

論 文

DUC 621.771.073 : 669.14.-415

圧延板の形状とロールの形状との関連

吉 識 忠 継**・田中英八郎***

On the Relation between Flatness of Rolled Strip and Profile of Roll Crown

Tadatsugu YOSHIKI and Eihachiro TANAKA

Synopsis:

The aim of present work is to investigate basically and experimentally the rolling condition under which the strip of flat shape can be obtained with a multi-high rolling mill having the working roll of smallest diameter.

By using the rolls with various profile, the roll indentations were impressed on the strip surface by means of static screw-down without roll revolution under the various forces. Then, the transverse distribution of roll indentation width, namely, the variation on width of roll indentation in the direction of strip width was measured, and a consideration was made on the correlation between these and the flatness of strip rolled under the same condition as static screwdown. It was shown that the transverse distribution of roll indentation width was equivalent qualitatively to the flatness of rolled strip.

The more appropriate profile of working roll crown for rolling the strip of flat shape with present mill was accorded closely with the cornered or rounded curvature rather than parabolic one which may be suitable for two-high mill.

The relation between flatness of strip and the shape of 1st-intermediate backing roll, and the trend of working roll deflection under static screw-down were also shown.

(Received May 21, 1971)

1. 緒 言

最近、高性能プレス機械を採用している薄板二次加工メーカーからの要求で圧延板の長さ方向の板厚公差や平坦さなどの寸法的な要求がますます厳しくなる傾向にある。プレス成形素材の帯板の板厚や板幅が変化したり、帯板がボーイング (Bowing) を起こしていると成形工程に種々の支障が生じ、折角の自動化され、高速化されたプレス機械もその性能が十分に発揮できない。また、小型部品の成形素材としては広幅の帯板を細いテープ状にマルチ・スリッチング (multi slitting) を行なつて使用することが多いが、このとき広幅の帯板の平坦さが悪ければ、スリッチングした後のテープはボーイングを起こし、ボーイングの曲率の大きさ、曲がる方向は圧延板の形状、すなわち平坦さと密接な関係がある¹⁾²⁾。

周知のように、硬質材料の広幅、薄板の圧延にはワークロール直径の小さい多段圧延機が使用されるが、ロール径が小さい場合には平面圧縮の状態からほど遠いた

め、ロール径の大きい圧延機に比べて圧延される板の平坦さが著しく悪くなる本質的な欠点をもっており、ロール研削精度、ロールクラウン (roll crown)、圧下力などの不適正がただちに不均一延びの原因となり、圧延板の形状に著しい影響をおよぼす。

本研究の目的は、小径ワークロールをもつセンチミヤ 20 段圧延機 (Z_R 32-4) で平坦な薄板を得るための圧延条件を基礎的に検討することであり、ロール形状と圧延板の形状との関連を求めた。

圧延薄板の形状に関与する因子の 1 つとして圧延時の前方張力があり、実際の圧延作業においても前方張力を大きくすることにより薄板の平坦さを矯正している。極薄板の場合には前方張力を過大にすると圧延中に薄板が切断する危険度が高まる。このような前方張力による板

* 昭和45年10月本会講演大会にて発表

昭和46年 5月21日受付

** 姫路工業大学産業機械工学教室 工博

*** 東北大学金属材料研究所 工博

の平坦さの矯正は、あくまで便宜的な方法であり、本質的には圧延工程に合致した適正なロールクラウンの形状と適正圧下力を採用して小さい前方張力で平坦な薄板を得ることが望ましい。

2段あるいは4段圧延機のような2点支持機構を持つた圧延機におけるロールクラウンの形状は、LARKE⁸⁾が2点支持梁として圧下力による曲げモーメントおよびせん断による撓み曲線を解析し、近似曲線として2次曲線がロールベンディングを補正する適当な形状であることを指摘した。このほかに2段あるいは4段圧延機におけるロール弾性変形に関する研究は多い⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。更に最近では、塩崎⁸⁾、STONE⁹⁾が4段圧延機におけるワークロールを弾性床上の梁として解き撓み曲線を求めている。

以上のように、2段、4段圧延機のロール変形に関する研究は多いが、多段圧延機のロールの弾性変形、あるいはロールクラウンの形状について解析した報告は、ほとんど見られない。とくにセンヂミーヤ20段圧延機ではロールの支持が多点多であるとともに、圧下力の反力の方向が8方向であるため、ロールベンディングに対する厳密な理論的解析は困難である。

本研究では、まず、平坦な薄板の圧延できる最も適正なワークロールのクラウンの形状を決定するために、静的に圧下したときのロール圧痕の形状(板幅方向の圧痕幅分布)と圧延した薄板の平坦さとの対応性を実験的に検討するとともに、圧痕幅分布よりワークロールベンディングの傾向を推定して、その現象を実験的に確かめた。また、圧痕幅分布を解析して最も適正なロールクラウンの形状を求めた。

薄板の冷間圧延においては、ワークロールにクラウンロール(crowned roll)を使用する代わりに、バックアップロールにテーパロール(tapered roll)を使い、ワークロールにはクラウンがついていない、いわゆるフラットロール(flat roll)を使用することがよく行なわれて

いる。

ロール研削作業からすると、圧延している金属と直接に接触しているワークロールは摩耗や焼付きがしばしば起こり再研削の必要度が多く、簡単な形状にしておく方が能率的と考えられる。また、圧延限界の低下や耐摩耗性という観点からは、超硬ロールの使用が圧延作業能率を上昇させる1つの方法と思われる。もし、ワークロールに超硬ロールを採用する場合には、超硬ロールはヤング率が大きく、伸びが少ないので、弾性撓みを与えて研削するクラウン成形法がとれない。すなわち、フラットロールを使用しなければならず、したがってバックアップロールにテーパロールを採用しなければ平坦な薄板を圧延することは不可能である。

以上の観点、すなわちロール研削作業能率、超硬ロールの採用という点からは、バックアップロールにテーパロールを使用する方が有利である。しかし、バックアップロールの形状に関しては、いずれも経験的な知見で決定されているようである。著者らは、先にワークロールとの間の接触変形を解析し、平坦な薄板の得られる圧延条件との関連性について報告した¹⁰⁾。

本研究では、種々の形状(平行部長さ、テーパ量を変化)をもつバックアップロール(この実験では第1中間ロール)を使用して、圧延した薄板の平坦さと圧延条件との関係を求めるとともに、静的圧下によるロール圧痕の形状におよぼすロール形状の影響を調べ、薄板の延び方との対応性について考察した。また、第1中間ロールにテーパロールを使用したときのワークロールベンディングの傾向についても実験的研究を行なった。さらに、第1中間ロールを組み合わせ使用したときの圧延板の平坦さについても考察した。

2. 実験方法

2.1 実験に使用した圧延機、および圧下力の測定

Table 1. Principal items of Sendzimir reversing cold strip mill used in experiments.

Roll	Numbers	Nominal dimensions		Hardness in Rockwell-C
		Diameter (mm)	Length of roll barrel (mm)	
Working	2	6.35	142.9	61 ~ 63
1st intermediate back-up	4	13.48	142.9	56 ~ 60
2nd intermediate back-up (drive)	4	27.38	142.9	60 ~ 62
2nd intermediate back-up (idler)	2	25.78	127.0	60 ~ 62
Backing bearing	8	47.62	25.4, 3 pieces	—

この研究に使用した圧延機は Z_R 32-4 型センヂミーヤ 20 段可逆冷間圧延機で各ロールの寸法および材質を Table 1 に示す。圧下力の測定の詳細についてはすでに報告¹⁰⁾しているのを省略するが、この圧延機は油圧圧下機構であるため、上下シリンダー差圧と圧下力との補正曲線をあらかじめ作っておき、圧延中あるいは静的圧下時の差圧 (kg/cm²) を測定することにより、この補正曲線より真の圧下力 (t) を求めた。

2.2 静的圧下による ロール圧痕の形状——“圧痕幅分布”——の測定

上下ワークロールの間に板を入れてロールを静的に圧下すると、板にロールが押し込まれ板が塑性変形してロール圧痕が板に残る。ここで取り扱うロール圧痕の形状とは、このようにして板に残った圧痕の幅の板幅方向における分布を表わすものであり、以下は簡単化のために“圧痕幅分布”と呼ぶ。

LARKE⁹⁾ が 2 段圧延機について説明しているが、一定ロールクラウンを使用した場合、圧下力の小さいときはロールバレル(roll barrel) 方向の上下ロール間隙はロール中央で狭く、端で広くなり板は中延びとなる。圧下力がある一定値に達するとロールバレル方向に間隙が一定となり平坦な板が圧延できる。それ以上の圧下力になると逆にバレル中央が端より広くなり端延びが生ずる。このロールバレル方向の上下ロール間隙は、板幅方向の断面形状を表わすもので、幅拡がりかほとんどない薄板では板の延び方あるいは平坦さと一義的な関係があると考えられる。

一定クラウンをもつたロールで静的な圧下を行なった場合のロール圧痕は、もしロールバレル方向の扁平変形に差がないとすれば、その形状について次のように推察できる。すなわち、Fig. 1 の略図に示すように、圧下力の小さいときの圧痕は板幅の中央部が広く、板端で狭い太鼓形となり、圧下力が過大となると逆に中央が狭く端で広い糸巻形となり、その中間の一定圧下力では端と中央の圧痕幅が等しい平行型の圧痕が得られるものと考えられる。ただし、これは素材の板幅方向の断面形状が正確な長方形である場合で、もし断面がくさび形であれば

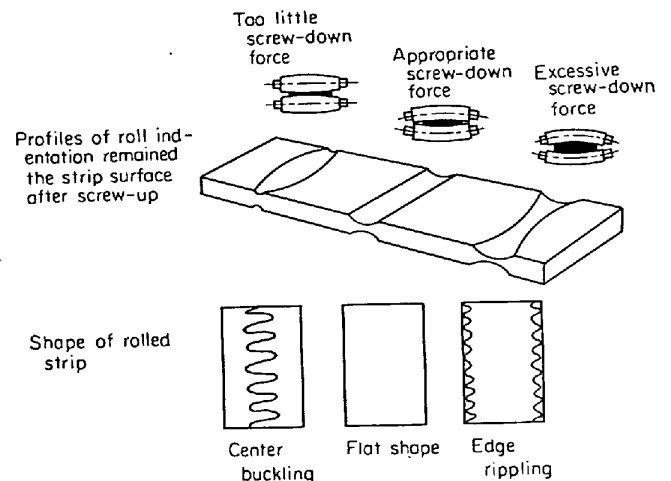


Fig. 1. Schematic figure of the relationship between the profile of roll indentation and the magnitude of screw-down force when the rolls were screw-downed statically without revolution.

くさび形の圧痕となり、板端が薄い素材では端の圧痕幅が狭くなることは当然予測される。そして、圧痕の形状が太鼓形となる圧下力の条件で圧延した場合、板は中延びとなり、糸巻形では端延びで、平行形の圧痕の得られる条件では平坦な薄板が圧延できるという推論をたてた。

上述のように、圧痕幅分布の測定には素材の板幅方向の断面が正確な長方形であることが重要である。今、仮りに圧痕の断面が円弧であり、ロールへん平変形を無視して幾何学的に計算すると、板幅方向の板厚変化量が 0.001 mm であると、圧痕幅が 0.500 mm の場合、圧痕幅で 0.0127 mm の誤差が生ずる。したがって、板幅方向の板厚変化が 0.001 mm 以下でなければ圧痕幅分布の測定の意味がなくなるので正確な長方形断面をもつ素材を調整した。

素材はワークロール径が 130 mmφ、バレル長さが 200 mm の実験用 4 段圧延機を使用して Table 2 で示す調整方法を行なった。同表には素材の分析値、寸法および変形抵抗も示している。調整した素材の板幅方向の板厚変動はセンヂミーヤ圧延機付属の厚み計 (1 目盛 0.002 mm) によつては測定不可能であつたので重量法で測定し

Table 2. Material used in the measurement of transverse distribution of roll indentation width.

Chemical composition	C=0.062%, Si < 0.001%, Mn=0.37%
Preparation processes	annealed strip (0.50 mm thick × 120 mm width) → cold rolling 60% (0.20 mm thick × 120 mm width) → slitting (0.20 mm thick × 100 mm width) material used
Resistance to deformation	71 kg/mm ²

た. すなわち, 素材の帯板を 10 mm 幅に切断した 10 枚の細片を同一寸法にするため 10 枚重ねて平面研削した後, 横と縦の寸法をコンパレータで測定し, 化学天秤で重量を測定し密度を入れて板厚を計算した. 結果は $0.1960 \text{ mm} \pm 0.0005 \text{ mm}$ 以下であつた. 一方において, マルチスリッチングした板のボーイングから板厚分布を求めた報告¹¹⁾を参照して, 調整した素材の平坦さを判定比較したが, 板厚変化はほとんどないことが確かめられた. これらの 2 つの検討結果を総合すると調整した素材の板幅方向の板厚公差は 0.0010 mm 以下であり, 正確な長方形断面の素材と考えることができ, 圧痕幅分布の解析には適当である.

