

(討9) 圧延荷重の比較と検討

富士製鉄中央研究所 ○柳本左門

1) はじめに

圧延荷重を計算するためには、すでに多くの理論が公表されているが、ここではその代表的なものを選り、これらの理論によって計算された結果がどの程度実測値に一致するものであるかを検討したのでその結果について報告する。理論と実験の比較をおこなう場合に前もって知っておかなければならないものに使用材料の降伏力カーヒブ曲線と摩擦係数がある。これらの量が与えられる圧延条件に対応するようにあらかじめ求められているとその比較が可能である。

前者の降伏力カーヒブ曲線は冷間状態では比較的容易に求めることができ、その方法は H. Ford⁽¹⁾ によって討論されているが、熱間状態ではいかに連続的な依存性が大きいことと温度の因子が加わるために各圧延条件に対応させて多くの骨の折れる実験をおこない求めるはならない。これに代してはすでに多くのデータが供給されているのでそちらを参考にされたい。⁽²⁾

これに対して後者の摩擦係数を圧延時に求める決定的な手段はないので、各研究者はあらかじめその値を圧延理論や先進の理論を介して推定し、与えて理論と実験値との比較を試みているのが現状である。したがって、正確な意味では理論と実験値の比較はできないものであるのかも知れないが、ここではすでに公表された研究をもとにそのあらましを述べてみたい。

2) 比較に用いた理論式について

これまでに公表された理論のうち、ここでは冷間圧延に対しては E. Orowan⁽³⁾, Bland & Ford⁽⁴⁾, Nadai⁽⁵⁾, Zelikov⁽⁶⁾, Ekelund⁽⁷⁾, Trinks⁽⁸⁾, Stone⁽⁹⁾ および Hill⁽¹⁰⁾ の各理論式および近似的式を用い、熱間圧延に対しては Sims⁽¹¹⁾, Ekelund⁽⁷⁾, Orowan & Pascoe⁽¹²⁾, Ford & Alexander⁽¹³⁾ および志田⁽¹⁴⁾ の各理論式および近似的式を用いた。

3) 比較検討結果

3.1 冷間圧延について。圧下力の計算の基礎となる理論にはロール間隙における材料の加工硬化特性が導入されているものと（たとえば、E. Orowan⁽³⁾ と Bland & Ford⁽⁴⁾ の理論）、平均降伏力として導入されているものとがあることを知っている。Bland & Ford は前者の理論においてロール間隙における加工硬化を考慮した場合に与えられる圧下力と平均降伏力を $\bar{K} = \int_0^{\phi} K d\phi / \phi$ で定義して与えられる圧下力の比較をおこない、その誤差はわずか2%であると報告している⁽⁴⁾。これは、前者の理論では中立矢のロール中々角中々およびその矢における材料の高さ H_n が降伏力 K に長岡浩の式として表現されていることによるのであろう。何れにしても、平均降伏力として導入しても実用上では全く支障のないものであることは注目されてよからう。

