圧　延　機　特　集

変形抵抗と圧延荷重……57

形鋼圧延における圧延荷重および圧延動力……63

八幡製鐵株式会社堺製鉄所納条用分塊圧延設備……70

油圧圧下式圧延機……75

東海製鐵株式会社納２スタンドタンデムミル……80
——テンパーおよびダブルコールドリダクション兼用ミル

ホットストリップミル用ワークロールの肌荒れの原因……85

U. D. C. 621.771.24

変　形　抵　抗　と　圧　延　荷　重

Resistance of Metals to Compression and Rolling Loads

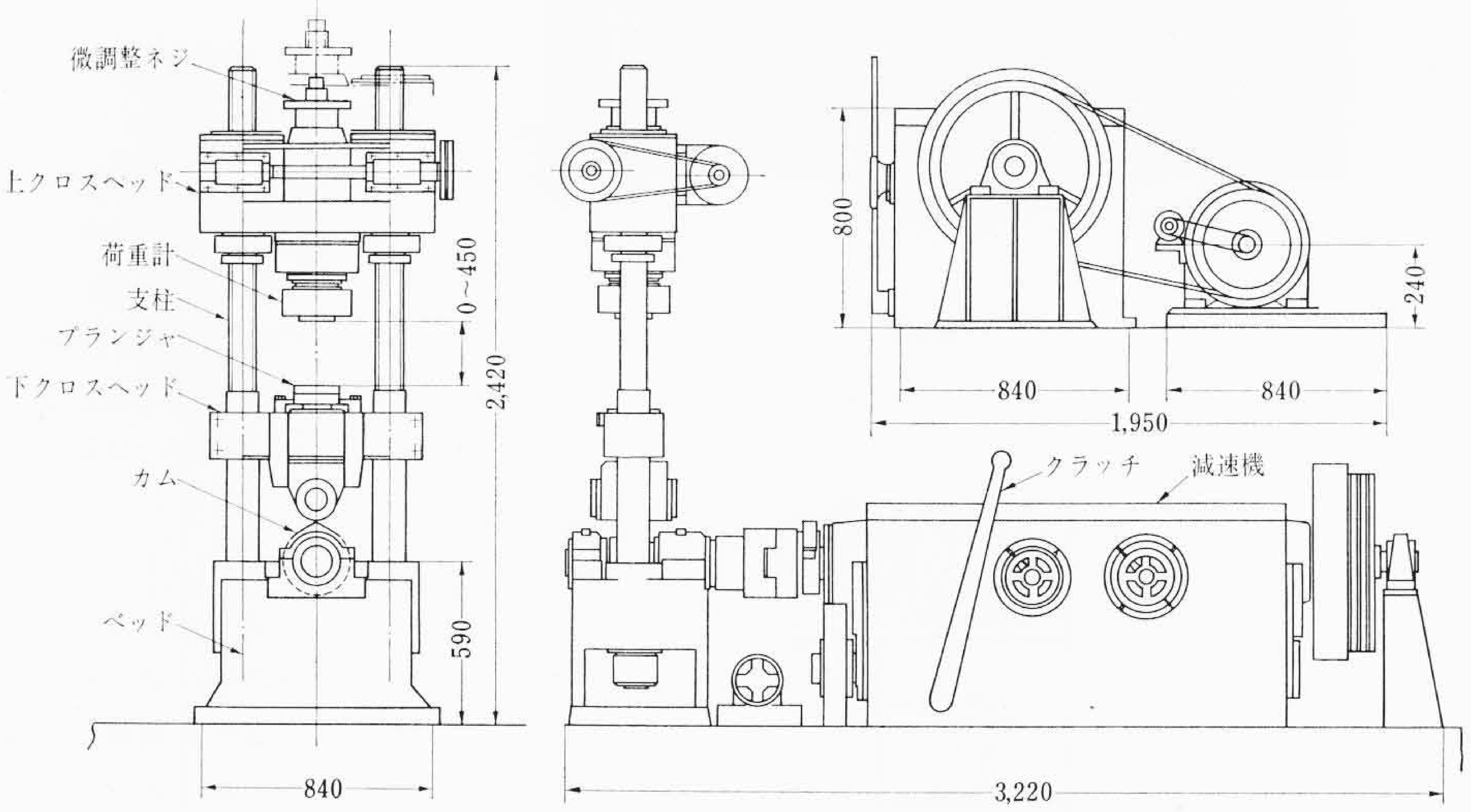
志　田　　茂*
Shigeru Shida

内　容　梗　概

0.1% 炭素鋼・18-8 ステンレス・鉛の変形抵抗に及ぼす変形速度，変形量，温度の影響を明らかにした。鉛については，さらに圧延荷重を測定して，変形抵抗と圧延荷重の関係を調べ，代表的な圧延理論式との比較を行なった。最後に，実用的な圧延荷重近似計算式を導き，実測値による検討を加えた。

1. 緒　　言

塑性加工による実際の生産で，加工力の大きさを的確にとらえることは重要な問題の一つで，これまでに加工力に関する研究がさかんに行なわれてきた。圧延に関しては，圧延荷重計算式だけでも，すでに，10指に余りあり，これらの計算式の紹介も多い[(1)~(4)]。このように，圧延荷重の計算式がいろいろ提案されてきたことは，裏をかえせば，どの計算式も広範囲に満足しないか，あるいは取り扱いが面倒で，あまり実用的でないことを示すものといえよう。圧延荷重を左右する因子には，(1)圧延材の変形抵抗，(2)圧延材とロール間の摩擦係数，(3)ロール径，板厚，圧下量などの幾何学的な関係がある。ロール周速，材料の種類，温度などは(1)(2)に，ロールの変形は(3)に含めて考える。この三因子のうちで，変形抵抗は実測値が少なく，摩擦係数は明確にとらえられない因子である。



第1図　カムプラストメータ概略図

熱間圧延では，多少問題があるが，ロールと圧延材の間が sticking を起こしていると考えてしまえば，不明確な摩擦係数を除くことができるので，(1)(3)の因子だけを考えてもよいものと思われる。ただし，ここでいう sticking とは，ロール面と圧延材が相対的にすべることなく付着するという意味でなく，接触面でのせん断応力が材料のせん断降伏点に達していることを指す。以上の考えに立つと，熱間圧延における圧延荷重は，多くの材料について，ひずみ速度，温度，圧下率の広範囲にわたっての変形抵抗を測定しておけば，ロールと圧延材の幾何学的条件で一義的に定まってしまうことになる。

本研究は，上に述べた考えに基づき，変形抵抗の測定と圧延荷重の測定を行ない，変形抵抗と圧延荷重の関係を求めて，従来の圧延理論式と比較検討するとともに，実用的な熱間圧延荷重計算式を得ることを目的としたものである。

