

# 高温度に於ける鋼の變形抵抗に関する研究 (第I報)

(日本鐵鋼協會第 27 回講演大會講演, 昭 17. 4. 東京)

池 島 俊 雄 \*

## STUDY OF THE RESISTANCE OF STEEL TO DEFORMATION AT ELEVATED TEMPERATURES (FIRST REPORT)

Tosio Ikezima.

**SYNOPSIS:**— Experiment to study the resistance to deformation at high temperatures was made as part of the study of the hot-working of steel. In the experiment, an impact-compression test was conducted, using a suitable lubricant, so that the compressive stress may be oneaxial as far as possible. The deformation resistance calculated from this result, which however has some range of errors, was presumed to be less than 10% in its magnitude. Results obtained at temperatures in the range of 700~1200°C in deformation resistance of various carbon and alloy steels were thus derived. Finally results obtained from theoretical calculations were referred to.

### 目 次

- I. 緒 言
- II. 従來の研究
- III. 研究の方針
- IV. 實驗方法
- V. 豫備實驗
- VI. 實驗結果 I. 歪速度の影響
- VII. 實驗結果 II. 温度の影響
- VIII. 總 括
- IX. 附記 理論的計算例

### I. 緒 言

高温度に於ける鋼の加工——例へば鍛造, 壓延, プレス等々——の方面に関する研究は未だ充分な學問的基礎の上に行はれたものが少く, これらの技術は寧ろ經驗的な立場から出發したものであつた。この方面に関する研究の基礎として高温度に於ける鋼の變形抵抗を塑性力學的立場から實驗研究した結果を報告する。即ち鋼が加工を受ける際にその變形抵抗が, 鋼自身の化學成分, 温度, 歪速度等によつて如何に變化するかを研究したものである。其の目的とする所は各種の加工機械の設計に際しての正確なる基礎資料を提供する事及び加工の困難なる特殊鋼に就て適當なる加工條件を求める基礎を研究する事にある。

### II. 従 來 の 研 究

金属材料の高温加工の場合の變形抵抗に関する研究の中で, 特に注目されるのは, E. Siebel 及び Kaiser Wilhelm

鐵研究所の人々に依つて行はれたる研究<sup>1)</sup>並びに A. Nadai の報告<sup>2)</sup>がある。前者は主として實驗用の壓延機及び各種加工機械による實驗結果から變形抵抗を計算したものであり, 後者は抗張試験機により, 巧妙な方法で廣範圍の歪速度に對する高温抗張力を求めたものである。併し此等の研究は特殊鋼にはあまり觸れて居ない。

### III. 研究の方針

#### 1. 變形抵抗の定義

一般に加工の方法が異なるに従つて加工される材料に生ずる應力分布は非常に變化する。今變形中の材料の一點に於ける主應力をその大きさの順に  $\sigma_1, \sigma_2$  及  $\sigma_3$  とすると,

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_f \dots \dots \dots (1)$$

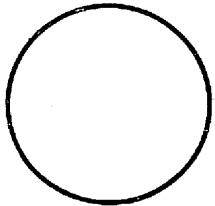
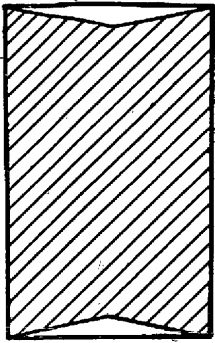
で定義される力  $k_f$  を變形抵抗と呼ぶ事にする。この定義は, 變形が最大剪斷應力説に従つて起ると考へた場合に最も都合のよいものである。最大剪斷應力説は嚴密な意味では正しくないが, 高温加工の變形に適用しても大きな誤りはないと考へられる。

この定義に従ふと, 一軸的な抗張試験では  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  故  $\sigma_1 = k_f$  となり, 一軸的な壓縮試験では  $\sigma_1 = -k_f$  となり, 引張應力又は壓縮應力自身が變形抵抗に等しい事になる。

#### 2. 一軸的引張試験及び壓縮試験

上記の考から一軸的な引張試験及び壓縮試験によつて變形抵抗を求める事が最も簡単な様に思はれるが, 實驗的には種々の難點がある。高温引張試験の場合には局部收縮が著しく, 應力分布は一軸的なものから遙かに離れたものと

\* 住友金屬工業株式會社鋼管製造所研究課



第1圖 E. Siebel  
が用ひた壓縮試料片

なると共に、引張試験中の試験片の眞の断面積を求める事にも技術的に難點がある。一方壓縮試験の場合には試験片の中央が膨れて大鼓形になり、應力は一軸的でなくなる。この難點を避ける實驗方法として次の二つの方法が考へられる。一つはE. Siebel<sup>3)</sup>等が行つた様に壓縮面を圓錐形とし、試験片を第1圖に示すやうな形にする事である。この方法は圓錐の頂角を適當に選ぶ點に大きな困難があつた。即ち材料の種類及び温度に應じてこの頂角を變化しなければならぬからである。他の方法としては適當な減摩剤を使用する事により、壓縮面の摩擦を出来る限り小さくして試験片の膨れを小さくする事である。筆者はこの方法を採用する事とした。

3. 變形抵抗の計算

壓縮試験の場合に應力が常に一軸的であり、試験片の温度分布が一様で且つ試験中變化しないと假定すると、變形抵抗は次の様にして計算される。即ち

- $h$ : 試験片の高さ
  - $h_b$ : 壓縮前の試験片の高さ
  - $h_a$ : 壓縮後の試験片の高さ
  - $F$ : 試験片の断面積
  - $F_0$ : 壓縮前の試験片の断面積
  - $V$ : 試験片の體積
  - $A$ : 全壓縮エネルギー
- .....(2)

とすると

$$A = - \int_{h_b}^{h_a} k_f \cdot F \cdot dh = -V \int_{h_b}^{h_a} \frac{k_f}{h} dh \quad \dots\dots(3)$$

となる。變形中の  $k_f$  を一定とし、これを  $k_{fm}$  とすると

$$A = V \cdot k_{fm} \cdot \ln \frac{h_b}{h_a} \quad \dots\dots(4)$$

又は

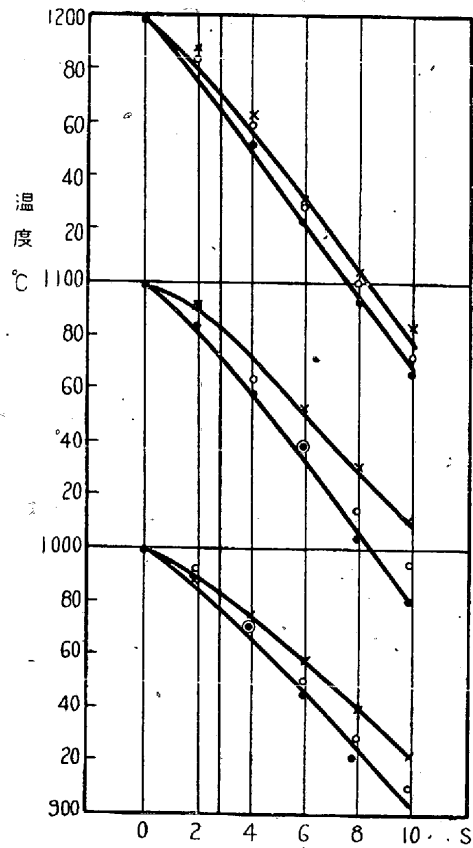
$$k_{fm} = \frac{A}{V \cdot \ln \frac{h_a}{h_b}} \quad \dots\dots(5)$$

