

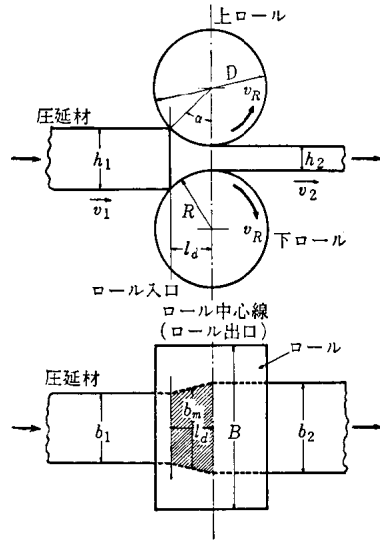
第1編 圧延法

1. 圧延理論と変形抵抗¹⁾

1.1. 圧延加工の機構

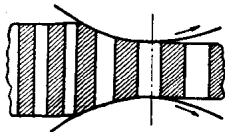
1.1.1. 圧延材料の塑性変形

図 1.1.1 は鋼板を圧延する場合を例にとり、側面および上面から観察したときのロールと材料の関係を示したものである。ここで、ロール直径 D 、ロール半径 R 、ロールパレル B 、入口板厚 h_1 、出口板厚 h_2 、入口板幅 b_1 、出口板幅 b_2 、入口速度 v_1 、出口速度 v_2 、ロールと板の接触している角度、すなわち接触角またはかみ込み角 α 、ロールと板の接触部の水平長さを l_a とする。ロールは矢印の方向に回転することにより入口から材料をかみ込み、板厚方向に圧縮作用を加えながら板厚を減少させて出口から出してやる。材料がロールの回転とともに引き込まれていくのは、材料とロールの間の摩擦力による。



【図 1.1.1】 圧延ロールと圧延材

材料は厚さの減少と同時に少し幅方向にもひろがる。冷間圧延ではロールと板の間の潤滑が良好ですべり摩擦状況であるが、理想的に考えると、一般に圧延前に垂直であった断面は図 1.2 のように圧延後も垂直になる。これを理想

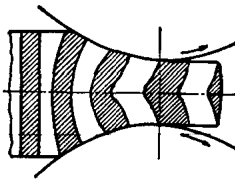


【図 1.1.2】 理想変形
(均一変形)

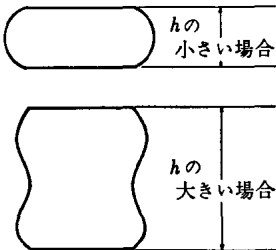
変形という。しかし、実際の圧延では図 1.1.3 に示すように不均一変形となり、圧延前に垂直であった断面は付加的せん断変形により曲がって、圧延表面のほうの方が板の中央部よりも先に進むことになる。とくに熱間圧延ではロールと板の間ですべりのない固着摩擦状態がひろい範囲で現われ、この傾向を助長する。熱間圧延では摩擦係数や板厚減少が大きいため、幅方向の変形も現われ、図 1.1.4 に示すように、板厚の小さい場合にはシングルパレル、板厚の大き

1) 加藤健三：金属塑性加工学 (1971), p.113 (丸善)

2 1. 圧延理論と変形抵抗

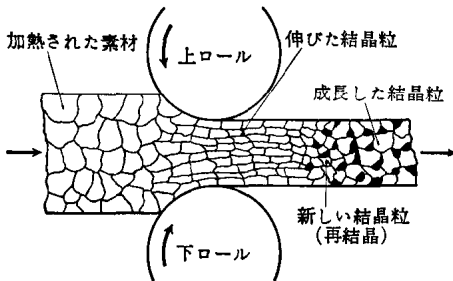


【図 1.1.3】 実際の変形
(不均一変形)



【図 1.1.4】 幅方向のパレル変形

び加工中の成分の拡散によって偏析を均一化する, (2) 樹枝状晶を変形させて破壊する, (3) 加工によって変形した結晶粒は冷却中に再結晶して微細化する, (4) 偏析あるいは介在物は変形方向に伸びて繊維状組織となり, 繊維方向のじん性が向上する, などの効果をあげることができる。

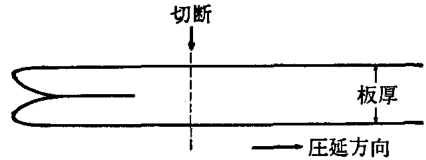


【図 1.1.6】 鋼の熱間圧延中における結晶粒の変化

冷間圧延では結晶のすべり変形によって転位はその数を増し, たがいにからみあって動きにくくなるため加工硬化が生じ, 結晶粒は圧延方向に長く伸び, 粒の方位は回転して加工集合組織を形成する。鋼の場合の組織はフェライトとセメンタイトから成っている。このうちフェライトは軟かく大きな変形が可能であるが, セメンタイトは硬いために変形の障害となり, 余分なひずみエネルギーが蓄積されてますます加工硬化を早める。微細な層状パーライト組織ではセメンタイトもフェライトとともによく伸び, 比較的一様な層状組

い場合にはダブルパレル状態になる。また, 板の表面に近い部分がよく圧延されて伸びるため, 圧延材の後端部では図 1.1.5 に示すようなフィッシュテール (fish tail) と称する 2 枚板が生じ, 切断除去が必要となり無駄となるので, その防止法の研究が必要である。

铸造されたままの鋼の組織は粗大な樹枝状晶を示し, 成分の偏析, 気泡などの欠陥をふくんでおり, じん性に欠けるとともに機械的性質が変化しやすい。これはオーステナイト温度範囲で熱間圧延することにより, (1) 加工前の均熱時およ



【図 1.1.5】 フィッシュテール

図 1.1.6 に鋼の熱間圧延時の組織変化を示すが, 変形後, 冷却中に再結晶し, 加工度と温度できまる粒度のオーステナイトが形成され, さらに冷却過程でフェライトとパーライトになる。したがって熱間圧延後室温に冷却されたときの組織は完全焼きなまし状態に似ている。最終仕上げ温度が変態点直上の上のときには組織は最も微細になる。