2. 記　　号

本報で使用する記号を一括して次に示す。

変形抵抗関係

σ, ε:　単軸圧縮応力，対数ひずみ　$\varepsilon=\ln\dfrac{h_1}{h}$

$\dot{\varepsilon}$:　ひずみ速度　$\dot{\varepsilon}=\dfrac{1}{h}\dfrac{dh}{dt}$

h_1, h:　試験片最初の高さ，圧縮中の高さ

k_m:　拘束平均変形抵抗

圧延関係

P:　圧延荷重

h_1, h_2:　圧延前後の板厚

b_1, b_2:　圧延前後の板幅

h_m, b_m:　平均板厚，平均板幅　$h_m=\dfrac{h_1+h_2}{2}$,　$b_m=\dfrac{b_1+b_2}{2}$

Δh, r:　圧下量，圧下率　$\Delta h=h_1-h_2$　$r=\dfrac{\Delta h}{h_1}$

R:　ロール半径

R':　扁平を考慮したロール半径　$R'=R\left(1-\dfrac{2cP}{b_m\Delta h}\right)$

c:　ロール材質できまる常数　$c=\dfrac{8(1-\nu^2)}{\pi E}$

E, ν:　ロール材のヤング率，ポアソン比

l_d:　接触投影長さ　$l_d=\sqrt{R'\Delta h}$

p_m:　平均圧延圧力　$p_m=\dfrac{P}{b_m l_d}$

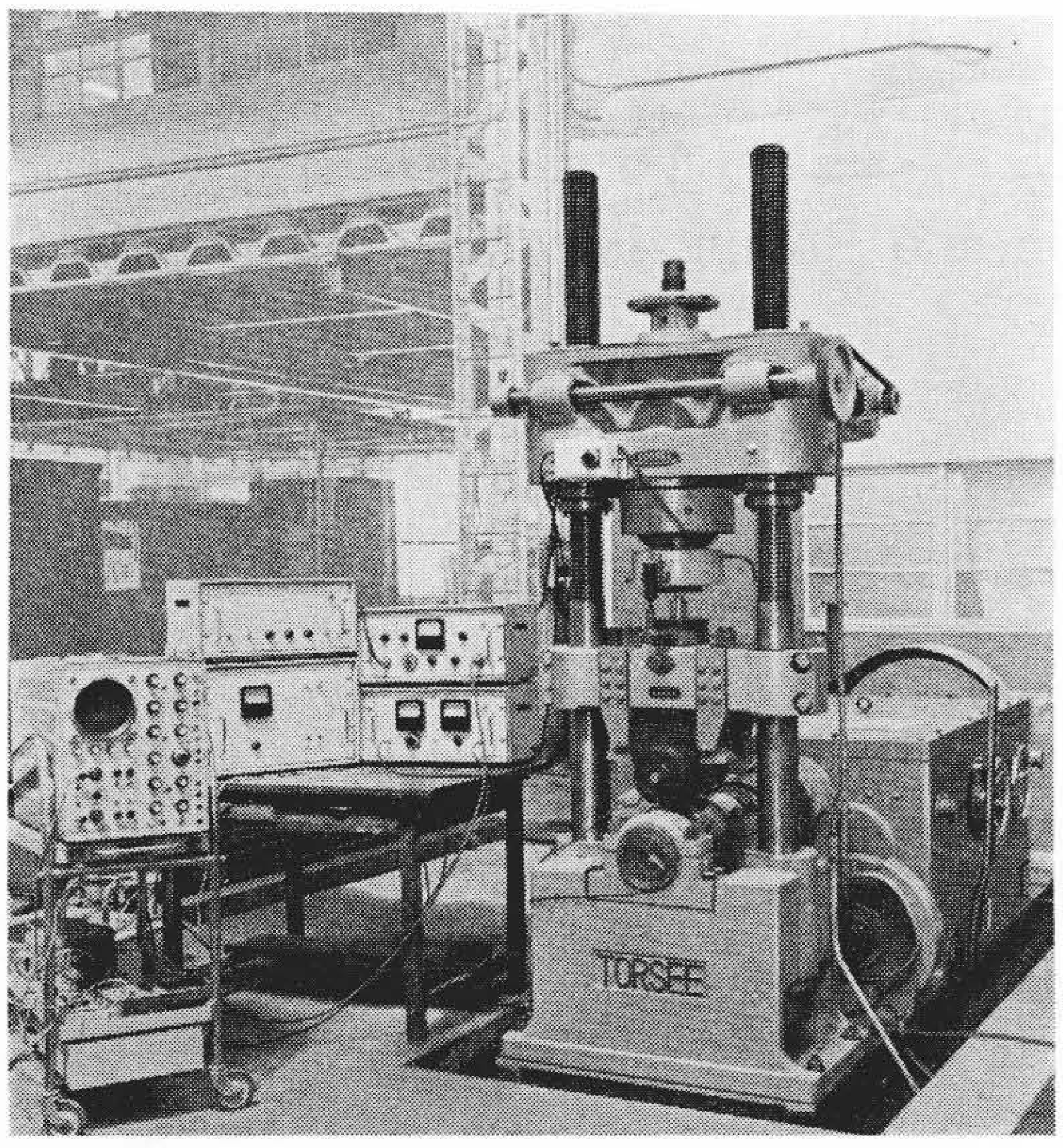
3. 変形抵抗の測定

3.1 測定装置

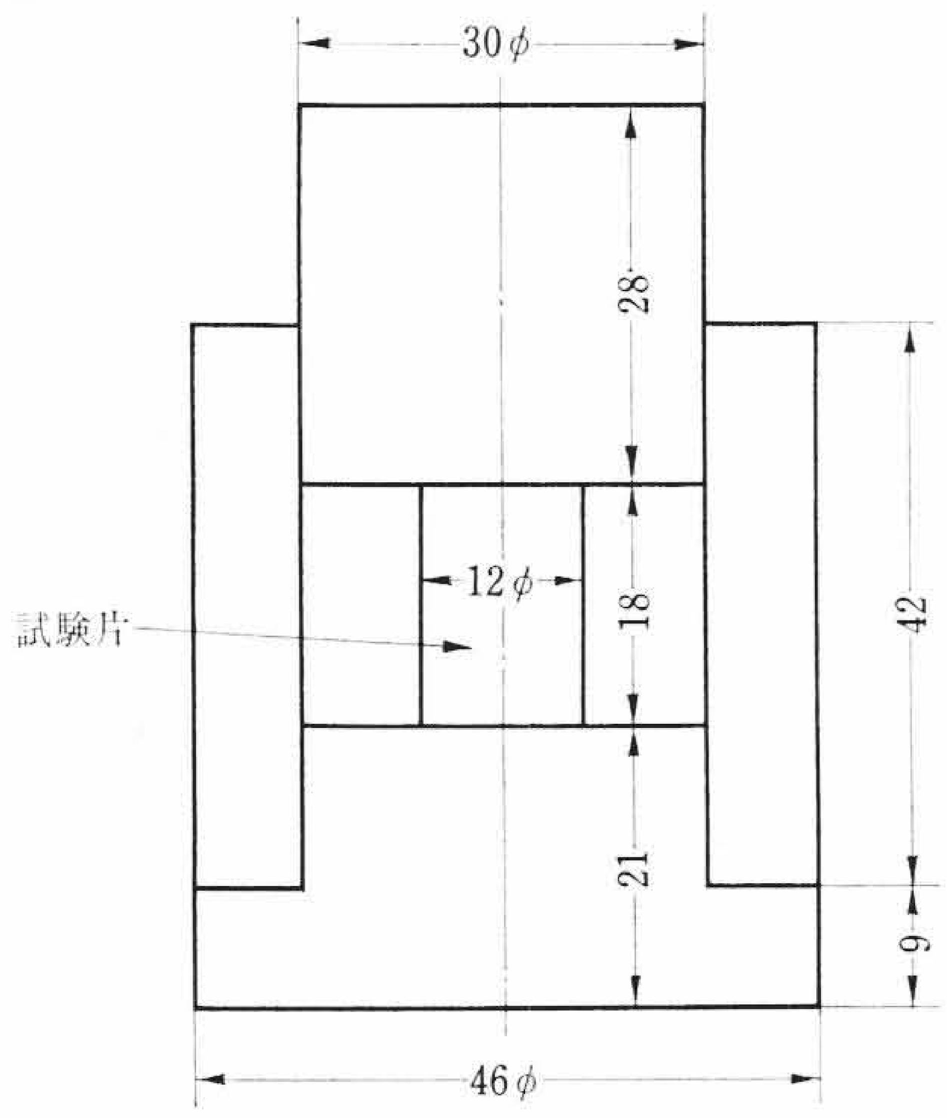
変形抵抗測定には，45 t カムプラストメータを用いた。橋爪氏[(5)]によって詳しく紹介されているように，カムプラストメータは，ひずみ速度一定あるいは変形速度一定の高温圧縮試験を行なう目的で製作された試験機である。本装置の概略図を第1図に，写真を第2図に示す。主要部分は，(1)試験機本体，(2)電気計測装置および記録装置からなり，加熱炉が付属している。仕様は次のとおりである。

最大荷重　45 t
ひずみ速度範囲　0.2～100 s^{-1}

* 日立製作所日立研究所



第2図 カムプラストメータ



第3図 試験片およびサブプレス

圧　縮　量	最大10 mmと20 mmの二種類
カム軸回転数	1.87～900 rpm
電　動　機	カム軸回転用　日立ICモータ　20 HP上クロスヘッド上下用　誘導モータ　1 HP
加　熱　炉	シリコニット電気炉　15 kW
	最高温度　1,500℃
	寸　法　250×250×500 (奥行)

3.1.1 試験機本体

試験片の圧縮は上下クロスヘッド間で行なわれる。下クロスヘッドはボルトをゆるめて上下させることができるが，カムの形で位置がきまり固定する。上クロスヘッドは，支柱の角ねじと誘導モータで回転するウォームギヤとにより上下する。バックラッシュがないように，ロック用のボルトでクロスヘッドを固定してから，微調整ねじで上下クロスヘッド間の間げきを正確に調整する。カムの回転によりプランジャが上下し試験片を圧縮するが，カムはモータからプーリ・減速機・クラッチを経て回転力が伝えられる。対数カムは定ひずみ速度用，直線カムは定変形速度用である。プーリと減速機の間にフライホィールがあって，圧縮中のカムの回転数の変化を避けてある。クラッチはつめクラッチである。

3.1.2 計測装置

測定装置は，荷重測定装置，変位測定装置，タイムマーカおよび電源部からなる。荷重検出には，抵抗線ひずみ計形の荷重計(抵抗1 kΩ)を用い，直流増幅を行なう。荷重計のブリッジに加える直流電圧は，0～60 Vの10段切換になっている。荷重計は50 t，20 tの二種類と，鉛などのやわらかい材料のため，1 t，5 tも用意した。変位測定装置のうち検出部は，静電容量形の変位計である。容量が変わると，LC発振器の周波数が変化するので，これを利用してFM変調する。基準発振周波数は連続的に変えることができるが，実験中は一定とする。この発信部からの送信周波数は高周波用の同軸ケーブルで受信器入力に送りこまれる。

タイムマーカは，時間校正に用いるもので，輝度変調にも利用できる。1～100 kcの4段切換ができるが，単に時間校正だけを行なうときは，簡単のため50，500 cの発振器を用い，さらにひずみ速度の遅い場合には，0.2 sの電接時計を使用する。