つぎに, 静的圧下の方法について述べる. 上, 下ワークロール間に素材を入れて静的に圧下し板に圧痕をつけた. 素材コイルより短尺 (長さ 1 m) の板を切りとり, 板はパスラインの中心に合致して設定されるようにハウジングの入口, 出口に案内を設けた. 圧下は目盛板で各ロールについて同一の値をとるようにした. 圧下力は $1.0 \sim 7.0 \text{ t}$ の範囲で変化させ, 圧下力を変えるときは除荷した後には圧痕を損傷ないようにワークロールを静かに抜きとり, 板を移動させて新しい場所に圧痕をつけた. 潤滑油は 3 号高速スピンドル油であるが圧下の前に板とロールに供給した.

圧痕幅の測定にはマイクロメーター (1 目盛 0.005 mm) 付きの読み取り顕微鏡を使用した. 圧痕をつけた薄板を平板の上に張りつけ読み取り顕微鏡の試料支持台に置き, 支持台の移動量で圧痕幅を測定した. 圧痕幅の測定場所は板端から 1, 10, 20, ……80, 90, 99 mm のところで板の表裏の圧痕について測定を行なつた.

2.3 実験に使用したロール形状

2.3.1 ワークロールのクラウンの形状

実験に使用したロールクラウンの形状を Fig. 2 に示す. これは板幅に相当する部分だけを図示している. 2 段圧延機においては LARKE³⁾ が提唱した 2 次曲線が平坦な薄板の圧延のために適正できるので, 比較上この形状のロールを採用した. すなわち図の放物線形クラウンである. また, 放物線形よりバレル中央部がもつと丸味をもつもの (円形クラウンと呼ぶ), およびバレル中央がほぼ平らで角ばつたもの (角形クラウンと呼ぶ) を使用した. Fig. 2 の縦軸はロールクラウン量であり, ロールバレルで板端に相当する場所と各場所における直径の差で表わしている. 図からわかるように 3 種のロールでクラウン量は同じになるように研削している.

これらのクラウンロールはハウジング内で下側に設定し, 上側ワークロールはクラウンのついていないフラットロールを使用した.

多段圧延機では多くのロールによつてワークロールが支持されているため, おのおののロールの研削精度あるいはロール形状が総合して薄板の平坦さに影響する. それでワークロールの形状について実験する場合には, 他のロールの複雑な影響をなくするため, 第 1 中間ロール, 第 2 中間ロール (駆動ロール, 遊びロール) はすべて注意深く研削したフラットロールを使用した. また, 最外周のベアリングはその高さを測定し, 調整してベアリングの影響が最も少なくなるようにした.

2.3.2 第 1 中間ロールの形状

通常, 第 1 中間ロールは板幅より少し小さい平行部 (ロール径の同じ部分) を残してバレル端にテーパをつける. 本研究では, 平行部長さ, テーパー量を種々に変えた Table 3 のようなロールを研削して使用した. 板

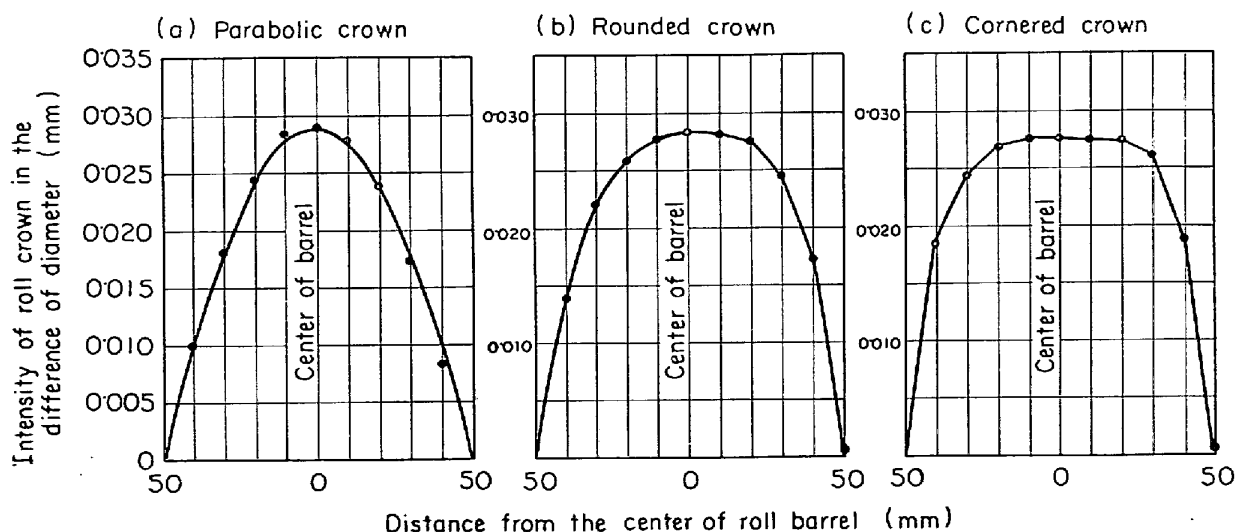


Fig. 2. Profile of working roll crown used in the present experiment.

Table 3. Length of central parallel portion and taper of 1st intermediate backing rolls used in experiment

Length of central parallel portion	mm	76.2	82.6	88.9	95.2
Taper	mm/mm	0.002	0.002	0.002	0.002
		0.004	0.004	0.004	0.004
		0.006	0.006	0.006	0.006
					0.0065 0.0189

幅が 100 mm のため平行部長さはそれより少なくとつて
いる。テーパ量は平行部のロール直径とテーパ肩部
(テーパの始まる場所) から単位距離はなれたところ
の直径との差で表わしている。また、以下は簡単のため
に、たとえば平行部長さ 88.9 mm, テーパ量が 0.002
mm/mm のロールを「88.9 F, 0.002 T ロール」のよう
に呼称する。

第 1 中間ロールの影響について実験する場合には、上
下ワークロールはフラットロールを使用し、4 本の第 1
中間ロールの内の 1 本だけを Table 3 に示すロールに
置きかえ、他の 3 本の第 1 中間ロールはすべてフラット
ロールを用いた。この 1 本のテーパロールの設定位置
は下側左の位置である。

2.4 ロールベンディングの実験的解析

静的圧下時のワークロールのベンディングの有無、あ
るいは傾向を調べるために、Fig. 3. (a)(b) に示す考
え方でロール延長の 2 点で圧下に伴うロールの下降量を
ダイヤル・インジケータで測定した。Photo. 1 は実際
の測定時の写真である。下側ロールのつかみ部を細く研
削し、その部分に、はめ合うことのできる測定棒を作り
接着剤で固定し、この測定棒の 2 箇所を圧下に伴う下降
量を 2 箇所のダイヤル・インジケータで測定した。この
ような 2 点同時測定を行えばロールベンディングの傾

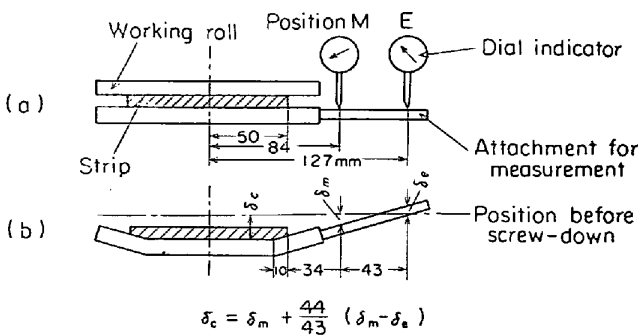


Fig. 3. Fig. (a) shows the method for measuring the
deflection of working roll.
Fig. (b) shows the deflection of bottom wor -
ing roll under loaded condition.

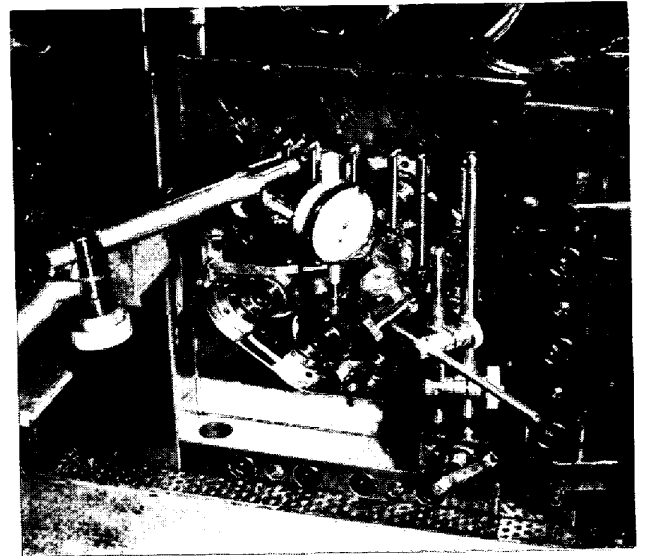


Photo. 1. Measuring photograph for the displacement
of working roll by static screw-down.

向がわかる。すなわち、 $\delta_e = \delta_m$ ならばロール軸は曲が
らないことを示し、もし $\delta_e < \delta_m$ であれば上側に曲がり、
逆に $\delta_e > \delta_m$ ならば下側に曲がっていることになる。

測定の便宜上、測定棒をつけた測定用ロールは下側に
設置した。上、下ワークロールの間には圧痕をつけた場
合と同一の素材を入れて静的に圧下した。圧延機の構造
上、圧下前には板とロールとの間には間隙があるので、
圧下用ハンドルを回していき、圧延機のハウジングに歪
みゲージを張り、歪み計の目盛が振れ始めたところを圧
下力が作用し始めた点としてダイヤルインジケータの
0 点を合わせた。したがって、+側は圧下前より下降し
たことであり、-側は上昇したことを意味する。

2.5 圧延条件

圧延の実験は、前方張力による板の平坦さの矯正をで
きるだけ少なくするため、圧延可能な限り小さい前方張
力 (15 kg/cm²) を採用した。圧下力は薄板が極端な中延
びや端延びになつて破断しない範囲で大幅に変化した。
圧延速度は圧延中にワークロール熱膨脹が起こらないよ
うにするため低速とし 3 m/min で実験した。圧延潤滑
油は 3 # 高速スピンドル油である。

3. 実験結果および考察

3.1 ワークロールの形状

3.1.1 圧痕幅分布におよぼす圧下力、ならびにワー
クロールクラウンの形状の影響

Fig. 2 に示す 3 種のロールで静的圧下を行ない圧下力
を増加させたときの圧痕幅分布を Fig. 4 a), b), c) に
示す。a), b), c) はそれぞれ放物線形、円形、角形ク
ラウンを使用した結果に相当する。この測定は板の表裏

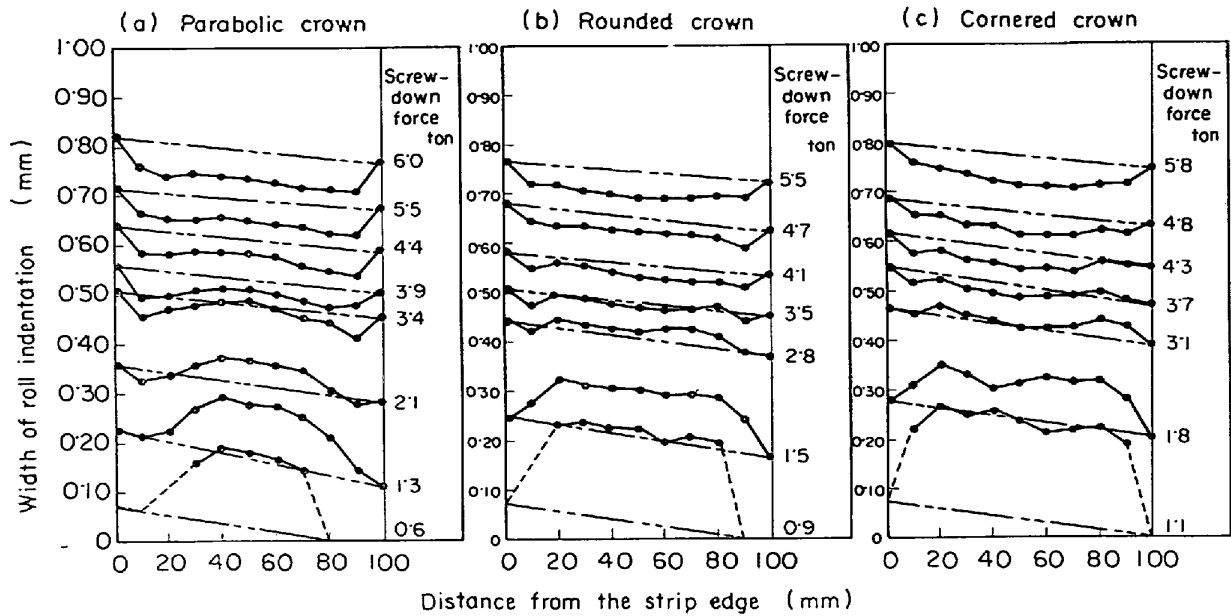


Fig. 4. Relation between the transverse distribution of roll indentation width by the static screw-down and the profile of roll crown.

