

形鋼圧延における圧延荷重および圧延動力

Investigation of Rolling Force and Power in Structural Rolling

中 島 英 男* 戸 田 進* 加 藤 孝 之**
Hideo Nakajima Susumu Toda Takayuki Katô
小 田 切 逸 郎** 清 水 信**
Itsurô Odagiri Makoto Shimizu

内 容 梗 概

熱間圧延，特に形鋼の圧延動力の計算式を求める目的で，トピー工業株式会社その他の圧延工場において圧延動力，荷重の共同研究を行ない実験式を導くことができた。本計算式は， $\angle 90 \sim \angle 200$ の等辺，不等辺山形鋼およびボックス圧延の計算において，かなりの精度で適用できる。なおひきつづき，本計算式の適用範囲を拡大した場合の精度について検討中である。

1. 緒 言

鋼材圧延時の荷重，動力をは握することは，圧延スケジュール，モータ選定，圧延機およびロールの設計上非常に重要なことである。もとよりこれらはある仮定のもとで計算することは可能であり，熱間圧延動力の計算式として，Orowan, Siebel, Trinks, Tselikov, Sims, Ekelund, Geleji 氏など多数の研究者によって発表されている。しかしこれらの式は，理論式，実験式をとわずほとんどが長方形断面の圧延材についてたてられたものであり，この式を各種の形鋼に適用することは困難であった。

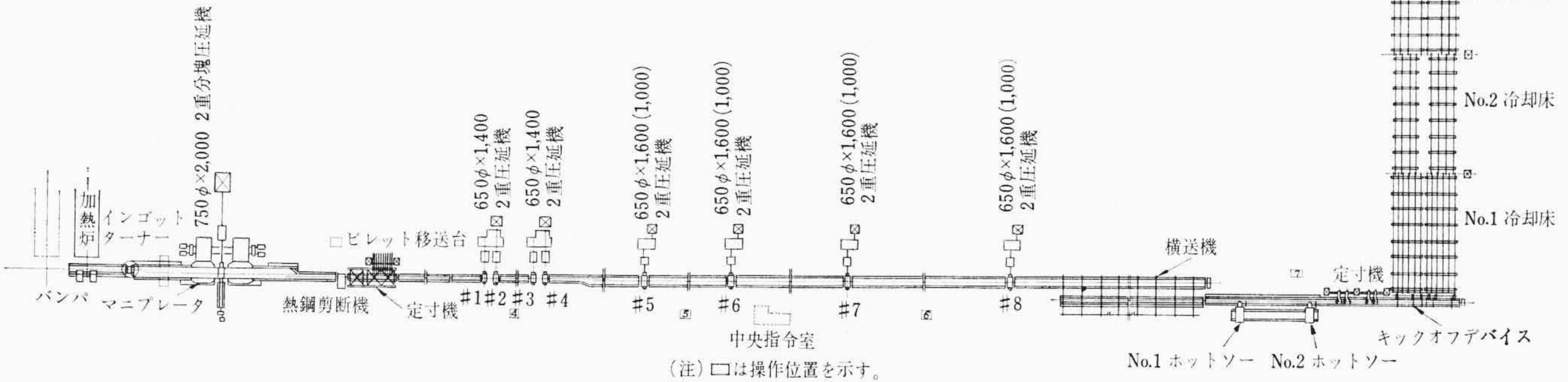
今回，トピー工業株式会社豊橋製造所，日立製作所の共同研究によって，形鋼の圧延動力および圧延荷重の測定を行ない実験式を導くことができた。本計算式は，次元解析類似の方法により求めた A. Geleji の理論式を検討し，これを修正，さらに一般性を持たせた変形抵抗の式を基に，今回の測定値を統計的にまとめたものである。

本計算式は， $\angle 90 \sim \angle 200$ の等辺，不等辺山形鋼およびボックス圧延において誤差が 20% 以下であることを確認した。なお引きつづき，みぞ形鋼，I 形鋼，H 形鋼について実験を行ない，適用条件を検討中である。

2. 概 要

測定は前に日立製作所が納めたトピー工業株式会社豊橋製造所の大中形圧延設備(第1図)連続造形8スタンドについて行なわれたもので，その要項は次のとおりである。

- 2.1 測定項目
- 圧 延 動 力
 - 圧 延 荷 重



第1図 トピー工業株式会社(豊橋)大中形圧延設備配置図

- 圧 延 材 温 度
ロ ー ル 回 転 数
- 2.2 測定品種
- $\square 200 \times 90$, $\angle 150 \times 90$
 - $\angle 150 \times 90$, $\angle 150 \times 100$
 - $\angle 90 \times 90$

