

ホットストリップ仕上げロールに発生する チルはげの発生機構について

On Spalling of Work Rolls in Hot Strip Mills

関 本 靖 裕*
Yasuhiro Sekimoto

内 容 梗 概

ホットストリップ仕上げ用ワークロールに、ロール表面の一部がはげ落ちるチルはげ事故がしばしば発生している。このためにロールの寿命はいちじるしく短くなる。圧延作業中に起こる絞り込みという異常圧延がチルはげに関係があるといわれているので、ロール表面に作用する圧延圧力を検討し、ロール表面付近の応力解析を行なった。その結果、絞り込み現象がクラック発生あるいはチルはげの原因となりうることを明らかにした。

1. 緒 言

わが国の薄板の需要増大に対して、鉄鋼製品のなかで最も多く生産されているのは薄板である。ロールメーカーはこのホットストリップのワークロールについてはつねに関心をもって研究を続けている。

ホットストリップ仕上げ用ワークロールは現在 1, 2 号スタンド用のロールと 3 号以下 6 号スタンド用とでは材質が異なっている。後半のスタンドでは高硬度の合金グレーンロールが使用されている。このロールの寿命を大きく支配するものは、いわゆるチルはげといわれているロール表面の一部が薄くはげ落ちる現象（スポーリングともいう）とクラックである。このチルはげは後半のスタンドに進むにつれて被圧延材の板厚が薄く、かつ圧延速度が速くなるために、被圧延材の頭部あるいは後尾端部が折り重なってロールギャップにはいる現象（絞り込みという）のひん度の高いことが大きく影響しているといわれている。絞り込みが起こったときロール表面は強圧を受け、そのためにクラックが発生してチルはげが起きるであろうと考えられる。このような事故を防止するためには、まずチルはげの発生機構を明らかにする必要がある。第 1 図にロールのチルはげを示す。

ロールのチルはげについてこれまでにいくつかの研究が外国から発表されている。しかし、ほとんどは熱応力の解析にとどまっているために、チルはげ機構を明快に説明できる論拠を十分そなえていないのが現状である。

絞り込みという異常圧延現象のロール表面に及ぼす影響を明らかにするために、熱間被圧延材とワークロールとの接触によってロール表面付近に発生する圧延圧力による応力場の解析を行なった。この解析結果から、絞り込みによるクラック発生の可能性およびチルはげの発生機構について考察した。以下これらの結果について述べる。

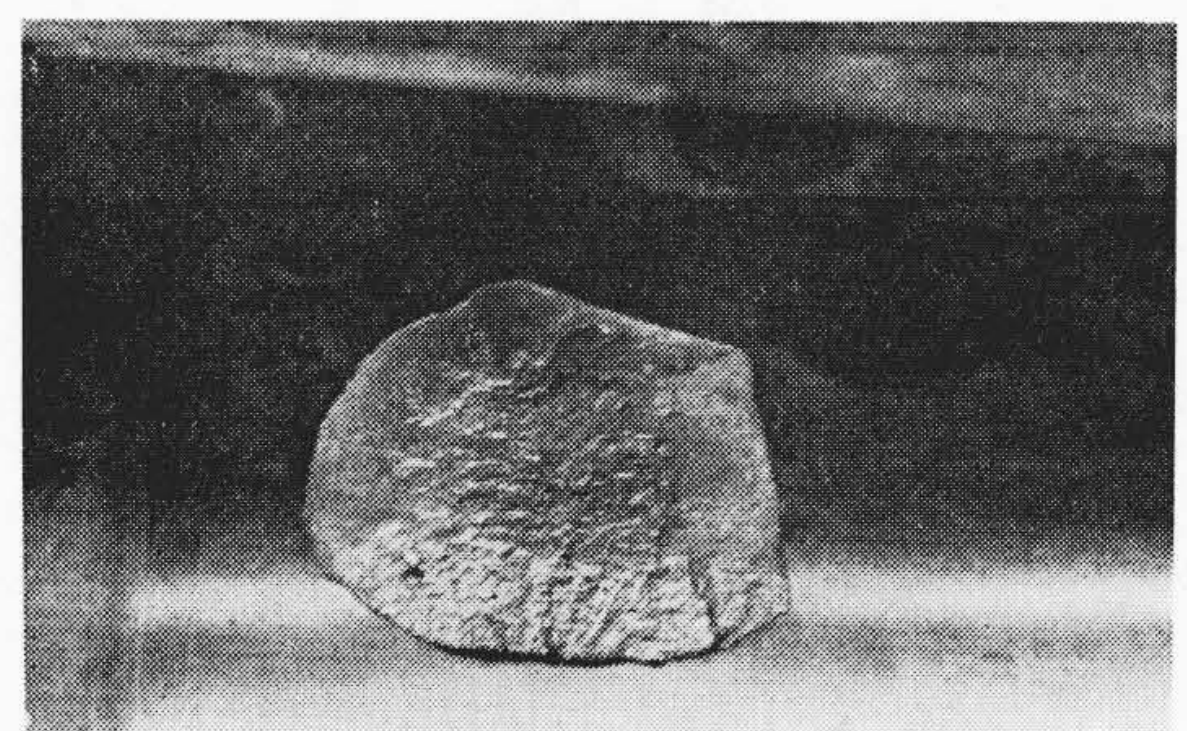
2. 圧 延 圧 力

2.1 ロール表面に作用する外力

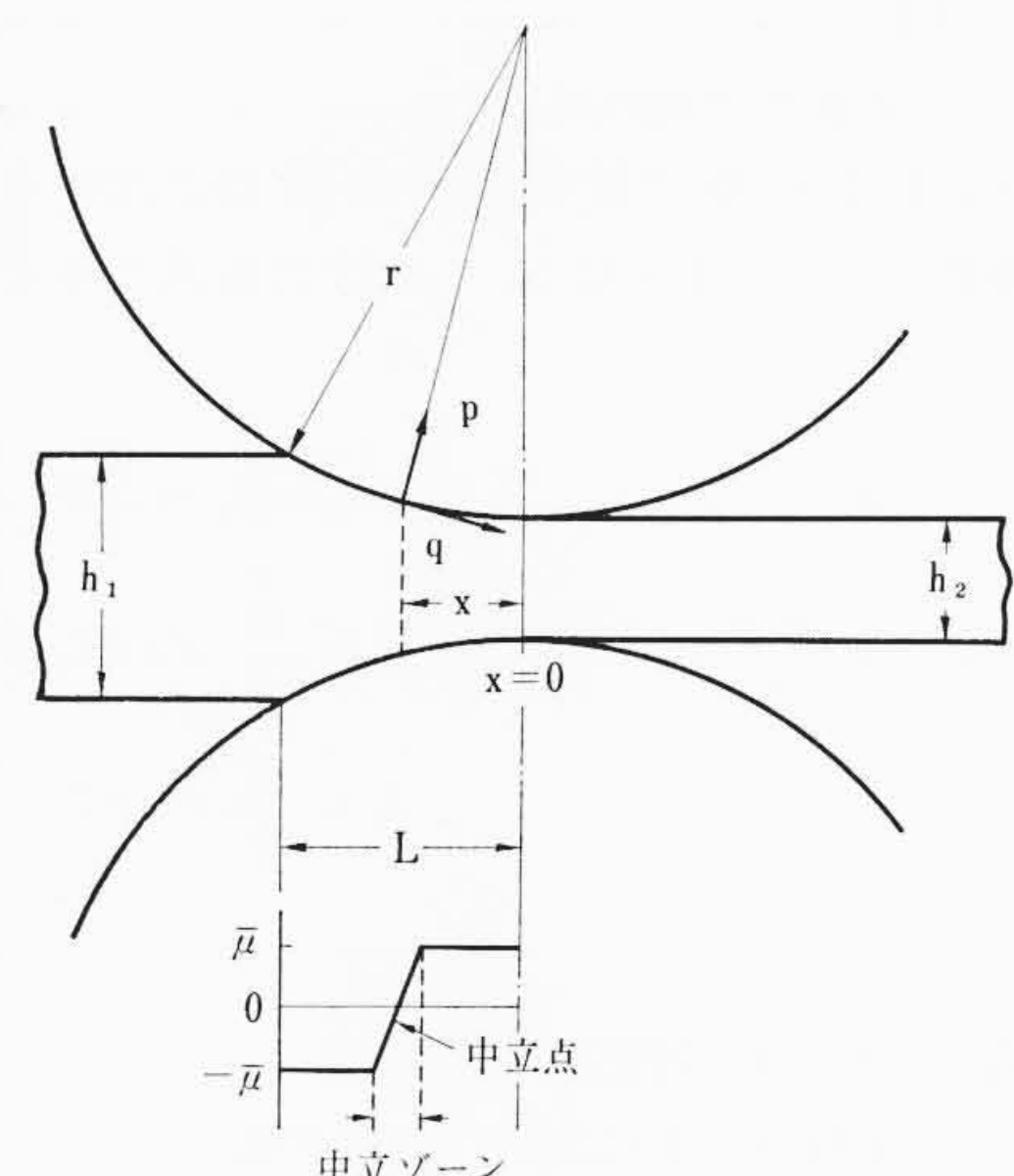
圧延圧力によってロール表面付近に発生する応力を解析するためには、被圧延材がロールギャップにはいったときに生ずる圧延圧力分布と被圧延材の流れによって生ずるせん断力分布を求めなければならない。