織となり、加工後の強さも高く、じん性も良好である。さらに大きな変形を加えるためには球状パーライト組織にする必要がある。

最近では、強さの高い鋼材を得るために、通常の熱間圧延温度よりも低い制御圧延や温間圧延も利用されるようになった。

1.1.2. 圧下量と圧下率

圧延で変形加工の程度を表示するには、圧下量か圧下率が用いられる。圧下量 Δh は入口板厚 h_1 と出口板厚 h_2 の差で

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (1.1)$$

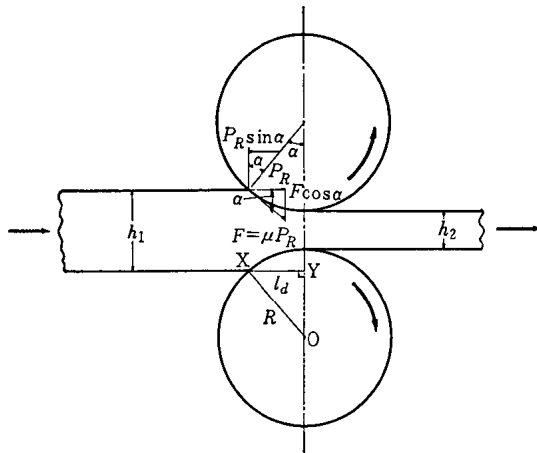
圧下率は圧下量を入口板厚で割ったもので

$$\Delta h/h = (h_1 - h_2)/h_1 \quad (1.2)$$

圧下率は普通、慣用ひずみの形で表示し、圧下率何パーセントとよんでいる。

1.1.3 接触角 (かみ込み角)

ロールと板の接触している部分の中心角 α を接触角またはかみ込み角とよぶ。さてロール入口について考えると、図 1.1.7 に示すように、ロール中心力 P_R の作用によりロールの回転とともにロールの接線方向に摩擦力 F がはたらき、材料はロールにかみ込まれていく。しかし、かみ込み力の水平成分を H とし、ロールと材料間の摩擦係数を μ とすると、摩擦力 F の水平成分 $F \cos \alpha$ がロール中心力 P_R の水平成分 $P_R \sin \alpha$ に打ち勝たなければ押しもどされることになるので、つぎの条件が必要となる。



【図 1.1.7】 圧延ロールと圧延材の間に作用する力

$$H = F \cos \alpha - P_R \sin \alpha > 0 \quad (1.3)$$

$$F \cos \alpha > P_R \sin \alpha$$

$$F/P_R > \tan \alpha$$

$$\mu > \tan \alpha \quad (1.4)$$

4 1. 圧延理論と変形抵抗

1.1.4. 接触長さ

ロールと材料の接触している部分の水平投影長さ l_a を、接触長さまたは投影接触長さとしてよぶ。 l_a の値は図 1.1.7 で $\triangle OXY$ を考えると、次式で求められる。

$$\begin{aligned} l_a^2 &= R^2 - \overline{OY}^2 = R^2 - \{R - (h_1 - h_2)/2\}^2 \\ &= R(h_1 - h_2) - (h_1 - h_2)^2/4 \end{aligned}$$

第2項は第1項に比べて無視できるものと考え、近似的に接触長さ l_a は次式となる。

$$l_a = \sqrt{R(h_1 - h_2)} = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1.5)$$

この式はロールが真円の場合に成立するもので、ロールが扁平変形を生じた場合は後で述べる。

1.1.5. 中立点

板幅が十分に大きい場合は、幅広がりや全幅に比べてきわめて小さいので無視すれば、圧延前後の材料の体積は一定であるから、ロール間の任意の点を単位時間に通過する材料の量は等しくなる（メタルフロー一定）ので、板幅一定として板厚 h と通過速度 v の積は一定の値になり、次式が成立する。ただし、この場合、圧延前後で材料の垂直断面はそのまま垂直で、密度も不変であると仮定する。

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 = h v \quad (1.6)$$

ここで、 $h_1 > h_2$ であるから、 $v_1 < v_2$ となり、ロール入口から出口に近づくにつれて速度は早くなり、入口と出口の中間に材料表面速度とロール周速が等しくなる点がある。この点を中立点、または no slip point とよぶ。

ロール入口から中立点までは材料の速度よりもロールの速度が大であり、中立点で等しくなり、さらに中立点からロール出口までは材料速度のほうが大きい。したがって摩擦力の方向は、中立点の前後で逆になる。これらの条件は冷間圧延時のすべり摩擦状態に相当する。

1.1.6. 先進率

ロール出口では、材料速度はロール速度よりも大きいので、材料はロール上を先進してすべり出ることになる。ロール速度を v_R とすれば、材料のロール出口速度は v_2 であるから、材料の先進の大小は $(v_2 - v_R)/v_R$ で表わすことができる。これを先進率とよぶ。図 1.1.8 に示すように中立点のロール中心角を ϕ 、中立点における板厚を h_ϕ 、水平速度を v_ϕ とするとメタルフロー一定の法則から

$$h_2 v_2 = h_\phi v_\phi = h_\phi \cdot v_R \cos \phi \quad (1.7)$$

中立点の板厚 h_ϕ は、 $h_\phi = h_2 + 2R(1 - \cos \phi)$ であるから

$$v_2 = v_R \cos \phi \times \{h_2 + 2R(1 - \cos \phi)\} / h_2 \quad (1.8)$$

したがって、先進率は

$$(v_2 - v_R) / v_R = (1 - \cos \phi) (2R \cos \phi / h_2 - 1) \quad (1.9)$$

ここで中立点のロール中心角 ϕ を求めるには、接触角を α 、摩擦係数を μ とすると

$$\sin \phi = [\sin \alpha + (\cos \alpha - 1) \mu] / 2 \quad (1.10)$$

であるから、先進率 $(v_2 - v_R) / v_R$ を計算することができる。

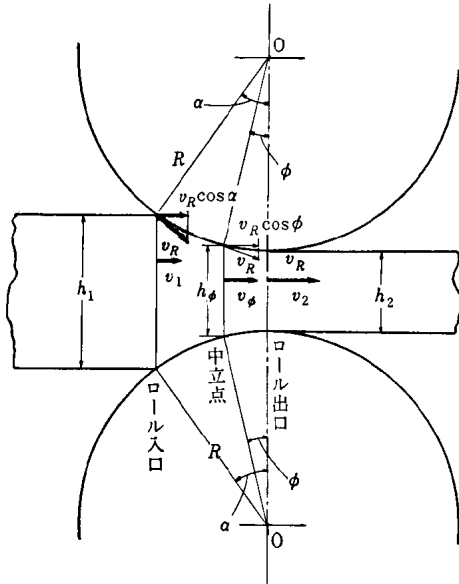
先進率の測定はロール表面に標点をつけ、圧延後に材料の表面についた刻印の間の距離を測定する方法を用いる。熱間圧延では温度が上昇すると先進率が小さくなるが、それは摩擦係数が減少するためであり、冷間圧延でも表面の粗いロールの場合にはなめらかなロールよりも先進率が大きく、摩擦係数の影響がわかる。理論式からわかるように、中立点がロール入口に一致した場合には先進率は最大値を示す。