についた圧痕に対して行なつたが、表裏の圧痕幅分布はほとんど変わらないため、クラウンロールを設定した下側すなわち裏側の圧痕幅分布を図示したものが Fig. 4 である。

図の圧痕幅分布を観察すると、いずれも板幅の中心に関して非対称である。実験方法で述べたように板をハウジングのパスラインの中心に設定したにもかかわらず、板の両端における圧延幅を結んだ線（2点鎖線）は傾いている。この理由は次のように考えられる。

Fig. 2 を見ると、ワークロールの形状はロールバレル中心に関してわずかに非対称であることが認められるが、クラウン量の大きい右側は圧痕幅の小さい側に対応しており、また、ロールを逆に入れ替えても圧痕幅分布の傾向は変わらないので、ワークロールの形状に原因するとは考えられない。他のバックアップロールはすべてフラットロールであるため非対称とは思えない。一方、素材の断面形状もくさび形の断面ではなく正確な長方形であることは検討済みである。以上のことを総合すると、圧痕の非対称の原因がロール形状や素材によるものであることが推定できる。

今、Fig. 4 の2点鎖線を詳細に見ると、いずれの圧下力、ロールについても同一方向に傾き、その傾斜もほぼ一定である。すなわち圧痕幅の広い側は常に圧延機ハウジングの手前側となつている。以上のことから推察すると、この現象は圧延機固有の特性（くせ）、たとえば、ハウジング内部やベアリング・サドルの工作精度によるものと考えられる。また、通常の圧延の場合にも、ハウジ

ングの中心にパスラインを設定すると常に手前側が余計に延びることが観察されている。

この理由により、圧痕幅分布を考える場合は圧延機の特性を補正するため、板の両端における圧痕幅を結んだ2点鎖線を規準線とし各場所の測定点との差異を考えることにした。この操作を行なうと板幅の中心に対して圧痕幅分布はほぼ対称となるため、この方法によつて圧下力の影響、ロール形状の影響について考察を行なつた。

Fig. 4 において圧痕幅分布の右側に示した数字は圧下力である。いずれの形のロールクラウンでも圧下力の小さいときには板端の圧痕幅が中央より小さいが、圧下力を増加して一定の圧下力になると板幅全体にわたつて圧痕幅がほぼ等しくなつて2点鎖線と近似した圧痕幅分布を示すようになる。それ以上の圧下力となると板端の方が中央より大きくなる。圧痕幅分布が2点鎖線と近似する圧下力は放物線形では2.1~3.4 t、円形では2.8~3.5 t、角形では3.1~3.7 t であり、圧下力がこの値より過小あるいは過大となると圧痕幅分布と2点鎖線との差異が大きいたことが明らかである。

以上の観察から、多点支持機構を持ち分布荷重をうけている多段圧延機においても、圧下力の小さい条件では太鼓形圧痕、過大な条件では糸巻型圧痕となり、その中間の圧下力では、ほぼ平行形の圧痕となる推論 (Fig. 1) が成立することが明白となつた。

つぎに、圧痕幅分布におよぼすロール形状の影響を調べるために Fig. 4 の結果をもとにして、前述の補正を行ない規準線を水平にした概念図を描いた。その図を

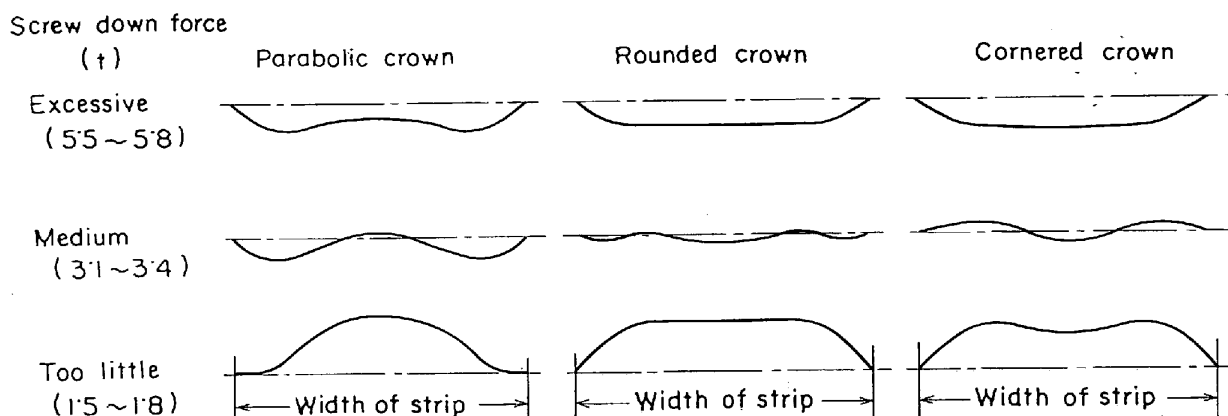


Fig. 5. Schematic figure indicating the influence of roll crown profile on the transverse distribution of roll indentation width.

Fig. 5 に示し、この図について考える。圧痕幅分布はロール形状によつて著しく異なる。小さい圧下力においてはロールクラウンの形状とよく近似しており、放物線形では圧痕幅の広い範囲が円形に比べて狭く、角形は最も広くなつてゐる。しかし、角形の特徴は、板の中央の圧痕幅より広い場所（板端より 20, 80 mm）があることである。

圧下力が大きくなり圧痕幅が 2 点鎖線に近くなる圧下力においては、ロール形状により圧痕幅分布が著しく異なる。放物線形では板端から 10 mm, 90 mm の場所の圧痕幅が最小で、板端と中央が最大となつてゐる。円形および角形ではこの傾向は少ししか認められない。角形では圧下力の小さいときに相対的に幅の広がつた 2 つの部分では、やはり圧痕幅が大きく、板幅の中央部の方がわずかに小さい。これらの中程度の圧下力では圧痕幅の変化が最も少ない条件、すなわち最も平行な圧痕の得られる条件であるが、Fig. 5 により圧痕の平行度の順序をつけると円形—角形—放物線形の順に悪くなり、2 段圧延機で最も適正とされている放物線形クラウンは圧痕の平行度が最も悪いことが判明した。

さらに大きい圧下力では、すべてのロールクラウンで板幅の中央部の圧痕幅が端部のそれより小さくなり、ロール形状による差はなくなる。ただ、放物線形では中程度の圧下力における圧痕幅分布の傾向が圧下力が大きくなつても残つてゐる。

3.1.2 圧痕幅分布と圧延した薄板の平坦さとの関連

ロール形状、圧下力により圧痕幅分布が変化することがわかつたが、つぎに、静的に圧下した場合と同一の圧下条件で圧延したときに得られる薄板の平坦さと圧痕幅分布との関連性を求めた。

薄板の平坦さ、あるいは延び方の定量的表示法はほとんどない。田中らの報告¹¹⁾によれば、マルチスリットし

て幅の狭いテープを作り、それぞれのテープのボーイングの方向と量を測定することによつて板幅の各場所における板の延び方を定量的に求めている。

しかし、薄板では極端に延びすぎた場合、しばしば塑性座屈を起しスリチングを行なつてもその挫屈はならずボーイングの測定が非常に不正確となる。したがつて本研究においては上述の方法を使用することはできない。また、本研究の目的からも定性的な板の延び方がわかれば十分であるから、薄板の肉眼観察による判定法を採用し、圧延条件も板の延び方の特徴が容易に観察できる条件を選んだ。観察の容易さからは、素材としては 0.10 ~ 0.05 mm 厚のものが板の剛性が小さく有利である。

圧痕が太鼓形、平行形、糸巻形となる圧下力の条件で圧延した場合の薄板の平坦さと圧痕幅分布との関連を調べるために、0.120 mm 厚×100 mm 幅の低炭素鋼板を素材とした。圧延時の薄板にかかる張力は、各圧下力、各ロールについて同一とし、前方張力=14 kg/mm²、後方張力=11 kg/mm²を採用した。一方において、同一圧下力で静的に圧下を行ない、同一素材にロール圧痕をつけて圧痕幅分布を測定した。Fig. 6 は一例として放物線形と円形クラウンに対する圧痕幅分布であり、Photo. 2 はそれと対応する圧延した薄板の写真である。

圧痕幅分布から板の延び方を推定するためには、Fig. 6 に示すように圧痕幅の最も小さいところを結んだ規準線（2 点鎖線）をとり、それと測定点との差で板の延び方が判定できる。たとえば、差の大きいところが延び方が顕著であると考えられる。このような判定を行なうと、薄板の延び方は圧痕幅分布とよい対応を示している。円形クラウンを例にとつて説明すると、圧下力が 1.0 t（静的圧下では 1.3 t で圧延開始とともに降下する）のとき、板の中央部の圧痕幅は規準線より大きく、したがつて板は中延びとなつてゐる（Photo. 2）。しかも、板端より

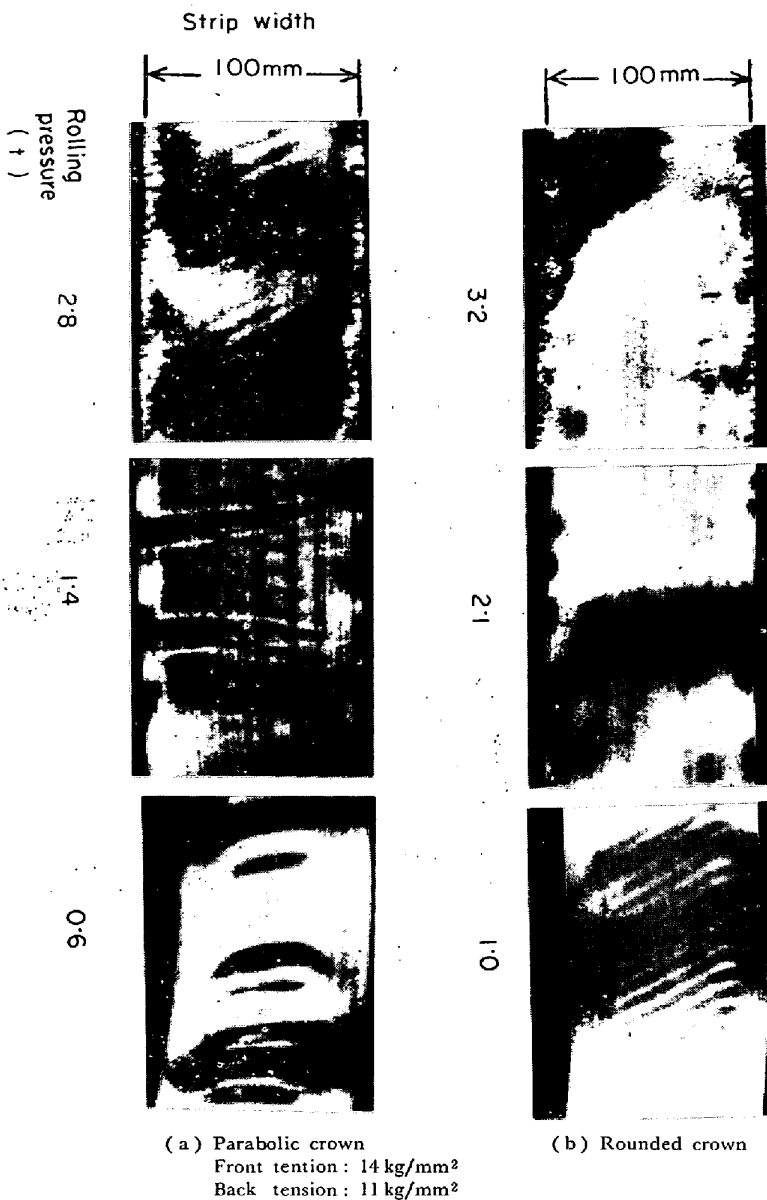


Photo. 2. Relation between the flatness of rolled strip and the transverse distribution of roll indentation width. These photographs are compared respectively with the transverse distribution of roll indentation width in Fig. 6.

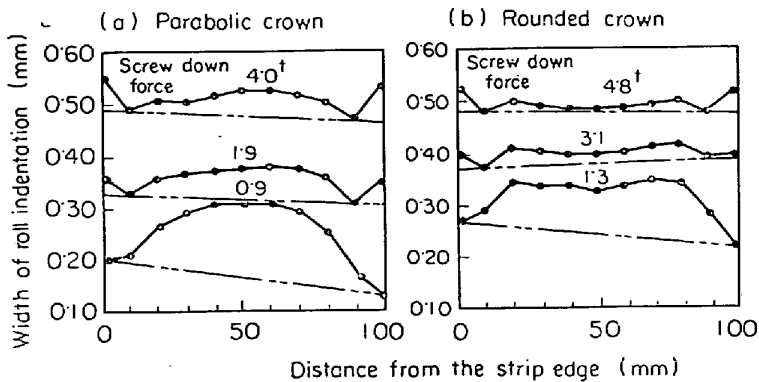


Fig. 6. Transverse distribution of roll indentation width in case of the same screw-down condition as Photo. 2.