第2図(a)~(c)に代表的な品種の圧延過程を示す。

2.3 測定方法および測定器

2.3.1 動力測定

ペン書きの記録動力計を 240 mm/min の速度で使用し，過渡現象をみるために電流値を電磁オシロで記録した。

2.3.2 圧延荷重測定

抵抗線ひずみゲージを利用したロードセルを上ロールの左右の軸受箱上に取り付けて測定した。

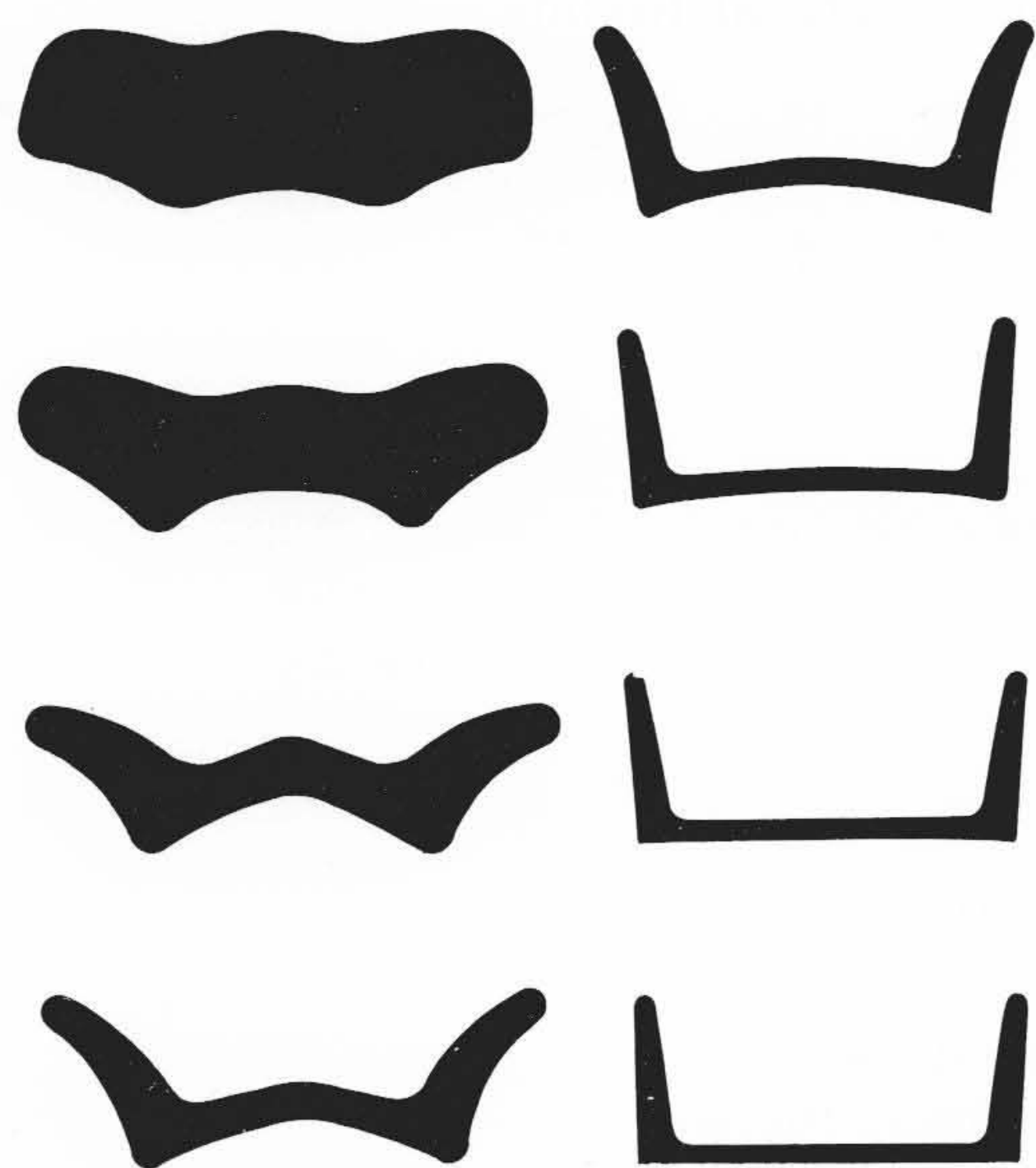
2.3.3 温度測定

圧延材の温度測定は光高温計を主体にしたが，測定者の個人差，鋼材表面のスケールの生成など誤差要因が多いので，精度を高める意図で光電管式高温計も併用した。

2.3.4 ロール回転数

主電動機に同期電動機を使用しているので，速度変動がほとんどないことを直読式回転計によって確認するのみにとどめた。

* トピー工業株式会社豊橋製造所
** 日立製作所日立工場



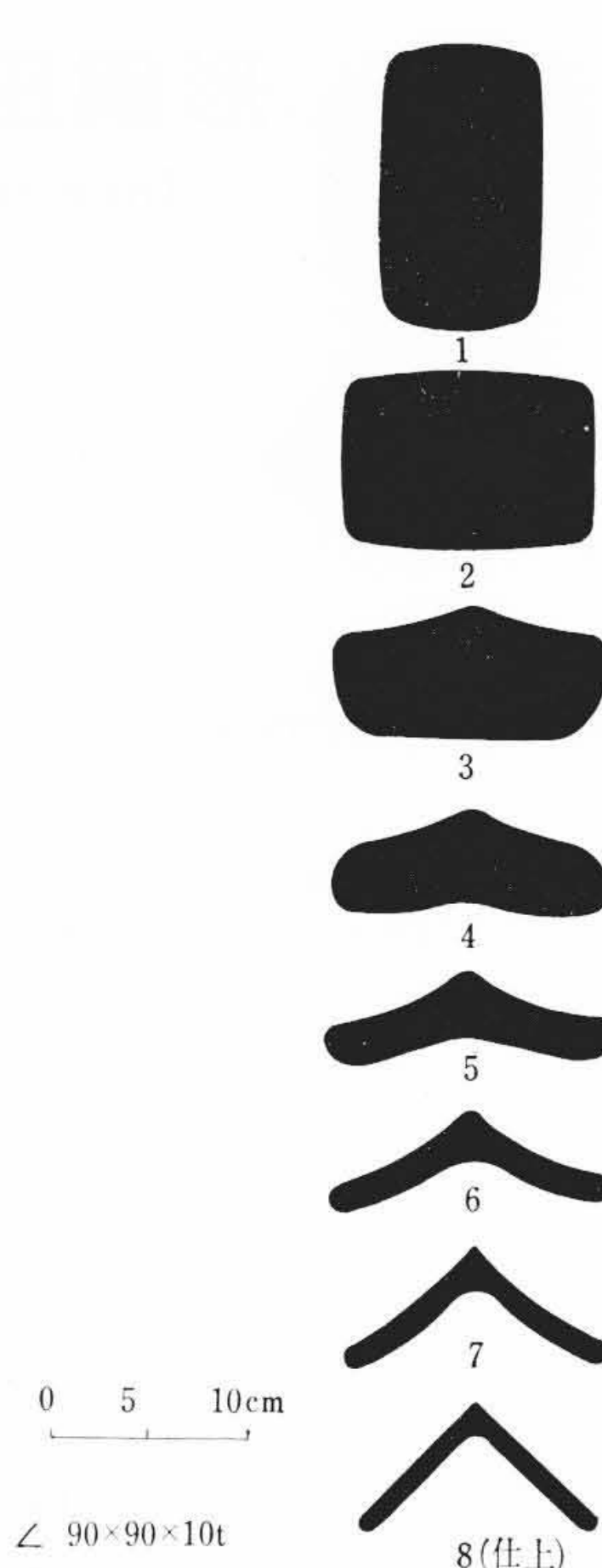
200×90×8t

第2図(a) 各スタンドにおける
圧延材の形状 (スタンプ)



150×90×9t

第2図(b) 各スタンドにおける
圧延材の形状 (スタンプ)