熱間圧延の圧延圧力分布を Karman の微分方程式から求めることにする。その場合、圧延圧力分布を実測結果に類似させるには、中立点において圧延圧力分布がなめらかな円弧状になり、かつせん

* 日立金属工業株式会社若松工場



第 1 図 ロール表面のチルはげ



第 2 図 ロールギャップの概略図

断力分布が連続的に変化するような解を求める必要がある。そのためには Karman の方程式を次式のように考えるとよい。

$$\frac{dy}{dz} + R(z)y = T(z) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$R(z) = -\frac{2}{\gamma} \frac{\mu(z)}{1+z^2}, \quad T(z) = \frac{2z}{1+z^2}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_2}{r}}, \quad z = \frac{x}{\gamma r}$$

r : ロール半径

h_2 : 被圧延材の出口側の板厚

x : ロール中心軸を結ぶ垂線から被圧延材入口側への距離

$\mu(z)$: ロールギャップにおける摩擦係数の分布

第 2 図にロールギャップの概略図を示す。(1)式の一般解は次式で

第 1 表 圧延スケジュール

| スタンド No. | ストリップ幅 (mm) | h_1 (mm) | h_2 (mm) | 材料温度 (°C) |
|----------------|----------------|------------|------------|--------------|
| F ₁ | 1,310 | 21 | 12 | 1,000 |
| F ₂ | 1,310 | 12 | 8.0 | 970 |
| F ₃ | 1,310 | 8.0 | 5.5 | 940 |
| F ₄ | 1,310 | 5.5 | 3.7 | 910 |
| F ₅ | 1,310 | 3.7 | 3.2 | 880 |
| F ₆ | 1,310 | 3.2 | 2.8 | 850 |

(注) ロール直径 27 インチ (675 mmφ)

第 2 表 圧延圧力分布とせん断力分布の最大値

| スタンド No. | $\Delta h/h_1$ (%) | L (mm) | $\bar{\mu}$ | P_0/S_0 | P_0 (kg/mm ²) | q_b | q_f |
|----------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------------------|------------|------------|
| F ₁ | 43 | 55.0 | 0.35 | — | — | — | — |
| F ₂ | 33 | 36.6 | 0.36 | — | — | — | — |
| F ₃ | 31 | 29.0 | 0.37 | 4.1 | 62 | 0.32 P_0 | 0.31 P_0 |
| F ₄ | 33 | 24.5 | 0.38 | 6.0 | 98 | 0.32 P_0 | 0.31 P_0 |
| F ₅ | 14 | 13.0 | 0.39 | 3.1 | 47 | 0.34 P_0 | 0.34 P_0 |
| F ₆ | 13 | 11.6 | 0.40 | 3.3 | 50 | 0.35 P_0 | 0.35 P_0 |

与えられる。

$$y = e^{-\int R(z) dz} \left(\int e^{\int R(z) dz} T(z) dz + C \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

被圧延材の降伏応力を S_0 とすれば、圧延圧力分布 $p(z)$ 、せん断力分布 $q(z)$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$p(z) = s_0 y \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q(z) = \mu(z) p(z) = s_0 \mu(z) y \quad \dots\dots\dots (4)$$

(2) 式の積分定数は $z=0$ で被圧延材の張力はないものとする $y=1$ の境界条件から $C=1$ となる。 $\mu(z)$ は次式で与えられるものとする。

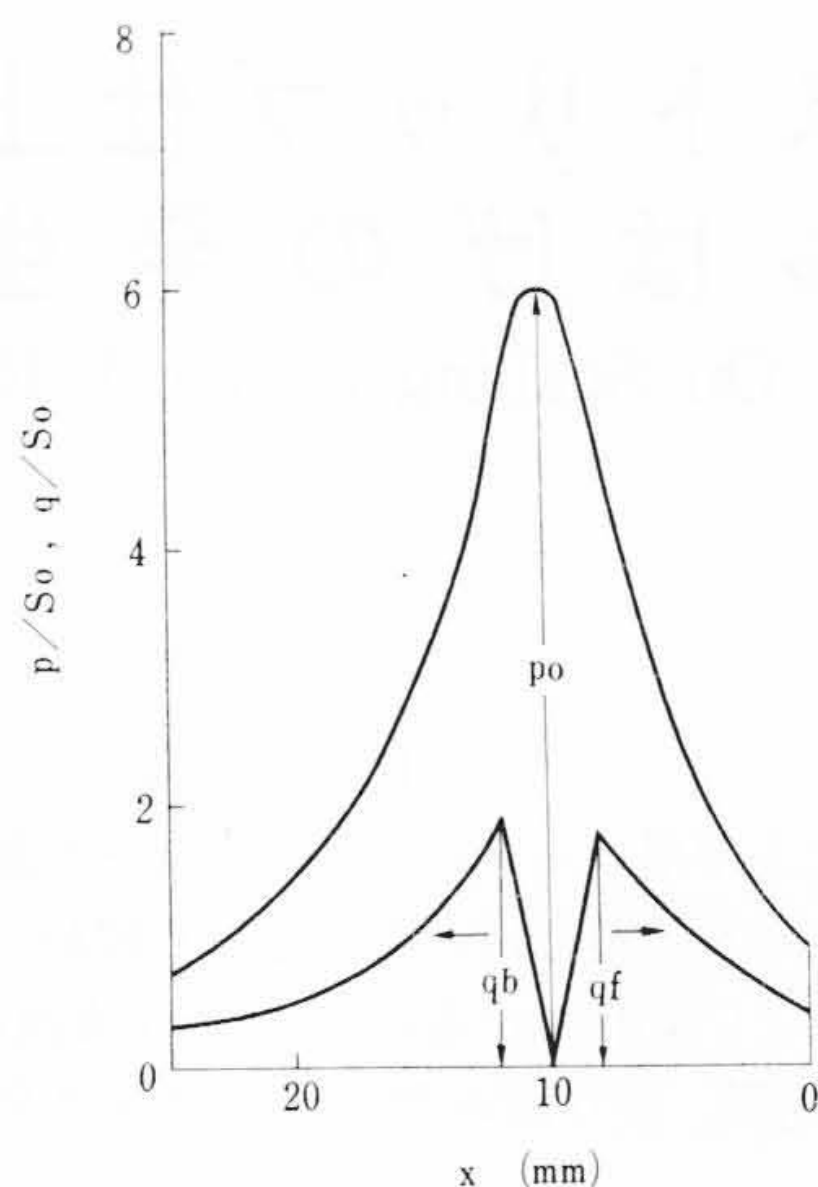
$$\mu(z) = \begin{cases} \bar{\mu} & , 0 < z < l_0 - \frac{N}{2} \\ -\frac{2\bar{\mu}}{N}z + \frac{2l_0\bar{\mu}}{N} & , l_0 - \frac{N}{2} < z < l_0 + \frac{N}{2} \\ -\bar{\mu} & , l_0 + \frac{N}{2} < z < l \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 l_0 : 中立点に対応する z の値
 l : 接触長さ L に対応する z の値
 N : 中立ゾーンの幅
 $\bar{\mu}$: 平均摩擦係数

