

冷間タンデムミルにおけるプロフィール制御技術

藤田 文夫*・釜瀬 敏秀*²・佐々木 健人*³

Sectional Profile Control in a Cold Tandem Mill

Fumio FUJITA, Toshihide KAMASE and Taketo SASAKI

Synopsis : In cold rolling, sectional profile must be able to be controlled within the limited region where edge drop grows by rolling. The characteristics of profile control are qualified by the experiments in an experimental mill and a real tandem mill installing a work-roll-shift device with tapered work rolls. Studying stress and strain conditions near width edge in a roll gap introduces some informations concerning to edge drop formation. And the printing ratio of work roll profile, the ratio between change of work roll profile and change of strip profile is introduced as theoretical equations. By this expression, the tendencies of change of edge drop by the change of rolling conditions and work roll shift conditions are able to be estimated. Further the plasticity curve involving the effect of tension feed back near width edge is expressed, and simulations of control of edge drop are performed by introducing the curve into the roll deformation model. By those studies, it is clarified that the range where the plane stress condition affects is a key factor for formation and control of edge drop.

Key words: cold rolling ; work roll shift ; profile control ; edge drop ; roll deformation model ; plane stress condition.

1. まえがき

従来、薄板圧延におけるプロフィール制御は、主に熱間圧延において行なわれ、冷間圧延においてはほとんど制御不可能と考えられてきた。しかし、エッジドロップについては冷間圧延においても変化するものであり、十分制御が可能なるものであると考えられる。エッジドロップの形成については、鈴木ら¹⁾によって検討が行なわれ、板幅端部での材料の塑性変化特性とロールの表面扁平特性の関係が論じられたが、以後プロフィール制御に結び付くような考察は近年の実験的な検討まで行なわれてこなかった。

冷間薄板圧延の場合、エッジドロップの形成は板幅端部に限定した範囲での現象であり、この制御には板幅端部付近で急峻にロールギャップを変化させるような方法を必要とする。本報では、ワークロールの胴端部にテーパ状のプロフィールを与え、これをロール軸方向にシフトする方法²⁾によるエッジドロップ制御特性を、実験圧延機による実験と、実機での圧延によって定量化した結果を報告し、材料の塑性変形特性とロールの弾性変形特性のエッジドロップ形成への関わりを考察した。

2. 実験圧延機の実験

ワークロールシフトによるエッジドロップ制御特性の実

験を行なうため、シフト装置を実験圧延機に組み込んだ。ワークロールにはFig. 1に示すようなテーパをつけ、シフト量Lを定義した。実験圧延機の基本仕様をTable 1に示す。また、圧延後のプロフィール変化の測定は、誤差を少なくする目的で接触式の測定器を実験圧延機内に設置して、材料を止めて圧延前後で同一の位置での測定を行なう方法を採用した。

テーパロールのシフト量、材料寸法、圧延条件のエッジドロップ形成への影響についての実験を行なった。実験条件をTable 2に示す。

Fig. 2にロールシフトの効果の実験のプロフィールの測定結果例を示す。1パス目の場合には板幅端部のプロフィール変化は2、3パス目での効果に比べて大きく、40mmのシフトの場合には大きなエッジアップとなっている。

このエッジドロップ変化を定量化するためSeで表されるエッジドロップ評価値を定義した。

$$Se = \int_0^{\frac{W}{2}} (h(z) - h_c) \cdot m(z) dz \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $h(z)$ は板幅端部から z の位置の板厚、 h_c は板幅中央の板厚、 $m(z)$ は幅方向位置 z における重み関数で、エッジドロップの製品寸法全体への影響度合を評価するのに特徴的な関数 $m(z) = \sqrt{z}$ を選び、この評価値によるエッジドロップの変化をFig. 3に示す。これから判るように第2、

平成4年7月17日受付 平成4年12月8日受理 (Received on July 17, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials and Processing Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation)

* 3 NKK設備技術センター (Plant Construction and Engineering Center, NKK Corporation)