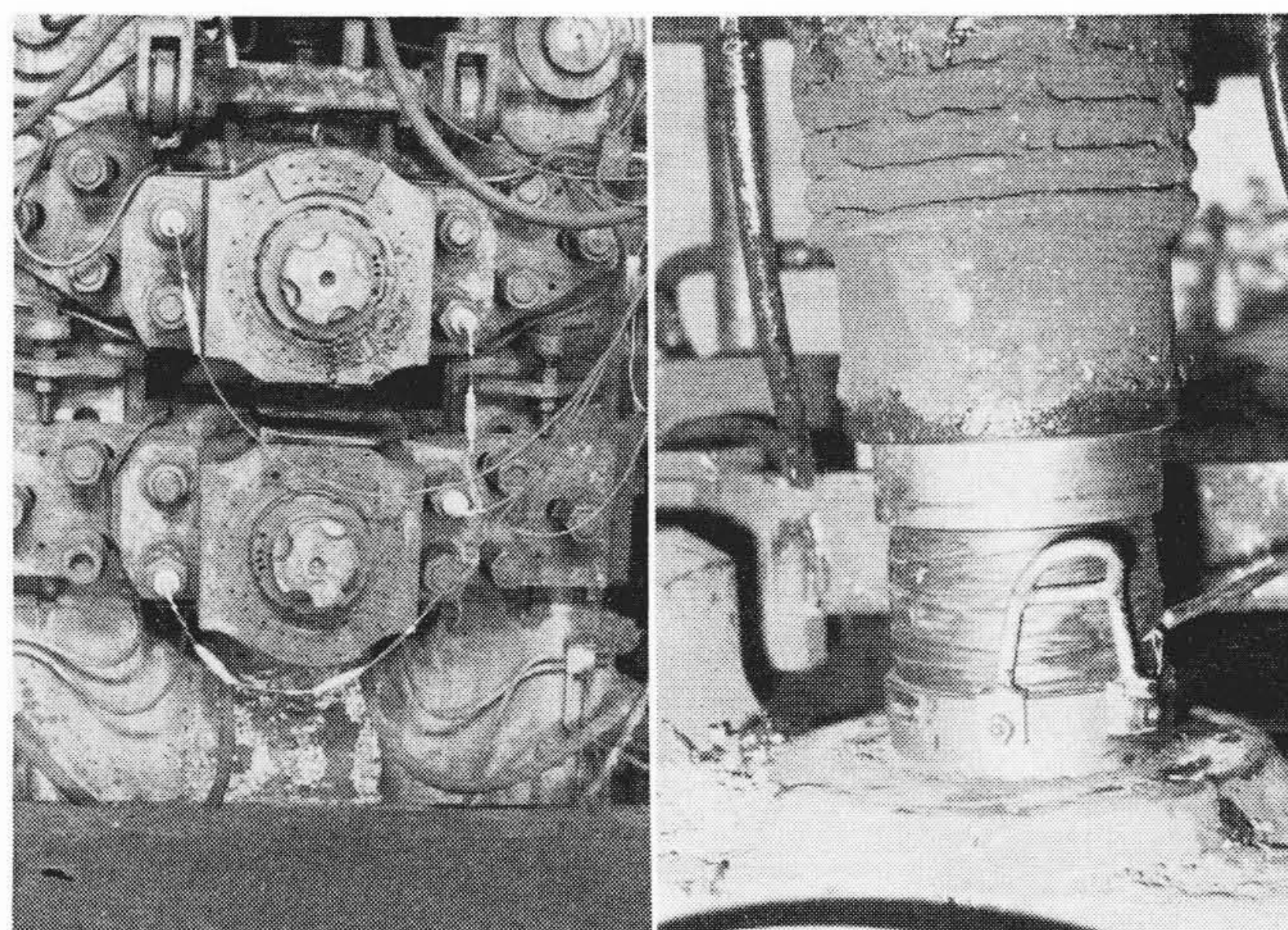


0 5 10cm

90×90×10t

8(仕上)

第2図(c) 各スタンドにおける
圧延材の形状 (スタンプ)



第3図 測定状況

2.3.5 その他の測定

□200×90 圧延 No. 2 スタンドのみ上下スピンドルのトルクおよびロール軸方向スラストを測定した。前者は上下スピンドルのトルク配分, かみ込時の過渡現象を調べるため, 後者は設計資料の目的で行なったもので本文には直接関係がないので割愛する。第3図に測定状況を示す。

3. 測定結果

第1表に前述5品種の測定結果を示す。

4. 変形抵抗に関する考察

4.1 変形抵抗の考察

材料の変形抵抗を明確にするには塑性変形の理論よりすべきであるが, いまだこれを明確にすることのできる段階にいたっていない。したがってこれらを究明する目的で各種の工学的研究が行なわれている。工学的研究によれば鉄鋼は粘弾性体でありその変形抵抗は成

第1表 トピー工業大中形測定結果

品 種	スタンド No.	圧延荷重 (t)	圧延動力 (kW)	圧延温度 (℃)
L200×90×8 t	1	142	1,865	1,150
	2	206		1,150
	3	234	2,580	1,110
	4	205		1,110
	5	231	1,835	1,050
	6	248	1,490	1,010
	7	138	942	975
	8	136	768	930
L150×90×12 t	5	119	1,015	1,070
	6	89	720	1,040
	7	86	456	1,000
L150×90×9 t	1	182	991	1,120
	2	69		1,120
	4	114		1,090
	7	94	660	1,000
	8	71	480	950
L150×100×9 t	5	137		1,070
	6	121		1,040
	7	70		1,000
	8	106		950
L90×90×10 t	1	79	496	1,120
	2	45		1,120
	3	67	1,200	1,110
	4	150		1,110
	5	135	1,260	1,095
	6	128	1,320	1,075
	7	82	588	1,055
	8	83	625	1,030

(注) 圧延材の組成

SS41

C: 0.1~0.15(%)

Si: 0.25

Mn: 0.4~0.5

P: 0.05 以下

S: 0.05 以下

Sn, Cu 若干

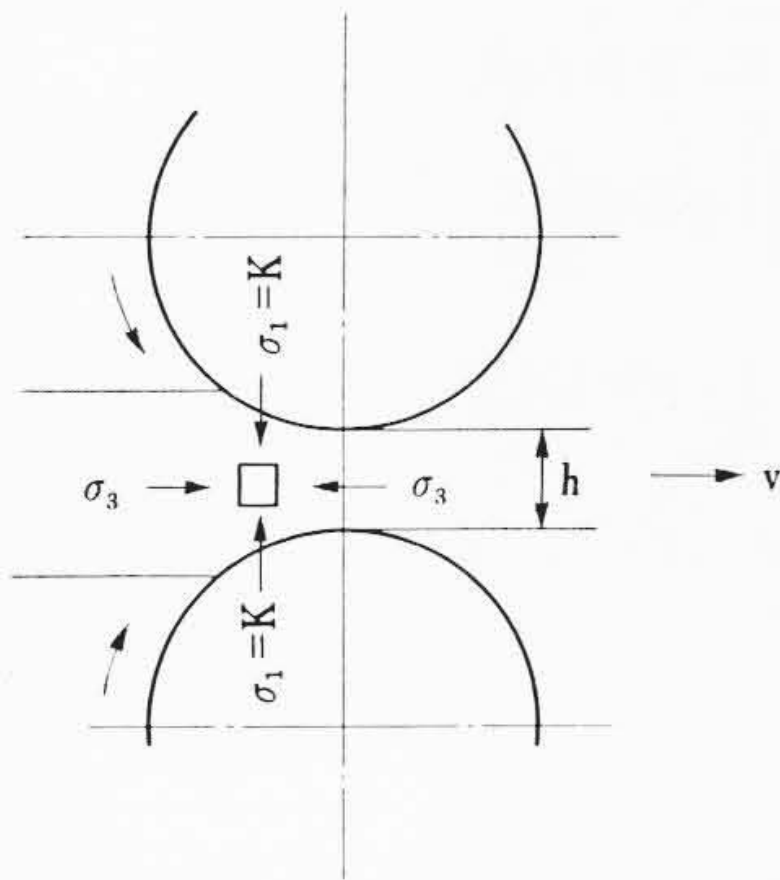
分が決まっている場合は次式によって表わされる。

$$s=f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, t) \dots\dots\dots (1)$$