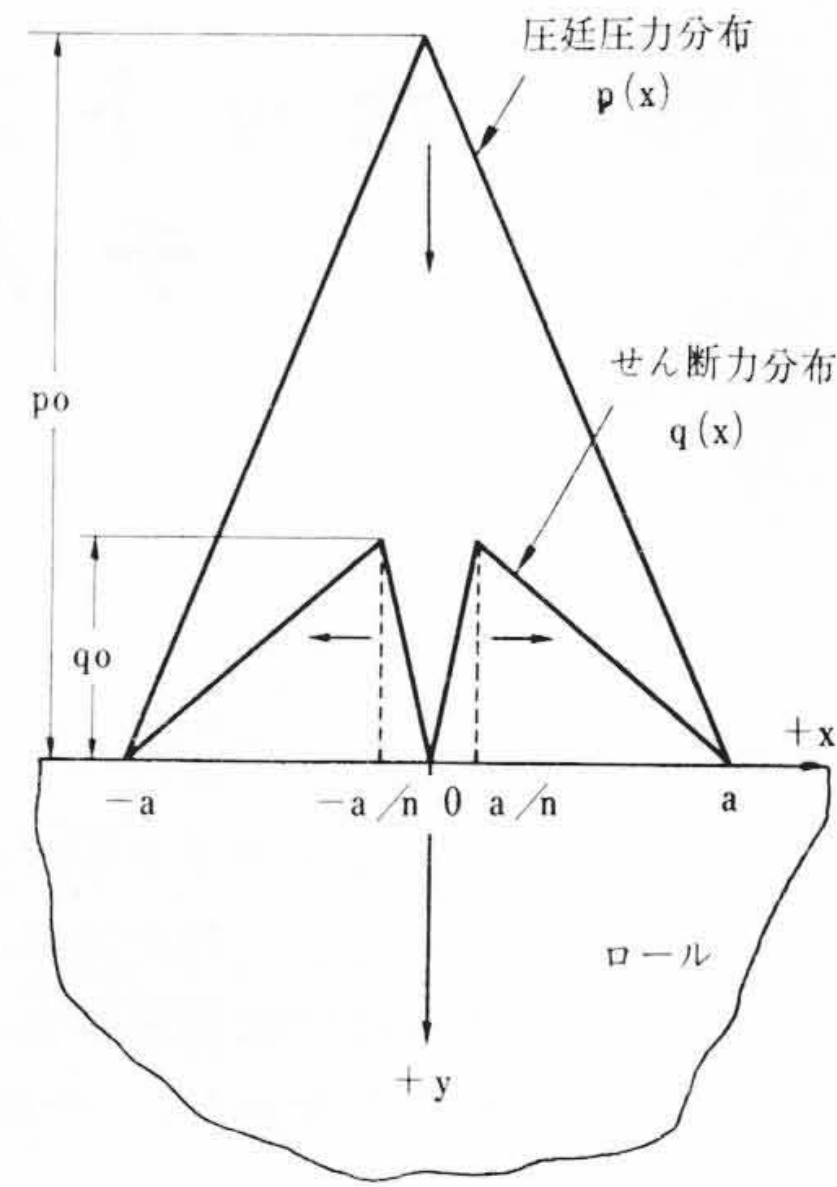
$\mu(z)$ が中立点を境に符号が反転するのは後進フローから前進フローへの変化を意味する。

2.2 ホットストリップの圧延圧力分布とせん断力分布

わが国の代表的なホットストリップ仕上げスタンドの圧延スケジュールを第 1 表に示す。第 1 表の圧延スケジュールからロール表面付近の応力解析に必要な接触長さ (L)、圧下率 ($\Delta h/h_1$)、平均摩擦係数 ($\bar{\mu}$)、およびこれらの数値を用いて (2) 式から求めた圧延圧力分布の最大値 p_0 と後進フローのせん断力分布の最大値 q_b 、前進フローのせん断力分布の最大値 q_f を第 2 表に示す。平均摩擦係数はグレーンロールと鋼板との間で成立する実験式⁽¹⁾ $\bar{\mu} = 0.80(1.06 - 0.005\theta)$ から求めた。 θ は被圧延材の温度 (°C) である。被圧延材の降伏応力は Siebel らの実験結果⁽²⁾ を参照して $S_0 = 15 \text{ kg/mm}^2$ と仮定した。中立ゾーンは Booyen らの実測結果⁽³⁾ を参照して $L/6$ にとった。第 3 図に一例として F_4 スタンドの圧延圧力分布とせん断力分布を示す。



第 3 図 正常圧延時の圧延圧力 (F₄ スタンド)



第 4 図 外力分布の近似図

3. ロール表面付近に発生する応力

第 3 図に示したような外力分布を、応力場の計算が簡便になるように第 4 図に示すような中立点で対称かつ直線的な分布で近似するものとする。しかるとき、圧力分布およびせん断力分布は次式で与えられる。

$$p(x) = -\frac{p_0}{a}|x| + p_0, \quad |x| \leq a \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$q(x) = \begin{cases} \frac{nq_0}{a}|x| & , |x| \leq \frac{a}{n} \\ -\frac{nq_0}{(n-1)a}|x| + \frac{n}{n-1}q_0 & , \frac{a}{n} \leq |x| \leq a \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