1.1.7. 摩擦係数

圧延ロールと圧延材との間の摩擦は圧延にとって重要な存在であるが、その本質はまだ完全には解明されていない。

冷間圧延では一般にすべり摩擦条件が適合していると考えられ、中立点の前後では材料の表面はロール面上ですべりを生じており、中立点でロール表面速度と一致し、ロール出口では材料の先進が生じている。しかし、熱間圧延においては、材料の表面がロールと等速度で移動することによって材料内にせん断応力を生じて押出すような傾向になるのか、あるいは、材料の表面がロール面上ですべりするのか明確でない。ロール接触長さの全長にわたって材料とロールが等速度で動く場合を固着摩擦とよび、一般には熱間圧延では固着摩擦条件が生じやすいと考えられており、また場合によっては固着摩擦とすべり摩擦の混合した状態になっているとも考えられている。

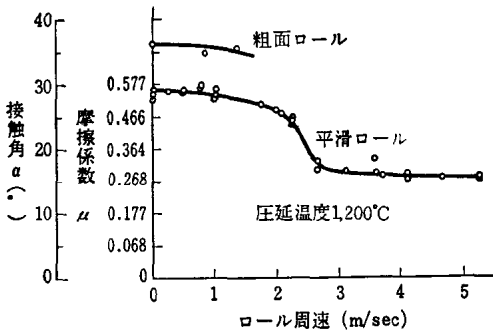
熱間圧延の摩擦係数については、Tafel¹⁾が噛み込み可能な最大接触角 α を求め、摩擦角 f に等しいとして、 $\mu = \tan f = \tan \alpha$ から摩擦係数を求めた。その結果を図 1.1.9 に示す。



【図 1.1.8】 中立点と先進

1) Tafel, W. : *Stahl u. Eisen*, 41, (1921) p. 962.

6 1. 圧延理論と変形抵抗



【図 1.1.9】 鋼の熱間圧延における接触角と摩擦係数 (Tafel)

表面の粗いロールの場合は平滑なロールよりも摩擦係数は大きな値を示し、また、ロール周速が速くなると摩擦係数が低下することがわかる。

Ekelund¹⁾は同様な方法で圧延温度を変化させて摩擦係数 μ を求め、700°C以上の温度では次式が成立するとした。ここで t は圧延温度[°C]である。

$$\text{鋼ロール } \mu = 1.05 - 0.0005 t \quad (1.11)$$

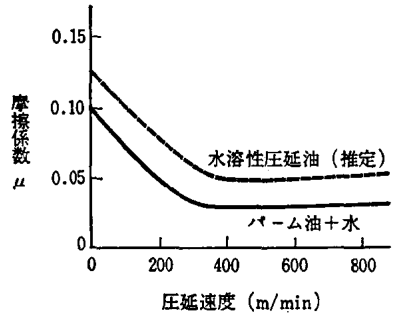
$$\text{研摩鋼ロール } \mu = 0.82 - 0.0005 t \quad (1.12)$$

Gelejiは圧延速度の影響を考慮して補正を加え、次式を示している。圧延速度を v m/secとして

$$\mu = 1.05 - 0.0005 t - 0.056 v \quad (1.13)$$

$$\mu = 0.82 - 0.0005 t - 0.056 v \quad (1.14)$$

冷間圧延においては圧延速度の増加とともに摩擦係数が低下を示すが、図 1.1.10はStone²⁾がバーム油潤滑の場合に圧延荷重測定値を圧延理論式に入れて求めた摩擦係数と速度の関係を示す。従来の冷間圧延の実験結果をまとめてみると、変形抵抗が高い場合の摩擦は、圧延速度が小さいところでは金属同士の静止摩擦に近いが、速度が大きくなるとすべり摩擦となり、高速度で良好な潤滑の場合は流体潤滑状態となる。変形抵抗が低い場合には潤滑の効果は低速から現われ、摩擦係数は小さい値を示す。無潤滑の場合は圧延速度の増大とともに摩擦係数は大きくなる。



【図 1.1.10】 冷間圧延における圧延速度と摩擦係数 (Stone)

1.1.8 幅広がり

圧延される材料は圧延方向に大きく変形するだけでなく、圧延と直角方向、すなわち、板幅方向にも変形を生じ、板幅を増大する。幅広がりとは高さの大きな鋼塊の分塊圧延や各

1) Ekelund, S. : Jernkontorets Ann. 111 (1927) p.39.

2) Stone, M. D. : Iron & Steel Eng., (1953) p.61.

種の形材の圧延，厚板の圧延などでは大きな値を示すが，薄板の圧延ではあまり大きくない。幅広がりに影響をあたえる因子としては，材料の幅と厚さ，材質，圧下量，ロール直径，ロール材質，摩擦係数などが考えられるが，理論的解析が困難であるために実験式が多い。

角断面を平ロールで圧延する場合については，Siebel¹⁾によれば

$$b_2 - b_1 = \Delta b = C\sqrt{R \cdot \Delta h} \cdot \Delta h / h_1 \quad (1.15)$$

ここで， C は材質でさまる係数で，鋼 0.313，鉛 0.33，銅 0.362，アルミ 0.45，それらの平均値として $C=0.35$ とした。

Ekelund は摩擦係数 μ を含む次式を示し

$$(b_2^2 - b_1^2) / 2 = 4m\sqrt{R \cdot \Delta h} \cdot \Delta h - 2m(h_1 + h_2)\sqrt{R \cdot \Delta h} \cdot \ln(b_2/b_1) \quad (1.16)$$