となる。(5)式により  $k_{fm}$  を求める事が出来る。變形抵抗  $k_f$  は再結晶温度よりも遙かに高い温度では主として至速

度に支配されるが、壓縮試験中歪速度が一定でない時は  $k_f$  も一定と考へる事は出来ない。従つて  $k_{fm}$  は一種の平均の變形抵抗である。この平均の内容に就ては附記に於て詳細に述べる事にする。

IV. 實驗方法

壓縮試験にはアムスラー式タツプマシンを用ひた。これは小型の落下鎚で、重錘の重量は最大 50kg. その落下距離は最大 4m である。試験片は真空中で加熱し、所定の温度に達してから 15mm 保持して爐から取り出し直ちに壓縮した。その間の所要時間は 2~3s である。この間に於ける試験片の中心部の冷却曲線を第2圖に示す。以下斷らない



試料の寸法  
高さ × 30 mm 020 mm 015 mm  
直徑 1.5 " 1.5 " 15 "

第2圖 試料の冷却曲線

限り便宜上この補正をしない温度を記す事にする。

尚、試験片を壓縮する前に豫め金敷及壓縮頭には減摩剤を塗布して置くのである。

V. 豫備實驗

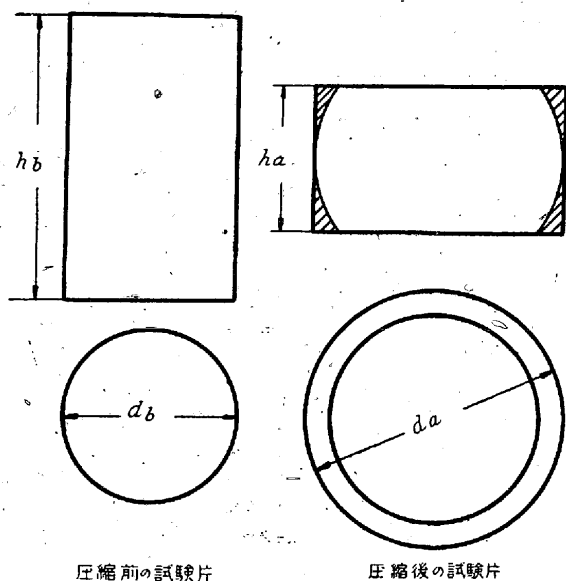
1. 減摩剤の撰定に関する實驗

適當なる減摩剤を用ひる事によつて壓縮面の摩擦を小に

する事がこの實驗の要點であるので、減摩劑の撰定に關しては多くの實驗を行つた。その詳細に關しては別に報告の豫定であるので、こゝには二、三の結果を述べるに止める。先づ試験片の大鼓狀の膨れを定量的に表はす爲に(6)式で定義される  $E$  といふ數値を採つた。

$$E = \frac{\frac{\pi}{4} d_a^2 h_a - \frac{\pi}{4} d_b^2 h_b}{\frac{\pi}{4} d_b^2 h_b} \times 100\% \dots \dots (6)$$

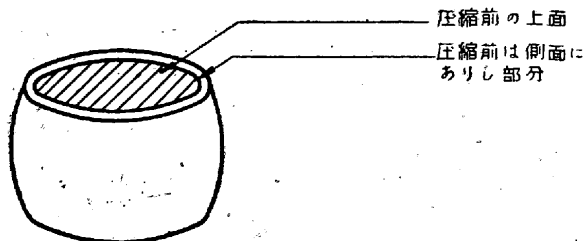
こゝに  $d_b$  は壓縮前の試験片の直径、 $d_a$  は壓縮後の試験片の最大直径を表はす。(6)式の意味は第3圖の斜線を施



第 3 圖

した部分即ち壓縮後の試験片とこれに外接する圓壘との間に挟まれた部分の體積を以て膨れの量を表はさうとするものである。従つて圓壘形の試験片が壓縮後も圓壘形ならば  $E=0$  である。勿論體積の變化はないものとする。

但し(6)式を適用するには次の條件が必要である。壓縮後の試験片の上下面に壓縮前の側面が含まれてはならぬ事である。摩擦が大きい場合には第4圖に示す様に側面の部



第 4 圖 摩擦多き場合の壓縮後の試験例

分が盛り上つて来る。斯る場合に(6)式を適用する事は無意味である。

(6)式で定義される  $E$  を以下膨張度と呼ぶ事にする。

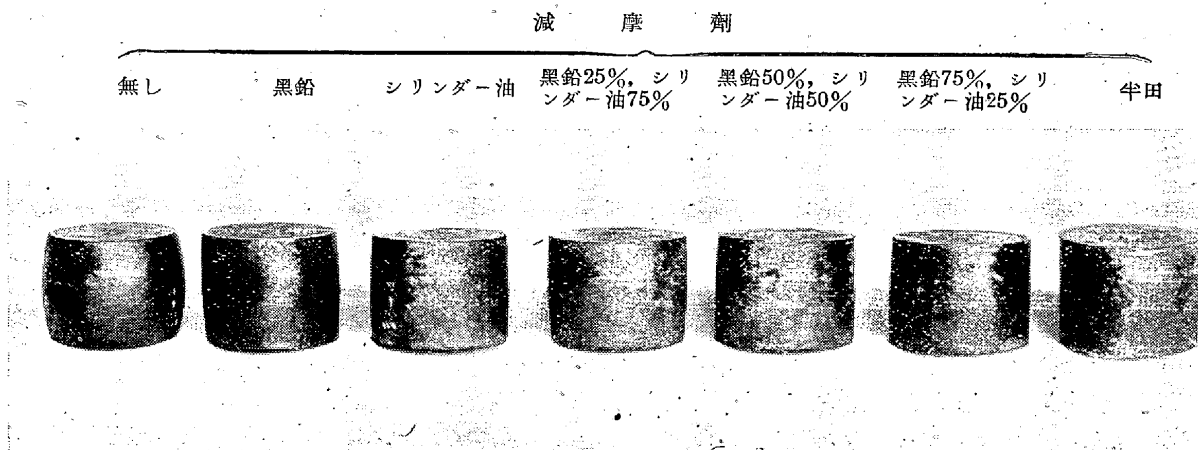
第 1 表 減摩劑に關する實驗例

試料 C=0.53% 炭素鋼  
 試験片寸法  $\phi$  15mm × 高20mm  
 試験温度 900°C  
 壓縮エネルギー 20kg × 2m

減 摩 劑	壓・減 率	膨 脹 度 $E\%$
	$\frac{h_b - h_a}{h_b} \times 100\%$	
使 用 せ ず	30.0	(7.8)*
鱗 片 狀 黒 鉛	28.7	2.8
シ リ ン ダ ー 油	29.6	2.1
鱗 片 狀 黒 鉛 25%	29.6	2.4
シ リ ン ダ ー 油 75%		
鱗 片 狀 黒 鉛 50%	29.6	1.5
シ リ ン ダ ー 油 50%		
鱗 片 狀 黒 鉛 75%	29.6	1.0
シ リ ン ダ ー 油 25%		
半 田	27.5	2.6