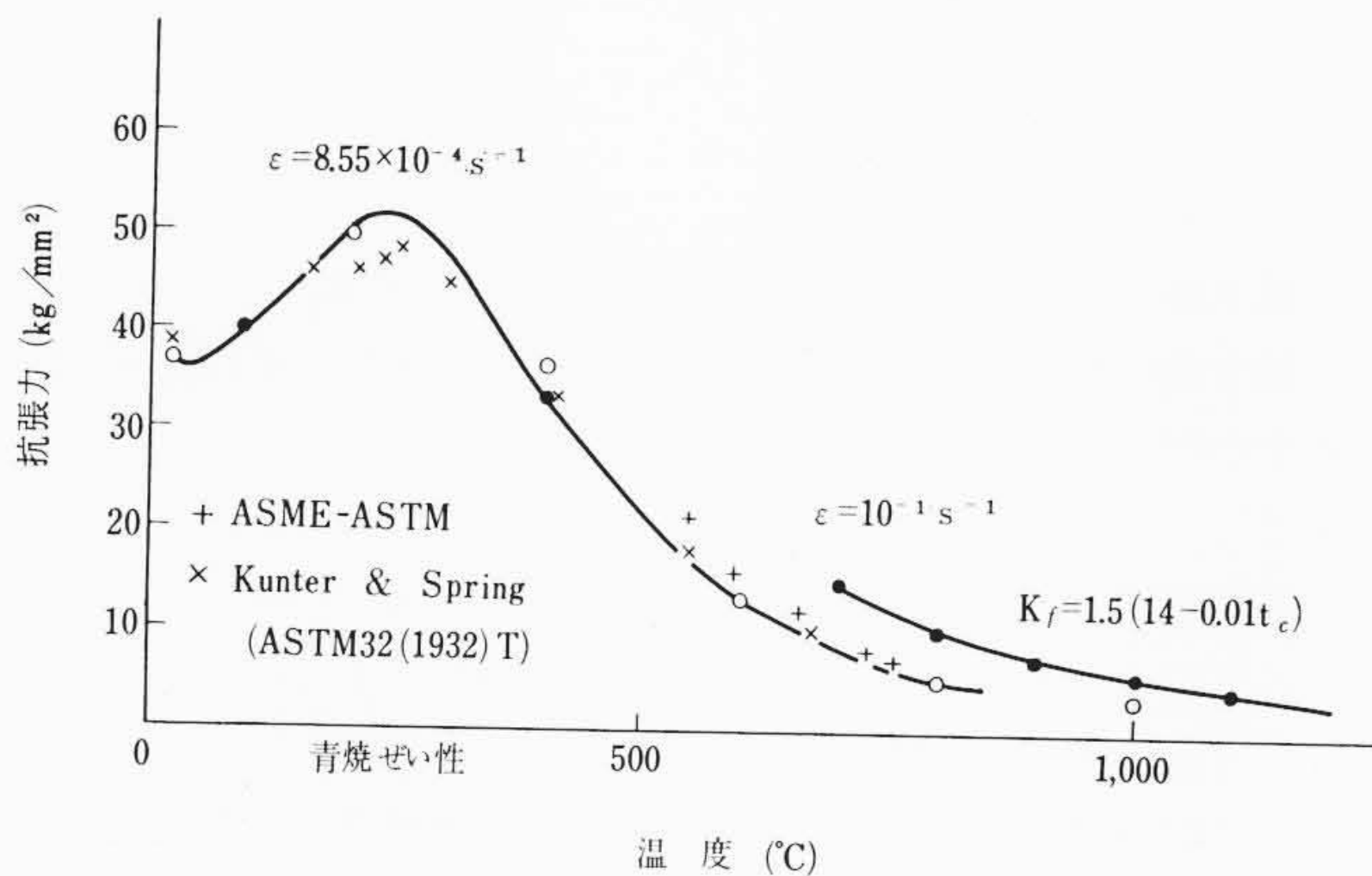
ただし, s: 変 形 抵 抗

ε : ひ ず み

$\dot{\varepsilon}$: ひ ず み 速 度



第4図 圧延の際の応力平衡



第5図 低炭素鋼の各温度と抗張力

T : 温度

t : 変形時間

変形時間は材料の緩和および再結晶軟化現象に影響するものであるが、これを無視すれば

$$s = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (2)$$

となる。この関数の決定については、多くの研究者によって研究されており、ひずみ速度、ひずみ、温度の影響を考慮していくつかの式が発表されている。井上⁽¹⁾⁽²⁾氏は、

$$s = K \cdot \varepsilon^m \cdot \dot{\varepsilon}^n \cdot e^{A/T_K} \quad (3)$$

であらわされるとした。ただし T_K は材料の絶対温度、 K, m, n, A は材質および変形条件によって決まる係数である。池島⁽¹⁾氏も同様に次式を提出しているが、加工硬化の表示が異なっている。

$$s = K \cdot e^{A/T_K} \cdot \dot{\varepsilon}^n (1 + C \varepsilon^m) \quad (4)$$

K, A, n, C, m は常数、 n は温度により多少変化するといわれている。現在のところ塑性変形の機構が定量的に明らかにされていないので、 $s = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ の関数形を明らかにすることは困難で、ただ実験によってその形を推定している。

4.2 A. Geleji の⁽³⁾平均変形抵抗

次に今回の実験式の母体となった A. Geleji の式について述べる。

A. Geleji 氏は平均変形抵抗について次式を導いた。

$$K_m = K_f \left(1 + 5.5 \mu \frac{l_d}{h} \sqrt[3]{v} \right) \quad [\text{kg/mm}^2] \quad (5)$$