ここで， $m = \{1.6\mu\sqrt{R \cdot \Delta h} - 1.2(h_1 - h_2)\} / (h_1 + h_2)$

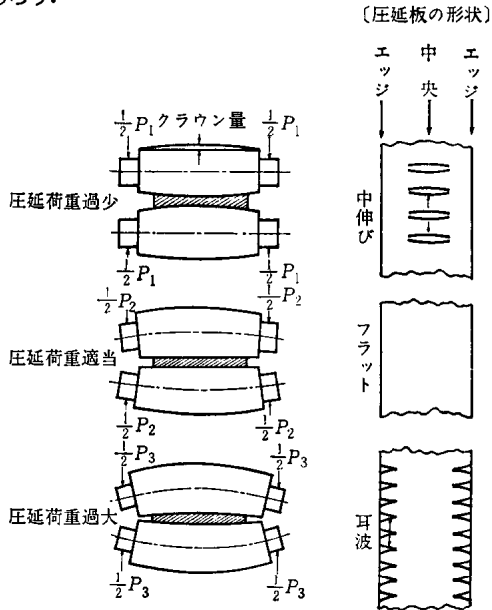
Ekelund の式は炭素鋼やステンレス鋼の熱間圧延では比較的適合性がよいようであり，摩擦係数 μ も計算できるので便利であろう。

幅広がり傾向としては，一般に板幅の比較的小さい範囲に最大値があり，板幅の大きい場合には減少を示し，ロール直径，圧下量の増加とともに大きくなって，ロール表面摩擦が大になれば大きくなる。

1.2. 圧延ロールの変形²⁾

1.2.1. 圧延ロールの曲がり

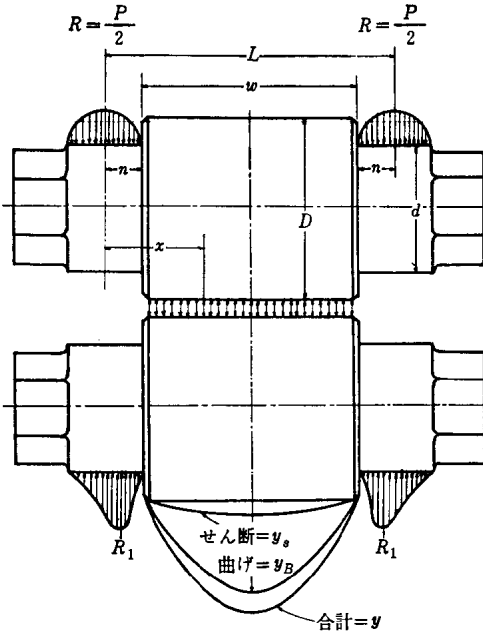
圧延ロールは円柱形状であって，圧延中に圧延材料から受ける圧延荷重によって曲げ変形を生じ，圧延荷重が大きくなると曲がりも大きくなる。この曲がりの影響を防ぐために，ロール面は軸方向に平たんにしないで，ロールパレルの中央部の直径をロール端部の直径よりわずかに大きくし，ロール面にあらかじめ曲



【図 1.1.11】 ロールクラウンと圧延荷重および圧延板の形状

1) Siebel, E. : *Stahl u. Eisen*, 43 (1923) p.1295

2) Larke, E. C. : *The Rolling of Strip, Sheet and Plate*, (1963) p.71, (Science Paperbacks and Chapman & Hall Ltd.)



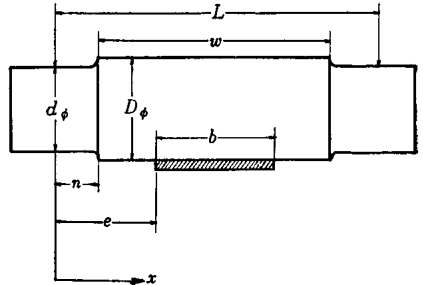
【図 1.1.12】 二段ロールの作用荷重と曲がり (Emicke)

まず、冷間圧延の場合でロールの熱変形を無視するとすれば、二段ロールの場合の荷重の作用点とロールの曲がりの状態は図 1.1.12 のようになる。ロールの曲がりにはロールバレルとネックの両方を含めて考え、圧延荷重 P に対抗するロール反力 $R = \frac{P}{2}$ はロールネック軸受部のだいたい中央に作用すると考えてさしつかえない。図のロールのようにロール径 D がロールバレル長さ w に比して比較的大きな値を示す場合は、丸棒の曲げの場合とちがひ、曲げ荷重による曲がりのほかにせん断力による曲がりを同時に考える必要がある。

ロールの曲がりを、最も一般的な場合として図 1.1.13 のようなロールバレルより板幅のせまい場合について考えて、曲げ荷重によるたわみを計算する。ネック部 $x=0$ から $x=n$ までの範囲でのたわみを y_1 、ロールバレル端部 $x=n$ から圧延板の端部 $x=(L-b)/2$

線を与えておく。これをロールクラウンまたはロールキャンパとよぶ。

図 1.1.11 はクラウンをあたえたロールに適当な圧延荷重が加わった場合と、不適当な圧延荷重が加わった場合の差を示している。圧延荷重の低い場合にはロールの曲がりも小さく、圧延材は幅の中央がよく圧延されることになり、中伸びまたは中だるみ現象を生ずる。また、圧延荷重が高すぎるとロールの曲がりが大きくなり、圧延材のエッジが強く圧延されるため耳波または縁波を生ずる。鋼板の圧延ではできるだけ平坦な製品をつくることが必要であり、圧延作業の高速化および使用者側のプレス工場の作業性から考えて、波やしわのない均一な板厚がますます要求されるようになる。



【図 1.1.13】 板幅がロールバレルより短い場合

$=e$ までの範囲でのたわみを y_2 , 圧延板の端部 $x=e$ から圧延板の中央 $x=L/2$ までの範囲でのたわみを y_3 , ロールネックおよびロールパレルの断面二次モーメントを I_a, I_D とし, 圧延荷重を P , ロール材のヤング率を E とすれば, 各範囲の曲げモーメントは

$$\left. \begin{aligned} EI_a d^2 y_1 / dx^2 &= -Px/2 \\ EI_D d^2 y_2 / dx^2 &= -Px/2 \\ EI_D d^2 y_3 / dx^2 &= -(P/2) \{x - (x-e)^2/b\} \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

(1.17) 式を 2 回積分して積分定数をきめ, 板幅 b の圧延材の範囲だけの曲げ荷重によるたわみ量を求めると

$$y_B = (P/384EI) \{8(3L^2 - b^2)(x-n) - 32(x^3 - n^3) + (2x-L+b)^4/b\} \quad (1.18)$$