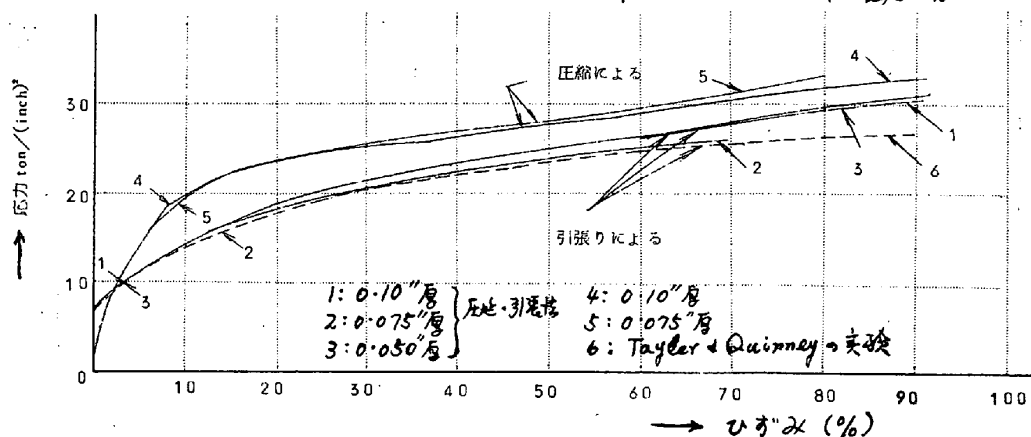
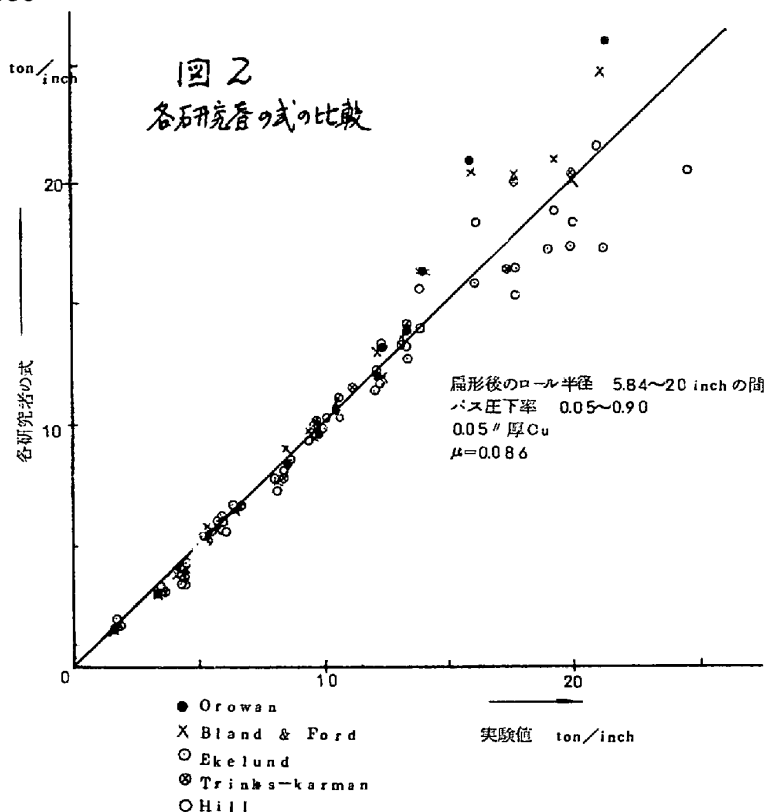
図1 圧延引張法と圧縮法⁽¹⁾によって与えられる降伏力カーヒブ曲線(電気鋼)

図1は H. Ford の求めた降伏力



一いずみ曲線で、曲線1, 2, 3は圧延と引張り試験を組合せて求めたものであり、4, 5は薄板を平面ダイスで直接圧縮して求める H. Ford の方法⁽¹⁾によるものである。曲線1と4, 2と5の間にはほぼ1.15倍の差が満たされ、H. Ford の提案した方法は妥当なものであることが示されている。また、図2に各研究者の式の比較結果を示した。図から、Ekelund の式も冷間圧延に十分使用できるものであろう。Ekelund の式⁽⁷⁾は次のように表現される。

$$P = k\sqrt{R\delta} \left(1 + \frac{1.6\mu\sqrt{R\delta} - 1.2\delta}{h_0 + h_i} \right) \quad \dots (1)$$

この比較から、Orowan および Bland & Ford の式は高目の値を、また Hill および Ekelund の式は低目の値をえ

るようである。一方、Trinks の解法によるものはかなりの一致を示すようであるが、理論の誘導にあたって用いた前提が Orowan のそれにおおはれないことを考えると、広範囲の圧延条件に対し Trinks の解が実験と一致するとみるのは必ずしも正しくないであらう。