$$K_f = 0.015(1,400 - \theta) \quad [\text{kg/mm}^2]$$

$$\mu = 0.841 - 0.0004\theta$$

ここで、 K_m : 平均変形抵抗

K_f : 熱間変形強さ

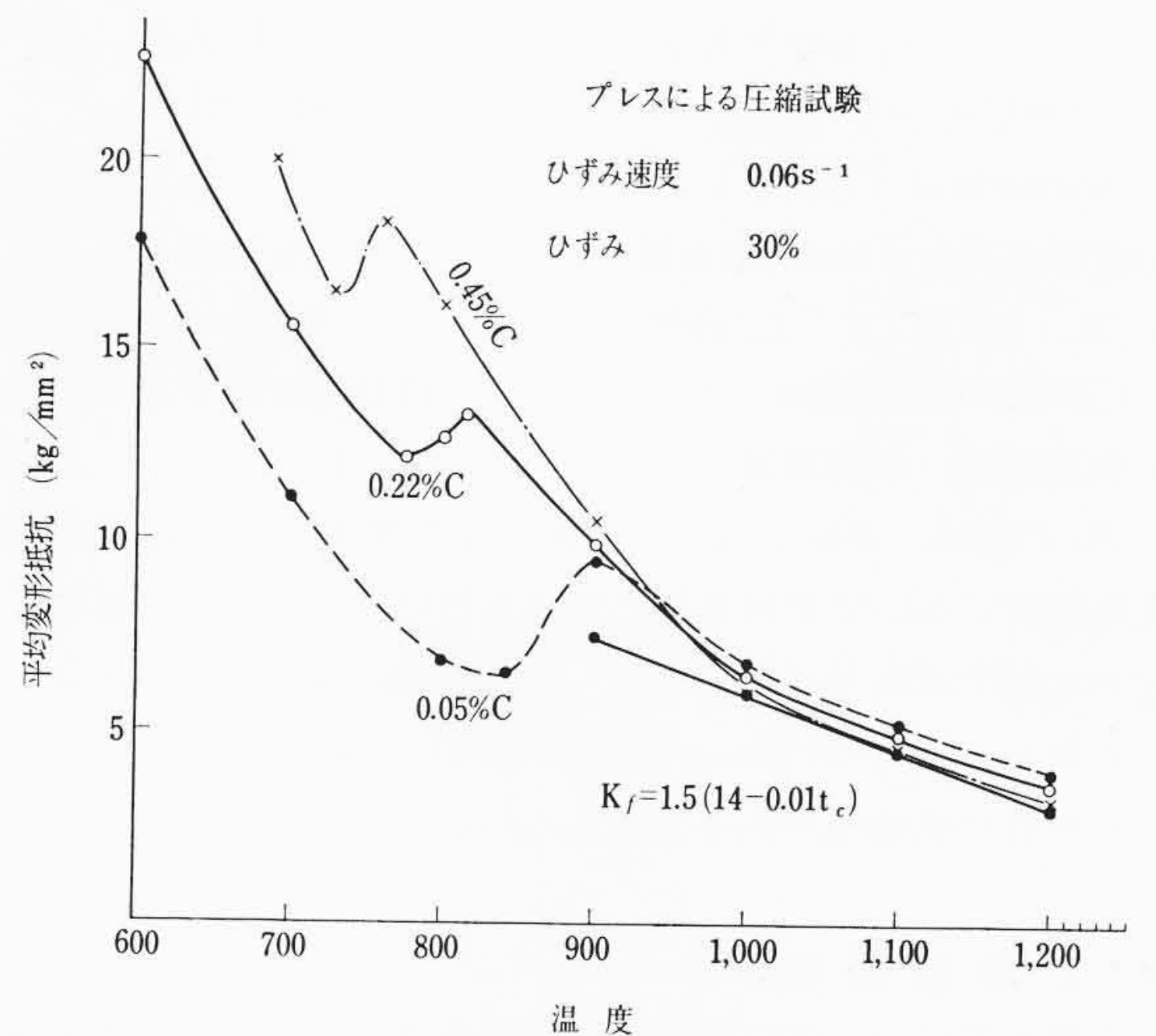
μ : ロールと材料間の摩擦係数

θ : 圧延材の温度

l_d : 接触弧の長さ

v : 圧延速度

である。前述の式について補足説明をすれば第4図において



第6図 低炭素鋼および炭素鋼の各温度における平均変形抵抗

$$\sigma_1 - \sigma_3 = K_f \quad (6)$$

$$\sigma_1 = K_f + \sigma_3 = K_m \quad (7)$$

と置く。Geleji 氏は多数の実験データより次元解析類似の手法により第3主応力 σ_3 を次の形にあらわした。

$$\sigma_3 = C K_f \mu \frac{l_d}{h} \sqrt[3]{v} \quad (8)$$

ゆえに

$$K_m = K_f \left(1 + C \mu \frac{l_d}{h} \sqrt[3]{v} \right) \quad (9)$$

以下実験により $C=5.5, n=4$ を求めた。

Geleji の式を変形して整理すると、 $t, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \mu, h/D$ の関数となっており、圧延の変形抵抗の式として(1)に述べた因子のほか、 $\mu, h/D$ の因子(D は有効ロール径)が加えられている。しかし(5)式で計算された平均変形抵抗は一般にかなり大きな値を示し、特に h/D が小さく ε の大きな場合には実測値の2~3倍はなる場合がある。その後 Geleji 氏^{(6)~(8)}は、この傾向を是正するため、 C を l_d/h の関数として

$$K_m = K_f \left\{ 1 + f \left(\frac{l_d}{h} \right) \frac{l_d}{h} \mu \sqrt[3]{v} \right\} \quad (10)$$

なる式を求め、($C=f(l_d/h)$ は3本の双曲線をつなぎあわせたグラフとして与えている)だが、この式による計算値も実測値とかなりはなれている。

4.3 Geleji の計算式をもとに新計算式の誘導

平均変形抵抗として次の関数を仮定し、実験値から C, m, n を求めた。

$$K_m = K_f \left\{ 1 + C \mu \left(\frac{l_d}{h_2} \right)^m v^n \right\} \quad (11)$$

4.3.1 熱間変形強さ: K_f

Geleji 氏は低炭素鋼の K_f について $800 \sim 1,300^\circ\text{C}$ の範囲において次の式を与えている。

$$K_f = 0.015(1,400 - \theta) \quad [\text{kg/mm}^2] \quad (12)$$

同様に Ekelund 氏は

$$K_f = (14 - 0.01\theta)(1.4 + C + \text{Mn}) \quad (13)$$

θ は圧延温度、 C, Mn は炭素、マンガンの含有%である。以下の経験式について検討してみる。

Nadai-Manjoine 氏⁽⁴⁾は高速引張試験機を用いて分解アンモニアガス中にて 920°C (1時間) で焼鈍した低炭素鋼の抗張力を求めた。第5図は炭素鋼の常温から $1,200^\circ\text{C}$ までの温度範囲における

抗張力を示したものである。これによると(12)式は、900℃から1,200℃において $\dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ のカーブに一致している。

Henneck氏⁽⁵⁾は、プレスによる圧縮エネルギーから炭素鋼の平均変形抵抗を求めた(第6図)。同図に(12)式を比較のために記入した。 $\dot{\epsilon}=10^{-2}\text{ s}^{-1}$ でGelejiの式は $K_f=1.5(14-0.01\theta)$ は950~1,200℃で測定値に一致する。この値はグラフからわかるように低炭素鋼、中炭素鋼を通じてなりたつものであり、Ekelundの K_f の値は、中炭素鋼では大きくなりすぎる。井上氏が鋼管用各種鋼材について変形抵抗の測定を行なっているが、同様に高温変形に関するかぎり低炭素鋼、中炭素鋼にほとんど差がないという結果がえられている。以上のようにGelejiの与えている K_f は相当高い信頼度があると考えられるのでこのまま用いることにした。

4.3.2 摩擦係数: μ

摩擦係数については実験データがあまりみられないのでGelejiの式をそのまま利用した。

$$\mu=0.841-0.0004\theta \dots\dots\dots (12)$$

4.3.3 平均変形抵抗 K_m の誘導

圧延荷重の実測値から平均変形抵抗を求める。

$$K_m = \frac{P}{l_d \times b_m}$$
$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \doteq \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

- ただし、 P : 圧延荷重
- l_d : 接触弧の長さ
- b_m : 圧延前後の圧延材幅の平均値
- R : 有効ロール半径
- Δh : 圧下量

である。

前述のように K_m を次の式で与える。

$$K_m = K_f \left\{ 1 + C \mu \left(\frac{l_d}{h_2} \right)^m \cdot v^n \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\left(\frac{K_m}{K_f} - 1 \right) / \mu = C \left(\frac{l_d}{h_2} \right)^m v^n$$
$$\log \left\{ \left(\frac{K_m}{K_f} - 1 \right) / \mu \right\} = \log C + m \log \left(\frac{l_d}{h_2} \right) + n \log v \dots\dots\dots (14)$$

それゆえ観測方程式は

$$a_i x_1 + b_i x_2 + c_i x_3 = m_i \dots\dots\dots (15)$$

$a = 1$

$m = \log \left\{ \left(\frac{K_m}{K_f} - 1 \right) / \mu \right\}$

$b = \log c$

$c = \log v$

以下最小自乗法により上述の各係数を決定する。

第2表に観測方程式に入れる27点のデータを示す(本表にはA社中小形圧延設備による $\angle 90 \times 90 \times 10\text{ t}$ の測定データを加えている)。

正規方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} 27x_1 + 5.2321x_2 + 6.3519x_3 = 14.0952 \\ 5.2321x_1 + 1.999584x_2 + 2.20895x_3 = 3.61157 \\ 6.3519x_1 + 2.20895x_2 + 3.33608x_3 = 4.80828 \end{cases}$$

第3表にGaussの方法による計算過程を示す。本表でたとえば $[ab]$ とあるのは $\sum_{i=1}^{27} a_i b_i$ の意味である。

$$x_3 = \frac{[cm_2]}{[cc.1]} = 0.70952 \doteq \frac{1}{1.41}$$
$$x_2 = \frac{[bm.1]}{[bb.1]} - \frac{[bc.1]}{[bb.1]} x_3 = 0.89637 - 0.70672$$