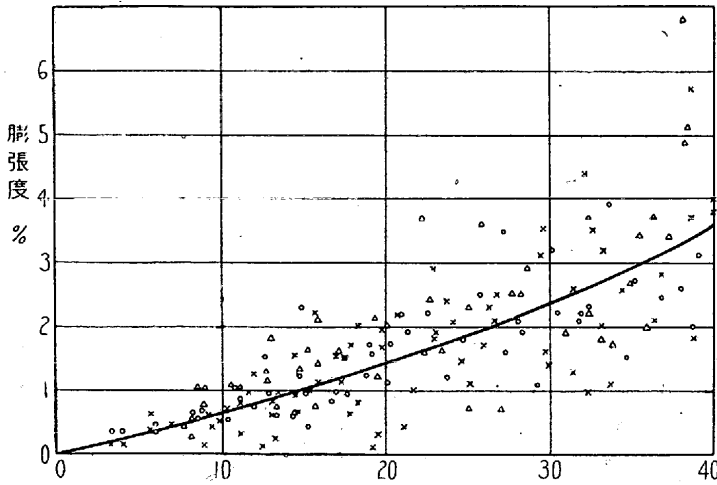
\* この場合は第5圖の寫眞からも明かなる如く側面の部分が壓縮面へと盛り上つてゐるのでこの値は参考迄に書いた。

第1表及び第5圖に實驗結果の一例を示す。種々の實驗によつて鱗片狀黒鉛75%とシリンドー油25%の混合物



第 5 圖 減摩劑に關する實驗例

が良好な減摩性を有する事が判明したので、以下の実験には悉くこれを使用した。第6圖はこの減摩剤を使用した多くの実験結果に就て壓減率と膨脹度  $E$  との關係を求めた



第6圖 (鱗片状黒鉛 75%+シリンドラ油 25%) を減摩剤として使用したる場合の壓減率と膨脹度との關係

ものである。この圖に畫かれた點は炭素鋼から不銹鋼迄の種々の材料に就て 700~1200°C の間の温度で行つた結果であるので、可なりばらつきが大きい、その平均の曲線は圖に示す様になる。

2. 試験片の寸法の選定に関する實驗

壓縮面の摩擦係数を  $\mu$  とする時、壓縮應力  $\sigma$  は

$$\sigma = k_f \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h} \right) \dots\dots\dots (7)$$

で大體表はされる。こゝに  $k_f$  は摩擦のない場合の壓縮應力、 $d$  は試験片の直径、 $h$  は其の高さである。

今の實驗では  $\mu$  は可なり小であるが、 $d/h$  の影響を全然無視してよいかどうかは疑問である。そこで  $d/h$  をどの程度にすべきかに関して實驗を行つた。併し乍ら實驗的に  $d/h$  のみの影響を見る事は困難で、歪速度、試験片の冷却等種々他の影響が同時に現はれるので、實驗結果の解析は可なり複雑となる。詳細は別の報告に譲るとして結果のみを述べると、 $d/h$  が 0.5~1.5 の範圍では壓縮應力に大きな影響は表はれない。従つて以下の實驗では悉く直径 15 mm、高さ 20mm の試験片を用ひる事とした。尙此の試験片を爐から取り出して壓縮する迄に冷却する温度は第2圖に示した通りである。

3. 壓縮エネルギーに就て

落下する重錘の質量を  $M$  落下距離を  $H$  とすると、試験料に衝突する直前に重錘の有する運動エネルギーは  $MgH$  に等しい。但し  $g$  は重力加速度である、併し此のエネルギー

の全部が壓縮に費されず、一部は金敷に吸収され、他の一部は重錘の彈性變形及び跳返りに費される。此等の壓縮以外に費されるエネルギーが何%に達するかを推算しよう。

(i) 重錘の跳返り これは實的に求められる。その大きさは變形抵抗が大きい程大である。現在の實驗の範圍では高々落下距離の 2% に過ぎない。従つて重錘の跳返りによるエネルギー損失は最高 2% である。

(ii) 重錘の彈性變形 彈性變形の場合の彈性エネルギー  $U$  は次の (8) 式で表はされる。

$$U = \frac{1}{2} \frac{P^2 l}{EA} \dots\dots\dots (8)$$

こゝに  $P$  は全壓縮力、 $E$  はヤング率、 $l$  及  $A$  は夫々重錘の長及び斷面積である。

試料の變形抵抗が大きい程  $P$  従つて  $U$  も大となる。今變形抵抗が 50kg/mm<sup>2</sup> とすると

$$P = 0.785 \times 15^2 \times 50 \text{ kg}$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$l = 45 \text{ cm}$$

$$A = 57.0 \text{ cm}^2$$

であるから、(8) 式を計算すると

$$U = 0.147 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

となる。落下エネルギーが 20kg・m の場合にはこの値は 1% にも達しない。

(iii) 金敷に吸収されるエネルギー 金敷及基礎に吸収されるエネルギーの正確な計算は困難であるが、次のやうに考へよう。即ち質量  $M$  の重錘の質量  $m$  の金敷 (コンクリートの基礎を含む) とが不完全彈性衝突をしたと考へるならば、衝突後に  $M$  及び  $m$  の得る運動のエネルギー  $E_M$  及び  $E_m$  は次の式で與へられる。

$$E_M = MgH \frac{(M - km)^2}{(M + m)^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$E_m = MgH \frac{mM}{(M + m)^2} \dots\dots\dots (10)$$

こゝに  $k$  は Restitutions koefizient<sup>4)</sup> と呼ばれる數で完全彈性衝突の時は 1 であり、非彈性衝突の場合は零である。(9) 式に於て  $E_M/MgH$  の値は (i) で述べたやうに最高 2% であるから、これを代入すると  $k$  の最高値が求められる。  $M=20\text{kg}$ ,  $m=2000\text{kg}$  とすると

$$k = 0.133$$

となる。この値を (10) 式に代入して  $E_m/MgH$  の値を求

めると 1.26% となる。金敷及び基礎に吸収されるエネルギーは大體此の程度のもと思はれる。

(i), (ii) 及び (iii) を總括して考へると、高温壓縮試験で壓縮以外に費されるエネルギーの總和は多くとも落下エネルギーの 4% に過ぎない。而してこの補正は材質、温度により非常に異なるので、以下の實驗値にはこの補正を行はず、重錘の落下エネルギーは悉く壓縮に費されたとして計算する事とする。