外力の作用域がロール円周に比べて小さいので半無限平面応力問題として考える。 $p(x)$ および $q(x)$ なる外力が作用したとき、点 (x, y) に発生する応力は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(u)(x-u)^2 y}{\{(x-u)^2 + y^2\}^2} du \\ &\quad - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{q(u)(x-u)^3}{\{(x-u)^2 + y^2\}^2} du \\ \sigma_y &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(u)y^3}{\{(x-u)^2 + y^2\}^2} du \\ &\quad - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{q(u)(x-u)y^2}{\{(x-u)^2 + y^2\}^2} du \\ \tau_{xy} &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(u)(x-u)y^2}{\{(x-u)^2 + y^2\}^2} du \\ &\quad - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{q(u)(x-u)^2 y}{\{(x-u)^2 + y^2\}^2} du \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(6) 式と (7) 式を (8) 式に代入して定積分を行なえば次式をうる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{p_0}{\pi} \left\{ \frac{y}{a} \left[\ln \frac{(a+x)^2 + y^2}{x^2 + y^2} + \ln \frac{(a-x)^2 + y^2}{x^2 + y^2} \right] \right. \\ &\quad + 2 \frac{|x|}{a} \tan^{-1} \frac{|x|}{y} - \frac{a+x}{a} \tan^{-1} \frac{a+x}{y} \\ &\quad \left. - \frac{a-x}{a} \tan^{-1} \frac{a-x}{y} \right\} - \frac{q_0}{\pi} \{f(x, y) + f(-x, y)\} \\ \sigma_y &= \frac{p_0}{\pi} \left\{ 2 \frac{|x|}{a} \tan^{-1} \frac{|x|}{y} - \frac{a+x}{a} \tan^{-1} \frac{a+x}{y} \right. \\ &\quad \left. - \frac{a-x}{a} \tan^{-1} \frac{a-x}{y} \right\} + \frac{q_0}{\pi} \{g(x, y) + g(-x, y)\} \\ \tau_{xy} &= \frac{p_0}{\pi} \frac{y}{a} \left(\tan^{-1} \frac{a+x}{y} - \tan^{-1} \frac{a-x}{y} - 2 \tan^{-1} \frac{x}{y} \right) \\ &\quad + \frac{q_0}{\pi} \{h(x, y) + h(-x, y)\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= \frac{3ny}{a} \left\{ \tan^{-1} \frac{x}{y} + \frac{1}{n-1} \tan^{-1} \frac{x-a}{y} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{n}{n-1} \tan^{-1} \frac{x-\frac{a}{n}}{y} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{nx}{a} \right) \ln \left\{ \left(x - \frac{a}{n} \right)^2 + y^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{n}{n-1} \left(\frac{x}{a} - 1 \right) \ln \{ (x-a)^2 + y^2 \} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{nx}{a} \ln (x^2 + y^2) \right\} \\
 g(x, y) &= \frac{ny}{a} \left(\tan^{-1} \frac{x}{y} + \frac{1}{n-1} \tan^{-1} \frac{x-a}{y} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{n}{n-1} \tan^{-1} \frac{x-\frac{a}{n}}{y} \right) \\
 h(x, y) &= \frac{ny}{a} \left\{ \ln \frac{x^2 + y^2}{\left(x - \frac{a}{n} \right)^2 + y^2} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{n-1} \ln \frac{(x-a)^2 + y^2}{\left(x - \frac{a}{n} \right)^2 + y^2} \right\} \\
 &\quad + \frac{nx}{a} \left(\tan^{-1} \frac{x-\frac{a}{n}}{y} - \tan^{-1} \frac{x}{y} \right) \\
 &\quad + \frac{n}{n-1} \frac{x-a}{a} \left(\tan^{-1} \frac{x-\frac{a}{n}}{y} - \tan^{-1} \frac{x-a}{y} \right)
 \end{aligned}$$

中立ゾーンが $L/6$ の場合は $n=6$ にとればよい。

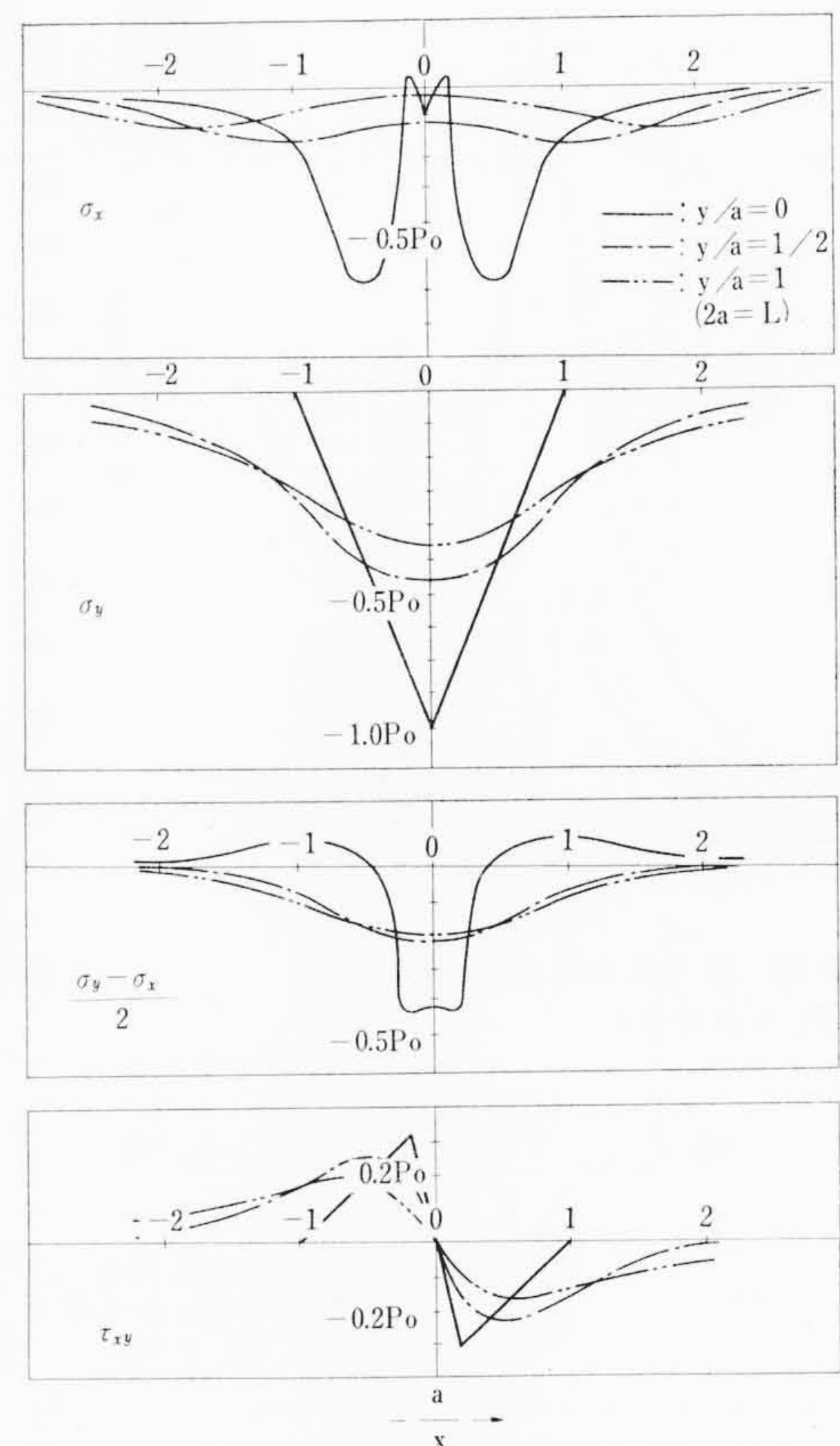
第5図に F_4 スタンドについて (9) 式を用いて計算した応力場を示す。この場合, 第2表の結果から $q_0 = (q_b + q_f)/2 = 0.315p_0$ にとった。