20 mm, 80 mm の場所では 相対的に 幅が 広く、これに対応した 延び方をして いることが 写真から 明らかである。また、圧下力が 過大である 3.2 t (静的では 4.8 t) の条件では 板端で 規準線より 幅が 広くて 端延びと なっている。放物線形クラウンでは 圧下力が 1.4 t, 2.8 t (静的では、1.9 t, 4.0 t) において 端延びと 中延びと が 共存して おり、これも 圧痕幅分布と よい 対応を 示している。

以上の ことから、圧痕の 形状が 太鼓形の場合には 圧延した 薄板は 中延び、平行形では 平坦、糸巻き形では 端延びと なることが 判明して、Fig. 1 のような 推論が ロール支持が 多点である センヂミーヤ 圧延機でも 成立することが 確認できた。

なお、Photo. 2 の板の 写真において 延び方の 著しい部分と 比較的 平坦な部分との 板厚差は 多くて 0.001 mm 程度であり、圧痕幅から 計算した 圧痕深さの 板幅方向の 差の 50% 以下であった。この 静的圧下による 圧痕深さの 板幅方向の 差は 圧延中の 張力により 矯正されたものと思われる。

以上の 結果を 総合すると、2 段圧延機で 適正な クラウン形状と されている 放物線形クラウンは、本圧延機においては 中位の 圧下力でも 端延びと 中延びが 共存し、平坦な 薄板の 圧延できる 圧下力が 存在しない。これは 多段圧延機においては、放物線形クラウンは 平坦な 薄板を得る ためには 適当でない 形状ということに ほかならない。このことは、静的な 圧下による 圧痕幅分布において 規準線と 一致する 圧下力の 条件がない ことから 確認できる。

一方、円形あるいは 角形クラウンでは、ある一定 圧下力で 圧痕幅分布が ほぼ 平行形となる 条件があり、また、Photo. 2 に示すように 中間の 圧下力では 板の 平坦さも 放物線型より 良好であった。換言すれば、小さい 圧下力では 太鼓形、過大な 圧下力では 糸巻き形であり、その 中間の 圧下力では ほぼ 平行形の 圧痕 (Fig. 5 参照) と なっている ことから、多段圧延機においては 円形あるいは 角形クラウンの方が 平坦な 薄板の 圧延には より 適正な ロールクラウンの 形状であると 断定できる。

3.1.3 ワークロールベンディングの実験的解析

静的圧下による圧痕幅分布と圧延した薄板の平坦さがよい対応性をもつということから、静的圧下時のロール変形が圧延時のそれと近似できると仮定して、静的圧下におけるワークロールの撓み変形の傾向を実験的に解析した。

静的圧下によつて圧痕幅分布を求めた実験では、下側ロールはクラウンロール、上側ロールはフラットロールを使用しているが、この場合、無負荷時のロールバレル方向の上下ロール間隙は、板幅の中央で小さく、板端で大きく一定でない。しかし、圧下力を増加してある一定の圧下力となると比較的平行な圧痕が得られるということは、上下ロール間隙がバレル方向にほぼ一定となることにほかならない。これは、圧下力によるロール弾性変形に基づくものであるが、その弾性変形には次の2種の変形があるものと推察できる。

a) ロール軸は曲がらず、接触弧におけるロール扁平変形がバレル方向、あるいは板幅方向に異なる。

b) ロール軸が曲がることによりロール間隙が一定となる。

まず、a)の変形の有無について考察を加えた。a)の変形についてさらに説明すると、クラウンロールにおいてはバレル中央のロール半径がロール端より大きい、圧下時に接触弧の扁平変形によるバレル中央の変形がバ

レル端より大きければ上下ロール間隙がロールバレル方向に一定となることが予測できる。扁平変形の大きさは、変形前、後のロール半径を R, R' とすると、 R'/R で表わされるが、この値がバレル方向について変化するか否かを検討した。考察した触針式のプロフィールメーターで圧痕の断面形状を測定した結果、断面が円弧に近似できることがわかつたので、このプロフィールメーターで圧痕深さと圧痕幅を測定し、円弧としてロール扁平変形後のロール半径 R' を計算し、 R'/R を求めた。圧下力を $1.25 \sim 5.5 t$ の範囲で変え、板幅方向について R'/R を比較したが、板幅方向の R'/R の値に差異はないことが判明した¹²⁾。したがつて、a) のような変形はわずかであることが確認されたので b) の弾性変形について検討した。

2.4 で述べた方法でロールベンディングを測定した。上下ロールの組み合わせは、上下共クラウン、上下共フラット、下側クラウン—上側フラット、下側フラット—上側クラウンの4種の組み合わせについてである。測定結果を Fig. 7 に示す。図の横軸は圧下力であり、縦軸にダイヤルインジケータの読み δ_e, δ_m の値をとつている。いずれの組み合わせにおいても δ_e (○印) $<$ δ_m (●印) であり、Fig. 3 の下図のように上側あるいは板側に曲がつていることが明白になつた。たとえば、下側にクラウンロ

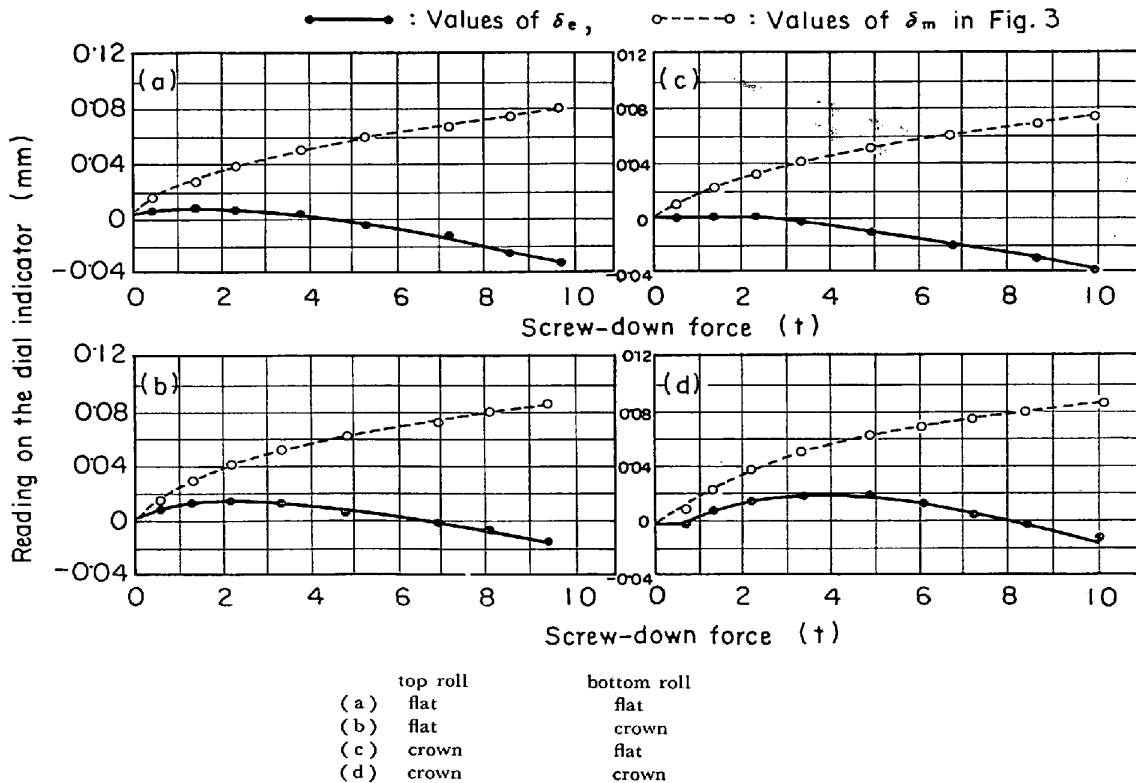


Fig. 7. Relation between screw-down force and the displacement of working roll at the position of M and E in Fig. 3.

ールを用いて、上側はフラット、クラウンいずれのロールの場合にでも上側に曲がる。

3.1.1 で述べた圧痕幅分布を観察すると板端の 10 mm において圧痕幅が急激に増大していることがわかる。圧痕幅分布がロールベンディングの様相を現わしていると仮定して推察すると Fig. 3 の下図に示したようなベンディングが起こると考えられ、板端から 10 mm の点からロール端までをほぼ直線と仮定すると、板端から測定点までの距離が既知であるため δ_e , δ_m の測定結果からロールバレル中央部の変位置 δ_c を推定することが可能である。

種々の上下ロールの組み合わせについて求めた δ_c を圧下力について図示すると Fig. 8 のようになる。図からわかるように、いずれの組み合わせでも δ_c はほぼ同一の値となる。また、図に示した点線は上下ロールをフラットロールにし、上下ロール間に板を入れずに圧下を行なったときの下側ワークロールの降下量を示すもので、板幅 100 mm の板を入れて圧下した場合は点線よりわずかに高い。もちろん、点線の実験では $\delta_e = \delta_m$ でロールベンディングは起らなかった。点線は下側のすべてのロール間の接触変形の総和に相当し、この場合はロールバレル全長で接触したときの変位置であり、板を入れたときやクラウンロールを使用したときは、第 1 中間ロールとの接触長さが短いため接触変形量が大きくなり、測定結果は点線より僅かに高くなつたものと考えられる。

以上のことから、センチミヤ圧延機のワークロール

は、ロール中央部では接触変形による変位が起こるため降下し、板の端部から急激に曲がる Fig. 3 の下図のような弾性変形が生ずる。換言すれば、2 段圧延機で起こる 2 点支持梁のようなロールベンディングでなく、ロール接触変形ないし弾性床上の梁のようなベンディングと考えられる。このため、2 段圧延機での弾性撓み曲線を補正するような放物線形クラウンは本圧延機では適正でなく、板端部での急激なベンディングを補正する角形に近いクラウンがより適正であつたものと推察できる。

3.1.4 適正なロールクラウン形状の定量的解析

センチミヤ 20 段圧延機のハウジング内での圧下に伴うワークロールのベンディングの傾向として、静的圧下時の測定結果から板側に曲がる事が確認できた。また、薄板の伸び方と静的圧下による圧痕幅分布とはよい対応性を示すことがわかつた。これらの結論を利用して多段圧延機において平坦な薄板の得られる最も適正なロールクラウンの形状を解析した。

センチミヤ 20 段圧延機のようにロール支持機構が複雑であり、圧下力の分力も 8 方向と多い圧延機ではロールベンディングの曲線や、接触変形によるロールバレル方向の変位分布を弾性論的に厳密な解析を行なうことは困難である。ここでは静的圧下による圧痕幅分布を解析し、板幅方向における圧痕深さの分布を求めた。すなわち、静的に圧下して得られる圧痕は板の塑性条件とロールの弾性条件を満足した結果を表わしているものと推察できるので、もし圧痕の弾性回復が無視できると仮定すれば圧痕幅分布から上下ワークロールのバレル方向の間隙分布が求められることが期待できる。

2 段圧延機においてはロールクラウンの形状としてフラットロールを用いて圧下したときのロール撓み曲線を補正する形状のクラウンをつければよいことが知られている³⁾。多段圧延機における本研究において、圧下力が小さいときは太鼓形圧痕、過大となると糸巻形圧痕となることが確かめられ、また、圧下時にはロールが板側に曲がる傾向が観察できたので、上下ワークロールおよびバックアップロールにすべてフラットロールを使用し、静的圧下を行なつて板に圧痕をつけた。この圧痕幅分布を解析して上下ワークロールのバレル方向の間隙分布を計算した。

圧下力を 1.0~6.7 t の範囲に変えた圧痕幅分布を Fig. 9 に示す。この図からわかるように、いずれの圧下力でも板端の圧痕幅が中央より大きい、いわゆる糸巻形圧痕で圧板した場合には端延びとなる。この結果から圧痕深さの板幅方向の分布を計算した。圧痕深さの計算にはロール扁平変形後のロール半径 R' を使用したが、

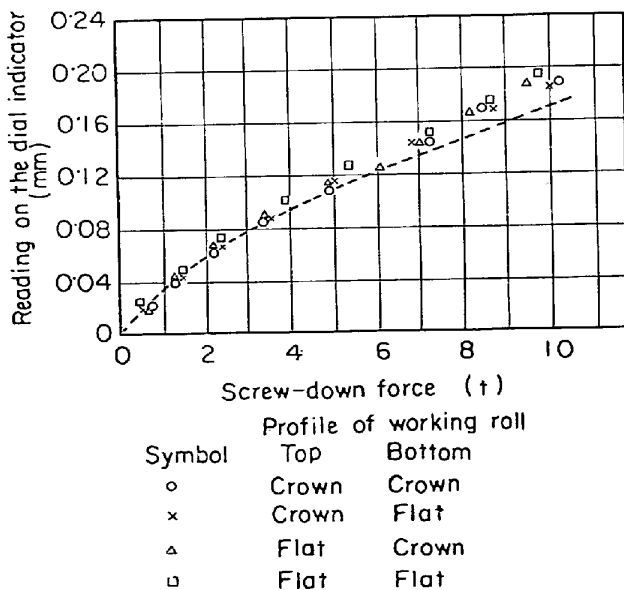


Fig. 8. Values of δ_c in Fig. 3 for various combination of working roll profiles. Broken line shows the measured values of displacement when loaded without strip.