つぎに, せん断荷重によるたわみを求める. ここでロール横断面内のせん断応力の分布は一様であるとして, ロール材の剛性率を G とすると, 曲げの場合と同じ各範囲について

$$\left. \begin{aligned} Gdy_1/dx &= 2P/(\pi d^2) \\ Gdy_2/dx &= 2P/(\pi D^2) \\ Gdy_3/dx &= 2P(L-2x)/(b\pi D^2) \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

板幅 b の範囲のせん断荷重によるたわみは

$$y_S = (P/2\pi GD^2) \{4x(L-x) - (L-b)^2 - 4bn\} / b \quad (1.20)$$

したがって, たわみの全量は曲げ荷重とせん断荷重による両方のたわみの和として

$$y = y_B + y_S \quad \text{ただし } (L-b)/2 \leq x \leq L/2 \quad (1.21)$$

つぎに, ロールパレルに一様な圧延荷重が作用した場合を考える. (1.18) 式と (1.20) 式の板幅 b に, $b=L-2n$ を代入すればよい.

$$y_B = \{P(x-n)/24EI\} \{(x-n)^3/w + L^2 + 2wn - 2x(x+n)\} \quad (1.22)$$

$$y_S = \{2P/\pi GD^2\} \{x(L-x) - n(L-n)\} / w \quad (1.23)$$

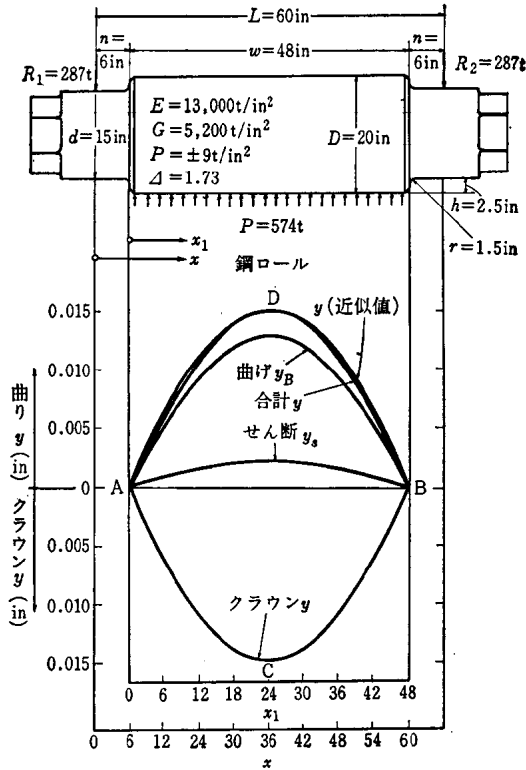
したがって, 全たわみ量は

$$y = y_B + y_S \quad \text{ただし } n \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (1.24)$$

ロールクラウンの設定は平らな圧延板を得ることが目的であるから, 図 1.1.12 に示したように最適のクラウン量が必要であり, 実際に生ずる圧延荷重とよく対応しなければならない. 図 1.1.14 は, Larke が安全を考慮して最大圧延荷重がロールパレルに一様に分布した場合のロールクラウンを計算で求めた結果である.

バックアップを使用する四段圧延機ではワークロールの曲がり是非常に減少する. バックアップロールとワークロールが円柱形状であるとみなし, 2本の丸棒の同時の曲げとして曲げ荷重によるたわみだけを考えると, バックアップとワークロールの両者のたわみは同一となり, 近似的に次式で示される¹⁾.

1) Geleji, A. (五弓訳): 金属塑性加工の計算 (上), (1964), p.163(コロナ社)



【図 1.1.14】 最大圧延荷重がロールバレルに一樣に分布した場合のロールクラウンの計算 (Larke)

$$\left. \begin{aligned} y &= (P_1/384E_1I_1)(12Lw^2 - 7w^3) \\ &+ (P_2/384E_2I_2)(12Lw^2 - 8w^3 + b^3) \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

ここで、 P_1, P_2 : バックアップロールとワークロールに作用する荷重

E_1, E_2 : バックアップロールとワークロールのヤング率

I_1, I_2 : バックアップロールとワークロールの断面二次モーメント

1.2.2. 圧延ロールの熱膨張

圧延加工中にはロール温度が上昇し、バレル中央で最大値を示し、両端に向かって低下する分布状態を示す。そのために、ロールバレル中央では熱膨張が最大となり、1.2.1のロールの曲がりと反対方向のロール変形を生ずることとなる。これをヒートクラウンとよ

ぶ。ロール温度の上昇に影響をあたえる因子としては、圧延材の熱量、ロール冷却方法、加工発生熱、ロール表面摩擦、圧下率、ロールネック軸受の摩擦熱などがあり、圧延速度やロール寸法も影響をあたえ、なかなか複雑である。要は圧延状態や冷却状態をできるだけ一定に保ってロール温度分布を一定にすることが必要である。

熱膨張はロールパレルの中央で最大であるが、ロール半径の増加量は

$$y_{tmax} = D\theta(T_m - T_e)/2 \tag{1.26}$$

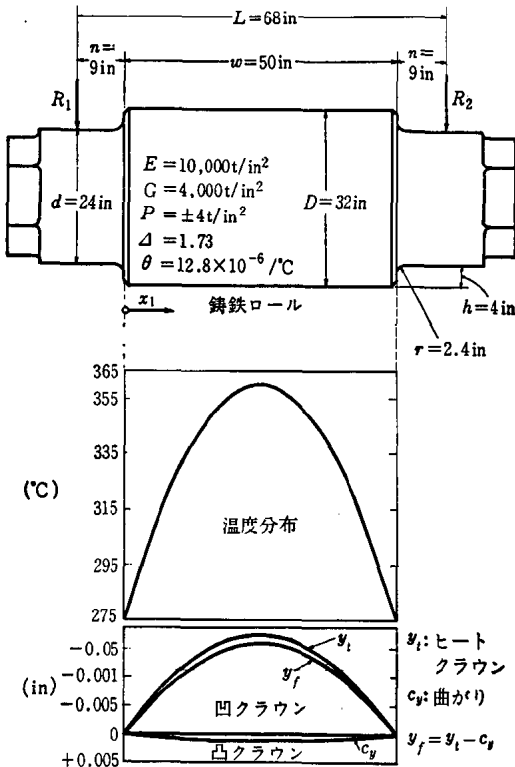
ここで、 D ：ロール直径、 θ ：線膨張係数、 T_m ：ロールパレル中央の温度