以上豫備實驗で種々述べた誤差を考慮すると、理想的壓縮試験の場合に比べて變形抵抗は幾分大に計算される。併しその程度は 10% 以内であると考へられる。

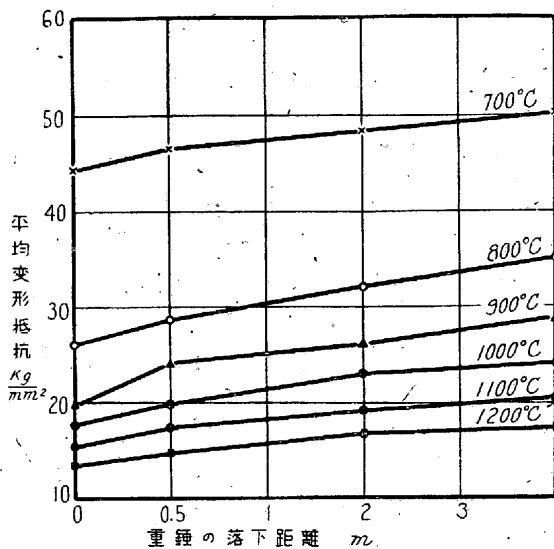
### VI. 實驗結果(I) 變形速度の影響

實驗に用ひた鋼の化學成分を第2表に示す。先づ 20 kg の重錘を、0.5m, 1m, 2m 及び 3m の高さから落下せしめて壓縮試験を行ひ、(5)式で變形抵抗  $k_{fm}$  を計算した結果

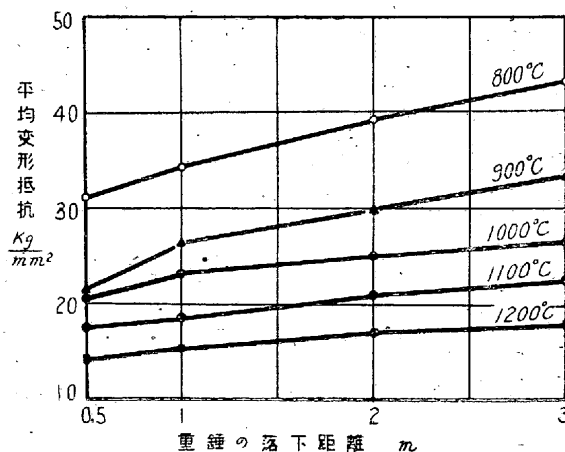
第2圖 試料の化學成分(%)

鋼種	符號	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
炭素鋼	C1	0.14	0.15	0.51	0.015	0.018	0.11	—	—	—
	C2	0.24	0.21	0.53	0.015	0.014	0.15	—	—	—
	C3	0.55	0.18	0.74	0.019	0.023	0.15	—	—	—
クロム・モリブデン鋼	Cr-Mo 1	0.14	0.12	0.43	0.019	0.015	—	3.02	—	0.20
	Cr-Mo 2	0.15	0.22	0.43	0.025	0.012	—	5.36	—	0.24
クロム・マンガ鋼	Cr-Mn	0.49	0.19	1.12	0.025	0.017	—	0.77	0.09	—
不銹鋼	13Cr	0.14	0.46	0.36	0.043	0.028	—	13.99	0.66	—
	18~8	0.09	0.31	0.30	0.023	0.010	—	18.59	8.33	—
	25~5	0.11	1.62	0.33	0.037	0.015	0.10	24.36	5.23	—

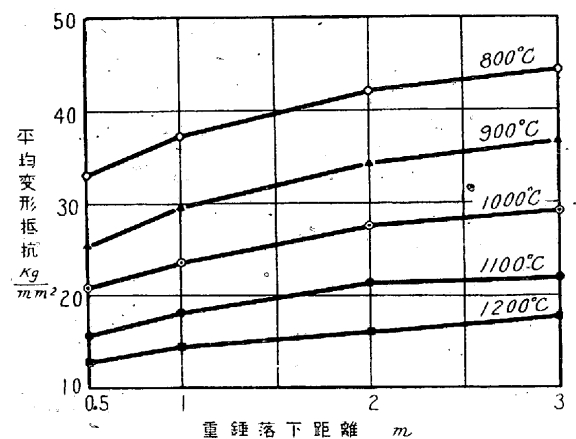
を第7~15圖に示す。是等の圖から直ちに分るやうに落下距離が大になる程、平均變形抵抗も大となる。これは落下距離が大になる程、試験片に衝突する重錘の初速度は大となり、従つて平均歪速度を増す爲である。附記に述べる計算から推定すると、落下距離 0.5m の場合には約 100/sec 1m の場合には 150~200/sec 2m の場合には約 250/sec. 3m の場合には約 350/sec の平均歪速度で壓縮が行はれた