各研究者の式はその解法に差がある中で、広範囲の圧延条件をえと比較するとかなりの差異が存在するものである。

図3に式(2), (3) および(4)の各式による比較を示した。これらの関係式は次のように表現される。

i) Ford, Ellis & Bland の圧下力係数⁽¹⁵⁾

$$f_F = \sqrt{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \int_0^{x_n} b(1+x^2) e^{2a \tan^{-1} x} dx + (1-\gamma) \sqrt{\frac{1-\gamma}{\gamma}} e^{2a \tan^{-1} x_n} \int_{x_n}^{x_1} (1+x^2) e^{-2a \tan^{-1} x} dx \quad \dots (2)$$

ii) Stone⁽⁹⁾ の圧下力係数

$$f_S = \frac{1+b}{2} \cdot \frac{e^\lambda - 1}{\lambda} \quad \dots (3)$$

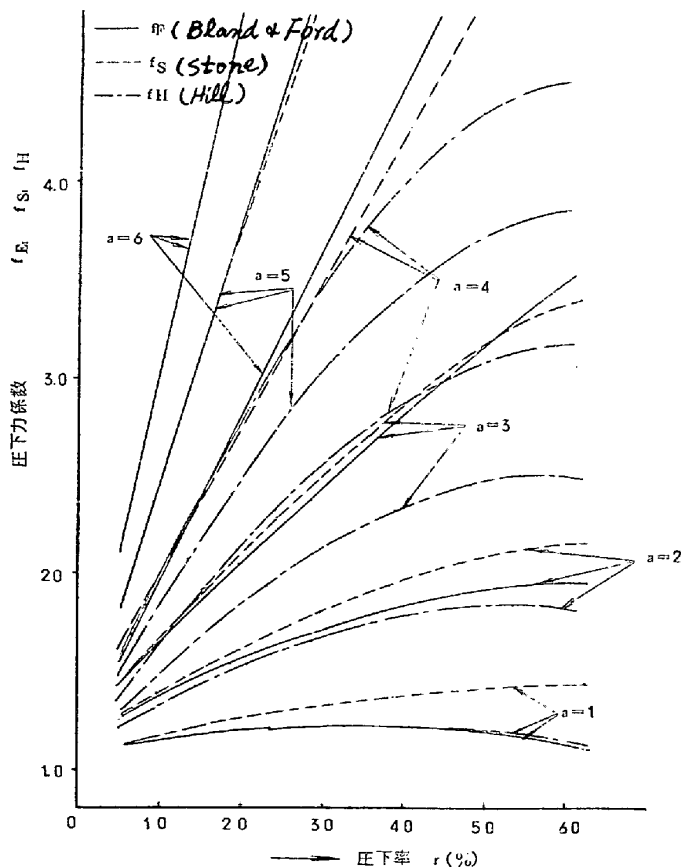


図3 Bland & Ford, Stone および Hill による圧下力係数の比較

iii) Hill の圧下力関数⁽¹⁰⁾

$$f_H = 1.08 + 1.79a\gamma\sqrt{1-\gamma} - 1.02\gamma \quad \dots (4)$$

$$\text{ただし, } x_1 = \sqrt{\frac{\gamma}{1-\gamma}}, x_2 = \tan\left[\frac{1}{2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{\gamma}{1-\gamma}} - \frac{1}{4a}\ln\frac{b}{1-\gamma}\right], \lambda = a\sqrt{\gamma(1-\gamma)} / \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right),$$

$$a = \mu\sqrt{\frac{R'}{h_2}}, \gamma = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \quad \dots (5)$$

これから3者の式とパラメータ a, γ について示したが図3であるが、図から Hill の式は $a \leq 2$ の範囲で、また Stone の式は $a \geq 3$ の範囲で Bland & Ford の理論をよく近似することがわかる。また図から圧延条件の選定によつては (a, γ を選定することを意味する)、各式の間かなりの差異の生ずる可能性があることがわかる。したがつて、圧延条件によつて Hill および Stone の式を使い分けると便利であらう。