T_e ：ロールパレル端部の温度

ヒートクラウンの形状をバラボラと考えれば、クラウンのカーブの式は、

$$y_t = k(w - x_1)x_1 \tag{1.27}$$

$x_1 = w/2$ 、すなわちロールパレル中央では、 $y_t = y_{tmax}$ であるから k の値がきまり、次式が



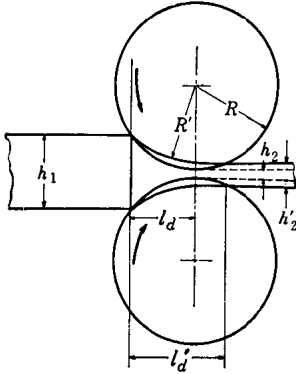
【図 1.1.15】 ヒートクラウンの一例 (Larke)

求められる。

$$y_1 = 2D \theta (T_m - T_c) (w - x_1) x_1 / w^2 \quad (1.28)$$

図 1.1.15 はヒートクラウンの一例である。

1.2.3. 圧延ロールの偏平変形



圧延加工中にロールは圧延材と接触する部分で微小の弾性変形をする。熱間圧延のように変形抵抗の低い場合は問題にはならないが、薄板の冷間圧延のように変形抵抗の高い材料を圧延する場合にはロールが偏平変形を生じ、接触長さが長くなり、圧延荷重の増加にもかかわらず接触圧力が低くなって、板厚が減少しなくなる。この場合は上下のロール同士が変形するのに対して圧延材が変形しない状態で、とくに極薄板を圧延するときに生じやすい。このようなときにはロール直径を減少し、硬いロール材質を用いる必要がある。

【図 1.1.16】 圧延ロールの偏平変形

Hitchcock¹⁾は、仮定として、接触弧における圧力分布はだ円分布とし、ロールは弾性変形後も円弧状であり、

圧延板の弾性変形を無視すると、次式をみちびいた。

$$l_d' = \sqrt{[8R(1-\nu^2)p_m'/\pi E]^2 + R \cdot \Delta h} + 8R(1-\nu^2)p_m'/\pi E \quad (1.29)$$

ここで、 l_d' ：偏平変形のときの投影接触長さ、 p_m' ：偏平変形のときの平均圧延圧力、 ν ：ポアソン比

偏平変形によりロール半径が R から R' に変形したとすれば

$$R' = R(1 + 2cP/b\Delta h) \quad (1.30)$$

ここで、 $c = 8(1-\nu^2)/\pi E$

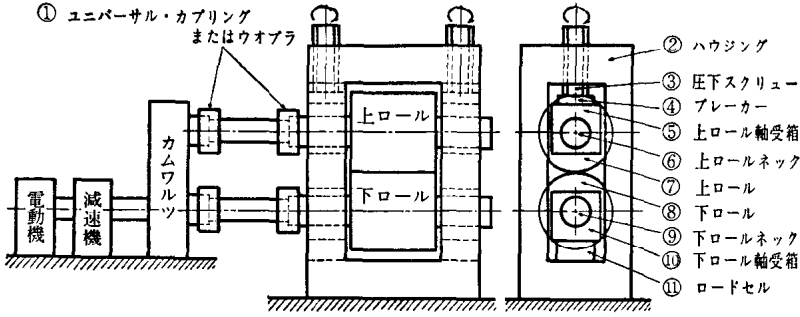
偏平変形を考慮する場合には、各圧延理論式中の R , l_d のかわりに R' , l_d' の値を用いる必要がある。

1.3. 圧延機の変形

圧延加工中には、ロール以外の圧延機部分も圧延荷重の影響をうけてわずかずつの弾性変形を生じ、みかけの圧延機の丈夫さにかかわらず、ロールすき間が増加する。この現象をミルスプリング (Mill Spring) とよんでいる。

図 1.1.17 は圧延機の荷重分担部分を略図的にみたものであり、ロールに生じた圧延荷重はロールを押し開こうとするため、ロールネック→軸受箱→圧下セクリュア→ハウジン

1) Hitchcock, J. : Roll Neck Bearing (1935), Amer. Soc. of Mech. Eng. Research Publication.



【図 1.1.17】 圧延機の構造

グの順に荷重がかかり、軸受では油膜軸受ならば油膜厚さの変化などを生じ、圧下スクリューでは圧縮変形、ハウジングでは伸び変形を生ずる。

1.3.1. 圧延機ハウジングの変形¹⁾

四角形トラスの上下に集中荷重がかかった場合としてとり扱かう。圧延機ハウジングは、図 1.1.18 に示すように、上下方向に力をうけると、上はりと下はりにたわみを生じ、柱は上下方向に伸びる。柱は内方にわずかにたわみを生ずるが、上下方向に対する影響は無視できるので、次式が成立する。

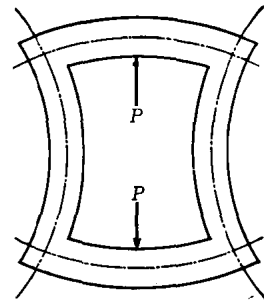
$$\text{ハウジングの変形} = \text{上はりのたわみ} + \text{下はりのたわみ} + \text{柱の伸び}$$

上下はりのたわみについては、図 1.1.19 に示すようにハウジングの形状が荷重作用点で左右対称であり、また $m/2$ 線に対して上下対称であるとすれば、ひずみエネルギー U を求めることによって上下はりのたわみ δ_0 を計算することができる。なお、柱の長さの中央点、すなわち $m/2$ 点に仮想水平力 $K/2$ が作用しているものと考えて計算する。

圧延機ハウジング全体のひずみエネルギー U は、

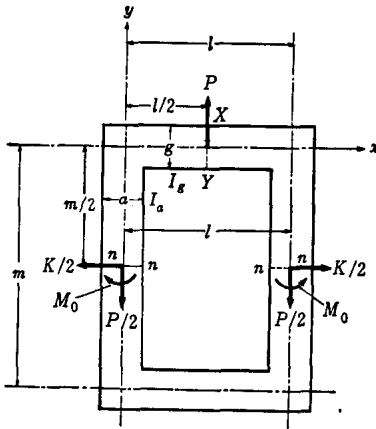
$$U = (2/EI_0) \int_0^{m/2} (M + Ky/2)^2 dy + (2/EI_0) \int_0^{l/2} (M + Km/4 - Px/2)^2 dx \quad (1.31)$$