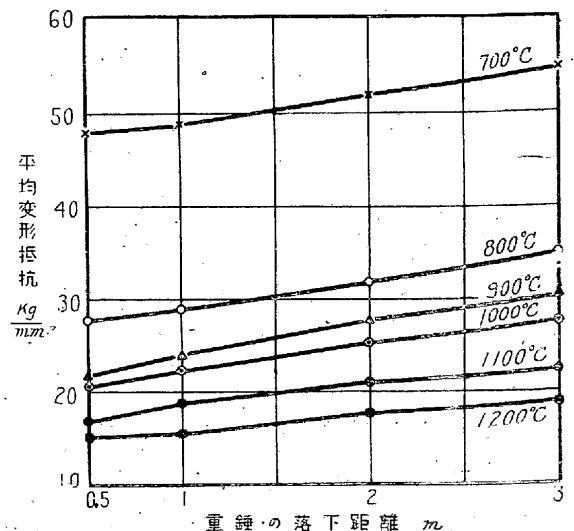
第7圖 C1の變形抵抗 重錘 20kg



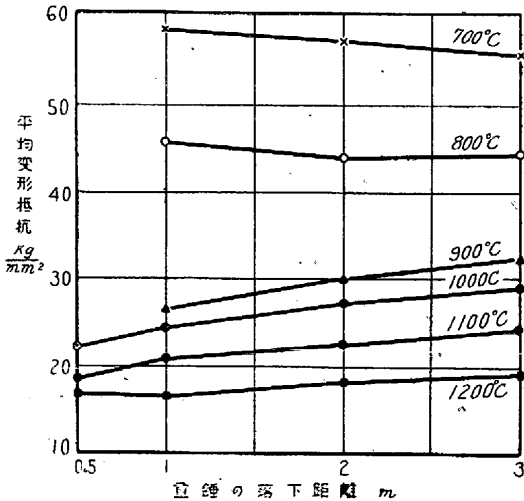
第8圖 C2の變形抵抗 重錘 20kg



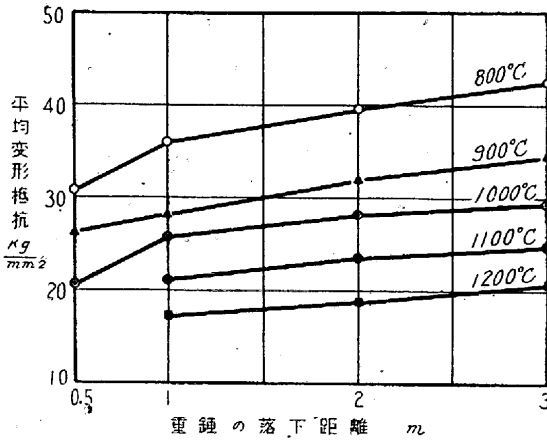
第9圖 C3の變形抵抗 重錘 20kg



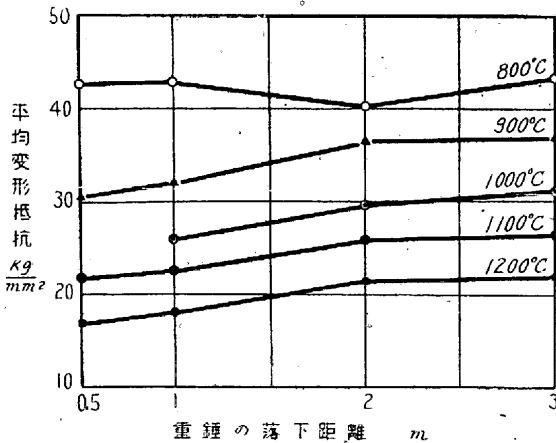
第10圖 Cr-Mo 1の變形抵抗 重錘 20kg



第11圖 Cr-Mo 2 の變形抵抗 重錘 20kg



第12圖 Cr-Mn の變形抵抗 重錘 20kg

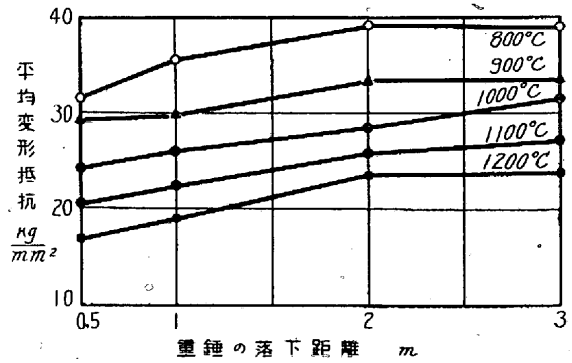


第13圖 13Cr の變形抵抗 重錘 20kg

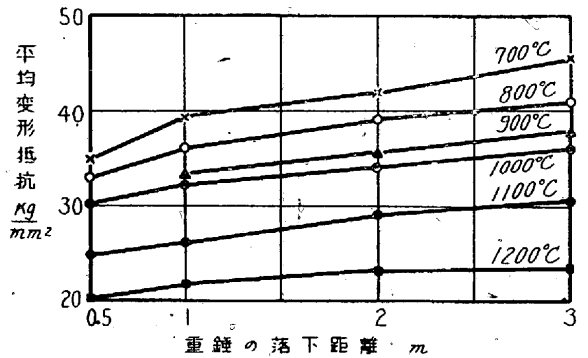
と思はれる。今變形抵抗と歪速度  $u$  とが次の如き關係にあるとしよう。

$$k_f = \alpha u^n \dots\dots\dots (11)$$

ここに  $\alpha, n$  は常數である。第7~15圖を用ひて  $n$  を計算すると、大體  $n=0.2\sim 0.3$  となる。併し  $n$  及び  $\alpha$  の正確な數値は壓縮過程中的應力一伸一時間曲線が知られなければ求められない。この點は尙實驗中である。尙第13



第14圖 18-8 の變形抵抗 重錘 20kg



第15圖 25-5 の變形抵抗 重錘 20kg

圖の13%クロム鋼の800°Cに於ける曲線は落下距離と共に上昇して居ない。同様の現象は他の鋼に於てもよい低温度で起る。従つて高温加工の場合には關係がないのでこゝでは深く立入らぬ事とする。

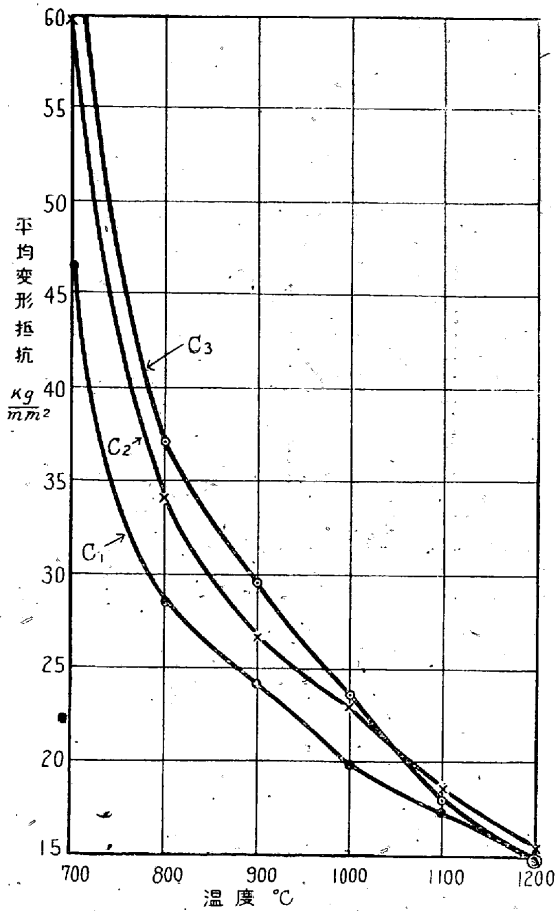
### VII. 實驗結果(II) 温度の影響

重錘 20kg 落下の高さ 1m の場合の平均變形抵抗と温度との關係を表はしたものが第16~18圖である。これは150~200/sec 平均歪速度に對する變形抵抗で鍛造及び壓延の場合に略適用出来る。\*)

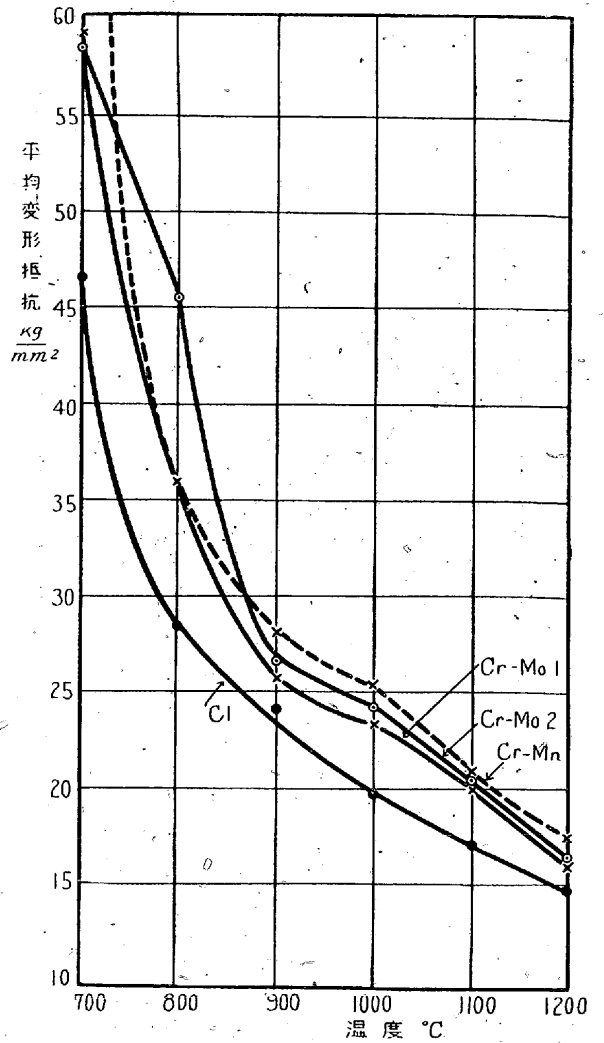
第16圖は炭素鋼の場合であるが、1000°C 迄は炭素量により變形抵抗は異なるが1100°C 以上では殆んど一致する。第17圖は低合金鋼の場合で比較のために軟鋼も圖示した。900°C 以上では炭素量の高いクロム・マンガン鋼が變形抵抗最大で、5%クロム・モリブデン鋼 3%クロム・モリブデン鋼の順となつてゐる。併しこの三者の相違は僅