3.2 熱間圧延について。すでによく知られているように熱間圧延ではいずみ速度 (又は圧延の速さにも比例する) に大きく依存するが、圧縮試験によつて求めたカーブいずみ曲線に対するいずみ速度を圧延によるいずみ速度と関係づけるおこななければならぬ。これに関する研究は Sims⁽¹¹⁾, Orowan & Pascoe⁽¹²⁾, Ekelund⁽⁷⁾, Ford & Alexander⁽¹³⁾ および Trinks⁽⁷⁾ によつておこなわれ、図4に示したような結果がえられている。このうちで最もよく使用されるのは Sims の式である。したがつて、これらの定式式によつて圧延におけるいずみ速度を求め、所定の圧下率と温度を与えて、それに対する変形抵抗を圧縮試験によつてえられたデータから求めるとよい。この値が求められることは冷間圧延と同じ方法によつて、圧延荷重の比較が可能である。

図4 各式の係数の比較

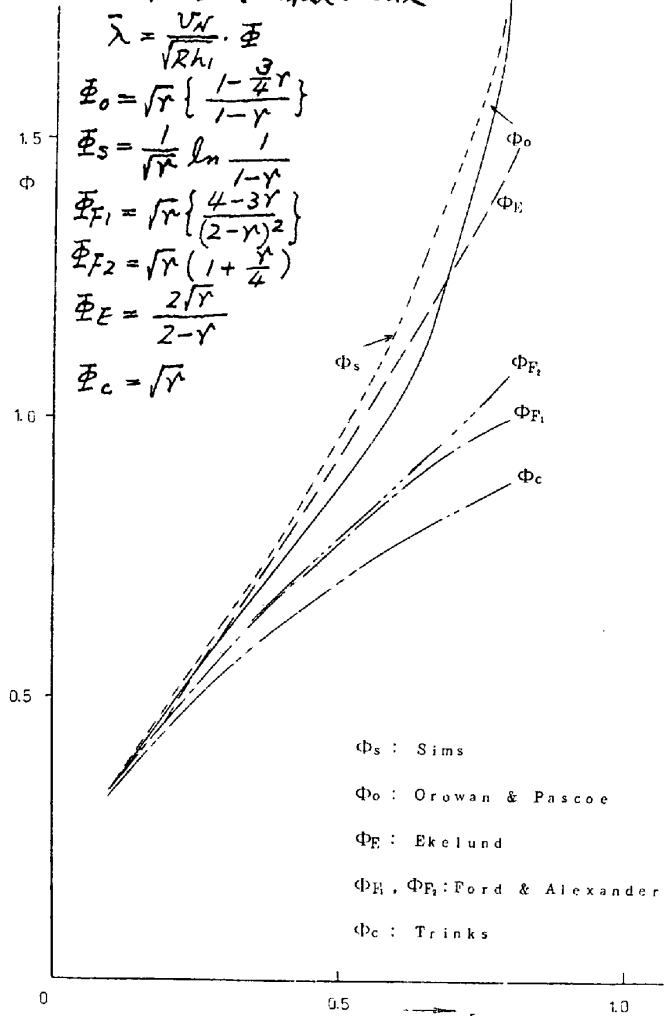


図5に、Orowan & Pascoe, Sims, Ekelund および Zelikov の各式の比較結果を示した⁽¹⁶⁾。図はロールの扁平を考慮していないが、扁平を考慮しても傾向には大差はない⁽¹⁶⁾。図から、Sims の式がかなり妥当なものであることがわかるが、この式を厳密に近似して更に補正する形で近似式を求めた志田の研究結果を示す次のようになる。