変位と荷重の記録には，周波数帯域DC～1 Mc，立ち上がり時間0.4 μsのメモリスコープを用いる。

第1表 供試材の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Pb	Ni	Cr
鉛		0.002					99.97		
炭素鋼	0.10	0.23	0.44	0.11	0.013	0.10			
ステンレス	0.90	0.69	1.22	0.029	0.003			9.10	18.62

第2表 測定条件

	温　度 (℃)	ひずみ速度 (s^{-1})	潤滑剤
鉛	0～40	1～30	植物性油
炭素鋼	800～1,200	0.4～30	粉末ガラス
ステンレス	800～1,200	0.4～30	粉末ガラス

3.1.3 試験片およびサブプレス

試験片は寸法12 φ×18 mmで，加熱の関係から**第3図**に示すようなサブプレスの中に試験片を設置する。高温の実験では，サブプレスのまま加熱し，プランジャ上に置き圧縮する。台上に置くため当然温度は下がるが，試験片に比較してサブプレスのほうが熱容量大のため，試験片には急激な温度降下がすぐには起こらない。1,200℃でも10秒以内なら温度降下を問題にしなくてよい。

3.2 実験方法

3.2.1 供試材

実験に供した材料は，性質の異なった鉛，炭素鋼，ステンレスの三種類で，化学成分は**第1表**に示すとおりである。

鉛は市販の鉛板を一度溶かしてから20 φmmの丸棒に鍛造し，これより15 φ×21 mmの試験片を採取した。鉛の再結晶温度は常温以下であり，鍛造後60日を経過しているが50℃ 1時間(炉冷)の熱処理を行なった。

0.1% 炭素鋼は，120φ×2,500 mmの素材を220 φ×800 mmに鍛造してから910℃ 1(空冷)時間の熱処理を行ない，12 φ×18 mmの試験片に機械加工したものである。

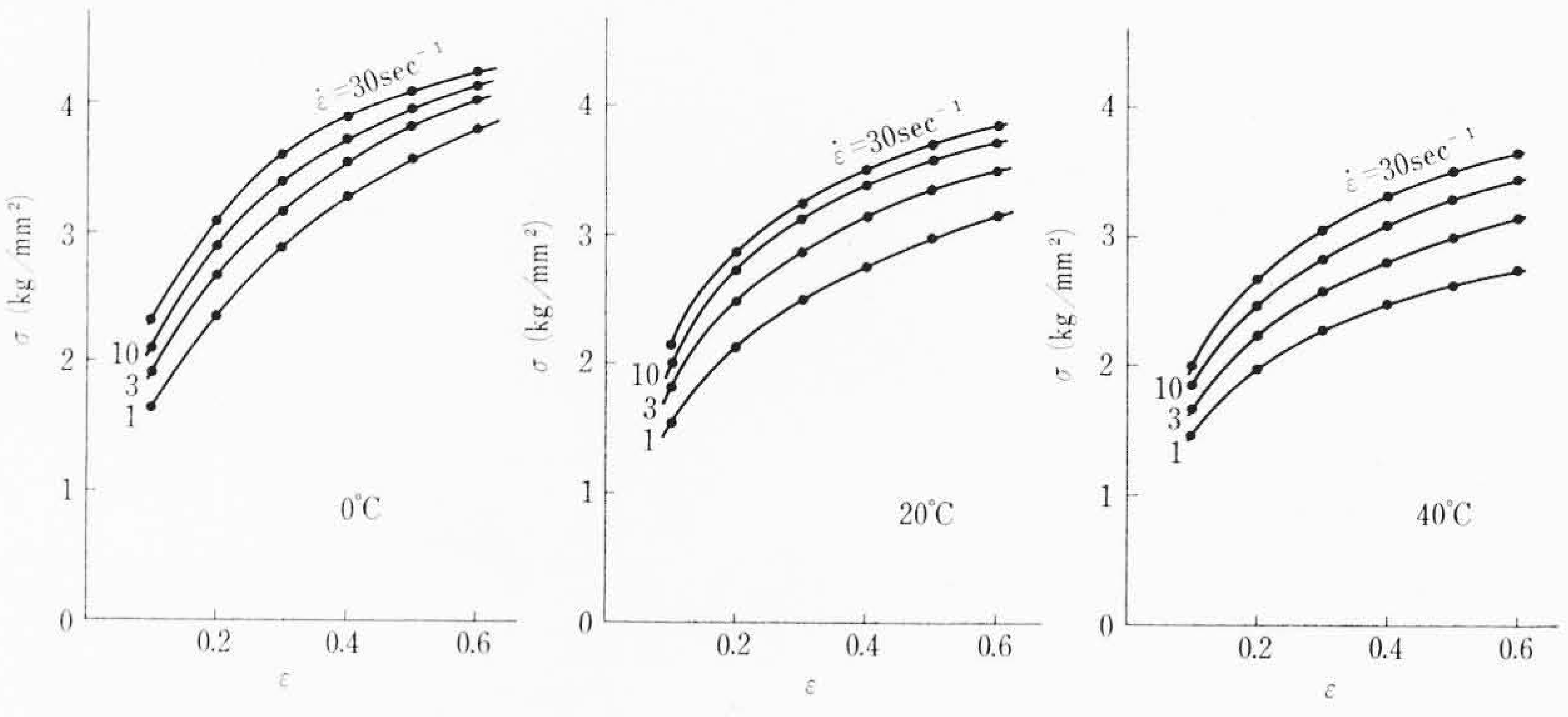
18-8ステンレスは，36 φ×520 mmの素材を15 φmmの丸棒に鍛造してから1,050℃ 1時間(水冷)の熱処理を行ない，12 φ×18 mmの試験片に機械加工したものである。