第3表 A. Nadai の實驗との比較

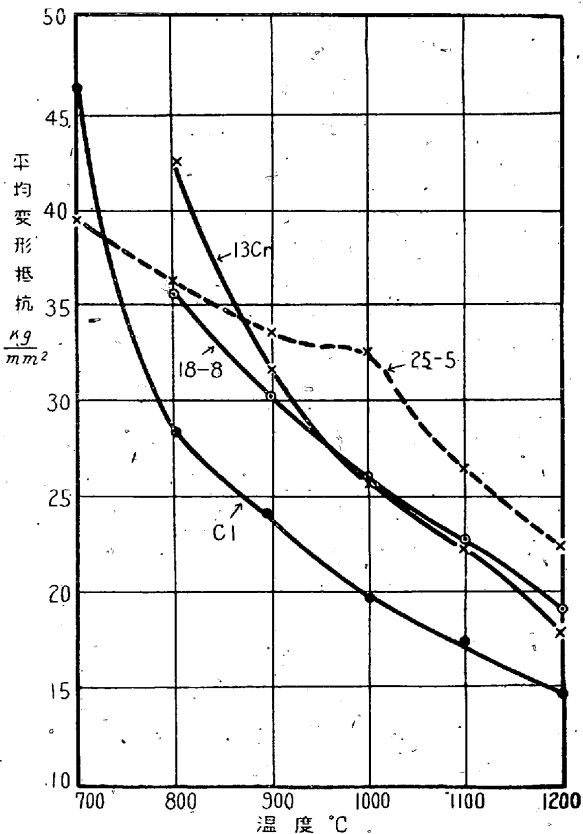
温度	800°C	1000°C	1200°C	歪速度
A. Nadai の實驗による最高抗張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	23	18	14	100/s
	31*	22	16	600/s
著者の實驗による變形抵抗 (kg/mm <sup>2</sup> )	28.4	19.7	14.6	150~200/s
	31.9	22.9	16.7	250~300/s



第 16 圖 炭素鋼の變形抵抗と温度との關係  
(但し變形抵抗は平均歪速度  $u=150\sim 200/\text{s}$  に対するもの)



第 17 圖 低合金鋼の變形抵抗と温度との關係  
(但し變形抵抗は平均歪速度  $150\sim 200/\text{s}$  に対するもの)



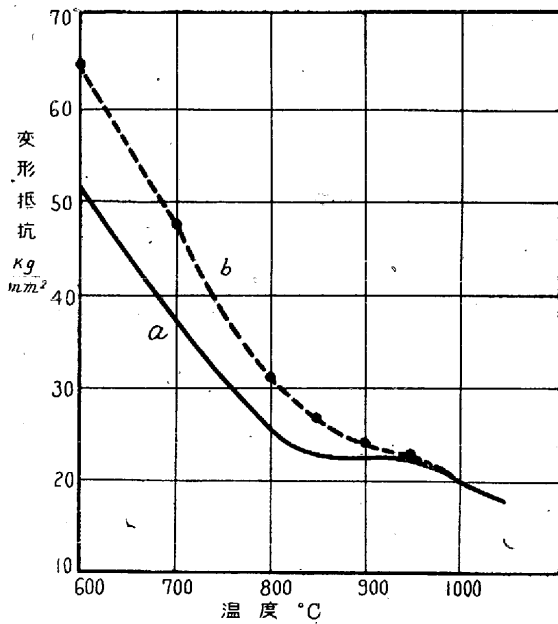
第 18 圖 不銹鋼の變形抵抗と温度との關係  
(但し變形抵抗は平均歪速度  $150\sim 200/\text{s}$  に対するもの)

少である。800 $^{\circ}\text{C}$ 以下では變態點が三者共相違してゐるので、變形抵抗の値も可なり著るしい開きがある。これらの低合金鋼は軟鋼と比較すると可なり差があり900 $^{\circ}\text{C}$ 以上に於ては約100 $^{\circ}\text{C}$ だけ低温の軟鋼の變形抵抗に等しい。第18圖に於て13%クロム鋼と18~8とを比較すると900 $^{\circ}\text{C}$ 迄は18~8の方が軟かであるが1000~1100 $^{\circ}\text{C}$ では同程度であり1200 $^{\circ}\text{C}$ では18~8が幾分硬い。更にクロム及びシリコンの高い25~5の變形抵抗は100 $^{\circ}\text{C}$ 以上では遙かに大きい1200 $^{\circ}\text{C}$ に於ける25~5の變形抵抗は1100 $^{\circ}\text{C}$ に於ける18~8又は950 $^{\circ}\text{C}$ に於ける軟鋼の變形抵抗に相當する事が分る。

次に軟鋼に就て得られた變形抵抗の値をA. Nadai<sup>2)</sup>によつて求められた最高抗張力の値と比較した結果を第3表に示す。實驗値は可なり良く一致してゐる。

又H. Henneke<sup>5)</sup>の報告によると、炭素鋼ではA3-變態點の附近で變形抵抗の谷がある。(第19圖の曲線a)筆

者の實驗では第 19 圖 b 曲線に示すやうに斯る谷は見られ



第 19 圖 低炭素鋼の變形抵抗と A<sub>1</sub> 變態點との關係

なかつた。これは歪速度の差によるものであらう。

### VIII. 總括

高温度に於ける鋼の變形抵抗を衝撃壓縮試験によつて求める實驗を行つた。試験に際し、壓縮面に鱗片狀黒鉛と油との混合物を置く事により、壓縮應力を一軸的に近くし、變形抵抗の計算を可能ならしめた。理想的な壓縮試験と比較して考へられる種々の誤差を吟味した結果、得られる變形抵抗は 10% 以上の誤差はないものと考へられた。

かくして 700~1200°C の温度範圍で、炭素鋼、低合金鋼及び不銹鋼等の變形抵抗を求めた。これらの値は各種加工機械の設計の基礎資料となると共に、特殊鋼の高温加工條件の決定の基礎となるものである。尙この實驗で求めた變形抵抗は 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>/sec 程度の比較的大きい歪速度に對する値で、歪速度  $u$  と變形抵抗  $k_f$  との正確な關係は次の報告に譲るが、

$$k_f = \alpha u^n \quad \alpha, n \text{ は常數}$$

なる式で  $n=0.2\sim0.3$  で表はされる。尙 A. Nadai が抗張試験から求めた最高抗張力と比較的一致した値を示した。

### IX. 附記

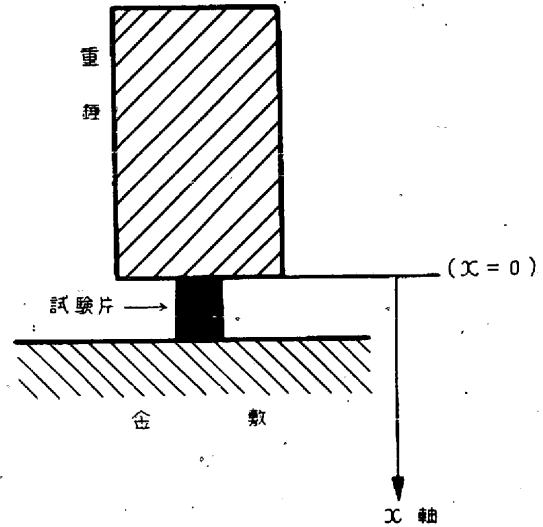
壓縮過程中に歪速度が如何に變化するかを理論的に調べて見た。計算に際して次の假定をした。