柱の $m/2$ 線で上下対称と考えれば、 $(1/4) \left(\frac{\partial U}{\partial M} \right) = 0$ であるから、ひずみエネルギー U を曲げモーメント M で微分して 0 とおき、 M を求めると



【図 1.1.18】 圧延機ハウジングの変形 (誇張して示した)

1) 加藤健三, 籠田三郎: 日本鋼管技報, 26 (1961)



【図 1.1.19】 上下はりのたわみの計算

ひ量を ΔH とすると

$$\Delta H = (P \cdot H/2) / F \cdot E \quad (1.33)$$

ここで、 H ：柱の長さ、 F ：柱の断面積、 E ：柱の縦弾性係数

以上、(1.32) 式および (1.33) 式の合計によりハウジング全体の変形量 Δl_1 が求められる。

$$\Delta l_1 = 2 \delta_0 + \Delta H \quad (1.34)$$

1.3.2. 圧下スクリュウの変形

圧下スクリュウ、ロードセル、また圧下ブロックなどは円柱状のものが多く、単純に円柱の圧縮として、圧縮変形量 Δl_2 は次式で求められる。

$$\Delta l_2 = P \cdot l_s / A_s \cdot E \quad (1.35)$$

ここで、 P ：荷重、 l_s ：荷重のかかる長さ、 A_s ：荷重のかかる断面積

1.4. 圧延圧力分布

圧延加工のときはロールに圧延荷重が生ずるが、さらに詳細にみると、ロールの入口から出口までの圧延圧力の分布があり、その総計として圧延荷重が存在している。

Siebel と Lueg¹⁾ は圧電気効果を利用して板材圧延における圧延圧力分布を測定した。図 1.1.20 に示すようにピエゾ式圧力測定装置をロールに取り付け、圧力検出ピンがロール圧延表面に一致するようにし、ロールの回転とともにロール表面と圧延材との接触面上における圧力変化をロール入口から出口まで連続的に測定することができた。図 1.1.21

$$M = [P l^2 - \{2ml + m^2(I_g/I_a)\} K] / 8 [l + m(I_g/I_a)]$$

はりのたわみを δ_0 とすると

$$\delta_0 = (1/2) (\partial U / \partial P)_{\kappa=0}$$

したがって

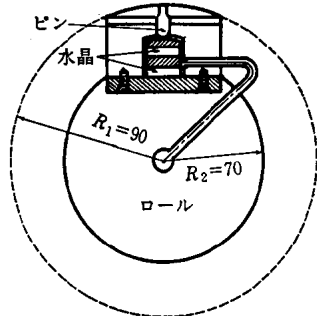
$$\delta_0 = (P/E) \{ (m/I_a) (l^2/\beta)^2 + (l/I_a) [l^2/\beta - (l/4) (l^2/\beta) + (l^2/48)] \} \quad (1.32)$$

ここで、 $\beta = 8 [l + m(I_g/I_a)]$

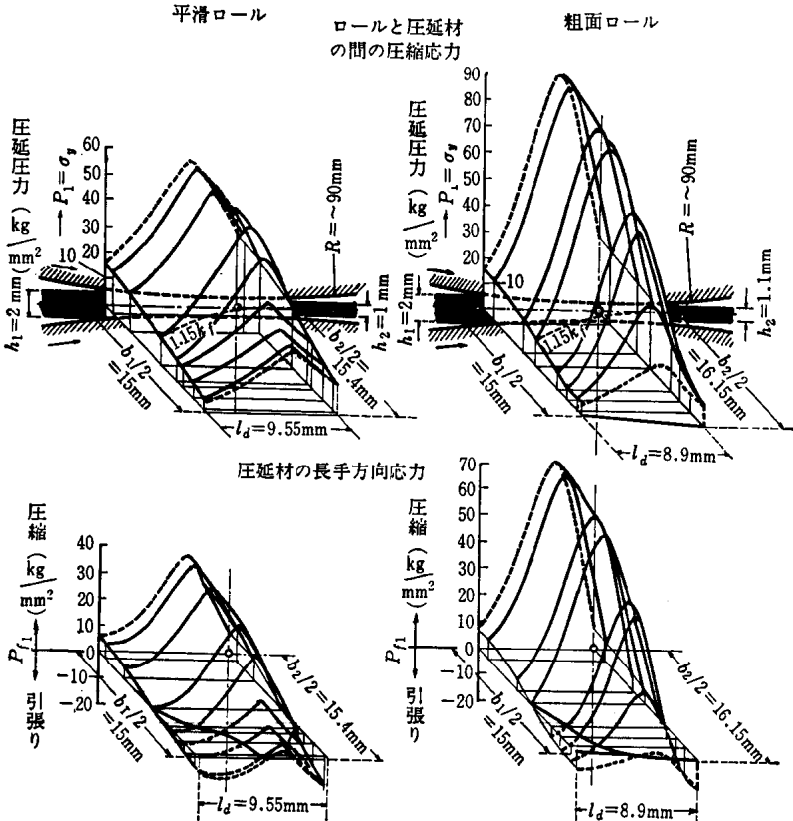
つぎに、ハウジングの柱の伸び変形については、長さ方向に対して曲げの影響を無視できるので引張応力による伸びを考え、一つの柱にかかる力は作用荷重 P の $1/2$ であるから、柱の伸

1) Siebel, E. & Lueg, W. : Mitt. Kaiser Wilhelm Inst. 15 (1933), p.1

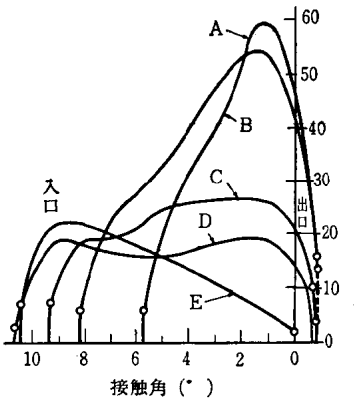
はアルミ板の冷間圧延における圧力分布を示す。圧延圧力分布は中立点で最大値を示し、板幅方向でみると板の中央が高く、板のエッジに近づくにしたがって減少する。研磨した平滑ロールに比してサンドブラストをかけた粗面ロールの場合には摩擦が大きくなるため圧延圧力が高い。Siebelらは圧延圧力分布値からトレスカの降伏条件をつかって圧延材の長手方向応力を求め、図1.1.22の下半分のように示した。この図からみると、圧延板のエッジには長手方向に引張応力が作用することがわかり、エッジクラックの原因となることが知られる。