3.2.2 測定方法

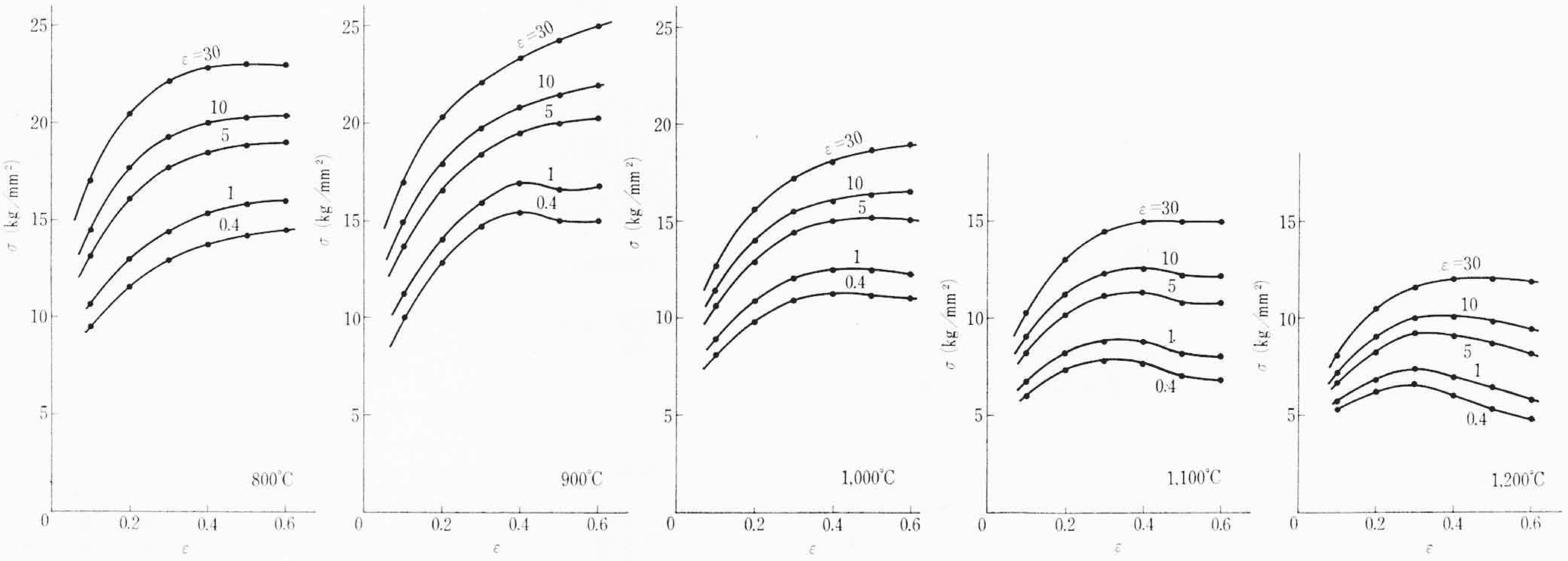
測定条件ならびに潤滑剤を**第2表**にまとめて示す。

3.3 測定結果

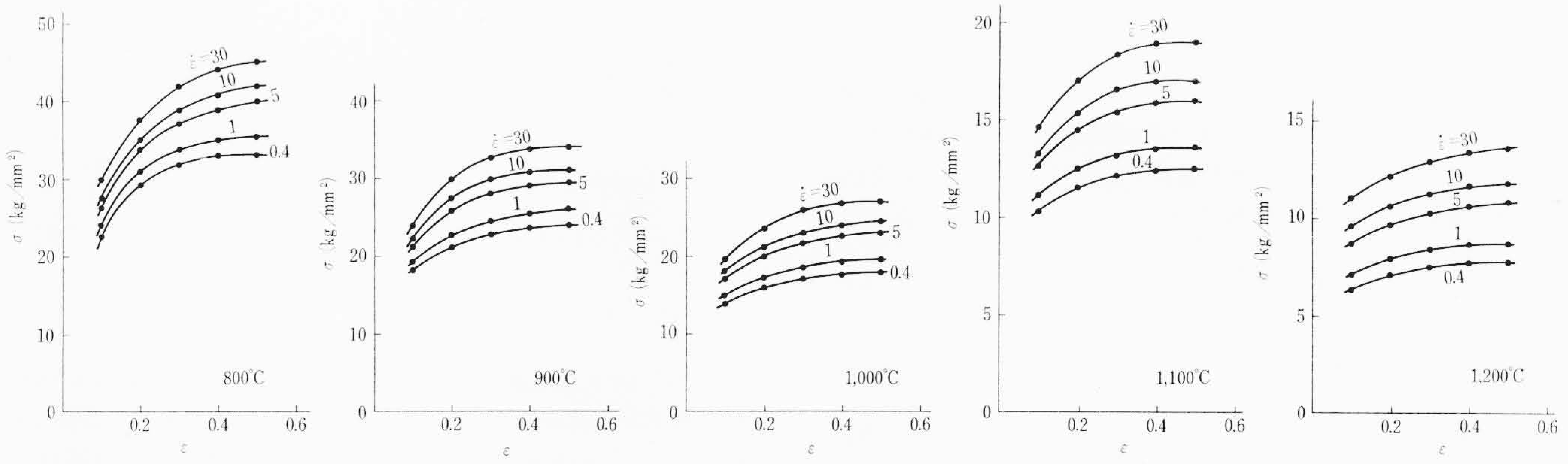
変形抵抗の測定結果を，σ-εの関係で**第4～6図**に示す。鉛，ステンレスは加工硬化性を示すが，炭素鋼の1,100℃，1,200℃あるいは低ひずみ速度では，ひずみの増加とともに応力が減少する部分がある。この現象は，高温ねじり試験では顕著に認められ，再結晶が原因と思われる[(6)]。各材料とも，ひずみ速度が増加すると，応力は増



第4図　応力とひずみとの関係（鉛）



第5図　応力とひずみの関係（炭素鋼）



第6図　応力とひずみの関係（ステンレス）

加する傾向にあって，都合によりグラフを割愛するが，$\ln\sigma$ と $\ln\dot{\varepsilon}$ とは炭素鋼，ステンレスともに直線関係にある。また σ と温度との関係は，鉛とステンレスは単調な減少関数であるが，炭素鋼は 800～900℃ に変曲点が存在する。

4. 圧延荷重の測定

4.1 実　験　方　法

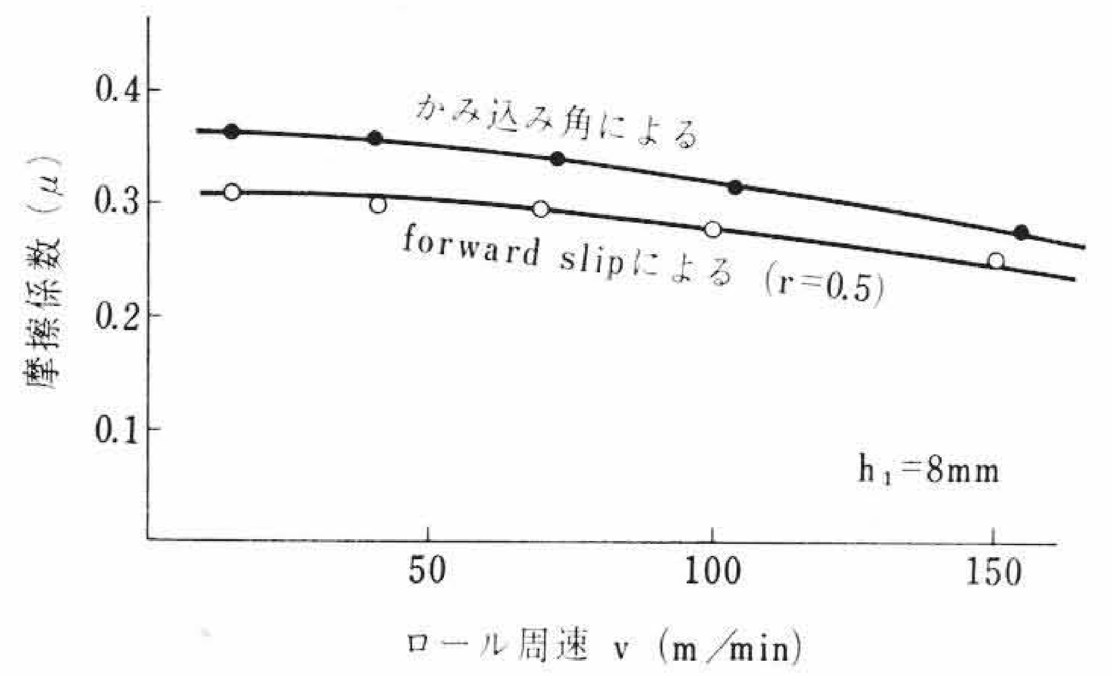
4.1.1 供　試　材

実験には，市販の鉛板を使用した。常温の鉛の圧延は，鋼材の熱間圧延のように，ほぼ sticking 状態と考えられている。常温の実験では，熱間圧延で避けることのできない圧延材の温度降下や酸化膜の厚さなどによる実験誤差がなく，さらに，実験的に明らかにされていない Roll Flattening も考慮する必要がない点で好都合である。

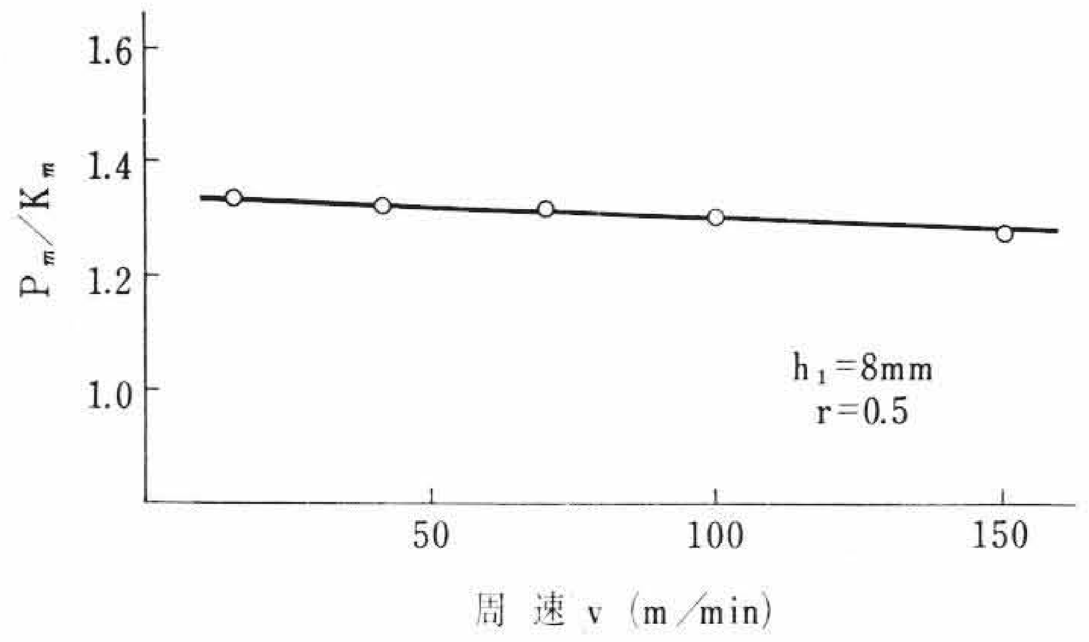
鉛板の化学成分は**第1表**とまったく同じであり，圧延材の寸法は幅 100，長さ 300，厚さ 2～8 mm である。

4.1.2 試　験　方　法

実験に使用した圧延機は，ワークロール径 130 mm，バックアップロール径 300 mm，ロール長さ 300 mm の四段圧延機であるが，鉛の圧延荷重は小さいので，実験に際して，ワークロールとバックアップロールのメタルチョック間にブロックおよびロードセルをそう入し二段圧延機として使用した。また，ワークロール間には，バネがあって，ロールの重量の影響は除いてある。ロール面は，四塩化炭素ならびにアセトンで脱脂して乾燥摩擦状態とした。ロールと圧延材の間の摩擦係数が明らかであれば，sticking 状態かどうか判断できるが，厳密な意味での摩擦係数の測定



第7図　鉛の摩擦係数



第9図　P_m/K_m と周速との関係

は，ほとんど不可能である。ここでは，かみ込み角による方法[7]，Forward Slip による方法[1]で大体の値を検討した。**第7図**はその結果であるが約0.3～0.4と考えられる。