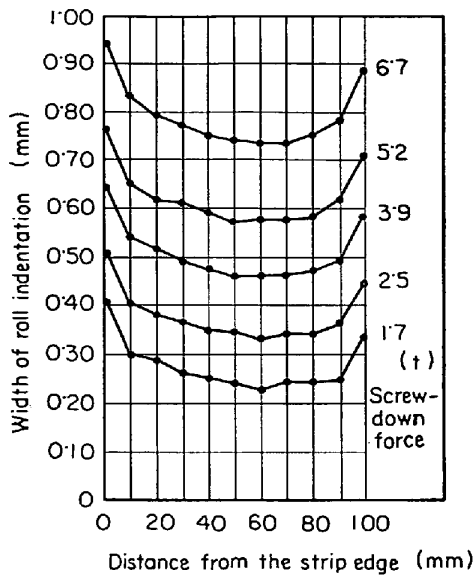


Fig. 9. Transverse distribution of roll indentation width when the static screw-down was carried out by using the flat rolls.

$R'/R=1.2$ と仮定*)して、ロールバレル方向には変わらないとした。

圧下力が 1.7, 3.9, 6.7 t について圧痕深さを計算した結果を Fig. 10 に示す。図は板幅方向の圧痕深さ分布を示すものである。Fig. 9 の圧痕幅分布からわかるように、この実験条件では圧延機の特徴が現われて板幅の中心に関して非対称であるため補正を行なっている。その過程は Fig. 10 の 6.7 t の例で示すように、板端の圧痕深さを結ぶ線が水平となるように●印(計算値)を縦軸と平行に移動して○印とした。この操作を行なつた○印

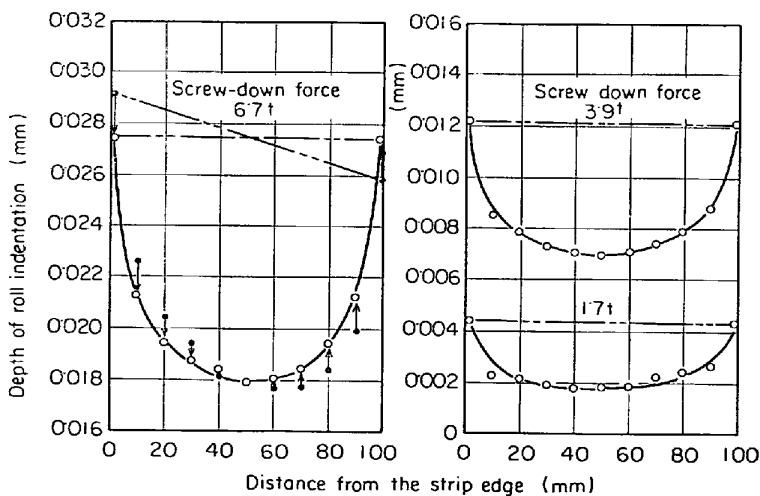


Fig. 10. Variation on the depth of roll indentation in direction of strip width (The depth was calculated by supposing $R'/R=1.2$ from the width of roll indentation).

をなめらかな曲線で結んだものが実線で、板の中央部で平らで、板端で急に下がる曲線**)となる。

つぎに、実験に使用したロールクラウンの適正度を定量的に調べるために、板幅方向の圧痕深さの分布曲線とロールクラウンの形状を比較した。曲線の比較の便宜上、

$$\text{圧痕に関する値} = (d_{\max} - d_i) / (d_{\max} - d_{ic})$$

$$\text{クラウンに関する値} = C / C_{\max}$$

を同一図表上に図示した。ただし、

d_{\max} : 圧痕の最大深さ (板端における圧痕深さ)

d_{ic} : 板幅の中央における圧痕深さ

d_i : 板幅の各点における圧痕深さ

C_{\max} : ロールバレル中央のクラウン量

C : ロールバレルの各点におけるクラウン量

である。

その結果を Fig. 11 に示している。ロールバレル中心に関して対称であるため半分だけを図示した。図の実線は圧痕深さの分布曲線であるが、上述の操作を行なうと圧下力が 3.9 t, 6.7 t の場合も曲線の形状に変化は見られない。この実線がロールの弾性条件と板の塑性条件を満足する上下ロール間隙のバレル方向の分布曲線であり、またフラットロールの撓み曲線と考えられる。すなわち本圧延機で平坦な薄板の圧延できる最適のロールクラウンの形状である。点線は実験に使用したロールクラウンの形状であり、実線と比較することにより適正度が定量的に判明する。2段圧延機で適正とされている拡物線形クラウンは実線と極端にかけ離れており、角形あるいは円形クラウンの方が実線と近似している。板端に対応するところでは角形と一致し、中央部では円形とほぼ合致している。

以上の結果から、角形ないし円形クラウンが多段圧延機の圧下時における上下ロールの間隙分布曲線とよく近似して、放物線形よりも適正なクラウンであることが定量的に実証できた。前述した圧痕幅分布の測定、ならびに圧延の実験では解析の簡単のため、クラウンロール1本(下側)とフラットロール1本(上側)を使用したが、Fig. 11の結果からは円形クラウンと角形クラウンを組み合わせで使用の方が、両者の効果が相殺されて、より平坦な薄板、あるいは平行な圧痕が得られるものと思われる。また、同図で放物線形クラウンの曲線を上に平行移動して板端から10~20 mmの間の曲線を実線と重ね合わせ

*) $R'/R=1.2$ と仮定した理由は補遺[1]に示す。

**) この現象の検討は補遺[2]に述べる。

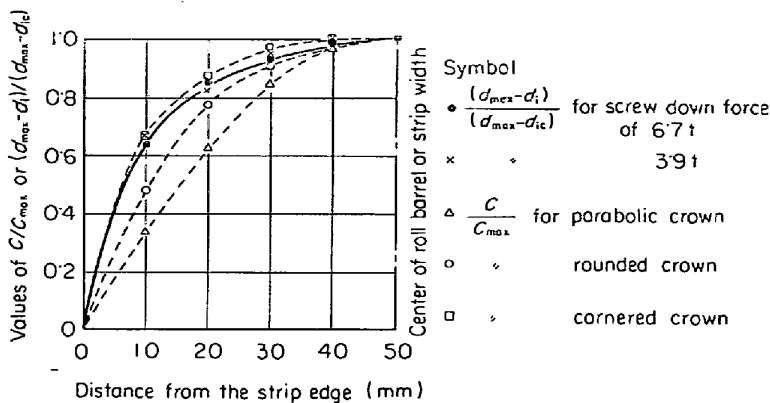


Fig. 11. Comparison between the variation on depth of roll indentation in direction of strip width and the profile of roll crown. In figure, the value of C/C_{max} indicates the profile of roll crown, while that of $(d_{max}-d_1)/(d_{max}-d_{1c})$ is concerning to the variation of roll indentation depth.

Crown of working roll (mm)	0.003						0					
	82.6	82.6	82.6	88.9	88.9	95.2	76.2	76.2	76.2	88.9	95.2	
	Length of central parallel portion (mm)		0002		0004		0006		0006		0006	
Taper (mm/mm)	0.002		0.004		0.006		0.002		0.004		0.006	
70												
60												
50												
40												
30												
20												
10												

△ symbol shows the edge rippling, × the center buckling and ○ the flat shape. In addition, numbers of symbol show the intensity of rippling or buckling.

Fig. 12. Effect of shape of 1st intermediate roll on flatness of rolled strip.

The dimension of material used was 0.055mm thick × 100 mm width. Applied front tension was 15 kg/mm² and back tension 20 kg/mm².

Rolling condition
 Applied tension
 Front : 15 kg/mm²
 Back : 20 kg/mm²
 Thickness
 Enter : 0.054 mm
 Exit : 0.047 mm
 Rolling pressure
 2.0 t



Photo. 3. The strip rolled with 76.2 mm Flat, 0.004 Taper roll.

て比較を行なえば、中延び、端延びが共存する条件となることが容易にわかる。

この解析ではロールクラウンの形状(曲線)だけに関するもので、圧下力によるクラウンの大きさの絶対値に対する考察は行なっていないが、これは今後の課題と考えられる。

3.2 第1中間ロールの形状

3.2.1 種々の形状の第1中間ロールによって圧延した薄板の平坦さ

薄板の平坦さにおよぼす第1中間ロールの影響を調べるために、平坦さの判定の便宜上、板厚の小さい素材を使用して圧延を行なった。素材は0.055 mm厚 × 100 mm幅で68.7%冷間圧延した低炭素鋼板である。圧延時の前方張力は15 kg/mm²、後方張力は20 kg/mm²で各ロールについて、圧下力は

圧延可能な範囲で変化した。結果を Fig. 12 に示す。図の縦軸は圧下力であり、板の平坦さは肉眼で定性的な判定を行ない、○印は平坦なもの、×印は中延び、△印は端延びを示す。また、その数は現われ方の程度を示し、数の多い方が延び方が顕著であること、すなわち、平坦さが悪いことを表わしている。図の左半分は、クラウン量のわずかなワークロールとテーパロールを共用した場合で、右半分はワークロールとしてフラットロールを使用したときの結果である。

Fig. 12 から、比較的平坦な薄板が圧延できるテーパロールの形状は、平行部長さが長いもの(95.2 F, 88.9 F)か、平行部長さが短くてテーパ量の少ないもの(82.6 F, 0.002 T)であることがわかる。ただし、平行部長さが長くてテーパ量の小さいものに対する結果は図から除いている。その理由は、素材が加工硬化しているので、平坦な薄板の得られた条件では、ほとんど板厚が減少しておらず、それ以上に圧下力を増大すると極端な端延びとなつて板が切断したためである。

一方、平行部長さが短くてテーパ量の大きいもので

は、Photo. 3 のように矢印で示すテーパ肩部より数 mm 中央よりの部分が極端に延びており、平坦さが著しく悪くなっている。この延びはテーパ肩部に影響された異常延びである。このような異常延びはテーパ量の小さいロール(0.002T)ではあまり顕著ではなく、また、平行部長さの長いロールでは板の延び方にテーパ肩部の影響がほとんど現われず、平坦さが良好であった。

3.2.2 平坦な薄板の得られる圧下力とロール形状との関係

つぎに、平坦な薄板の得られる圧下力、圧下率とロール形状との関連を系統的に検討するために、加工硬化の少ない素材(スキンパスした低炭素鋼板、厚さ 0.144 mm、板幅 100 mm)を使用して各ロールで圧下力を広範囲に変化させて圧延を行なった。この場合、ワークロールはフラットロールを使用した。

厳密には、すべてのロールで平坦な薄板は得られないが、圧下力を増加して端延びの現われ始める条件を、そのロール形状で最も平坦な薄板の得られる圧下力 (P_f) と仮定して結果を整理した。その結果を Table 4 に示す。表より判明することは、平行部長さが同一であれば

Table 4. Effect of shape of 1st intermediate roll on the rolling reduction in one pass and the rolling pressure by which the strip of comparative flat shape could be obtained.

Length of central parallel portion (mm)	Taper (mm/mm)	Rolling reduction in one pass (%)	Rolling pressure (t)
76.2	0.002	21.5	2.0
	0.004	43.1	3.4
	0.006	45.0*	4.7
82.6	0.002	13.2	1.2
	0.004	30.6	1.7
	0.006	41.0	2.7
88.9	0.002	9.7	0.73
	0.004	11.1	1.2
	0.006	13.2	1.6
95.2	0.002	6.3	0.73
	0.004	8.3	1.2
	0.006	9.4	1.5

The * symbol shows that edge rippling was not appeared. Materials were the skin-passed low carbon steel strip having the dimension of 0.14mm thick x 100 width.