第5図の結果から明らかなように, ロール表面中立点近傍の σ_x はわずかに引張応力になる。この傾向は F_5, F_6 スタンドの場合のほうが顕著で約 $0.1p_0$ に達する。 x 軸と y 軸に対して45度なる面に作用するせん断応力 $(\sigma_y - \sigma_x)/2$ (以下 τ_{45} と記す) はロール表面中立点近傍において最大となり, 内部にゆくにしたがって減少する。その最大値は F_4 スタンドにおいては約 $0.4p_0$ であるが, F_5, F_6 スタンドのほうが大きくなり約 $0.5p_0$ になる。 τ_{45} はほぼ片振りに近い振動をするが, これに対して τ_{xy} は両振りで τ_{45} に比べて振幅は大きい。 τ_{xy} はロール表面で最大値をとり, 内部へゆくにしたがって減少する。 F_4 スタンドの τ_{xy} の最大振幅は約 $0.6p_0 (\pm 0.3p_0)$ であるが, F_5, F_6 スタンドのほうが大きくなり約 $0.7p_0$ になる。

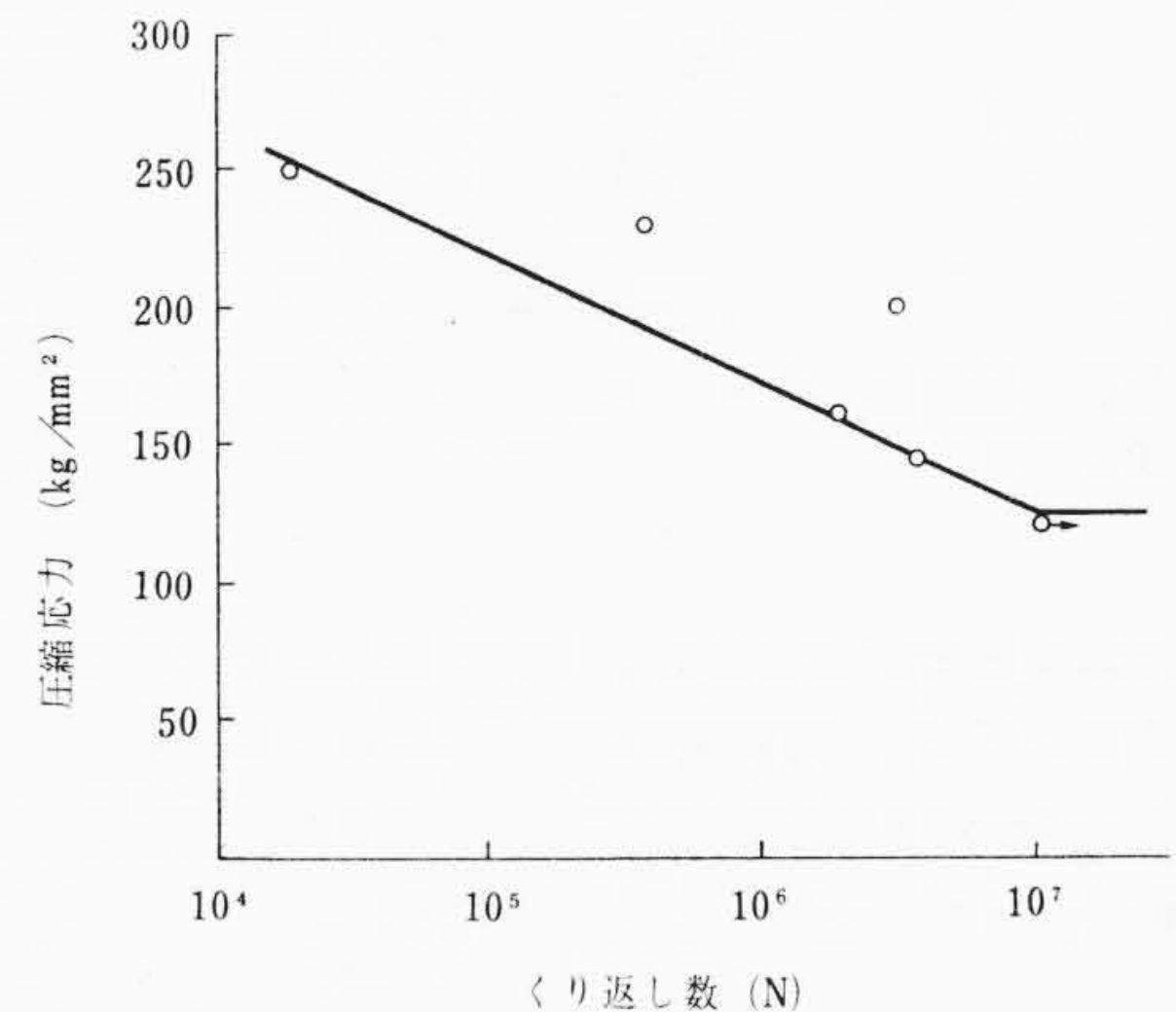
正常圧延の場合の p_0 は第2表に示したように 100 kg/mm^2 以下である。ロール表面付近に発生する応力のなかで, ロールの破壊にもっとも大きな影響を与えるものとして応力振幅の大きな τ_{xy} が考えられる。 p_0 の高い F_4 スタンドでは τ_{xy} の振幅は約 60 kg/mm^2 である。第6図にロール表面部から試料を採取し, バイブルフォアで圧縮疲労試験を行なった結果を示す。第7図に試験片寸法を示す。第6図から τ_{45} の疲労強度は 62 kg/mm^2 であることがわかる。ロールに作用する τ_{xy} は両振りであるが, 圧縮疲労試験の τ_{45} は片振りである。一応, 応力振幅から考えると, ロール表面にクラックが既存している場合, クラックは τ_{xy} によって進展するであろうと考えられる。

4. 絞り込み現象

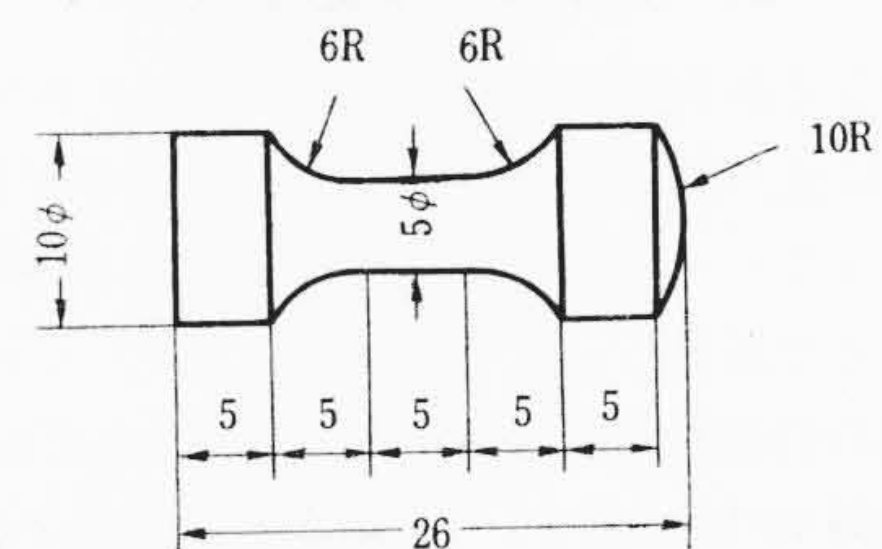
被圧延材が二重になって絞り込んだ場合の圧延圧力分布とせん断力分布を求めてみる。その場合, (2) 式を計算するにあたって h_1 を



第5図 ロール表面付近に発生する応力場 (F_4 スタンド)