1) 試験片の温度分布は一様とし、且變形中に温度の變

化はないとした。

2) 壓縮面の摩擦は無く、壓縮應力は常に一軸的とした。

第 20 圖の様に重錘が試験片に最初接する面を  $x$  軸の零



第 20 圖

點とし、鉛直方向に  $x$  軸を採る。  $M$  を重錘の質量  $g$  を重力加速度、  $t$  を時間、  $P$  を全壓力、  $u$  を歪速度とすると、重錘が試験片に衝突してから以後の重錘の運動方程式は

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = Mg - P \quad \dots\dots\dots (12)$$

で與へられる。  $Mg$  は  $P$  に對して無視出来るから (12) は

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -P \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。一方  $P$  は次の式で與へられる。

$$P = F \cdot k_f \quad \dots\dots\dots (14)$$

斷面積  $F$  は次の式で與へられる。

$$F = \frac{F_0 h_0}{h_0 - x} \quad \dots\dots\dots (15)$$

次に變形抵抗  $k_f$  は再結晶温度より可なり高い温度では加工硬化は殆んど起らないと考へ、歪速度のみの函数と假定すれば

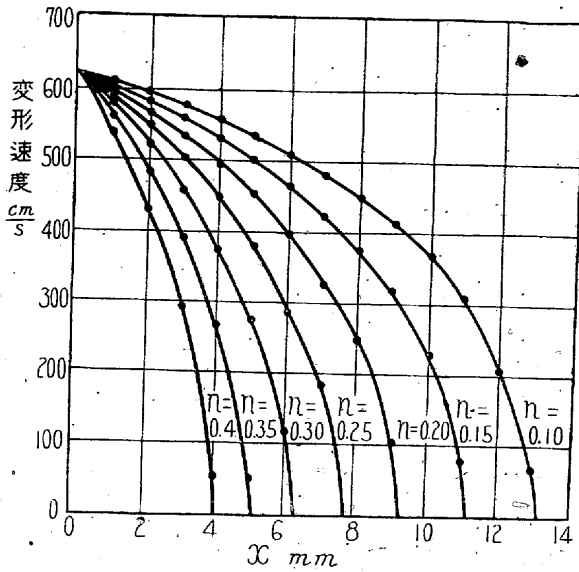
$$k_f = \alpha u^n \quad \dots\dots\dots (16)$$

として表はしてよいであらう。こゝに  $\alpha, n$  は温度、材質によつて變化する常數である。今の場合  $u$  は次式で表はされる。

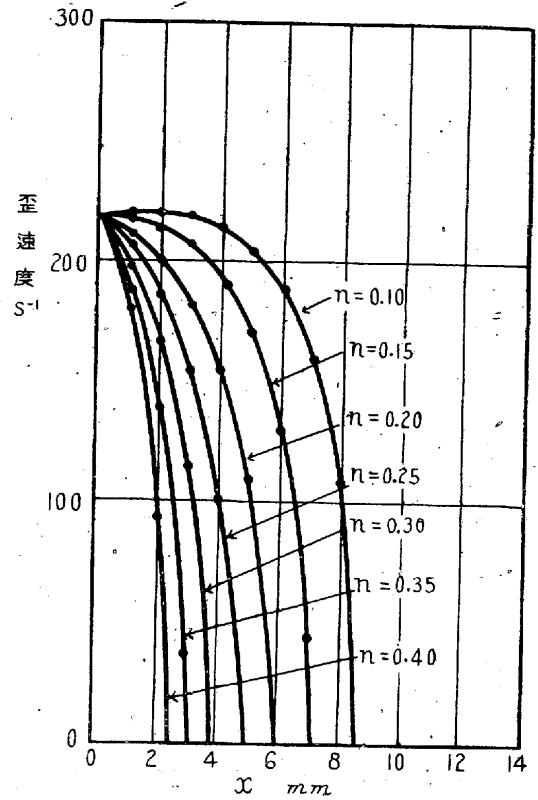
$$u = \frac{1}{h_0 - x} \frac{dx}{dt} \quad \dots\dots\dots (17)$$

扱 (13) 式に (14), (15), (16) 及 (17) 式を代入すると

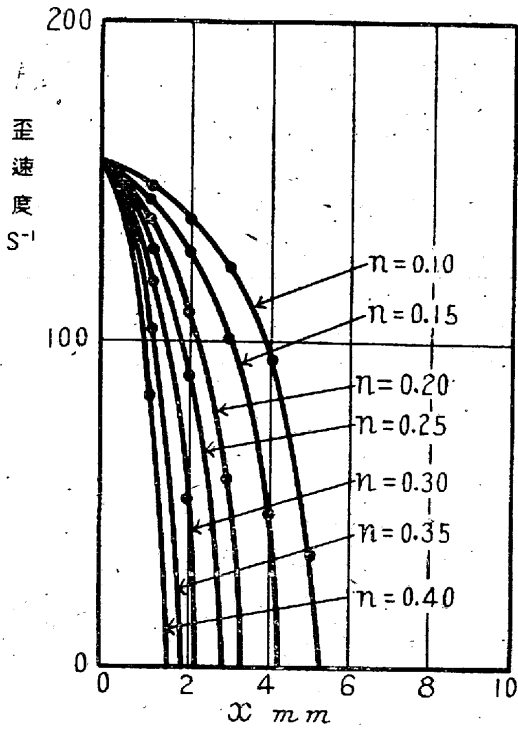




試料 φ 15mm × 高 20mm, 壓縮エネルギー 20kg × 2m  
第 21 圖 壓縮中の變形速度の變化



試料の高さ 20mm, 壓縮エネルギー 20kg × 1m  
第 23 圖 壓縮中の歪速度の變化



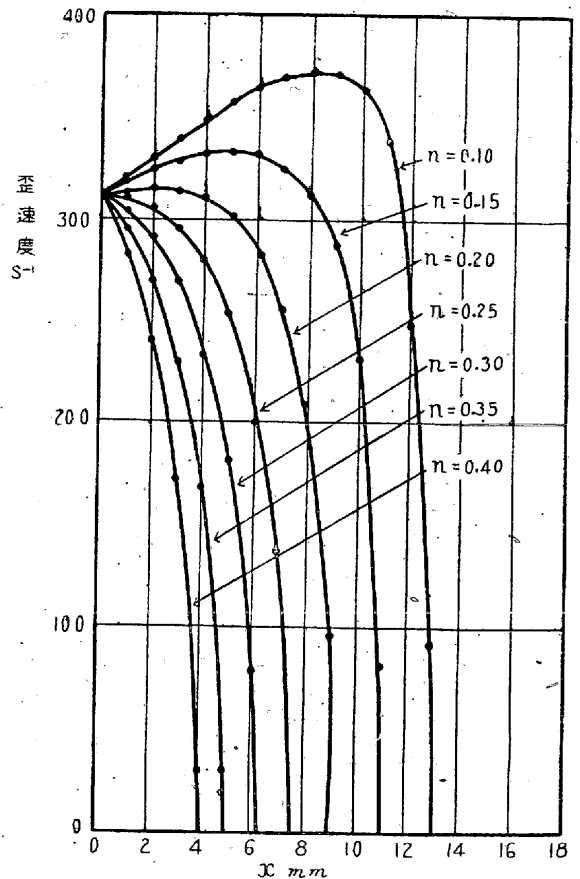
試料の高さ 20mm, 壓縮エネルギー 20kg × 0.5m  
第 22 圖 壓縮中の歪速度の變化