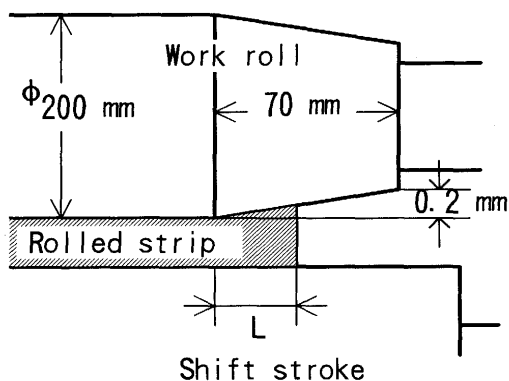


Fig. 1. Profile of tapered work roll.

Table 1. Specification of the experimental rolling mill.

Roll dimension	$\phi 200/\phi 500 \times L500\text{mm}$
Rolling force	max.2.450MN
Rolling speed	max.30mpm
Tension	max.78.4kN
Motor power	75kW $\times 2$

Table 2. Experimental condition.

Pass No.	Reduction ratio / %	Tension (backward/forward) / Nmm ⁻²	Shift length (L) / mm
1	15~65	49/176.5	0~40
2		176.5/196	
3		196/147	
Material	SPHC pickled coil '2.3×"250mm		
Lubrication	tallow 5% emulsion		
Rolling speed	10 mpm		

3パスではSeの値は0~40mmの範囲ではほぼシフト量に比例した変化を示すが、第1パスでは30~40mmで効果が急激に大きくなっているのが判る。また、制御効果も第1パスが一番大きく、板厚が薄くなるにつれて効果が小さくなる。この違いは後の章で考察する。

各パスでの圧下率を変化させて、ロールシフトの効果への影響を調べた。Fig. 4 にシフトを30mmにしたときの各圧下率でのプロフィールの測定結果をSeで示す。圧下率が小さいときの1パス目ではシフト効果は大きいですが、圧下率が高いとき（60%）では通常圧延でのエッジドロップの変化以上にシフト効果が小さくなっているのが判る。

多パス圧延の各パスでのロールシフトの効果をTable 3の条件で調べた実験の、エッジドロップ評価関数で表した結果をFig. 5 に示す。前パスでのシフトの効果が最も大きく最終パス後のプロフィールに影響し、後パスになるにつれて効果が小さく、かつ板幅端部のみに限定されてくる。このため、多パス圧延の場合には前パスにて比較的板幅端部から内側に近いところまでのプロフィールを、後段パスでは比較的端部に近い所のプロフィールを制御するような適切なワークロールシフト効果を適用すれば、ほぼ平坦な断面プロフ

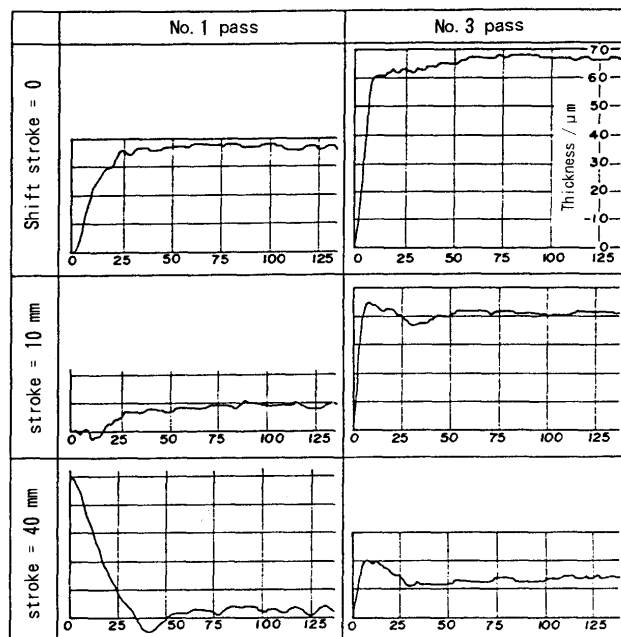


Fig. 2. Measured profile by different roll shift stroke.