第2表 観測方程式に入れる測定点

No.	品 種 StNo.		$\times 10^3\text{ (kg)}$ P	$\times 10^3\text{ (mm}^2\text{)}$ $b_m \times l_d$	$\text{(kg/mm}^2\text{)}$ K_m	$\text{(^{\circ}C)}$ Temp	$\text{(kg/mm}^2\text{)}$ K_f	$\frac{K_m}{K_f}$	μ	$\frac{(K_m/K_f-1)}{\mu}$	$\frac{l_d}{h_2}$	(m/s) v
1	150×90×12 t	5	119	9.45	12.57	1,070	4.95	2.54	0.413	3.73	2.295	2.46
2		6	89	7.27	12.24	1,040	5.40	2.27	0.425	2.99	2.25	2.46
3		7	86	4.49	19.15	1,000	6.00	3.19	0.441	4.96	1.592	3.11
4	150×90×9 t	1	182	16.40	11.10	1,120	4.20	2.64	0.393	4.17	1.190	0.75
5		2	69	12.03	5.74	1,120	4.20	1.35	0.393	0.93	1.095	1.025
6		4	114	10.85	10.50	1,090	4.65	2.26	0.405	3.11	1.905	1.54
7		7	94	5.06	18.55	1,000	6.00	3.09	0.441	4.74	2.20	3.12
8		8	71	3.03	23.45	950	6.75	3.47	0.461	5.36	1.43	3.17
9	150×100×9 t	5	137	9.68	14.13	1,070	4.95	2.85	0.413	4.48	2.49	2.49
10		6	121	8.07	15.00	1,040	5.40	2.78	0.425	4.10	2.86	2.49
11		7	70	3.93	17.70	1,000	6.00	2.95	0.441	4.42	1.54	3.18
12	90×90×10 t	1	79	12.20	6.47	1,120	4.20	1.540	0.393	1.373	1.115	0.75
13		2	45	5.90	7.63	1,120	4.20	1.815	0.393	2.07	0.577	0.895
14		3	67	11.40	5.88	1,110	4.35	1.35	0.397	0.882	1.558	1.002
15		4	150	9.06	16.55	1,110	4.35	3.81	0.397	7.08	1.680	1.452
16		5	135	8.64	15.62	1,095	4.57	3.42	0.403	6.00	2.46	3.30
17		6	128	7.25	17.65	1,075	4.87	3.63	0.411	6.40	3.04	3.92
18		7	82	3.74	21.90	1,055	5.17	4.24	0.419	7.74	1.861	4.40
19	90×90×10 t	2	91	18.12	5.02	1,150	3.75	13.4	0.381	0.89	0.543	0.613
20		3	175.5	22.47	7.80	1,150	3.75	2.08	0.381	2.83	0.989	0.93
21		4	86	13.35	6.45	1,150	3.75	1.720	0.381	1.89	0.745	1.10
22		8	92	11.15	8.25	1,120	4.20	1.964	0.393	2.45	1.513	0.794
23		9	765	9.62	7.96	1,120	4.20	1.895	0.393	2.28	1.680	1.023
24		10	703	7.57	9.30	1,120	4.20	2.218	0.393	3.10	1.670	1.100
25		3	68	4.76	14.23	1,088	4.72	3.04	0.407	5.02	1.250	1.847
26		5	90	5.69	15.82	1,080	4.80	3.30	0.409	5.63	2.06	2.54
27		8	93	4.72	19.70	1,070	4.95	3.98	0.413	7.21	2.37	3.54

(注) 次の規約にしたがってデータを整理した。

$b_m = \frac{b_1 + b_2}{2}$ b_1, b_2 は圧延材の最大幅

$h_1 = \frac{S_1}{b_1}, h_2 = \frac{S_2}{b_2}$ (ただし b_1, b_2 の場合のみ, b_1, b_2 の場合は $\frac{S_1}{b_2} = h, \frac{S_2}{b_2} = h_2$) $cd = R\Delta h$

P : 圧延荷重 b : 平均幅 l_d : 接触弧の長さ K_m : 平均変形抵抗 K_f : 燃間変形強さ

Temp: 温度 μ : ロール材料間の摩擦係数 v : 有効径の円周速度

第3表 Gauss の計算法による計算過程

		a	b	c	m
A	a	27	5.2321	6.3519	14.0952
	b	$[ab]/[aa]$ =0.19378	1.99584 1.01388	2.20895 1.23087	3.61157 2.73137
	c	$[ac]/[aa]$ =0.23526		3.33608 1.49435	4.80828 3.31604
	m	$[am]/[aa]$ =0.52204			9.36554 7.35826
B	b		0.98196	0.97808	0.88020
	c	$[bc.1]/[bb1]$ =0.99605		1.84173 0.97422	1.49224 0.87672
	m	$[cm.1]/[bb1]$ =0.89637			2.00728
C	c			0.86751	0.61552
	m	$[cm.2]/[cc1]$ =0.70952			

$$=0.18965 \div \frac{1}{5.27}$$

$$x_1 = \frac{[am]}{[aa]} - \frac{[ac]}{[aa]} x_3 - \frac{[ab]}{[aa]} x_2$$

$$=0.52204 - 0.16692 - 0.03675 = 0.31837$$

$$\log c = 0.31837, \quad c \doteq 2.08$$

ゆえに平均変形抵抗の式は

$$K_m = K_f \left\{ 1 + 2.08 \mu \left(\frac{l_d}{h_2} \right)^{\frac{1}{5.17}} \cdot v^{\frac{1}{1.41}} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

(16)式を用いて圧延荷重を計算し、実測値と比較した結果、当然予想されたことではあるが、次の結果がえられた。

- (i) 等辺、不等辺山形鋼では比較の実測値に近い値が計算されたが、最終仕上パスに近づくにしながら実測値が計算値よりも大きくなる。
- (ii) みぞ形鋼は一般に実測値が計算値より大きく、大きいものでは35%程度の誤差が出てくる。

この傾向は複雑な断面形状を幅を基準とした等価長方形断面におきかえて計算するため、仕上に近づくにたつれ幅方向の拘束が大きくなり σ_1 が大きくなるためと思われる。この傾向を補正する形状係数を考え $K=f(l_c/b)$ の関数を導入し l_c/b , P/P' をグラフに整理してみると

$$K = \sqrt{\frac{l_c}{b}}$$

が妥当であることがわかった。

ここで、 b : 最大幅

l_c : 断面中心線の長さ

P : 荷重の計算値

P' : 実測値

である。

5. 圧延動力の計算式および数値計算

5.1 圧延動力の計算式

5.1.1 記号の説明

P : 圧延荷重 (t)

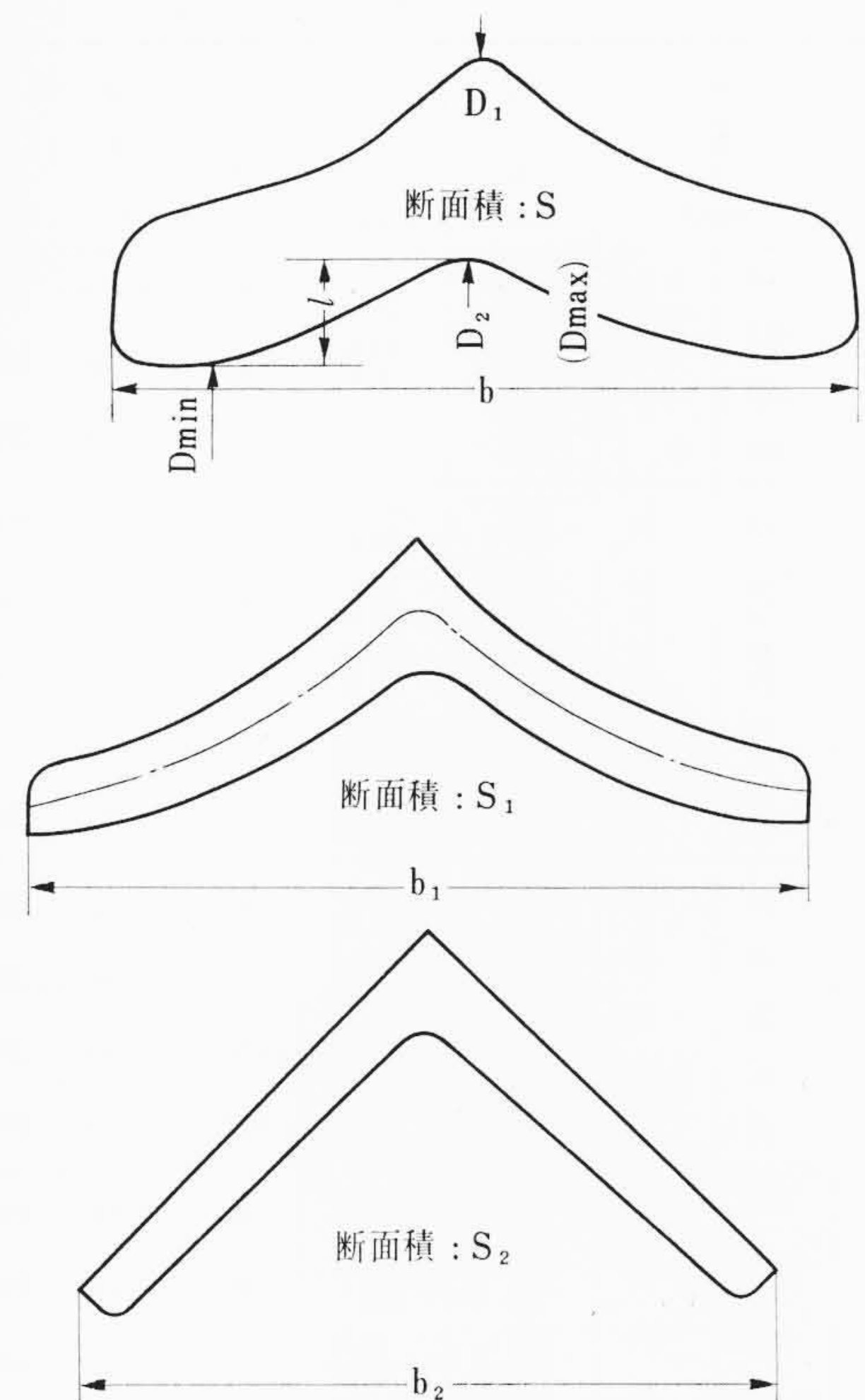
R : ロール有効半径 (mm)