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -\alpha F_0 h_0 \left( \frac{1}{h_0 - x} \right)^{1+n} \left( \frac{dx}{dt} \right)^n \quad (18)$$

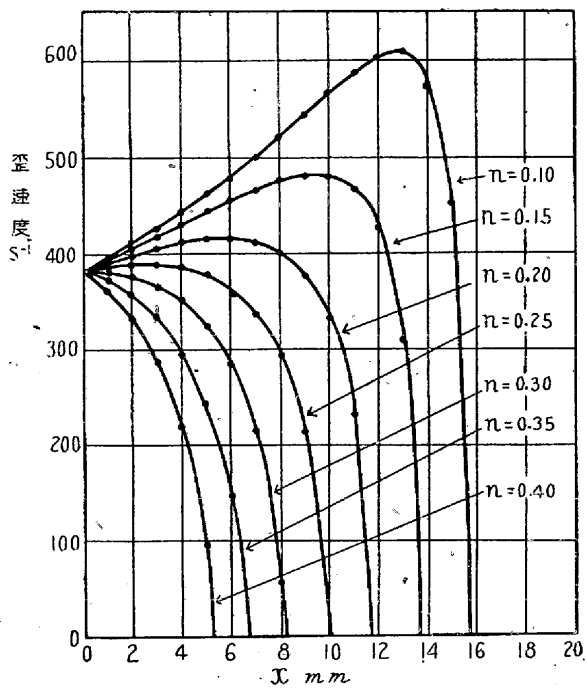
なる重錘の運動方程式が得られる。この重錘の運動は同時に試験片の高さの變化を表す故  $dx/dt$  は試験片の壓縮される速度である。(18)式を一回積分として、(19)式の如き初期条件をとると、(20)式が得られる。

$$t=0 \text{ の時 } x=0, \text{ 且つ } \left( \frac{dx}{dt} \right)_{t=0} = v_0 \quad (19)$$

$$\left( \frac{dx}{dt} \right)^{2-n} = v_0^{2-n} - \frac{\alpha F_0 h_0}{M} \cdot \frac{2-n}{n}$$



試料の高さ 20mm, 壓縮エネルギー 20kg × 2m  
第 24 圖 壓縮中の歪速度の變化



試料の高さ 20mm, 圧縮エネルギー 20kg×3m

第25圖 圧縮中の歪速度の変化

$$\left\{ \frac{1}{(h_b - x)^n} - \frac{1}{h_b^n} \right\} \dots \dots \dots (20)$$

(20) 式から変形速度  $dx/dt$  と  $u$  との関係が計算される。更に歪速度 も計算出来る。

又 (20) 式に於て  $dx/dt=0$  となる  $x$  の値を  $x_0$  と表はすと  $x_0$  は次の式で與へられる。

$$\frac{h_b - x_0}{h_b} = \left( \frac{1}{1 + \frac{M h_b}{\alpha F_0} \frac{n}{2-n} \left( \frac{v_0}{h_b} \right)^{2-n}} \right)^{\frac{1}{n}} \dots \dots (21)$$

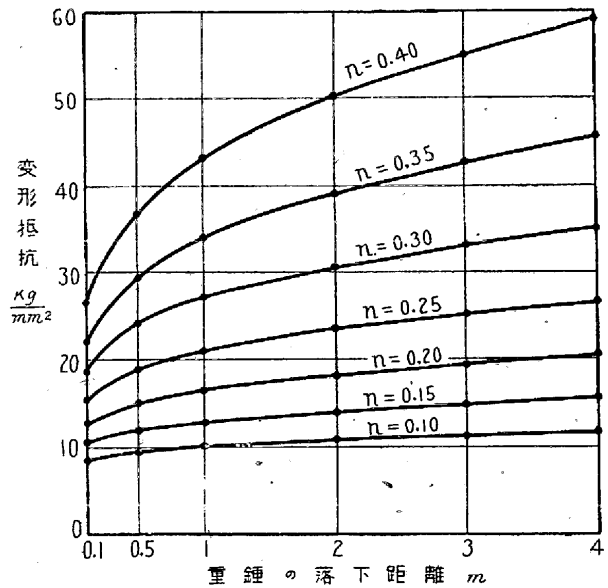
この (21) 式の左邊は  $h_a/h_b$  である。

計算例 1. 圧縮中の歪速度の変化

計算例の二, 三を次に示す。計算に用いた數値は下記の通りである。

- $h_b = 20\text{mm}$
- $F_0 = 0.785 \times 15^2\text{mm}$
- $M = 20\text{kg}$
- $v_0 = \sqrt{2gH}$
- $H = 500, 1000, 2000, 3000\text{mm}$
- $g = 9800\text{mm/sec}^2$
- $\alpha = 6 \times 9800$
- $n = 0.1 \sim 0.4$

(22) の數値を (20) 式に代入して  $dx/dt$  と  $x$  との関係を求めた結果の一例は第 21 圖の通りである。更にこれよ



第26圖 變形抵抗と重錘の落下距離との關係 重錘 20kg

り  $u$  と  $x$  との関係を求めた結果は第 22~25 圖の通りである。

高温に於ける鋼の場合には  $n=0.2 \sim 0.3$  の程度であるから、第 22~25 圖から平均の歪速度が推定される。その値は既に述べた通りである。これらの圖で注目される事は衝撃壓縮の場合には歪速度は變形の進行と共に直線的に減少する事無く、或る場合には増加する事さへある。

計算例 2. 重錘落下距離の影響

(22) の數値を用ひて (21) 式を計算し、この結果から平均變形抵抗  $k_{fm}$  を計算した結果を第 26 圖に示す。この結果と第 7~15 圖の實驗曲線を比較すると  $n=0.2 \sim 0.3$  の附近で極めて似た傾向を有する事を知る。併し乍ら  $n$  及び  $\alpha$  の値の決定は尙今後の研究に依つて正確を期したいと考へる。

文 獻

- 1) Mitt. Kais. Wilh. Inst. Eisenf. 中の多數の報告。
- 2) Proc. A. S. T. M. Vol. 40, 1940, p. 822~837, Journal of Applied Mechanics, Vol. 1941, A 77~A 91,
- 3) Mitt. Kais. Wilh. Inst. Eisenf. Bd. 9, 1927, s. 157~172 同上 Bd. 10, 1928, s. 55~62,
- 4) Auerbach u. Hort, Handbuch der physik. u. techn. Mechanik, Bd. 3. s. 425,
- 5) Ber Werkstoffaussch. V. d. Eisenh. Nr. 94, 1926.