4.2 測定結果

平均圧延圧力 p_m の測定結果を**第8図**に示す。データを，$2.75 \leqq \sqrt{R/h_1} < 3.25$，$3.25 \leqq \sqrt{R/h_1} < 3.75$，$3.75 \leqq \sqrt{R/h_1} < 4.25$，$4.25 \leqq \sqrt{R/h_1} < 4.75$ の四領域に分類し，おのおの $\sqrt{R/h_1} = 3.0, 3.5, 4.0, 4.5$ として整理したものである。明らかに，$\sqrt{R/h_1}$ の大きいものほど，圧下率の大きいものほど p_m が大きい傾向にある。また，p_m は変形速度によっても影響をうけ，ロール周速が大なるほど大きい。しかし，p_m の代わりに p_m/k_m とロール周速との関係をみると，**第9図**に示すように本実験に関する限り変形速度の影響はあまり見られない。ここに k_m は拘束平均変形抵抗であるが，k_m を求める方法はいろいろ考えられ，$r=r_0$ の k_m を求めるには，次の方法がある。

$$k_{m1} = \frac{1.15}{2\sqrt{r_0}} \int_0^{r_0} \frac{\sigma}{\sqrt{r_0 - r}} dr \quad \cdots\cdots (1)$$

$$k_{m2} = \frac{1.15}{r_0} \int_0^{r_0} \sigma\, dr \quad \cdots\cdots (2)$$

$$k_{m3} = \frac{1.15}{r_0} \int_0^{r_0} \sigma\, d\varepsilon \quad \cdots\cdots (3)$$

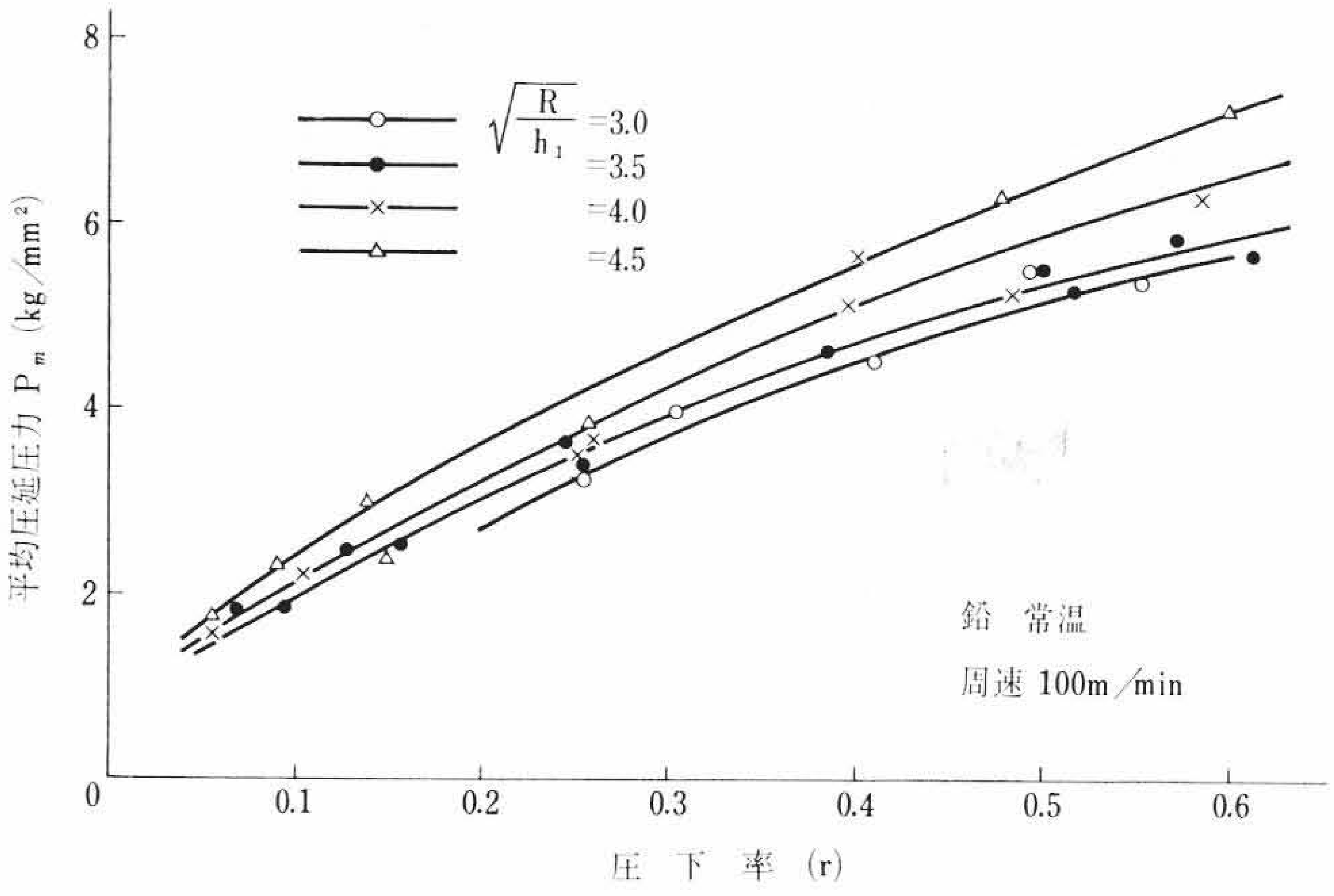
板圧延では，幅方向が拘束されるため，平面ひずみとなり，上式は $2/\sqrt{3}$ 倍してある。$k_{m1} \sim k_{m3}$ は数値的に2～8%の差があり，k_m の定義によって理論式の適否がわずかながら影響をうけることに注意を要する。圧延圧力に対しては，k_{m1} が最も合理的であると言われているが[3]，Orowan の理論を数値的に解いて比較してみた結果では，圧下率の大きい場合に k_{m1} でも十分でなく，さらに，積分が容易でない欠点がある。ここでは，k_{m3} をもって拘束平均変形抵抗 k_m と定義する。(3)式は，$\sigma = a\varepsilon^n$ で表わされる材料に対して $k_m = 1.15\sigma/1+n$ と簡単に求められる。なお，圧延の場合の平均ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_m$ は次式から求められる*。

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{2\pi N}{60\sqrt{r}} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \ln \frac{1}{1-r} \quad \cdots\cdots (4)$$

ここに，N：ロール回転数 (rpm)

4.3 圧延理論式の検討

熱間圧延に適用できる計算式には，Orowan & Pascoe の式，Sims の式，Ekelund の式，Tselikov の式，Geleji の式などいくつかあるが，ここでは紙面の都合上 Orowan & Pascoe の式，Sims の式，Geleji の式をとり上げ実測値と比較する。各計算式は次のとおりである[(1)~(4)]。



第8図　平均圧延圧力測定結果

(1)　Orowan & Pascoe の式

$$\frac{p_m}{k_m} = 0.8 + \frac{n l_d}{2h_2} \quad \cdots\cdots (5)$$

ここに，n：$\dfrac{\Delta h}{2R}$ の関数，$n = 0.4 \sim 0.6$

(2)　Sims の式

$$\frac{p_m}{k_m} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{1-r}{r}} \tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{1-r}{r}}\sqrt{\frac{R'}{h_2}} \ln\frac{h_n}{h_2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1-r}{r}}\sqrt{\frac{R'}{h_2}} \ln\frac{1}{1-r} \quad \cdots\cdots (6)$$

ただし，

$$\ln\frac{h_n}{h_2} = \ln\left[1 + \tan^2\left\{\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{\pi}{8}\sqrt{\frac{h_2}{R'}} \ln\frac{1}{1-r}\right\}\right] \quad \cdots\cdots (7)$$

(3)　Geleji の式

$$\frac{p_m}{k_m} = 1 + C \cdot \mu \cdot \frac{l_d}{h_m} \sqrt[4]{v} \quad \cdots\cdots (8)$$

ここに，C：$\dfrac{l_d}{h_m}$ の関数　　v：ロール周速 (m/s)

以上の三つの式と実測値の比較を**第10図**に示す。三式のうちでは，Sims の式が比較的よく一致している。孔型圧延に対して良好な結果を示した[8] Geleji の式は，鉛には全然あてはまらない。Geleji の式の誤差の原因は，C の値が正しくないためと思われる。Geleji は，p_m の値として O. Emicke の測定結果を，k_m，μ の値として Ekelund の式を用いて，(8)式より逆算で C を求めた。鉛では大幅に差が生じていることは，k_m か μ の値が適切でなかったものと思われる。