第6図 圧縮疲労試験結果

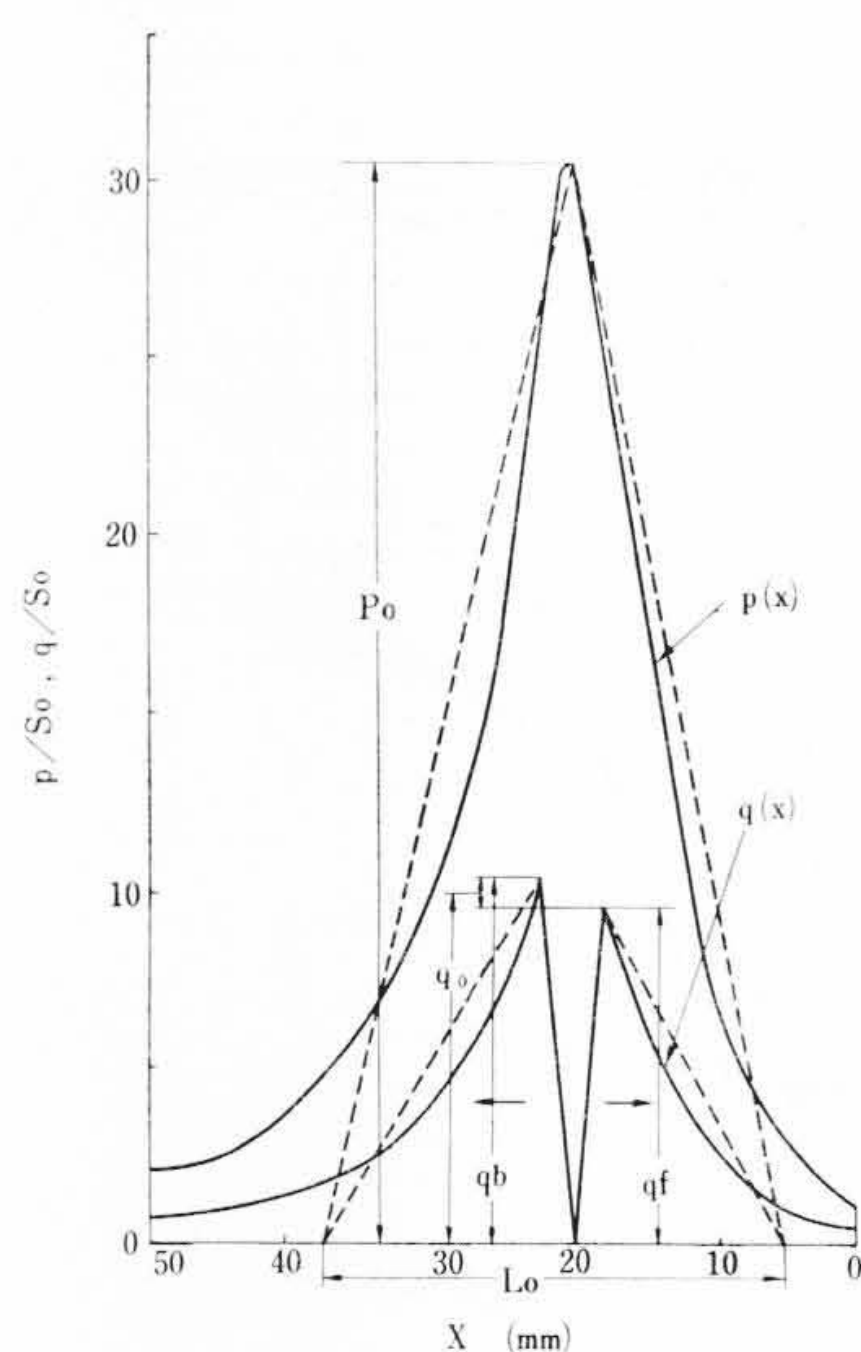
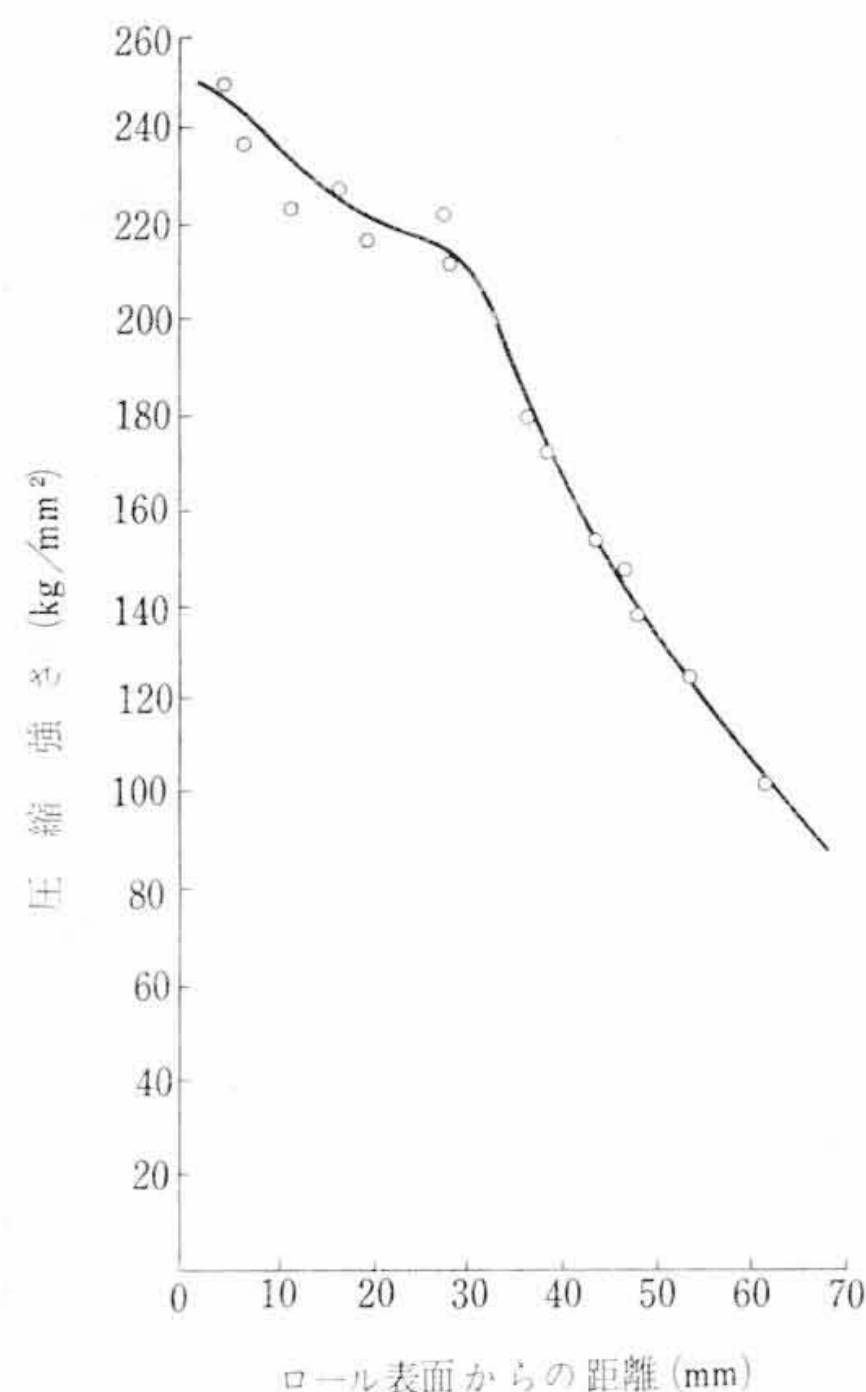