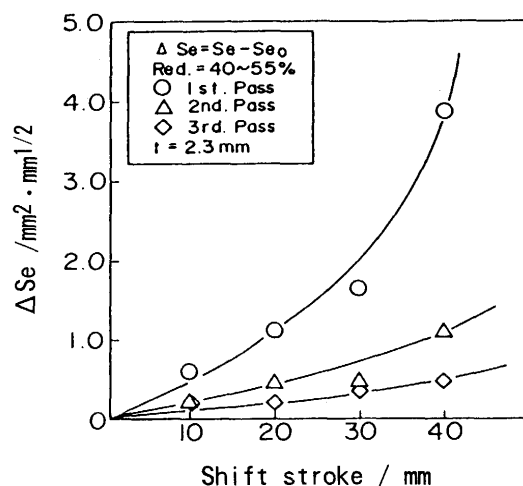


Fig. 3. Change of the edge drop evaluator, Se by change of roll shift stroke.

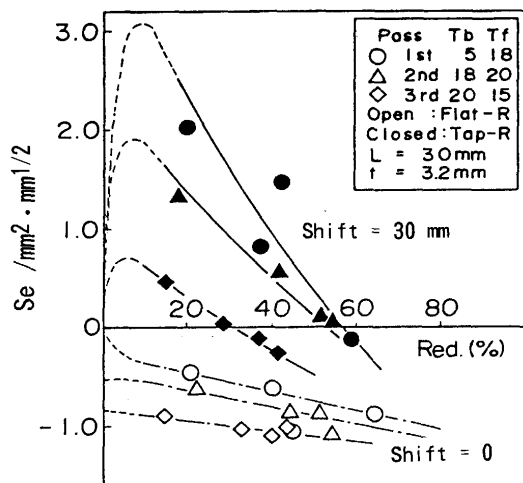


Fig. 4. Change of edge drop evaluator, Se by change of reduction ratio.

Table 3. Condition of experiment for multi-pass effect.

Pass No.	1	2	3
Reduction ratio /%	40	55	41
Tension (backward/ forward)/Nmm ⁻²	49/176	176/196	196/147
Roll shift (L)/mm	0, 30		

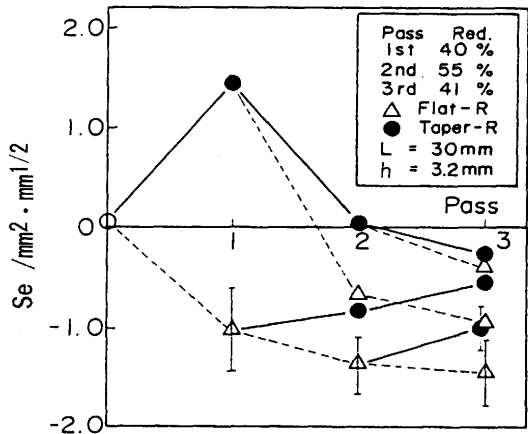


Fig. 5. Change of edge drop evaluator by multi-pass rolling.

イルが得られることが判る。

3. 実機圧延によるプロフィール制御

以上のような実験結果を基に、ワークロールシフト装置をそなえた4スタンドタンデム圧延機の第1～第3スタンドにテーパプロフィールワークロールを組み込んで、エッジドロップ制御の実験を行なった。圧延機の基本仕様をTable 4に示す。各スタンドでのプロフィール変化は、圧延機を途中止めてサンプリングし、オフラインでプロフィールを計測した。組み込んだワークロールのプロフィールは、胴端から450mmの長さに、半径当たり0.5mmの直線状のテーパを付けたものである。