---

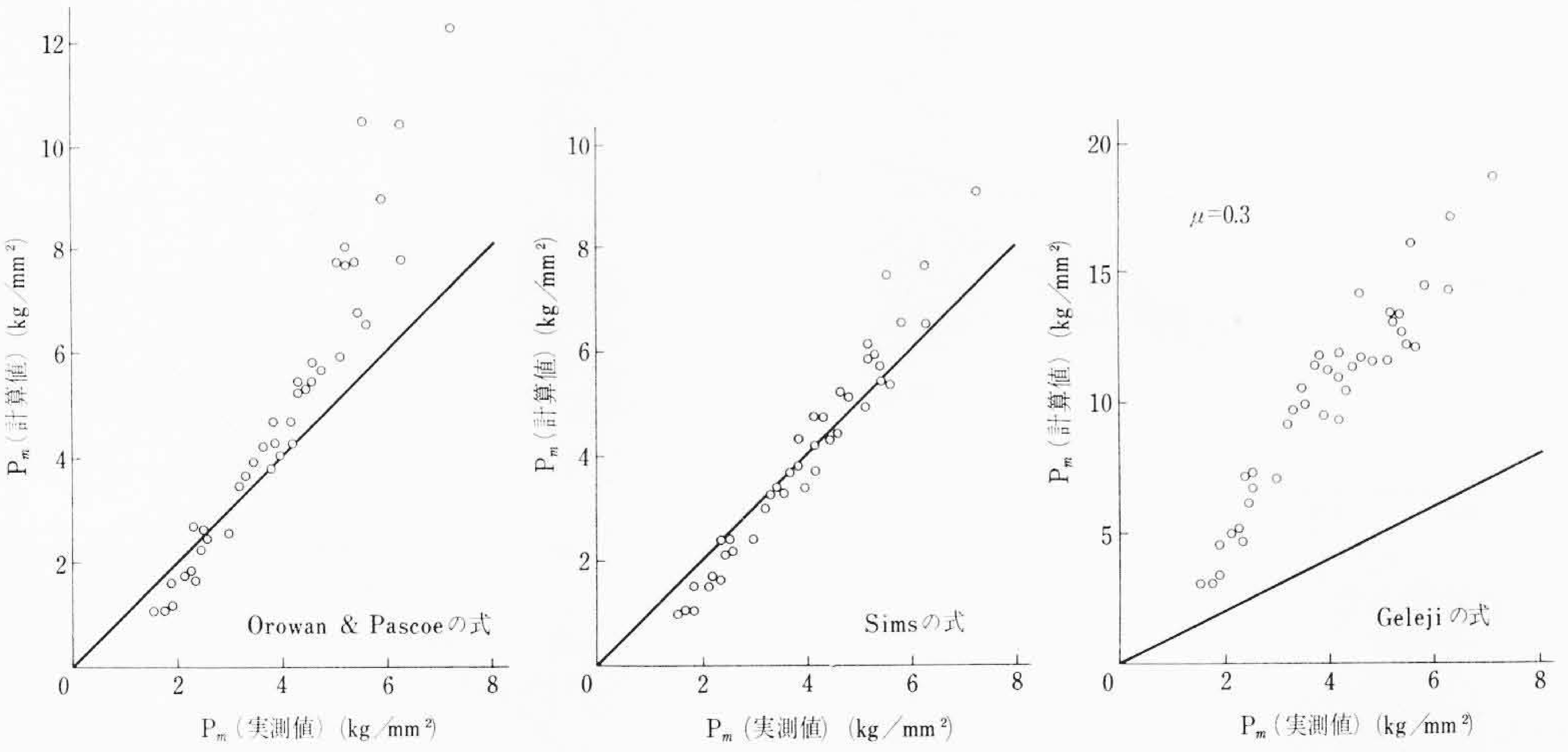
* Roll Flattening を考慮した場合のひずみ速度は，Sims 氏が次式を与えている。

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{2\pi N}{60\sqrt{r}} \sqrt{\frac{R'}{h_1}} \ln\frac{1}{1-r} \quad \cdots\cdots (4a)$$

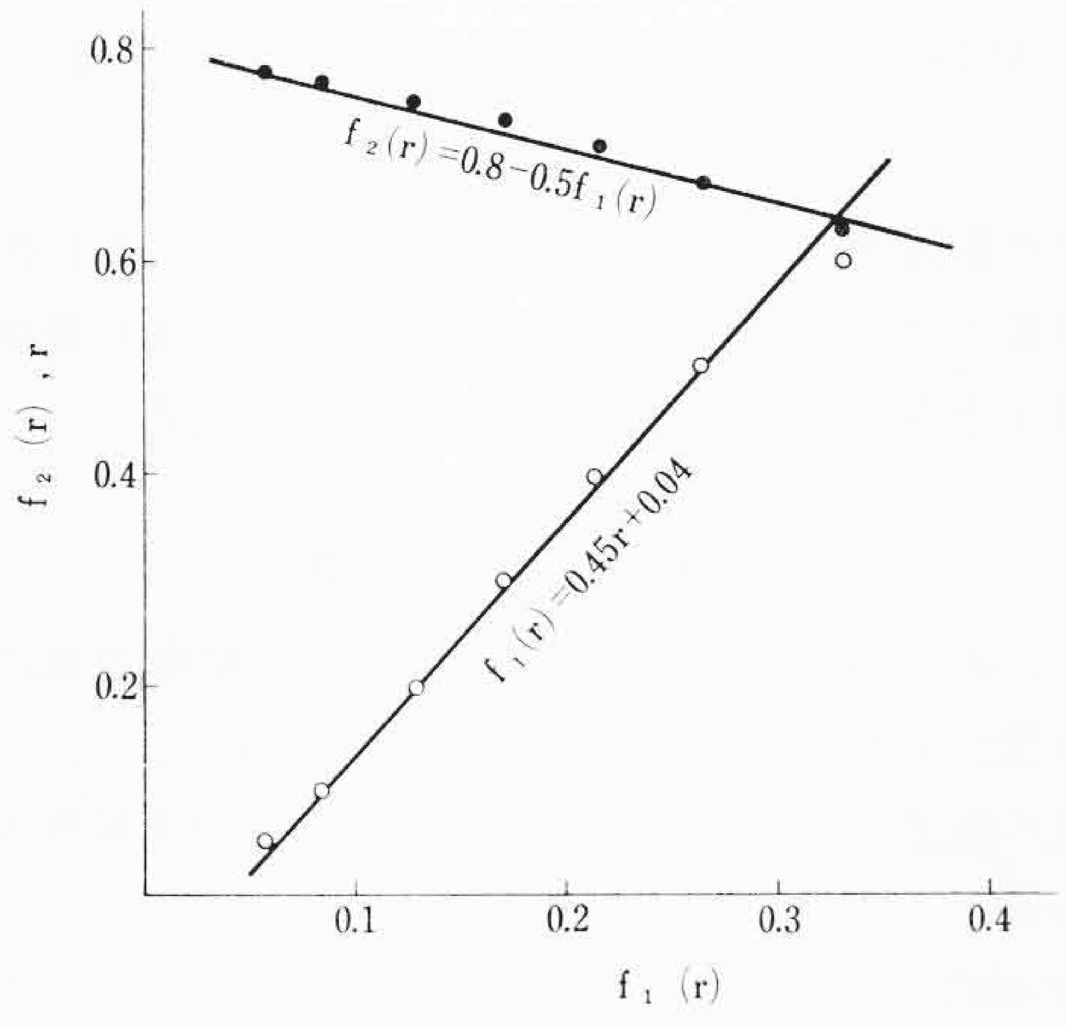
(4a) 式は，$\dot{\varepsilon}_m = \dfrac{1}{\alpha}\displaystyle\int_0^{\alpha} \dot{\varepsilon}\, d\theta = \dfrac{1}{\alpha}\int_0^{\alpha} \dfrac{1}{h}\dfrac{dh}{d\theta}\dfrac{d\theta}{dt} d\theta \cdots\cdots$ (a)

に，$h = h_2 + R'\theta^2 \cdots\cdots$ (b)，$\dfrac{d\theta}{dt} = \dfrac{2\pi N}{60} \cdots\cdots$ (c)