Δh : 圧下量 ($h_1 - h_2$) (mm)

b_m : $\frac{b_1 + b_2}{2}$ (mm)

b_1, b_2 : 圧延前後の材料幅 (mm)

K_m : 平均変形抵抗 (kg/mm^2)



第7図 山形鋼の計算例

μ : 摩擦係数

v_r : 平均相対速度 (mm/s)

ω : ロール角速度

K_f : 熱間変形強さ (kg/mm^2)

θ : 圧延材の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

l_d : 接触弧の投影長さ (mm)

h_1, h_2 : 圧延前後の材料高さ (mm)

W_a : 純変形動力 (kW)

W_{lr} : 軸受損失動力 (kW)

W_s : 摩擦損失動力 (kW)

R_z : ロールネック半径 (mm)

μ_z : ロール軸受の摩擦係数

W : 全圧延動力 (kW)

$$\text{圧延荷重: } P = \sqrt{R \cdot \Delta h} \times b_m \times K_m \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{ただし, } K_m = K_f \left\{ 1 + 2.08 \mu \left(\frac{l_d}{h_2} \right)^{\frac{1}{5.27}} \cdot v^{\frac{1}{1.41}} \right\} \cdot K$$

$$K_f = 1.5(14 - 0.01\theta)$$

$$\mu = 0.841 - 0.0004\theta$$

$$v = R\omega$$

$$K = \sqrt{\frac{l_c}{b}}$$

5.1.2 圧延動力

$$W = W_a + W_{lr} + W_s \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{ただし, } W_a = 1.96 \times 10^{-2} \times P \times \frac{l_d}{2} \times \omega$$

$$W_{lr} = 1.96 \times 10^{-2} \times P \times \mu_z \times R_z \times \omega$$

$$W_s = 1.96 \times 10^{-2} \times P \times \mu \times v_r$$

$$v_r = 0.6 \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{2} \times \omega$$

本圧延動力の計算式に関しては、測定精度および現段階で必要とする計算精度の観点から弾性復元、ロールフラットニング、ト

第4表 圧延動力および荷重の計算値と測定値の比較

品 種	パス 番号	断面 積 S (mm ²)		幅 b (mm)	高 さ h ₁ , h ₂ (mm)	回 転 数 N (rpm)	温 度 t (℃)	有 効 半 径 R (mm)	ld/h ₂	v	K (kg/ mm ²)	K _r (kg/ mm ²)	K _m (kg/ mm ²)	圧延荷重 (t)		W (kW)	W' (kW)	P/P'	W/W'
														計算 P	実測 P'				
L150×90×12 t	5	568	0	204 204	27.8 20.2	83	1,070	282.7	2.295	2.46	1.02	4.95	14.97	141.5	119	832	1,015	1.19	0.82
	6	412	0	200 200	20.6 16.0	83	1,040	282.5	2.25	2.46	1.05	5.40	16.72	121.5	89	634	720	1.36	0.88
	7	320	0	188 188	17.02 15.00	104	1,000	285.0	1.592	3.11	1.075	6.00	21.0	94.2	86	520	456	1.09	1.14
L150×90×9 t	1	192	50	187 195	103 72.1	30	1,120	238.8	1.190	0.75	1.0	4.20	7.09	115.0	182	750	993	0.62	0.755
	2	140 110	50 00	195 195	72.1 56.5	40.5	1,120	242.5	1.093	1.025	1.0	4.20	7.95	96.1	69			1.39	
	4	79 57	20 00	202 203.5	39.2 28.0	57	1,090	258.2	1.905	1.54	1.04	4.65	10.85	119.8	114	542		1.03	
	7	27 23	90 00	185.5 185.5	15.03 12.42	104	1,000	287.1	2.200	3.12	1.09	6.00	22.1	115.5	94	702	660	1.27	1.06
	8	23 21	00 20	173.0 173.0	13.30 12.25	104	950	291.5	1.43	3.17	1.136	6.75	24.9	75.6	71	391	480	1.05	0.861
L150×100×9 t	5	54	00	214 216	25.20 18.00	83	1,070	286.4	2.49	2.47	1.02	4.95	14.9	144.0	137	852.5		0.98	
	6	38	90	214 214	18.17 13.19	83	1,040	288.6	2.86	2.49	1.044	5.40	18.2	139.5	181	750		1.15	
	7	28	20	196.5 196.5	14.35 12.93	104	1,000	287.3	1.54	3.18	1.08	6.00	22.7	89.0	70	477.5		1.27	
	8	25 22	40 30	179.5 179.5	14.15 12.46	104	950	291.5	1.85	3.18	1.165	6.75	28.6	116.5	106	634		1.10	
L90×90×10 t	1	147	00	140 151	105 75.4	30	1,120	238.5	1.115	0.75	1.0	4.20	9.03	85.8	79	438	496	1.09	0.885
	2	113	80	79 90	144 121	40.5	1,120	211	0.577	0.895	1.0	4.30	7.07	40.9	45			0.91	
	3	108	90	126 139.5	86.3 55.1	40.5	1,110	236.5	1.558	1.002	1.0	4.35	8.27	94.3	67	1,120	1,200	1.40	0.935
	4	76	80	139.5 143	55.1 38.2	59	1,110	243	1.680	1.452	1.0	4.35	9.58	86.8	150			0.58	
	5	54	60	143 148	38.2 24.3	12.5	1,095	252	2.460	3.30	1.0	4.57	15.6	135	135	1,415	1,260	1.0	1.12
	6	35	90	145 145	24.7 16.43	12.5	1,075	299	3.040	3.92	1.04	4.87	19.2	139	128	1,320	1,320	1.085	1.0
	7	23	90	136 136	17.51 14.73	15.6	1,055	268.9	1.861	4.40	1.08	5.17	21.3	80	82	700	588	0.975	1.19
	8	20 16	00 40	125 125	16.08 13.10	15.6	1,030	265.5	2.150	4.40	1.16	5.55	25.4	90	83	828	685	1.08	1.32
L90×90×10 t (A社)	粗2	425	10	168.6 168.6	252 197.0	25.6	1,158	229	0.543	0.613	1.0	3.75	5.62	102	91	354	334	1.11	1.06
	3	332	20	168.6 181.1	197.0 130.0	33.7	1,155	264	0.989	0.93	1.0	3.75	6.72	151	175.5	803	882	0.86	0.91
	4	235	40	120.7 126.5	195.5 145.0	42.5	1,152	247	0.745	1.10	1.0	3.75	6.78	90.5	86.3	488	558	1.05	0.875
	5	142	40	126.5 131.8	145.0 108.0	65.0	1,149	248.5	0.871	1.694	1.0	3.75	7.95	96.6	152	726	1,160	0.65	0.625
	8	100	00	125 139	80.9 55.8	25.6	1,120	296	0.513	0.794	1.0	4.20	7.35	82	92	252	300	0.89	0.84
	9	77	60	139 144	55.8 40.5	33.7	1,117	302	0.680	1.023	1.0	4.20	8.05	77.5	76.5	224	289	1.01	0.775
	10	58	30	144 145	40.5 31.4	42.5	1,114	302	1.67	1.10	1.025	4.20	8.47	64	70.3	197	270	0.91	0.73
	中3	45	50	145 145	31.4 26.2	85.0	1,110	207.0	1.25	1.847	1.045	4.75	11.75	55.8	68	238	260	0.82	0.88
	5	38	00	145 146	26.2 18.96	115	1,096	211	2.06	2.54	1.06	4.80	15.20	86.5	90	717	640	0.96	1.12
	仕8	27	70	145.5 145.5	19.04 13.68	170	1,092	198.8	2.37	3.54	1.07	4.95	18.43	86.9	93	870	800	0.995	1.09
L90×90×10 t (B社)	10	19	90	126 126	15.79 13.50	197	1,088	201	1.59	4.14	1.17	5.10	21.5	58.3	60.0	508	550	0.98	0.925