テーパ量が大きくなるほど平坦な薄板の得られる圧下力 P_f は増加し、したがって 1 パス圧下率も大きくなる。一方、テーパ量を同一にとつて比較を行なうと平行部長さが長くなるほど P_f が小さくなる。ただし、76.2 F, 0.506 T ロールでは圧下力を 4.7 t にしても端延びが現われず、圧延モーターの能力制限により、これ以上の圧下力による圧延を行なうことは不可能であった。

3.2.3 静的圧下による圧痕幅分布、および それと圧延した薄板の平坦さとの対応性

第 I 中間ロールの形状の圧痕幅分布におよぼす影響について調べるとともに、第 I 中間ロールにテーパロールを使用しても圧延した薄板の延び方と圧痕幅分布と対応性があるか、どうかについて検討した。

素材、圧下条件、圧痕幅分布の測定法は 3.1 とまったく同じである。各種の第 I 中間ロールを用いて静的に圧下した場合に得られた圧痕幅分布の特徴について述べる。

平行部長さを一定としてテーパ量の影響を図示したものが Fig. 13 a), b) である。図はほぼ同一の圧下力について比較を行なったものである。Fig. 13 a) は 76.2 F ロールでテーパ量が 0.002, 0.004, 0.006 のものを比較した場合で、板幅の中央部 (20~80 mm) の圧痕幅分布は圧下力が同一であればテーパ量の大小にかかわらず、ほとんど同じであることが図から明らかである。テーパ量によつて異なるのは、板の端部 (0~20 mm, 80~100 mm) の圧痕幅分布であり、テーパ量が大きくなるにしたがつて圧痕幅は小さくなり、テーパ量による順序は圧下力が大きくなつても変化しない。たとえば、圧下力が 2.0 t の場合をみると、0.002 T ロールでは中央部より板端の圧痕幅がわずかに大きく、最も圧痕幅の狭い点を結んだ規準線をもとに考えればわずかの端延びが生ずる。しかし、0.006 T ロールでは逆に板端の圧痕幅が小さく中延びになる。

Fig. 13 のように、圧下力が一定であればテーパ量が異なつても板幅の中央部の圧痕幅分布はほぼ同一であることは、Table 4 の結果と一見矛盾するように思われるが、その理由はつぎのように考察できる。

板幅の中央部における圧痕幅分布は圧延機の弾性曲線と板の塑性曲線とによつて規定されるものと考えられる。HESSENBERG, SIMS¹³⁾ によれば、ロール出口板厚は圧延機の弾性曲線と圧延板の塑性曲線との交点で表わされるとしている。板の中央部における圧痕幅はロール出口板厚に相当すると考えられるので、素材は同一であるから塑性曲線は一定である。一方、ロールとロールで静的に圧下を行ない、ハウジング内の変形量の総和を圧下

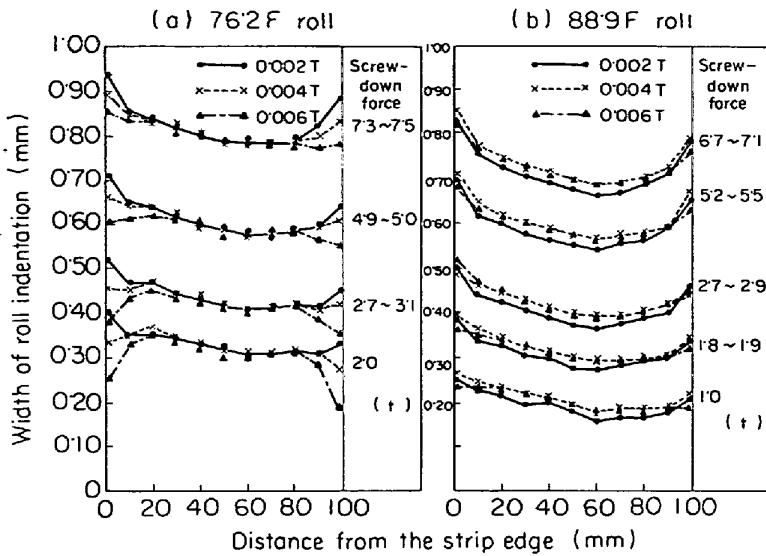


Fig. 13. Effect of taper on the transverse distribution of roll indentation width.

用ラックの上昇量とワークロールの圧下量の関係に基づいて測定したが、変形量の総和は第1中間ロールのテーパ量により、ほとんど差異は認められなかった。すなわち、テーパ量の大小により圧延機の弾性曲線に差異はほとんどないものと思われる。したがって、圧下力が一定の場合には、弾性曲線と塑性曲線で規定される中央部の圧痕幅は一定のはずである。

Fig. 13 b) は平行部長さが大きい 88.9F ロールに対する結果であるが、Fig. 13 a) ほど明白でないが同様の傾向が観察できる。△印 (0.006T) と×印 (0.004T) では中央部の圧痕幅は同一であり、○印 (0.002) も縦軸

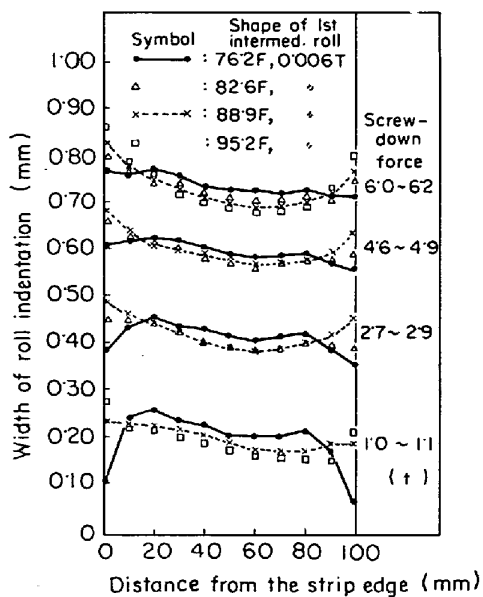


Fig. 14. Effect of length of central parallel portion on the transverse distribution of roll indentation width.

と平行にずらせば a) と全く同様な傾向となる。

つぎに、テーパ量を同一 (0.006T) にとって平行部長さの圧痕幅分布におよぼす影響を調べたが、その結果が Fig. 14 である。平行部長さが異なる4種について全部を図示すると図が複雑となるので典型的なものだけ図示し、76.2F, 88.9F だけについて実線、点線、点線で結んだ。この図から、平行部長さが変わっても圧下力が一定であれば、中央部の圧痕幅分布はほとんど変化せず、板端部の圧痕幅分布のみに平行部長さの影響が現われていることがわかる。すなわち、平行部長さの短い方が板の端部の圧痕幅が小さくなっている。

以上の圧痕幅分布に対する第1中間ロールの形状の影響について括めると、テーパ肩部より内側、すなわち板幅中央部の圧痕幅分布は平行部長さやテーパ量の大小によつてほとんど変化せず、ロール形状によつて変わるのは端部における圧痕幅分布である。換言すれば、板の伸び方を左右するのは端部の圧痕幅分布であると考えられる。このことから、板端部からテーパ肩部に至るロール弾性変形がロール形状により異なり、圧痕幅分布を変化させ、したがって薄板の平坦さに影響するものと推察できる。

つぎに、第1中間ロールにテーパロールを使用したときの圧痕幅分布と圧延した板の伸び方との対応性を検討した。すなわち、圧痕幅分布を基にして描いた伸び方の概念図を圧延した薄板の形状と比較した。圧痕幅分布には圧延機の特徴が現われているので、両端の圧痕幅を直線で結び、傾斜した直線を水平にして各測定点を縦軸に平行に移動することにより補正した。この操作により板幅の中心に対称な圧痕幅分布となるので、板の伸び方の推定図を描いた。その結果が Fig. 15 a), b), c), d) である。この図は実験結果の薄板の写真を提示した条件、ならびに、特徴の明白な条件だけを選択して示した。Fig. 15 a), b) は比較的平坦な薄板の得られた条件に相当するもので、圧痕幅分布と規準線 (2点鎖線) との差はわずかであり、図からもほぼ平坦な板が圧延できることが明らかである。Fig. 15 c) は 76.2F, 0.006T ロールの 4.9 t の場合の結果である。圧延した結果は Table 4 に示したように 4.7 t の圧下力においても端伸びが現われなかった。Fig. 15 c) の圧痕幅分布からの推定結果も、端の圧痕幅が中央より小さく端伸びが現われないことを示している。また、このような平行部長さの短いロール形状では、テーパ肩部に相当するところの

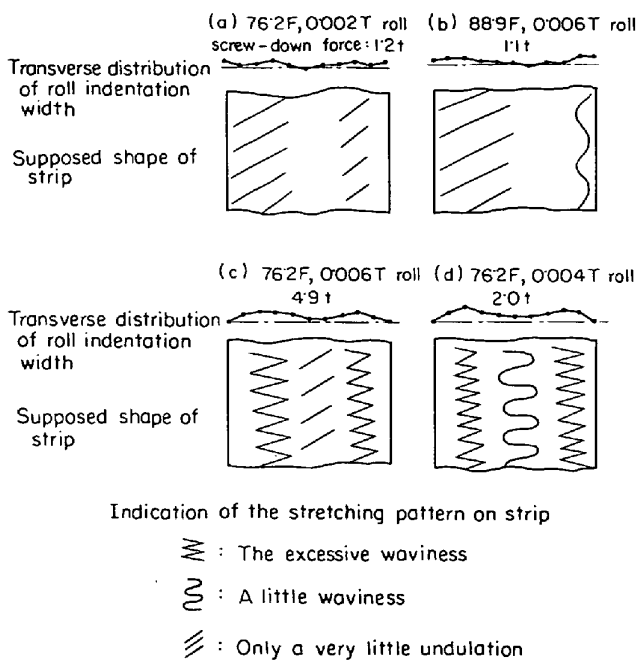


Fig. 15. The shape of rolled strip supposed from the transverse distribution of roll indentation width.

圧痕幅が他より大きく、この部分が極端に伸びることも推定でき、圧延結果とよく合致している。Fig. 15 d) は 76.2 F, 0.004 T ロールで圧下力が 2.0 t に対するもので Photo. 3 に示した板と同一圧下条件である。Photo. 3 と Fig. 15 d) は定性的に一致しており、テーパ肩部の影響も非常に明瞭に現われている。すなわち、平行部長さが短く、テーパ量が大きいものではテーパ肩部の影響が圧痕幅分布にも明白に現われ、圧延した薄板の伸び方、あるいは平坦さとよい対応を示している。

ここで注意すべきことは、同一圧下力において板の中央部の圧痕幅分布が第 1 中間ロールの形状のいかんにかかわらず一定であることを前述したが、これは板の中央部の伸び方が同じであるという意味でない、ということ

である。板の伸び方に関しては Fig. 15 で示したように規準線と圧痕幅分布との差で表わされるため、同一圧下力では板の伸び方はロール形状により著しく差異がある。このことは、Fig. 13 あるいは Fig. 14 に規準線を引いて考えれば明らかとなる。たとえば Fig. 14 で 88.9 F, 0.006 T ロールでほぼ平坦な薄板の得られる圧下力 (1.1 t) では、76.2 F, 0.006 T ロールにおいては規準線と中央部の圧痕幅の差は 0.12 mm となり極端な中伸びになる。

3.2.4 テーパーロールを使用した場合のワークロールベンディング

静的圧下による圧痕幅分布からワークロールのベンディングを推定すると Fig. 16 の想定図に示す 2 種類のベンディングを考えなければならない。この実験では上側のロールはすべてフラットロールであるから 3.1.3 からわかるようにワークロールは板側、すなわちパレル端が下側に曲がる。つぎに、下側のワークロールのベンディングを予想するために圧下力 2.0 t のときの圧痕幅分布を考えてみることにする。圧痕幅分布から考察すると下側の第 1 中間ロールの形状によつてロールベンディングが異なるものと思われる。Fig. 16 a) は平行部長さが短くて、テーパ量の大きい場合であるが、テーパ肩部に対応した部分から下側、すなわちテーパロール側へ曲がれば上に示した圧痕幅分布となることが予想できる。このようなベンディングを便宜上“肩部ベンディング”と呼ぶ。

一方、Fig. 16 b) は平行部長さが大きいテーパロールに対するもので、やはり圧痕幅分布から推定すると、下側ワークロールは上側に曲がらなければならない。このような曲がり方を“板側ベンディング”と呼ぶことにする。

