}$)	$T_s=1\,000^\circ\text{C}$ ($=1\,273^\circ\text{K}$)	—

(ii) Scale factors of physical quantities

Physical quantities	Scale factor
Length	$l^*=2$
Time	$t^*=10^{-2}$ ← from $l^*/t^*=200$
Force	$F^*=4\,410$ ← from (13)
Stress	$F^*/l^{*2}=1\,101$ ← from (14)
Strain rate	$l/t^*=10^2$
Strain	—
Temperature	—

比を掛けてやれば、鋼のそれが分かることになる。

次に例として Table 2 に示すようなモデル実験を考え、それに対応する実物での現象を求めるを試みよう。

二つの実験の対応を (i) に示す。モデル実験にはプラスチックを使い、その温度は 20°C であり圧延のロール径は $\phi 200\text{ mm}$ 、圧延速度は 1 cm/s である。これでロール径 $\phi 400\text{ mm}$ 、圧延速度 200 cm/s 、鋼の温度 $1\,000^\circ\text{C}$ の実物の圧延における応力、ひずみ、ひずみ速度、荷重などを求めようとすると、(ii) のような相似比になる。すなわち、実験条件だけで長さや時間の相似比が定まってしまう。次にプラスチックを用いたことで力の相似比、応力の相似比も (13)、(14) 式で定まってしまう訳である。力についてはモデル実験の荷重の $4\,410$ 倍をすれば実物の荷重が、また応力についてはモデル実験の応力の $1\,102$ 倍が実物の内部や境界で生じていることになる。

以上の検討および (14) 式からプラスチックを室温で用い $1\,000^\circ\text{C}$ 前後の鋼の加工のシミュレーションをする場合、実物の応力はプラスチックで得られたもののおおよそ $1\,000$ 倍になると考えてよいことがわかる。

7. 結 言

鋼の熱間圧延時の各種の応力状態や変形挙動の推定お

よび連続鋳造時の鋳片の表面および内部の割れの防止法の発見のためのシミュレーションに不可欠な、プラスチックの力学的性質として、静的な性質・動的な性質・摩擦の性質などを明らかにした。その結果、たとえばプラスチックの応力 σ (kgf/cm^2)、対数ひずみ ϵ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ ($1/\text{s}$)、温度 T ($^\circ\text{K}$) の間には、 $T=253\sim 323^\circ\text{K}$ 、 $=\epsilon\,0.02\sim 0.3$ 、 $\dot{\epsilon}=10^{-2}\sim 10^0\,1/\text{s}$ の間で

$$\sigma = 1.15 \times 10^{-5} \epsilon^{0.085} \dot{\epsilon}^{0.12} \exp(3530/T)$$

の関係があることがわかった。またこれらの試験結果をもとにして、プラスチックと高温の鋼との相似性の確認を行い、プラスチックが高温の鋼の変形挙動のみならず応力状態をもシミュレーションするのに十分な性能をもっていること、プラスチックで得た応力を約 $1\,000$ 倍すれば実際の応力が得られることなどがわかった。

なおプラスチックをモデル材料とする実験には、本報で取り扱った現象の他に応力緩和とその温度依存性・クリープ・弾性回復などのデータも不可欠であり、また実際の試料の取り扱いでは内部加熱や放冷による温度変化・試料強度の異方性・経年変化などのデータも必要となる。しかし本報では紙面の都合上すべて割愛した。

なお、本研究を進めるに当たり、貴重な助言を下さった東京大学工学部木原諄二助教授ならびにお世話になった次の方々にお礼を申し述べたい。東京大学工学部総合試験所山宮正三助手にはプラスチックの組成分析をしていただいた。本研究に用いた万能試験機の設計は、同学部産業機械学科の当時の学生だった竹内恒夫君（現新日本製鉄勤務）によるものであり、その製作は同学部機械工学実験所の方々によるものである。また通常の土質試験の採用では、(株)竹中工務店技術研究所中崎英彦氏に大変お世話になった。この他に東京大学工学部産業機械工学科千々岩研究室の学部学生・大学院生の多くの学生諸君の協力により、本研究が進められたことを記し、感謝したい。

文 献

- 1) 栗野泰吉：塑性と加工，1 (1960) 3, p. 203
- 2) 栗野泰吉，団野 敦：塑性と加工，13 (1972-10) 141, p. 768~775
- 3) 柳下小太郎，塚本頼彦，江川庸夫，大森舜二，飯伏順一：三菱重工技報，11 (1974-1) 1, p. 43
- 4) 千々岩健児，畑村洋太郎，松岡 潔：鉄と鋼，62 (1976) 4, p. 106
- 5) 日本鉄鋼協会：圧延理論とその応用 (1975)，p. 157，[誠文堂新光社]