ルクアーム係数の変化などを無視した。摩擦損失動力の平均相対速度は Geleji 氏が提唱しているもので、ロール軸方向で径に差がある場合に、圧延材の速度はロール径のある一点の周速に一致しており、あとの部分ではすべりを起こしているという考えに基づくものである。

5.1.3 計算上の規約

(i) $b_2 > b_1$ の場合

$$R = \frac{D_1 + D_2}{4}$$

$$h = \frac{s}{b}$$

(ii) $b_2 < b_1$ の場合の $h_1 h_2$ の決め方 (第7図)

第7図において

$$h_1 = \frac{s_1}{b}$$

$$h_2 = \frac{s_2}{b_2}$$

(iii) 平均相対速度 v_r

第7図において

$$v_r = \xi \frac{l \cdot \omega}{2} \quad \xi = 0.6$$

(iv) 形状係数 K (第7図)

$$K = \sqrt{\frac{l_{c2}}{b_2}}$$

ここに、 l_c : 中心線(一点鎖線)の長さ

5.2 計算結果およびその検討

今回導いた計算式により測定点全点について圧延動力の計算を行

第5表 3重圧延機によるボックス圧延の例

パス No.	ロー 有効径 (mm)	回転数 (rpm)	断 面		断面積 (m^2)	圧下率 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	平均変 形抵抗 (kg/mm^2)	圧延 荷重 (t)	圧延 動力 計算値 W (kW)	圧延 動力 実測値 W' (kW)	W/W'
			高さ (mm)	幅 (mm)								
1	427	70	245 230	245 245	6,000	6.13	1,250	6.77	95	534	540	0.99
2	442	70	230 220	245 270	56,350	13.05	1,240	7.10	149	1,230	1,000	1.23
3	422	70	270 235	200 208	54,000	12.95	1,230	6.96	125	1,100	560	1.96
4	442	70	235 200	208 215	48,900	14.90	1,220	7.45	139	1,270	1,210	1.05
5	472	70	215 185	200 208	43,000	13.95	1,210	8.24	141	1,220	1,232	0.99
6	492	70	185 150	208 215	38,480	18.90	1,200	8.75	91	1,190	1,462	0.815
7	492	70	215 165	150 160	32,250	23.13	1,190	9.00	155	1,530	1,535	0.979
					26,400							

なった。第4表にこれを示す。本表において W , P は計算値, W' , P' は測定値である。山形鋼についてみると計算値はほぼ20%の誤差内にはいつている。みぞ形鋼については、スタンドのデータを除いて一般に計算値が小さくなっており誤差も大きい。1, 2スタンド, 3, 4スタンドはおのおの1モータで駆動されているが、計算動力と実測値とが合わず、一方が大きくなると他方が小さくなるが、2スタンドの合計動力は実測値に近い値をとる傾向がどの品種にもみられた。この原因として、テンション、コンプレッションの影響が考えられるが、オシログラフからこの現象をみいだすことはできなかった。

さらに本計算式の信頼性を検討するため、トピー工業株式会社以外の他社の3重圧延機によるボックス圧延, 中小形圧延機による $\angle 125 \times 65$ の圧延動力の測定結果について検討した。第5, 6表に計算結果と実測結果との比較を示す。このほかトピー工業大中形圧延機による $\angle 200 \times 200$ の計算値も実測値にほぼ近い値を示した。

6. 結 言

トピー工業株式会社豊橋製造所において、各種形鋼の圧延動力の測定を行ない、圧延動力の計算式を求めることができた。

6.1 適 用 範 囲

材 質 低炭素鋼, 中炭素鋼

第6表 中小形圧延設備による $L 125 \times 65 \times 6$ tの圧延

パス No. (ス タ ン ド No.)	ロー 有効径 (mm)	回転数 (rpm)	断 面		断面積 (m^2)	圧下率 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	平均変 形抵抗 (kg/mm^2)	圧延 荷重 (t)	圧延 動力 計算値 W (kW)	圧延 動力 実測値 W' (kW)	W/W'
			高さ	幅								
中 No. 3	432	89.3	31.4 24.4	166 160	5,190	22.3	1,060	16.1	100.5	568	600	0.95
4	435	116.4	25.6 18.75	152 152	3,900	25.8	1,030	21.1	125	910	828	1.1
5	430	145.0	19.65 16.55	145 145	2,850	15.7	1,000	25.4	92.8	728	730	0.997
仕 8	398	188.0	16.65 12.90	144 144	2,400	22.5	970	31.0	121.5	667	806	0.825
					1,860							

温 度 $950 \sim 1,250^{\circ}\text{C}$

形 状 寸 法 $\angle 90 \sim \angle 200$ 等辺, 不等辺山形鋼および長方形断面

圧 延 速 度 $0.5 \sim 5 \text{ m/s}$ (今回測定範囲)

$\frac{l_d}{h_2}$ の範囲 $0.5 \sim 3$ (今回測定範囲)

6.2 今後の研究課題

本研究は数ある形鋼の一部にふれたにすぎないが、筆者らはさらに適用範囲, 条件を検討するため、各種のみぞ形鋼, I形鋼, H形鋼の数種に対して測定を行ない、データを検討中である。今後数多くの鋼種ならびに圧延材断面形状にわたって信頼できる実験結果を待ち、この研究をより確実にしていきたいと考えている。

終わりに臨み本実験に多大の便宜を与えられた関係者のかたがたに対し深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 鉄鋼技術共同研究会編: 圧延理論と変形抵抗
- (2) 井上勝郎: 鉄と鋼 Vol. 41 (1955) No. 5, No. 6, No. 8
- (3) A. Geleji: Walzwerks und Schmiedemachnen.
- (4) A. Nadai, M. Manjoine: J. of Applied Mechanics 63, (1941)
- (5) H. Henneck: Stahl u. Eisen 48 (1928) 315
- (6) A. Geleji: Stahl u. Eisen 77 (1957)
- (7) A. Geleji: Stahl u. Eisen (1958)
- (8) A. Geleji: Arch. fur Eisenhutten Wesen 31, 571 (1960-Oct.)