以上は圧痕幅分布からの推定図であるが、実際にこのような現象があるかどうかを実験的に確かめるため 2.4

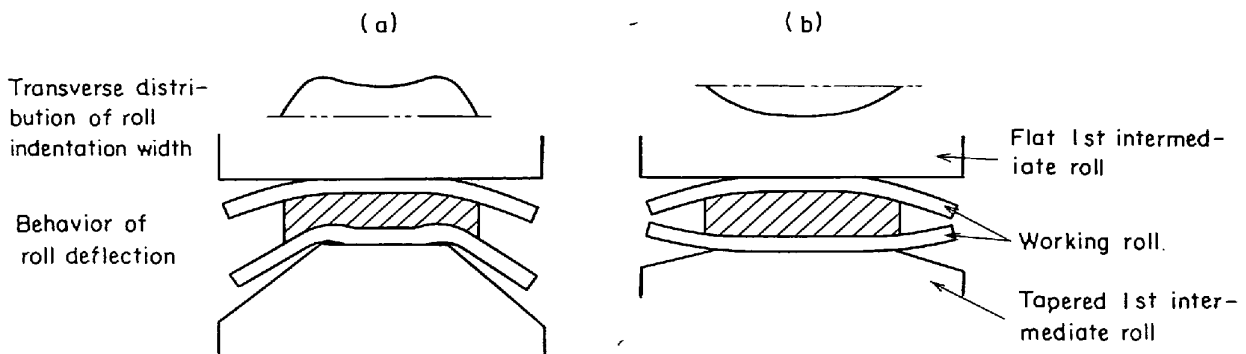
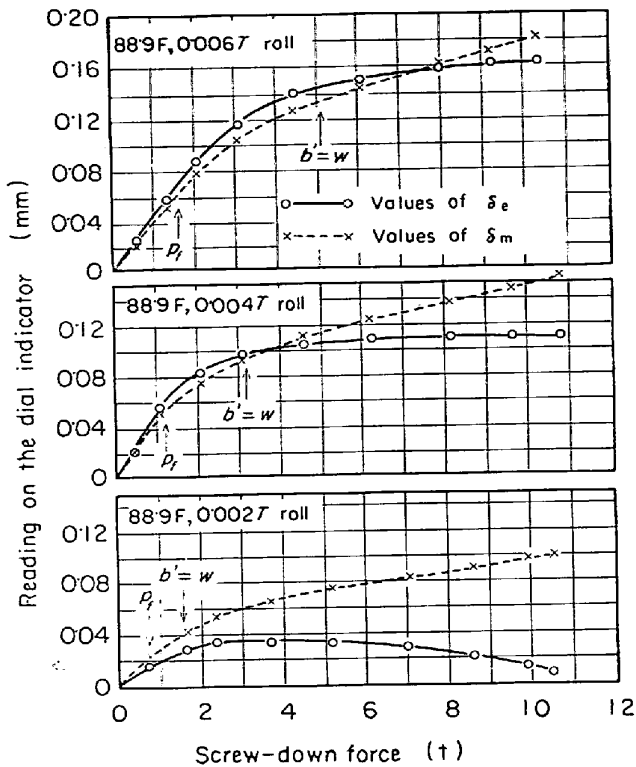


Fig. 16. Schematic figures of working roll deflection when the tapered roll was used. (a) shows the deflection to the side of tapered roll, and (b) the deflection to the side of strip.

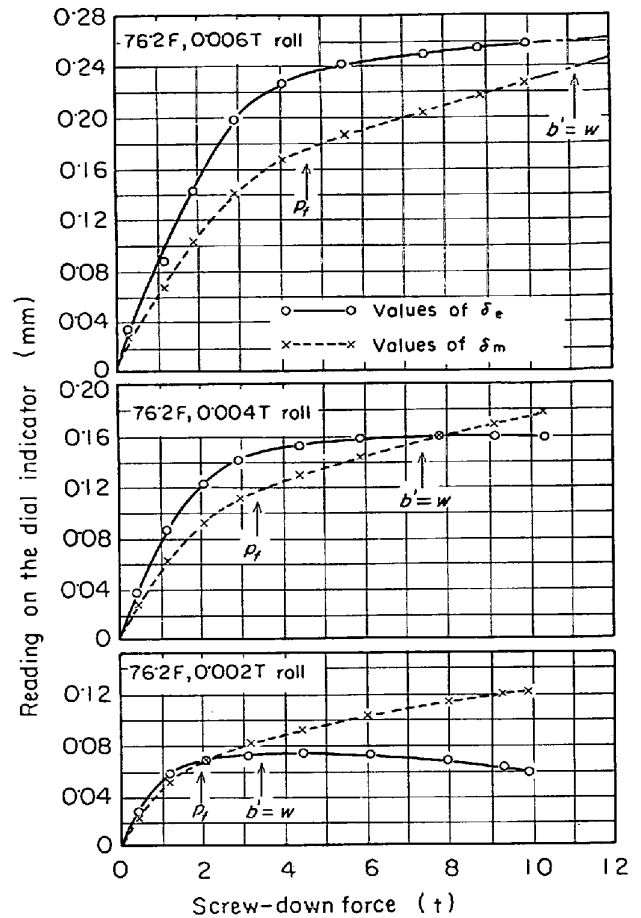


P_f : the rolling pressure by which the strip of flat shape could be obtained.
 b' : calculated length of contact on the roll barrel after the occurrence of contact deformation.
 w : width of strip.

Fig. 17. Relation between screw-down force and the displacement of roll at the position of M and E. This figure shows the tendency of roll deflection when the tapered roll of 88.9 mm length of central parallel portion was used.

で示した方法で測定した。実験条件は静的圧下により圧痕をつけた場合と同じである。測定結果を Fig. 17, 18 に示す。Fig. 17 は 76.2 F ロールに対するもので、Fig. 18 は 88.9 F ロールの結果で、いずれも横軸に圧下力、縦軸に変位量を取り、○印(実線)は δ_e の値、×印(点線)は δ_m の測定値を示している。図を考察する上で注意しなければならないことは、肩部ベンディングにおいてワークロールとテーパロールとがバレル端で密着しないかどうか、また、板側ベンディングにおける上下ワークロールの密着の有無に対する検討である。この2点に関しては、バレル端の間隙と変位量、圧痕深さと変位量をそれぞれ比較することにより、上述した密着は起こっていないことが確認できたので、つぎに考察を加えた。

Fig. 17, 18 を見ると 88.9 F, 0.002 T ロールを除くいずれのテーパロールにおいても圧下力の低いときは $\delta_e > \delta_m$ となり、Fig. 16 a) のような肩部ベンディングが起り、ある一定圧下力より大きくなると $\delta_e < \delta_m$ と



P_f : the rolling pressure by which the strip of flat shape could be obtained.
 b' : calculated length of contact on the roll barrel after the occurrence of contact deformation.
 w : width of strip.

Fig. 18. Relation between screw-down force and the displacement of roll at the position of M and E. This figure shows the tendency of roll deflection when the tapered roll of 76.2 mm length of central parallel portion was used.

なつて Fig. 16 b) の板側ベンディングが起こることが明白である。しかし、76.2 F, 0.006 T ロールにおいては実験を行なつた圧下力の範囲では板側ベンディングは認められないが、曲線を延長すると $\delta_e < \delta_m$ となることが推察できる。 $\delta_e = \delta_m$ (点線と実線の交点) では肩部ベンディングから板側ベンディングへの転移条件であると考えられ、この圧下力においてはロール軸が水平になることを示すものである。この転移条件は平行部長さが一定であれば、テーパ量が小さいほど低圧下力側に移動し、また平行部長さが大きいほど低圧下力で起こる。

この転移条件はワークロールとテーパロールの接触変形後の接触長さ $b'^{10)}$ と何らかの関連があると思われるので。図に $b' = w$ (板幅) の圧下力を矢印で示した。0.004 T, 0.006 T ロールでは $b' = w$ よりわずかに大き

い圧下力に転移条件があり、0.002T ロールでは $b' = w$ より小さい圧下力であるが、いずれも $b' = w$ の近傍の圧下力でベンディングの転移が起こっていることがわかる。

両図において、平坦な薄板の圧延できる圧下力 P_f も矢印で示しているが、この値が転移条件と一致しないのは、上側の第1中間ロールはすべてフラットロールであったため、上側ワークロールが板側ベンディングを起こしたゆえと考えられる。もし、上下の第1中間ロールに同一のテーパロールを採用するならば、この転移条件が平坦な薄板の圧延できる圧下力と一致するものと推察できる。

以上のことから、第1中間ロールにテーパロールを用いた場合、圧痕幅分布から推論したようなワークロールベンディングが起こることを実証することができた。

3.2.5 テーパーロールの組合せと圧延した薄板の平坦さ

3.2.1 で述べたように、第1中間ロールにテーパロールを採用した場合、最も平坦な薄板の得られるロール形状は、平行部長さが大きい場合か、平行部長さが小さくてもテーパ量の少ないロールを用いた場合であった。Table 4 あるいは Fig. 12 からわかるように、これらのロール形状では、いずれも平坦な薄板の得られる圧下力は小さく、したがって1パス圧下率も小さいことになる。それで、以下においては大きい1パス圧下率を与え、しかも、平坦な薄板の得られる圧延条件を検討するために、2本以上のテーパロールを組合わせて使用する方法について研究した。

大きい1パス圧下率を得る方法は、Table 4 より明らかかなようにテーパ量の大きいロールを用いるのも1つの方法であるが、他の方法としては、小さいテーパロールを2本以上組合わせて使用することも考えられる。この二つの方法で圧延を行ない、ロールを組合わせた場合の薄板の平坦さに対する影響を調べた。

Table 3 に示した 95.2F, 0.0189T ロールを1本だけ使用した場合と、95.2F, 0.0065T ロール2本と 95.2

F, 0.006T ロール1本を組合わせて使用した場合について同一圧下力で圧延した薄板の平坦さを比較した。その場合の圧延条件を Table 5 に示し、得られた薄板の写真を Photo. 4 a), b) に示す。この二つの条件を比較すると圧下率は同じであるが、薄板の平坦さは著しく相異し、テーパ量の大きいロールを1本だけ用いたときは Photo. 4 a) に示すように顕著な端延びを生じた。他方、3本のテーパロールを組合わせると端延びはごくわずかで中延びが生じた (Photo. 4 b) 参照)。一見、平坦さからすれば Photo. 4 b) の方が悪いようであるが、Photo. 4 a) の方は極端な端延びによる薄板の切断を防ぐため前方、後方張力を増加しているため、板幅の中央部の平坦さが矯正されたものであるが、Photo. 4 b) は

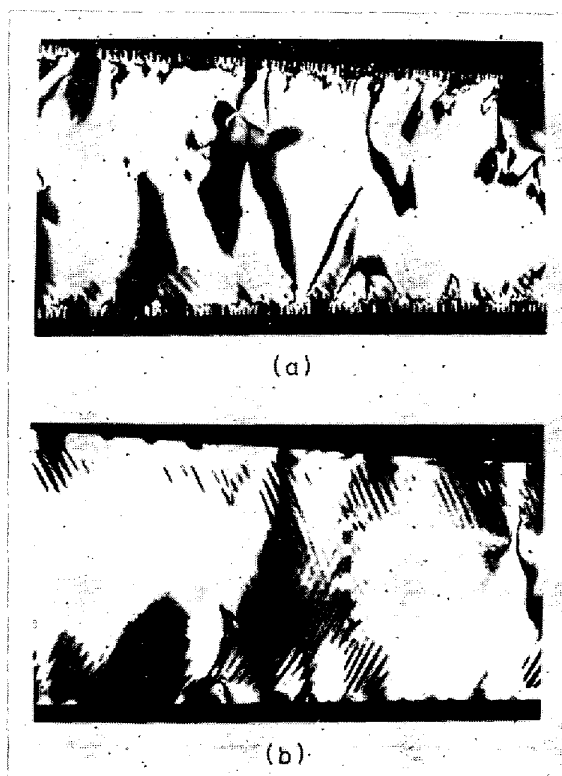


Photo. 4. Effect of the combining of tapered rolls on the flatness of rolled strip. In photograph, (a) and (b) correspond to those of table 5 respectively.

Table 5. Rolling condition of strip shown in Photo. 4.