3・1 各スタンドでの制御効果

各スタンドでのロールシフトをTable 5のような組み合わせで実験した。第1～第3スタンドのワークロールをそれぞれTable 5のA, F, Lのようにシフトしたときの、最終スタンドでのプロフィール変化の計測値をFig. 6に示す。プロフィール変化の傾向は、実験圧延機の実験の結果と同様であるが、プロフィールの変化する板幅方向の範囲は実圧延機の場合の方が広く、この違いはロール径、板厚などの圧延条件の違いによると考えられる。この違いについては考察で詳述する。

Fig. 7に各ケースのセンタークラウン、エッジドロップの変化への効果を示す。エッジドロップはシフト適用スタンドのシフト量が多くなるにしたがって小さくなるが、センタークラウンについては、第2スタンドでのシフトを100mm

Table 4. Specification of the tandem cold mill.

Stand No.	1, 2, 3	4
Mill type	4-hi type	6-hi type
Roll dimension	φ550/φ1420 ×1750mm	φ490/φ550/φ1420 ×1750mm
Control device	Work roll shift Work roll bender	Work roll & intermediate roll shift Work roll & intermediate roll bender
Rolling speed	max. 1320 mpm	
Lubrication	Tallow base emulsion	

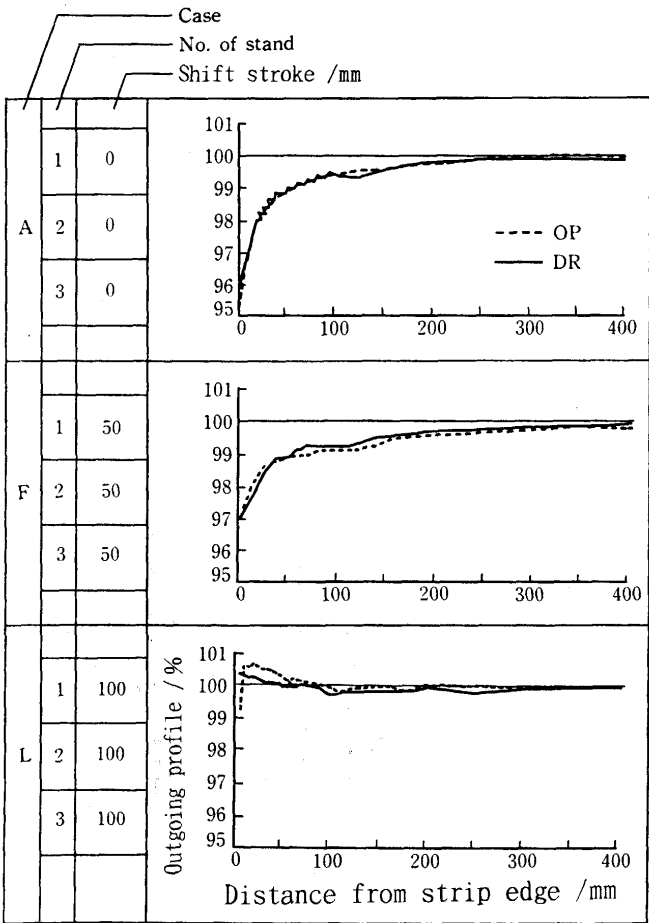


Fig. 6. Measured profile after last stand for case A,F,G and L.

Table 5. Condition of work roll shift.

Case	Shift length, L mm											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
No.1 stand	0	0	50	50	50	50	100	100	100	100	100	100
No.2 stand	0	0	0	0	50	50	50	50	50	100	100	100
No.3 stand	0	50	0	50	0	50	0	50	100	0	50	100