第7図 試験片形状

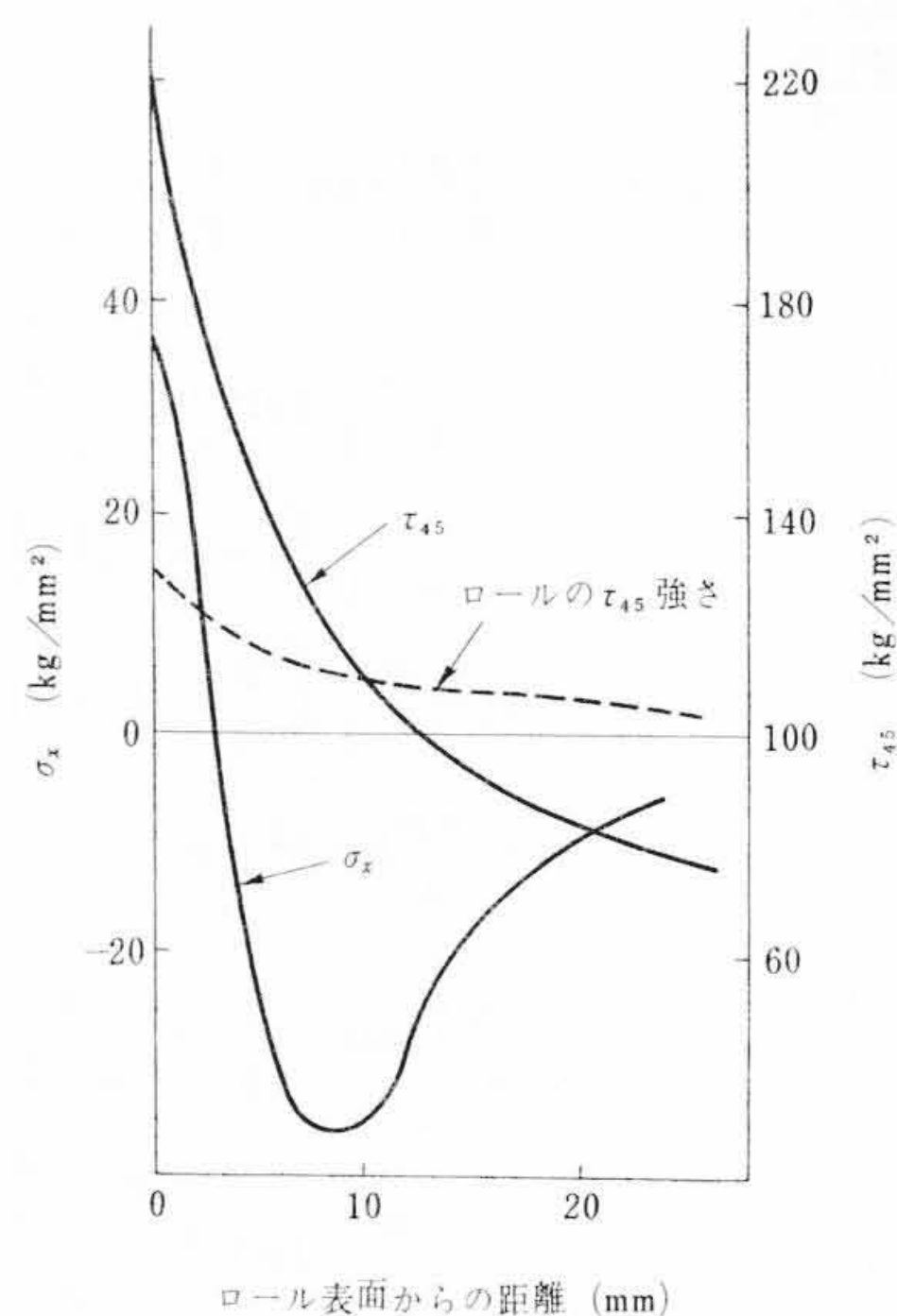
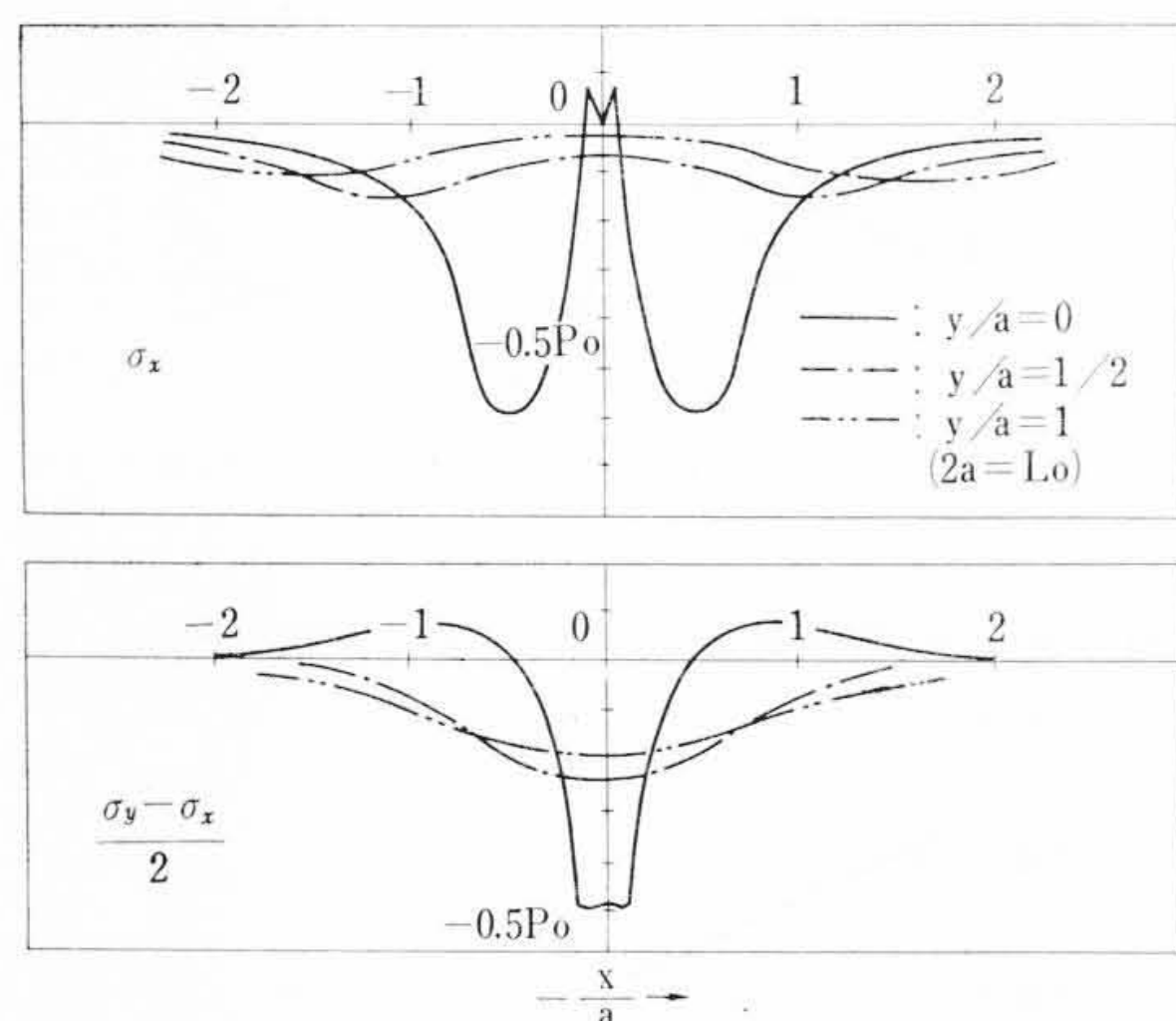
$2h_1$ とし, 中立ゾーンは正常圧延のときと同じ幅であると仮定する。