【図 1.1.20】 Siebel-Lueg の圧延圧力測定装置



【図 1.1.21】 冷間圧延における圧延圧力分布および圧延材長手方向応力 (Siebel-Lueg)



- A: $h_0 = 0.06 \text{ in}$, $r = 48\%$, $l/H_m = 6.3$
- B: $h_0 = 0.121 \text{ in}$, $r = 50\%$, $l/H_m = 4.7$
- C: $h_0 = 0.251 \text{ in}$, $r = 30\%$, $l/H_m = 2.2$
- D: $h_0 = 0.500 \text{ in}$, $r = 20\%$, $l/H_m = 1.2$
- E: $h_0 = 0.959 \text{ in}$, $r = 10\%$, $l/H_m = 0.6$

$$\left(\begin{array}{l} h_0 : \text{入口板厚}, \quad r : \text{圧下率}, \\ l : \text{接触長さ}, \quad H_m : \text{平均板厚} \end{array} \right)$$

【図 1.1.22】 ロール間けき形状比 l/H_m と圧延圧力分布の関係 (MacGregor-Palme)

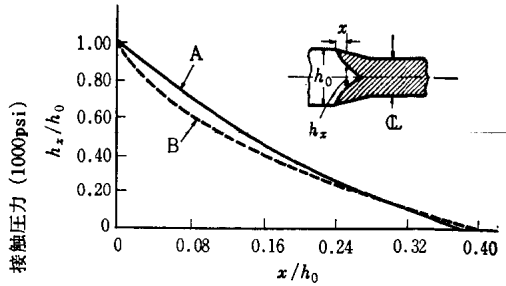
ロール接触長さの中央または出口側にピークがあるが、板厚が厚くなるにしたがってロール入口にピークが現われる。

ピーニング効果は、幅のせまい工具で厚い材料を圧縮するとき、工具圧力はブランドルの理論²⁾によって摩擦がなくても変形抵抗の 2.57 倍まで最大値として達し得るわけで、図 1.1.23 に示すように、鋼片の圧延ではロール入口付近の圧延材内部に弾性的なくさびがあり、上下から幅のせまい工具で押込む場合の抵抗と一致すると考えられる。

1.5. 圧延荷重

圧延加工の場合にロールが材料からうける荷重を圧延荷重とよび、ロール分離力といわれることもある。圧延荷重はロール接触面における圧延圧力分布の総計に等しいわけで、

1) MacGregor, Palme: *J. Appl. Mech.* 15 (1948), p. 297
 2) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, (1950) p. 257



A: 実測, B: エピサイクロイド
 【図 1.1.23】 ロール入口における弾性くさび (MacGregor-Palme)

MacGregor と Palme¹⁾ は半径 3 in のロール面に直径 2.35 mm の丸ピンを装置し、ピンの後方を太くしてワイヤストレングージでピン圧力を測定した。薄板だけでなく、厚板や角材のロール圧力分布を研究し、板厚が厚くなると Siebel らが求めた圧力分布のほかにロール入口付近にピークを生ずることを見出し、入口のピークはピーニング (peening) による効果であるとした。図 1.1.22 は鋼板の板厚を 25.4 mm に一定に保ち、板厚および圧下率をかえて薄板圧延から厚板や鋼片圧延の条件まで 5 段階の圧延圧力分布を比較したものである。薄板では

圧延工場においても作業上の重要な項目であり、また圧延機設計上の必要値であって、最近では圧延荷重を連続的に測定できる荷重計を使用して板厚の自動制御を実施している。

圧延荷重 P は鋼板圧延の場合を考えると次式で示される。

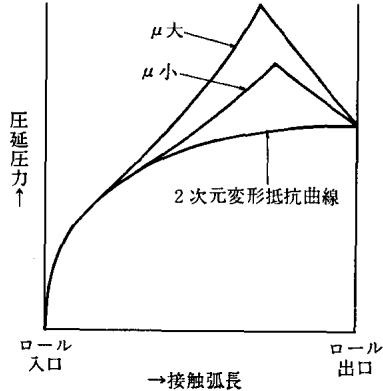
$$P = p_s \cdot b \cdot l_a = p_s \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \tag{1.36}$$

ここで、 p_s ：平均圧延圧力、 b ：平均板幅、 l_a ：接触投影長さ、 R ：ロール半径、 Δh ：压下量

圧延機の形式が変わったり、圧延条件がいちじろしくかわった場合には、単位面積当たりの平均圧延圧力 p_s で比較する必要がある。 p_s は圧延荷重実測値 P より次式で求める。

$$p_s = P / b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \tag{1.37}$$

図 1.1.24 に示すのは接触長さにそった圧延圧力分布であって、二次元拘束圧縮変形（平面ひずみ圧縮）の変形抵抗曲線と摩擦にもとづく山形の曲線（friction hill）とから成立っており、摩擦係数 μ が減少するにしたがって山形の曲線は低くなり、摩擦が 0 になれば変形抵抗曲線に一致する。二次元拘束変形抵抗は板幅方向の変形のない平面ひずみ変形の場合であって、円柱の単純圧縮変形抵抗の 1.15 倍の値となる。



【図 1.1.24】 圧延圧力分布の考え方

1.6. 圧延トルク

圧延加工では、ロールに生ずる圧延荷重に打勝ってロールを回転するためにロールトルクが必要である。ロールと圧延材との接触面には圧延圧力の分布があり、図 1.1.25 に示すように圧延圧力の作用線はすべて上下ロールの中心を結ぶ線と平行であって、これら圧延圧力の作用線に対してロール中心から下した垂線の長さがトルクアーム、またはレバーアームとよばれる。

圧延圧力 p_1, p_2, p_3, \dots にトルクアーム a_1, a_2, a_3, \dots を乗じたものが、トルク $T_1 = p_1 a_1, T_2 = p_2 a_2, T_3 = p_3 a_3, \dots$ である。これらのトルクは同一方向であるから全部を合成すると、合成トルク Pa となる。これが上下ロールに同時に作用するので、圧延加工に必要な圧延トルク T としての値は次式で示される。

$$T = 2Pa \tag{1.38}$$

図 1.1.26 に示すように、圧延トルク T は圧延荷重 P にトルクアーム a を乗じたものになる。トルクアーム a の値は、ロールと材料の接触面上での圧力分布が一様であるか、また