にすることによる効果が非常に大きいことが判る。

3・2 材質の違いによる制御効果

前節までは比較的柔らかい材質におけるシフトの効果の

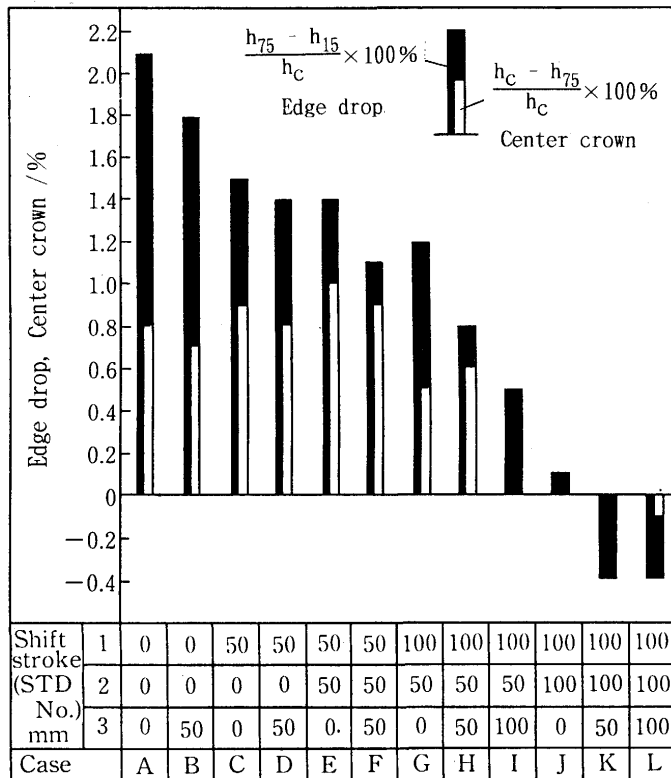


Fig. 7. Center crown and edge drop for each case.

Table 6. Condition of experiment.

Material	A	B	C
Standard in JIS	SPCC	S12C	S50C
Reduction ratio	69%	63%	55%
Size	1.0×910mm	1.2×920mm	0.9×950mm
Work roll taper /mm	taper=0.5/radius, length=450 for No. 1, 2, 3 stand		
Shift stroke /mm	No.1 std : 100 No.2 std : 75 No.3 std : 50		

実験結果であるが、硬質材については圧延荷重が大きいこともあって、効果が異なると考えられる。

3つの異なる材質についての圧延条件をTable 6に、そのときの各スタンドでの圧延荷重をFig. 8に示す。Fig. 9に最終スタンド後のプロフィール測定結果を示す。軟質材であるAは前節での結果のようにほぼフラットなプロフィールが得られ、十分な制御効果といえるが、材質B、Cでは大きなエッジドロップの形成がみられ、このシフト条件では所望の制御効果は得られないことが判る。

4. 考察

2次元理論をベースにしたロール変形解析に幅方向の変形を考慮し、エッジドロップを推定した解析などがあるが³⁾、板幅端部での応力状態などについては深く検討してはならず、エッジドロップの形成の考察には不十分であった。本

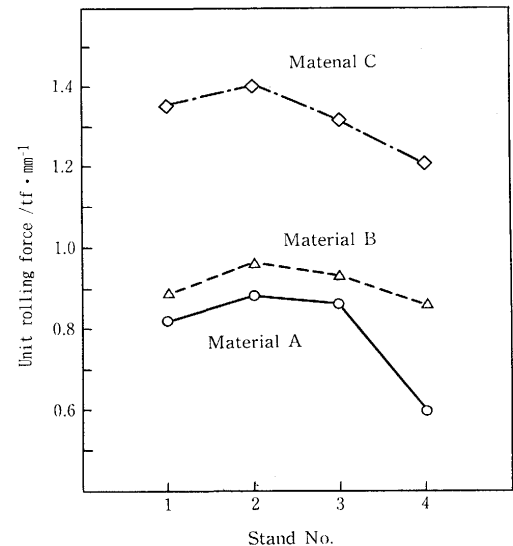


Fig. 8. Roll force of each stand for 3 materials.