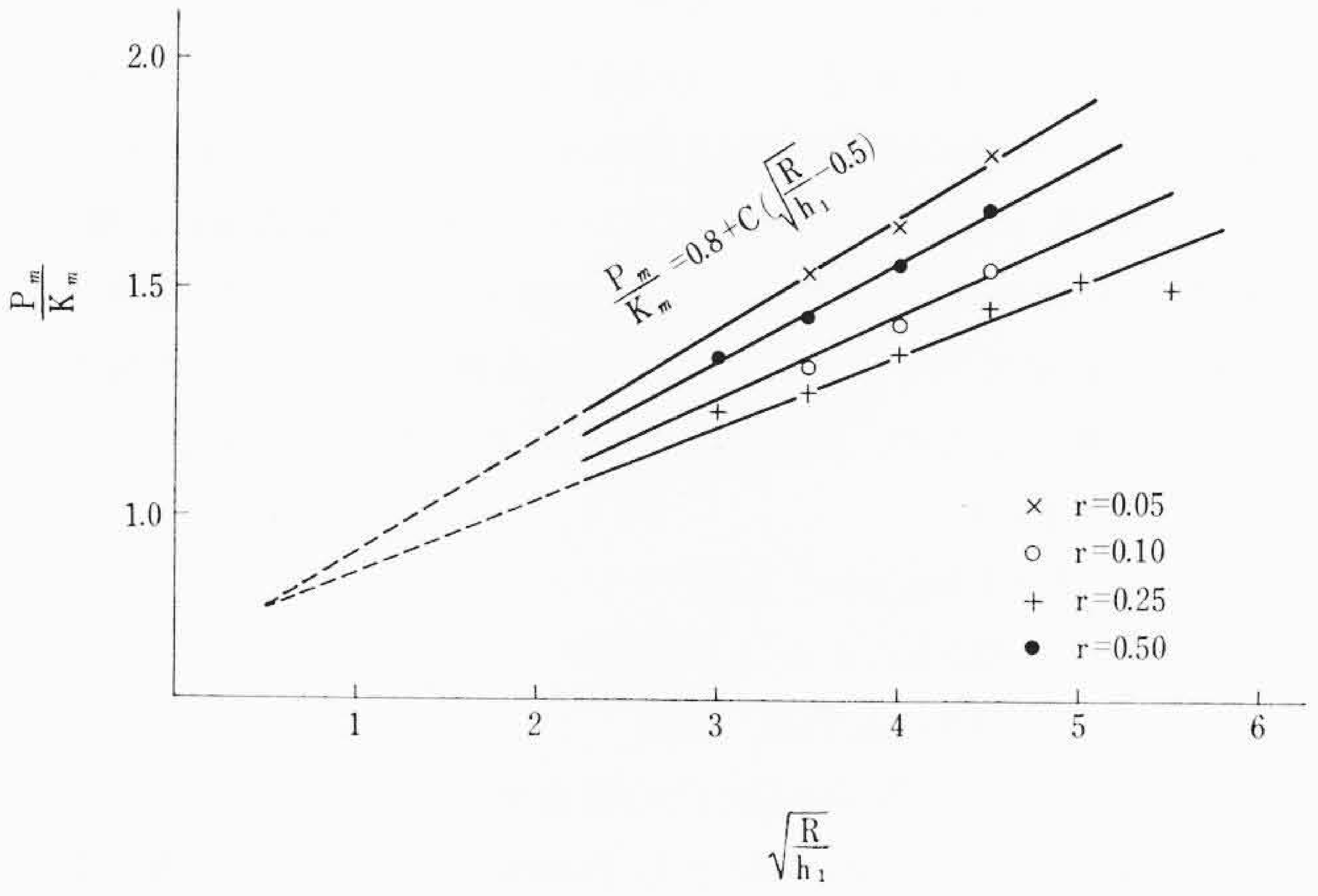
を代入して求めたものであるが，$d\theta/dt$ は (c) 式よりむしろ $2\pi N/60\sqrt{R/R'}$ で近似すべきであるから，Roll Flattening が起こっても平均ひずみ速度は (4) 式でよい。



第10図　実測値と理論式との比較



第11図　$f_1(r)$, $f_2(r)$, r の関係



第12図　$\dfrac{P_m}{K_m}$ と $\sqrt{\dfrac{R}{h_1}}$ との関係

5. 圧延荷重近似計算式

圧延荷重 P は,

$$P=p_m\cdot b_m\cdot l_d \qquad (9)$$

で表わされる。Sticking 状態では, p_m/k_m は単に R', h_1, r の関数として表わすことができるが, この関数形は, Sims の式が示すように一般には複雑で, 比較的簡単な形の Orowan & Pascoe の式, Geleji の式は, 第10図が示すように広い範囲で一致するとは言えない。以下, 広範囲に満足する実用的な近似式の誘導を試みる。

$h_2=(1-r)\,h_1$ であるから, (6)式を次のように変形する。

$$\frac{p_m}{k_m}=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{r}{1-r}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}-\frac{\pi}{4}-\sqrt{\frac{1}{r}}\sqrt{\frac{R'}{h_1}}\ln\frac{h_n}{h_2}+\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{r}}\sqrt{\frac{R'}{h_1}}\ln\frac{1}{1-r} \qquad (10)$$

(7)式から同様に,

$$\ln\frac{h_n}{h_2}=\ln\left[1+\tan^2\left\{\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}-\frac{\pi}{8}\sqrt{\frac{h_1}{R'}}\sqrt{1-r}\ln\frac{1}{1-r}\right\}\right] \qquad (11)$$

(11)式は Taylor 展開によって圧延条件上十分な精度で次式で表わされる。

$$\ln\frac{h_n}{h_2}\simeq\ln\left[1+\tan^2\left\{\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}\right\}\right]-\frac{\pi}{4}\sqrt{1-r}\ln\frac{1}{1-r}\tan\left\{\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}\right\}\sqrt{\frac{h_1}{R'}} \qquad (12)$$

(12)を(10)式に代入すると次式を得る。

$$\frac{p_m}{k_m}=\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{r}}\ln\frac{1}{1-r}-\sqrt{\frac{1}{r}}\ln\left\{1+\tan^2\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}\right)\right\}\right]\sqrt{\frac{R'}{h_1}}+\left[\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{1-r}{r}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}-\frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{1-r}{r}}\ln\frac{1}{1-r}\tan\left\{\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}\right\}\right]$$