図5に、Orowan & Pascoe, Sims, Ekelund および Zelikov の各式の比較結果を示した⁽¹⁶⁾。図はロールの扁平を考慮していないが、扁平を考慮しても傾向には大差はない⁽¹⁶⁾。図から、Sims の式がかなり妥当なものであることがわかるが、この式を厳密に近似して更に補正する形で近似式を求めた志田の研究結果を示す次のようになる。

$$p_m = k_m \left\{ 0.8 + C \left(\sqrt{\frac{R'}{h_1}} - 0.5 \right) \right\} \quad \dots (6)$$

$$\text{ただし, } C = \frac{0.052}{\sqrt{\gamma}} + 0.016, \gamma \leq 0.15$$

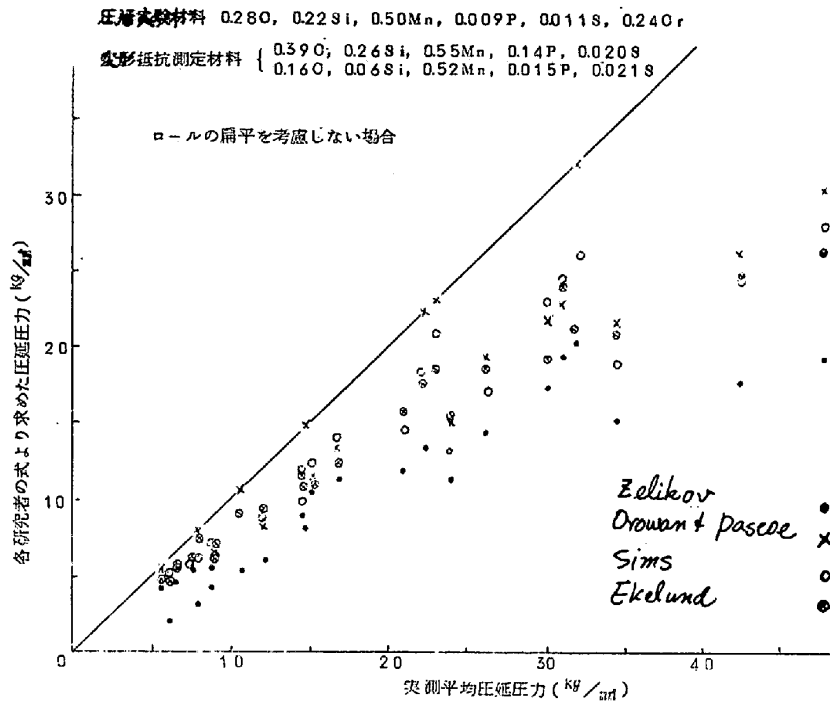
$$C = 0.2\gamma + 0.12, \gamma \geq 0.15$$

である。一方、Ford & Alexander⁽¹³⁾ の式は

$$Q_F = \frac{P}{kL} = 0.79 + \frac{\sqrt{(1-\gamma)\gamma}}{2(2-\gamma)} \quad \dots (7)$$

と表現される。Orowan & Pascoe の式⁽¹²⁾ は文献を参照されたい。また、Zelikov の式は冷間圧延に対称に導かれたものであるため、その表

図5 各研究者の式と実験との比較



提案の熱間圧延に一致しにくいことや摩擦係数の決定に妥当性を欠くと大きな誤差がはいり易いと考えられるため、実験との一致はみがかしいようである。Ekelundの式(1)に含まれる摩擦係数 μ は

$$\mu = c(1.05 - 0.0005t) \quad (8)$$

(ただし、 c は鋼ロールで1.0、鋳鉄ロールで0.8をとる。)

とされている。参考までにTschischikoff⁽¹⁸⁾の式一例をあげると、冷間圧延を鋳鋼ロールで圧延する場合に

$$\mu = 0.1(0.005t - 0.006e^{0.005t}) \quad (9)$$

となる。さて、冷間圧延を対称に

— Q_s (例えば志田, 塑性と加工 Vol. 7, 667 (1966-8), p. 424)

--- Q_0

--- Q_F

--- Q_{E_1} (1000°C)

--- Q_{E_2} (1200°C)