Symbol on Photo. 4	Shape of 1st intermediate roll	Thickness of strip (mm)		Applied tension during rolling (kg/mm ²)		Rolling pressure (t)
		before rolling	after	front	back	
(a)	Onyl one of 95.2 F, 0.0189 T	0.045	0.027	19	35	3.5
(b)	combined {one of 95.2 F, 0.006 T two of 95.2 F, 0.0065 T	0.046	0.028	15	20	3.5

前方張力が小さいので平坦さが悪くなっている。b) の場合でも a) と同一の張力をかければ板の中央部の波模様はなくなり、a) より平坦な薄板が得られる。

以上の結果よりいえることは、圧下率を大きくして平坦な薄板を得るためには、大きいテーパ量のロールを 1 本だけ使用するよりも、テーパ量を分割して小さいテーパ量のロールを組み合わせる方が有効である。

センデミーヤ 20 段圧延機には 4 本の第 1 中間ロールがあるので、テーパロールの組み合わせ方法(設定位置)と薄板の平坦さ、圧下力、圧下率の関係をつきに求めた。得られた結果を Fig. 19 に示す。82・6F ロールを用い、0・002T, 0・004T ロールの 2 本を合わせてロール設定位置を図のように変えたとともに、同一平行部長さで 0・006T ロール 1 本だけを使用した場合と比較した。

Fig. 19 よりわかるように、2 本のテーパロールを使用する場合、上下左右どこに入れても圧下力が一定であれば得られる薄板の平坦さ、1 パス圧下率は変化しない。しかし、82・6F, 0・006T ロールを 1 本だけ使用したときは、同一圧下力において得られる 1 パス圧下率は 2 本を合わせたときとほぼ同じであるが、得られる薄板の形状は異なり、小さい圧下力においても端延びが現われており、前述した結果が再確認できた。

テーパロールを合わせた場合の圧痕幅分布やワークロールベンディングに関しては、系統的な研究を行な

っていないが、ロールベンディングなどの挙動については 1 本だけを使用した結果から組合わせた場合についても定性的な類推は可能であろう。しかし、詳細に関しては今後の課題と考えられる。

4. 結 言

小径ワークロールをもつ多段圧延機で平坦な薄板を得るための圧延条件を基礎的に検討するために、ロール形状と圧延板の形状との関連を求めた。すなわち、静的圧下によるロール圧痕の形状(圧痕幅分布)と圧延した薄板の平坦さとの対応性を求め、ワークロールベンディングの傾向を実験的に確認し、平坦な薄板の得られるワークロールクラウンの形状、第 1 中間ロールの形状を決定した。結果はつぎのように要約できる。

まず、ワークロールクラウンの形状に関しては、

1) 一定クラウンをもつたワークロールで静的に圧下を行なつて板についたロール圧痕の形状を解析すると、圧下力が小さい範囲では太鼓形、圧下力が過大となると糸巻形、その中間の圧下力ではほぼ平行形の圧痕となることが明白となつた。

2) 静的圧下による圧痕幅分布を求めたときと同一圧下条件で圧延し、圧延した薄板の平坦さと圧痕幅分布との対応性を求めた。圧痕が大鼓形では中延び、糸巻形では端延びとなり、平行形圧痕の場合に平坦な板が圧延でき、圧痕幅分布と圧延した薄板の平坦さとはよい対応を示した。すなわち、圧痕幅分布において最も圧痕幅の小さい場所を結んだ規準線を引くと、その規準線と圧痕幅分布との差異で板の延び方を定性的に表わされることが明らかとなつた。

3) 静的圧下におけるロールベンディングの傾向をダイヤルインデケータで測定したが、上下ワークロールがクラウン、フラットの組合わせのいかんにかかわらず、板側に曲がることを多段圧延機においても確認することができた。

4) 静的圧下による圧痕の平行度と圧延した薄板の平坦さから、放物線形クラウンは多段圧延機で平坦な薄板を得るためには適正なクラウン形状ではなく、角形あるいは円形クラウンの方がより適正な形状であることが判明した。

さらに、フラットロール用いて静的に圧下したときの圧痕幅分布から板幅方向の圧痕深さの分布曲線を計算した。この曲線と実験に使用したクラウンの形状を比較することにより上述のことが定量的に実証できた。また、この方法で多段圧延機において平坦な薄板の圧延できる最適のワークロールクラウンの形状が解析できること

Length of central parallel portion (mm)	82・6	82・6	82・6	82・6
Taper (mm/mm)	0・006	0・002 0・004	0・002 0・004	0・002 0・004
Setting position of tapered roll.				
Rolling pressure (t)	50			
	40	Δ × 222	Δ × 311	Δ × 333
Pass red.	30	× 133	× 222	× 266
	20	× 22	× 2・2	× 44
Pass red.	10	%	%	%
		Shape	Shape	Shape
		Pass red.	Pass red.	Pass red.

Fig. 19. Effect of setting position of tapered rolls on the flatness of rolled strip and on a pass reduction.

がわかった。

つぎに、第1中間ロールの形状に関しては

5) 平行部長さ、テーパ量を種々に変えたテーパロールを使用して圧延を行ない、薄板の平坦さを観察した結果、平行部長さの短いロールではテーパ肩部の影響と考えられる異常伸びが現われるが、平行部長さの長いものではこの影響が現われず平坦さが良好であった。これは静的圧下による圧痕幅分布からも明らかになった。

6) 各ロールについて圧下力を広い範囲に変化させて圧延し、端伸びの現われ始める圧下力を、そのロールに関して比較的平坦な薄板の得られる圧下力 P_f と定義すると、 P_f は平行部長さが短くなるほど、またテーパ量が増すほど大きくなる。

7) テーパーロールを用いた場合の圧痕幅分布を測定した結果、テーパ肩部よりパレル中央部（板幅の中央部）に対する圧痕幅分布は、圧下力が一定であれば平行部長さ、テーパ量のいかにかわからず、ほぼ同一であり、ロール形状によつて変化するのは板端部の圧痕幅分布である。

8) テーパーロールを使用したときのワークロールベンディングについて観察した結果、低圧下力では肩部ベンディングが起こり、圧下力の増加とともに板側ベンディングに移行する。その中間の一定圧下力でロール軸が水平となるベンディングの転移条件が存在し、その圧下力はロール形状によつて差異があり、ロール接触変形後の接触長さ b' と板幅とに密接な関係があるように思われる。

9) 1パス圧下率を増大させ、かつ平坦な薄板を得る

ためには、テーパ量の大きいロールを1本だけ使用するよりも、テーパ量を分割した小さいテーパ量のロールを2本以上組合わせて使用の方が有効であることが判明した。組合わせ方は、4本の第1中間ロールの設定位置のいずれに設定しても薄板の平坦さ、1パス圧下率に変化は認められなかった。

補遺 [1]

計算に使用した R'/R を1.2とした理由について、ここで述べる。Photo. 2の圧延を行なったときの板厚、圧下力から HITUCHI の式¹⁴⁾

$$R'/R = 1 + 16(1-r^2)P/\pi E \cdot W \cdot \Delta h$$

ただし E, r : ロールのヤング率, ポアッソン比

W : 板幅

Δh : 圧下量

P : 圧下力

で R'/R をかりに計算してみると $R'/R = 1.1 \sim 1.3$ であつた。

さらに、考案した触針式のプロフィールメーター（読み取り顕微鏡の対物レンズをはずし、触針のついた UT ひずみゲージを取りつけたもので 10^{-4} mm まで歪み計で測定できる。）で圧痕の断面形状を測定し圧痕幅 w_i 、圧痕深さ d_i を求めた。

圧痕をつけた後の板の弾性回復を無視し、圧痕断面が円弧であると仮定すると、ロール扁平変形後のロール半径 R' は、幾何学的関係から

$$R' = w_i^2 / 8d_i$$

で計算できる。

w_i, d_i の測定値、 R'/R をまとめて示したのが Table Aで、板幅方向の3カ所での測定結果である。

Table A. Measured values on the sectional profile of roll indentation and calculated values of R'/R .

	distance from the strip edge (mm) screw down force(t)	Width of roll indentation w_i (mm)			Depth of roll indentation (measured value)			Values of R'/R		
		10	30	50	10	30	50	10	30	50
Parabolic crown	1.25	0.210	0.272	0.277	0.0011	0.0021	0.0024	1.56	1.39	1.26
	3.9	0.494	0.506	0.510	0.0095	0.0101	0.0102	1.12	1.10	1.08
	5.5	0.665	0.651	0.650	0.0156	0.0154	0.0154	1.07	1.10	1.08
Rounded crown	1.5	0.276	0.313	0.300	0.0024	0.0031	0.0027	1.18	1.22	1.33
	3.5	0.472	0.485	0.465	0.0085	0.0085	0.0083	1.09	1.10	1.10
	5.5	0.715	0.700	0.683	0.0182	0.0180	0.0168	1.06	1.08	1.06

この表を見ると、圧下力の小さいところでは板幅方向に R'/R が変化しているようであるが、その傾向は円型クラウンと放物線型クラウンでは逆であり、圧痕深さ、幅の測定誤差あるいは板の弾性回復などのための誤差と考えられる。一方、圧下力の大きいところでは表から明白のように板幅方向には R'/R の変化はないものと考えられる。

Table A の R'/R の値、ならびに前述した圧延時の値を加味して、便宜上 $R'/R=1.2$ と仮定して圧痕幅分布の測定値から圧痕深さを計算した。

補遺 [2]

Fig. 9 において板端から 10 mm のところから圧痕幅が急激に大きくなっているし、Fig. 10 でも板端で急激に下がっている現象が見られる。この板端での drop はロール表面変形でないかとの疑問が起こるので次のような計算を行なった。

FÖPPL によれば(文献13) p. 287~参照)、ロール接触弧内の応力分布が parabolic の場合、ロール半径方向の変位量 Z_1 (Fig. A) は

$$Z_1 = \frac{2(1-\nu^2)P}{W\pi E} \left[1.026 + \log e \frac{R}{(x_0+x_1)} \right]$$

ここで R : ロール半径

W : 板幅

x_0, x_1 : Fig. A 参照

E, ν : ロールのヤング率, ポアソン比

で与えられている。

ここでは、上式が静的に圧下した場合の圧痕の場合にも近似的に成立すると仮定し、式中の (x_0+x_1) が圧痕幅の 1/2 に対応するものとしてロール表面変形を計算した。

圧下力が 1.7, 3.9, 6.7 t について (x_0+x_1) を板端から 90 mm の場所の圧痕幅の 1/2 として Z_1 を計算し、

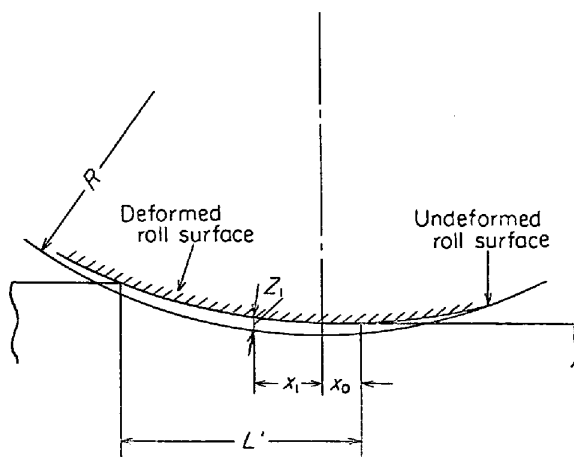


Fig. A. Roll flattening on the arc of contact.

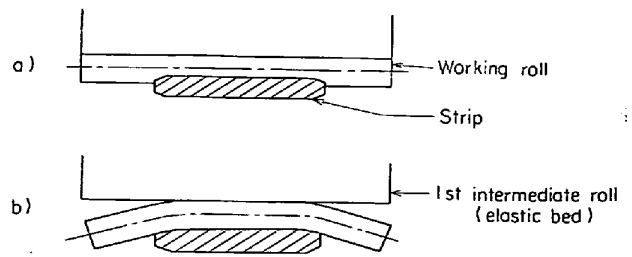


Fig. B. a) Roll surface deformation caused to the roll flattening
b) Roll deflection on the elastic bed.

板端 (99 mm) のところの圧痕深さと 90 mm のところの圧痕深さの差 a (drop 量) を Fig. 10 より求めて比較すると

$P t$	Z_1 (mm)	a (mm)
1.7	0.00202	0.0017
3.9	0.00386	0.0034
6.7	0.00579	0.0062

となり、この結果からは drop 量と表面変形とは、ほぼ近似した数値となつていことがわかる。

しかし、Fig. 3 の測定法でロール延長上の 2 点, M, E の変位を測定するとロール端でのベンディングの傾向が明らかに観察できる (Fig. 7)。

したがって、板端での drop は Fig. B の略図に示すロール表面変形によるもの、弾性床上の梁のようなベンディングの両方が推察できる。この研究の段階ではどちらの現象が主役をなすかについては結論できず、なお今後検討の余地があるので、本文中では drop の理由については考察しなかつた。

この研究にご協力下さった東北大学金属材料研究所 福田武司氏、同所工業化第一研究室の諸氏、当時学生であつた新林孝文氏(現在、住友金属工業 K K) に深甚の謝意を表す。

文 献

- 1) W.K.J. PEARSON: J. Inst. Metals, 93 (1964~65), p. 169
- 2) 田中, 角川, 福田: 日本金属学会誌, 26 (1962), p. 112
- 3) E.C. LARKE: The Rolling of Strip and Plate, (1952) [Chapman and Hall Ltd.]
- 4) F. LINDEMAN: Stahl u. Eisen, 82 (1961), p. 1350
- 5) B. FAZAN: Freiburger Forschung, 96 (1964), p. 5
- 6) O. PAWELSKI: Stahl u. Eisen, 82 (1962), p. 1450
- 7) 藤沢, 小松: 塑性と加工, 4 (1963) 27, p. 195
- 8) 塩崎: 塑性と加工, 9 (1968) 88, p. 315
- 9) M. D. STONE: Z. Metallk., 58 (1967), p. 1

-
- | | |
|--|---|
| <p>10) 田中, 吉識, 福田: 塑性と加工, 2 (1961) 9, p. 325</p> <p>11) 田中, 寿, 福田: 日本金属学会, 昭和 42 年春期講演会概要</p> <p>12) 吉識: 未発表, 学位論文</p> | <p>13) <i>L. R. UNDERWOOD</i>: The Rolling of Metals, (1952), p. 294 [Chapman and Hall Ltd.]</p> <p>14) <i>W. C. F. HESSENBERG</i> and <i>R. B. SIMS</i>: Proc. Inst. Mech. Eng., 166 (1952), p. 75</p> |
|--|---|
-