$$=f_1(r)\cdot\sqrt{\frac{R'}{h_1}}+f_2(r) \qquad (13)$$

$f_1(r)$ と r および $f_2(r)$ との関係は第11図に示すように次式で近似できる。

$$f_1(r)=0.45r+0.04 \qquad (14)$$

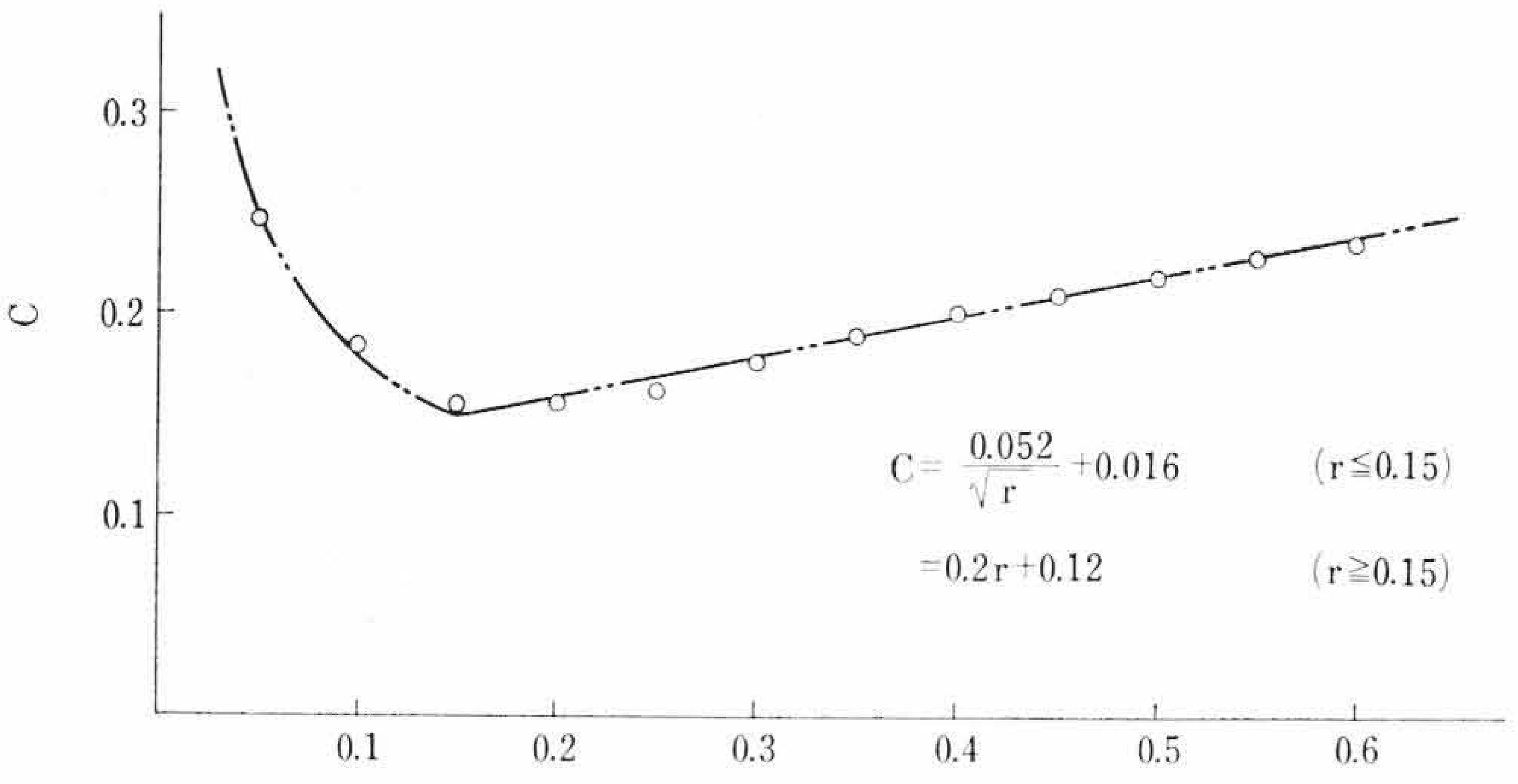
$$f_2(r)=0.8-0.5f_1(r) \qquad (15)$$

(15)式を(13)式に代入すると次のように簡単になる。

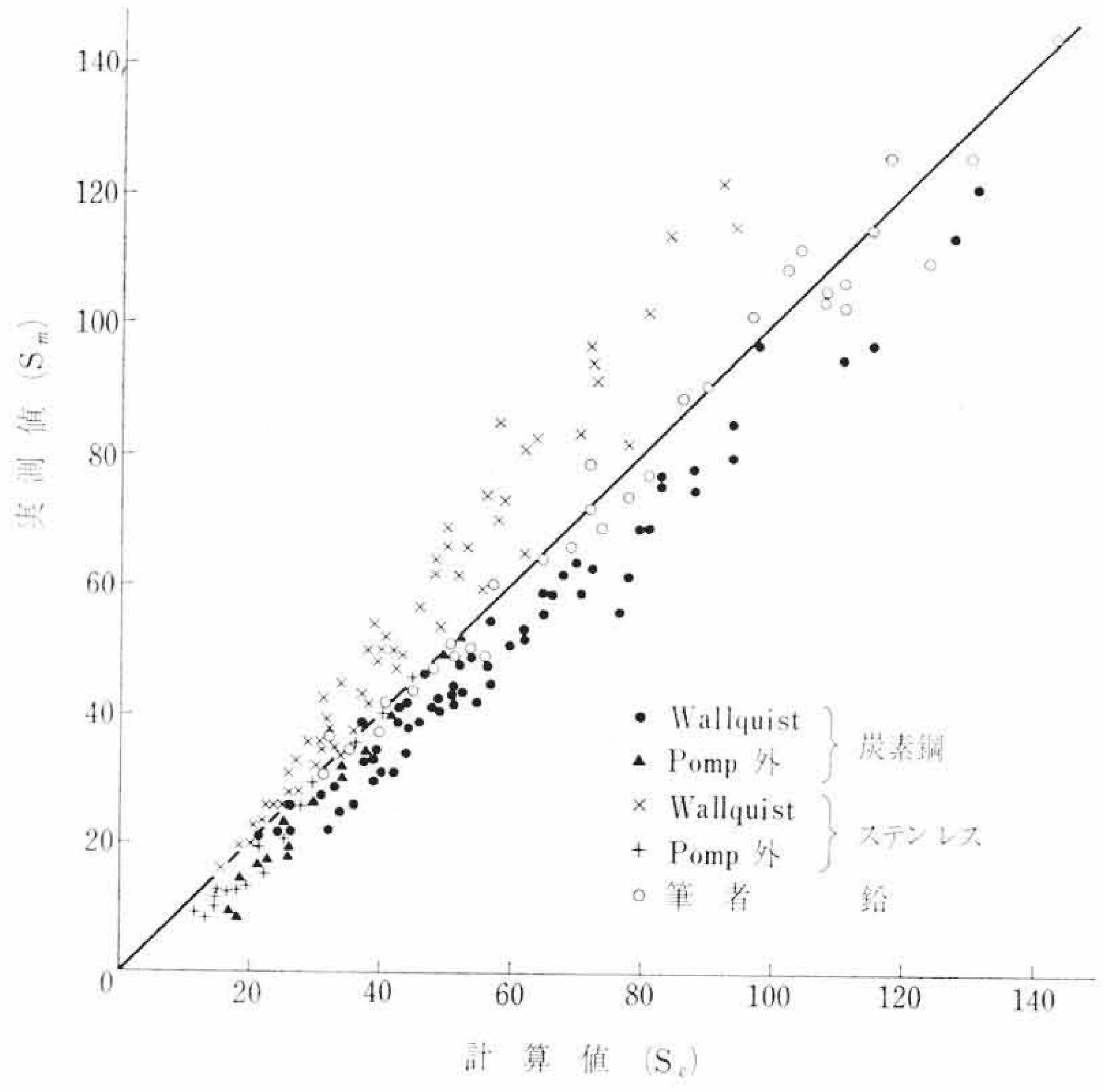
$$\frac{p_m}{k_m}=0.8+C\left(\sqrt{\frac{R'}{h_1}}-0.5\right) \qquad (16)$$

ここに, C は r のみの関数で $C=f_1(r)$ である。

本報では, (3)式で定義された k_m を用いているが, 理論的な拘束平均変形抵抗を得るには, 圧延圧力分布を考慮して, 重みを加味した平均を行なう必要がある。しかし, これは不可能なことであって, k_m はそのまま(3)式を用い, その代わり C の値として $f_1(r)$ をそのまま採用せずに, 実測値による補正をする。第12図は p_m/k_m と $\sqrt{R/h_1}$ との関係を実験的に求めたもので, この直線の傾斜から C を決定したのが第13図である。以上の結果から, 圧延荷重の近似計算式は次式で表わされる。



第13図　C の値



第14図　近似計算式と実測値の比第

$$\frac{p_m}{k_m}=0.8+C\left(\sqrt{\frac{R'}{h_1}}-0.5\right) \quad \cdots\cdots(17)$$

$$C=\frac{0.052}{\sqrt{r}}+0.016 \quad (r\leqq 0.15)$$

$$=0.2r+0.12 \quad (r\geqq 0.15) \quad \cdots\cdots(18)$$

(17)式と実測値の比較を**第14図**に示す。鉛のほかに変形抵抗を測定した0.1%炭素鋼，18-8ステンレスの圧延実験結果が，Wallquist氏とPomp & Lueg氏によって発表されているので，参考までに同図にあわせてプロットした。鉛，炭素鋼，ステンレスの変形抵抗は大幅に異なるため，p_mの代わりに次式のSで整理した。

$$S=p_m/k \quad \cdots\cdots(19)$$

ただし，　$k=1$ kg/mm^2（ステンレス）
$=0.5$ kg/mm^2（炭素鋼）
$=0.05$ kg/mm^2（鉛）

Roll Flatteningは，Wallquist氏の場合チルド鋳鉄ロールを用いているので$E=1.1\times10^4$ kg/mm^{2}とし Pomp氏らの場合は，合金鋳物ロールというだけで明らかではないので，一応$E=2.1\times10^4$ kg/mm^{2}として求めた。しかし，実際に起こっているRoll Flatteningは正確にわからない。チルド鋳鉄ロールの場合，高温の炭素鋼圧延のように，面圧が比較的低ければ，白鋳鉄の部分の変形が大部分を占め，Eを鋳鉄より大きな1.8×10^4 kg/mm^{2}くらいにとるほうがよいと考えられるが，一方，ステンレスのように，面圧が100 kg/mm^{2}にも及ぶと，鋳鉄は比例限が低く非直線的な応力ひずみ曲線を示すから，$E=1.1\times10^4$ kg/mm^{2}で計算すると接触投影長さを小さく見積ることになり，実測圧延圧力が高く評価されるものと思われる。**第14図**でステンレスの実測値が高いのは，変形抵抗測定に用いた材料とWall Quistの圧延材との化学成分の違いや，圧延材の弾性復元などいろいろ考えられるが，Foll Rlatteningも原因の一つではないかと思われる。Floll Ratteningの研究は，あまり行なわれていないが，ステンレスの圧延で圧下量の小さい場合などはR'/Rが2.0以上にもなるので，圧延荷重の計算上是非明らかにしなければならない問題であろう。

以上のように，データの整理上で検討を要する問題がまだ残されているが，非常に簡単な圧延近似式(17)式が，鉛，炭素鋼，ステンレスなどのまったく異なった材料に対しても，また温度，圧下率，ひずみ速度の広範囲にわたってほぼ満足できることがわかった。ただし，本報告では，分塊圧延のようにR'/h_1の小さい範囲をデータ不足で検討できなかった。今後検討したいと考える。

6. 結　　言

（1）鉛，0.1%炭素鋼，18-8ステンレスの変形抵抗に及ぼす変形量，変形速度，温度の影響を明らかにした。

（2）鉛の圧延荷重を測定し，代表的な三つの圧延理論式と比較検討した。

（3）実用的な圧延荷重の近似計算式を導いた。この計算式と鉛，炭素鋼，ステンレスの圧延荷重実測値と比較したところ，ほぼ満足できる結果が得られた。今後，変形抵抗のデータを増し，さらに広範囲な検討を加える予定である。

終わりに臨み，変形抵抗の測定に関して有益なご助言をいただいた東京大学生産技術研究所鈴木弘教授，日立製作所横浜工場橋爪主任(前生産技術研究所)に感謝の意を表わすとともに，終始ご指導いただいた日立工場原口部長，日立研究所大内田研究室長，楠本主任研究員にお礼申し上げる。

参　考　文　献

（1）L. R. Underwood: The rolling of Metals, (1952 Chapmann & Hall)
（2）A. Geleji: Die Berechnung der Kräfte und des Arbeitsbedarfs bei der Formgebung in bildsamen Zustande der Metalle, (1955 Akadémie Kiadó, Budapest)
（3）鈴木: 機械の研究 10～11 (1958～59) 連載
（4）鉄鋼技術共同研究会: 圧延理論と変形抵抗 (昭35 誠文堂新光社)
（5）橋爪: 塑性と加工 1, 5 (1960)
（6）鈴木, 矢吹, 志田: 塑性と加工 5, 581 (1964)
（7）志田: 第13回塑性加工連合講演会前刷集 25 (1962-11)
（8）A. Geleji: Arch. Eisenh. 31, 571 (1960)