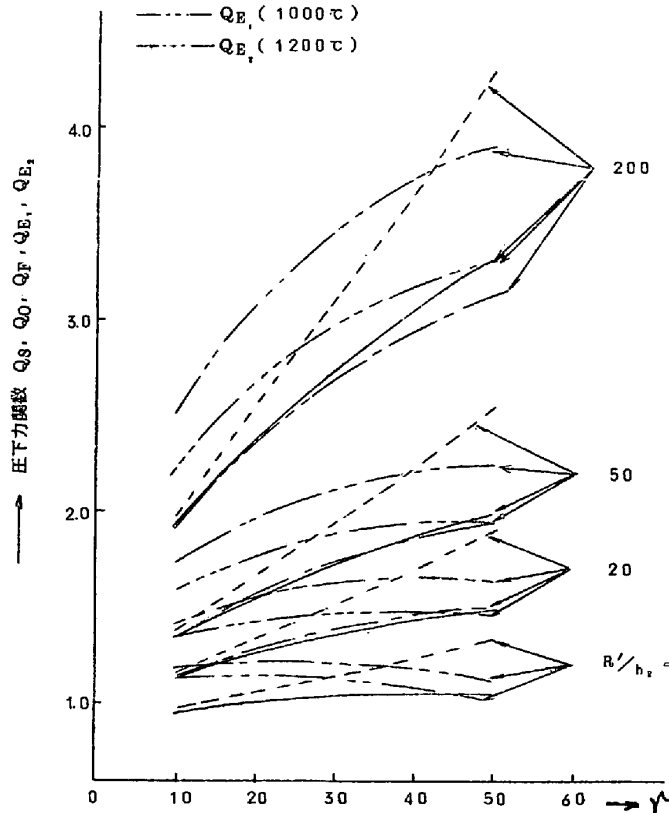


図6 各研究者の式による圧下力係数の比較

文献 9-1, 72; 9-2, 54 (17) H. Hoff 外, "Grundlagen des Walzverfahrens" 1955, 201 (18) J. H. Tschischikoff "Walzwerkswesen" 1954,

各式の比較を式(2)に図3に示した如く、同様の比較を熱間圧延に対して示すと図6のようになる。図からも圧延条件の選定によって各式の間にかなりの差異を生ずることになり、特定の圧延条件のみにて比較し、式の優劣を決定することは極めて危険なことであることを示している。

4 あとがき

以上、簡単であるが代表的な関係式の比較を示した。冷間では Bland & Ford の理論が、熱間では Sims の理論が最も妥当なものであることがわかる。(詳細は講演会の席上に述べる予定である)

文献 (1) H. Ford, Proc. Instn. Mech. Engrs., 159

(1948), 115 (2) 鉄鋼技術共同研究会, 圧延理論と変形抵抗 p. 104 (3) E. Orowan, Proc. Instn. Mech. Engrs., 150 (1943), 152 (4) D. R. Bland & H. Ford, Proc. Instn. Mech. Engrs., 159 (1948), 144 (5) A. Nadai, J. of App. Mech., 1939-6, A54

(6) A. Zelikov, Metallurg., 1933, №6, 61 (7) (8) 同, L. R. Underwood "The Rolling of Metals" Chapman & Hall Ltd. 1952 (9) M. D. Stone, Trans. ASME, 1959-12, 681 (10) R. Hill, 塑性, 増刊号, 186

(11) R. B. Sims, Proc. Instn. Mech. Engrs., 168 (1954), 191 (12) 文献(2)に同じ; p. 68 参照 (13) H. Ford & J. H. Alexander

J. of the Inst. of Metals, 92 (1963-64), 397 (14) 志田, 塑性と加工, 7-67 (1966), 424 (15) H. Ford, F. Ellis, D. R. Bland

J. of Iron & Steel Inst., 1951-5, 168 (16) 田島外, 高土

鉄鋼技術共同研究会, 圧延理論と変形抵抗 p. 104 (17) H. Hoff 外, "Grundlagen des Walzverfahrens" 1955, 201 (18) J. H. Tschischikoff "Walzwerkswesen" 1954,