第8図に F_4 スタンドにおいて絞り込みが起きた場合の圧延圧力分布とせん断力分布を示す。圧延圧力分布の最大値 p_0 は $p_0 = 30.4S_0 \div 450 \text{ kg/mm}^2$ となる。せん断力分布の最大値と p_0 の関係は $q_b = 0.34p_0, q_f = 0.31p_0$ となる。

第8図の外力分布がロール表面に作用したときのロール表面付近の応力場は3章で求めたと同じ方法で計算することにする。ただし, $p(x)$ および $q(x)$ を $\int_0^L p(x)dx, \int_0^L q(x)dx$ がそれぞれ等しいように直線で近似するものとする。したがって外力の作用する領域は接触長さよりせまくなる。せん断力分布の最大値 q_0 は $q_0 = (q_b + q_f)/2 = 0.325p_0$ にとった。外力分布の近似直線を第8図中に鎖線で

第8図 絞り込み時の圧延圧力 (F₄ スタンド)

第10図 ロールの圧縮強さ

第11図 絞り込みによって生ずる応力 (F₄ スタンド)第9図 絞り込み時ロール表面付近に発生する応力場 (F₄ スタンド)

示す。

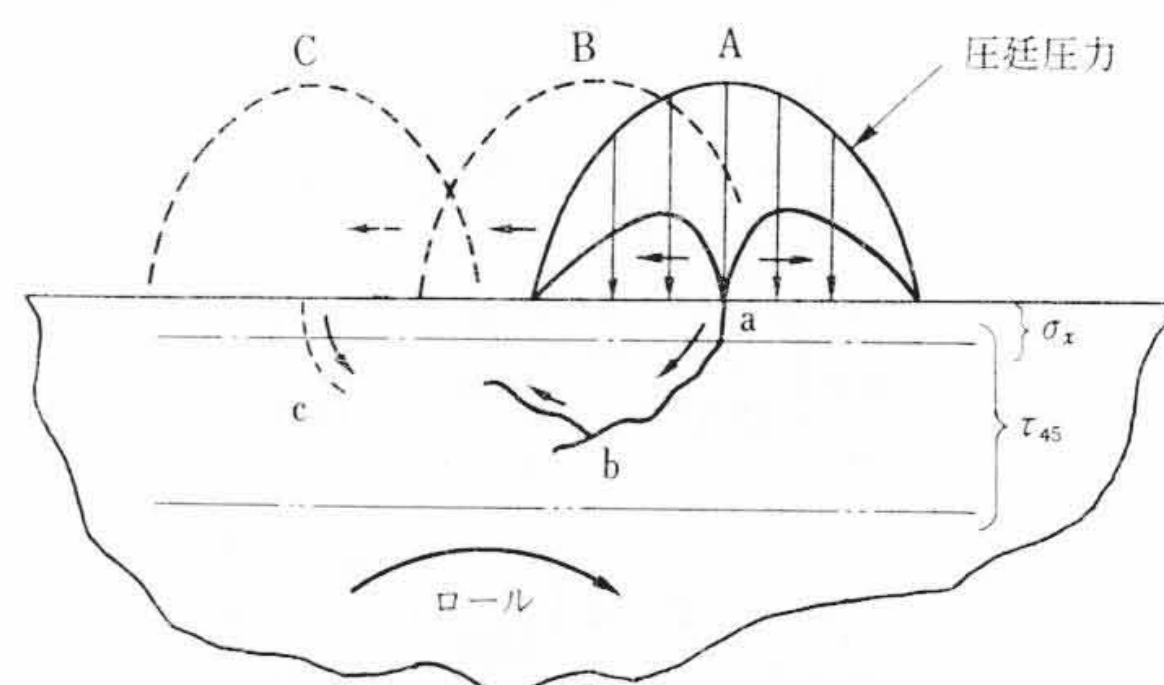
第9図に第8図の直線分布を(9)式に代入して求めたロール表面付近の応力場を示す。第9図の結果からロール表面中立点近傍に $0.08p_0 = 36 \text{ kg/mm}^2$ 程度の引張応力が発生する。またその点における τ_{45} は $0.49p_0 = 220 \text{ kg/mm}^2$ である。

5. チルはげの発生機構

絞り込み現象なる異状圧延が起きたとき、F₄ スタンドの場合 p_0 は正常圧延のときに比べて4.5倍になる。被圧延材がしわ状になって三重に折り重なってロールギャップにはいる絞り込みの場合、 p_0 はさらに大きくなるであろう。

ロール表面部の引張り強さは $35 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$ である。また、圧縮試験の結果を第10図に示す。試験片寸法は第7図に示したものと同一である。

第11図は絞り込んだときロール表面中立点近傍の応力分布を示す。第11図中に鎖線で示したのはロールのせん断強さである。第11図からわかるようにロール表面から1mmあたりまでの σ_x はロール材の引張り強さ程度の値をとる。またその近傍に生じている τ_{45} はロール材の τ_{45} 強さ以上になっている。そのためにロール表面から容易にクラックが発生しロール内部へ進展するであろう。ロールが回転するにつれて表面に作用する圧延圧力は第12図に示すように移動する。 τ_{45} は圧延圧力分布の中立点直下において最大であるから、クラックはロールの回転とともにロールの円周方向に進展するであろう(第12図のb点)。 σ_x および τ_{45} によって破断する範囲をそれぞれ第12図中に一点鎖線および二点鎖線で示した。 τ_{45} は表面



第12図 クラックの進展状況

に近いほど大きいから、ある程度内部まで進展したクラックはこんどは表面に向かって進展しようとする。圧延圧力分布が最初のクラック発生場所(第12図のa点)に近い間はクラックの影響で σ_x はいくぶん開放されるが、a点から離れるにつれて σ_x は初期の値に達し、新たにロール表面にクラックが発生するであろうと考えられる。(第12図c点)。一回の絞り込みによってb点とc点がつながった場合はチルはげとしてロール表面がはげる。またクラック発生だけで止ったとしても、その後の圧延によってクラックはだんだん進展するであろう。この場合は3章で述べたように τ_{xy} が影響し、やがてはチルはげになるものと考えられる。

6. 結 言

ロール表面に作用する圧延圧力による外力分布を求める場合、被圧延材の進展および後進フローによって生ずるせん断力分布がロールギャップの中立点で連続的に変化するように圧延理論の基礎方程式を解く必要がある。この報告では摩擦係数を変数として方程式の解を求めた。

ロール表面付近に発生する円周方向の主応力は、せん断力の影響を受けて表面中立点近傍で引張力になる。また、せん断応力は表面で最大となる。

絞り込み現象によって圧延圧力の最大値は正常圧延のときに比べて大きくなる。チルはげはそのときの接線方向の引張応力とせん断応力によって発生するであろうと考えられる。

終わりに、本研究の遂行に当たりご助言、ご指導を賜った九州大学石橋教授に深謝する。

参 考 文 献

- (1) W. Trinks: Blast Furnace and Steel Plant (July, 1937) 713
- (2) E. Siebel: The Plastic Forming of Metals (1932)
- (3) G. T. Booyen, W. A. Backofen: J. Iron & Steel Inst. (June, 1957) 235