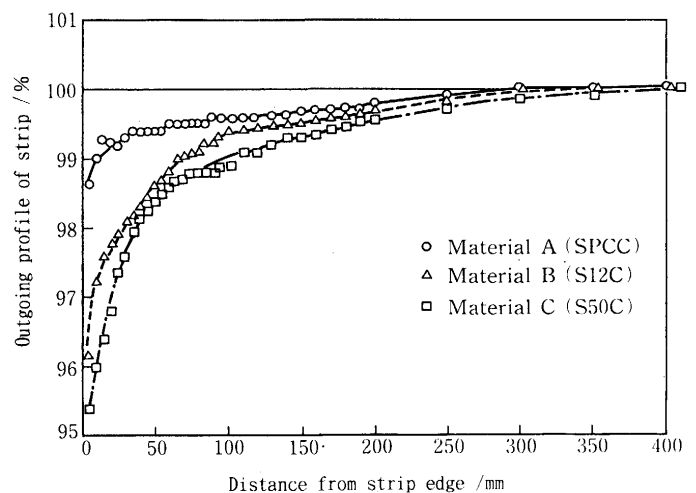


Fig. 9. Measured profile after last stand for 3 materials.

章では、エッジドロップ制御の各因子の影響を推定し、前章までの実験圧延機および実機でのワークロールシフトによるプロフィール制御実験の特性を説明するために、塑性力学的な検討を加え、2次元変形理論でエッジドロップの形成、制御の特性を解析する方法を提案する。

4・1 ロールプロフィール転写率

ロールプロフィール変化による板プロフィール変化について考察する。圧延機の板プロフィールは、ロールのプロフィールと、圧延による圧延荷重分布がひきおこすロールの弾性変形とによって決まる。また、圧延荷重分布は圧延前後の板プロフィール変化によって決まる。圧延荷重分布が一様であるとしたときの板プロフィール Cr^* は、メカニカル板クラウンと呼ばれ、板幅が与えられたとき、ワークロールの軸芯変形と表面弾性変形を合わせた係数 A' と圧延線荷重 p とで表される $A' \cdot p$ と、ワークロールのプロフィール Cr_{WR} との差で表される⁵⁾。

$$Cr^* = -Cr_{wr} + A' \cdot p \dots\dots\dots (2)$$

圧延荷重の平均からの偏差分布 Δp が生じたときのロール変形 ΔCr は、荷重分布に比例すると考えられるから、荷重分布によるロール変形を表す係数(軸たわみ+凹み)をAとすると、弾性変形であることから、概略

$$\Delta Cr = A \cdot \Delta p \dots\dots\dots (3)$$

で表されると考えられる³⁾。このAは(2)式のA'とは異なり、偏差荷重による変形のみを表すものである。

さて、圧延荷重分布の平均荷重からの偏差 Δp は、次節で詳述する板幅端部における平面応力状態に起因するフリクションヒルのでき方の違いによるもの Δp_{ps} 、板幅方向の圧下率分布によるもの Δp_r 、伸び率分布による弾力フィードバック効果によるもの Δp_{tf} ⁶⁾が考えられる。

$$\Delta p = \Delta p_{ps} + \Delta p_r + \Delta p_{tf} \dots\dots\dots (4)$$

平面応力状態による偏差荷重 Δp_{ps} は、圧延条件にもよるが、板幅端部からの距離zの関数 f(z) によって表されると考えてよい。これについては、次節で詳述する。

$$\Delta p_{ps} = p \cdot f(z) \dots\dots\dots (5)$$

また、圧下率分布は板クラウン比率の変化とほぼ等価と考えられ、これによる偏差荷重 Δp_r は第一近似として、圧延前後の板クラウン比率の変化に比例するとおくことができる。

$$\Delta p_r = \frac{dp}{dh} \cdot h \cdot \left(\frac{Cr_0}{h} - \frac{Cr_1}{H} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\frac{dp}{dh}$ は圧下量変化による荷重変化を表す係数、 Cr_0 と h は圧延後の板クラウンと平均板厚、 Cr_1 と H は圧延前のそれらである。板クラウン比率変化による張力分布 Δt は、形状変化係数 α と材料の縦弾性率 E とによって以下のように表される。

$$\Delta t = \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{Cr_1}{H} - \frac{Cr_0}{h} + r_e \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここに r_e は板幅端部の横流れ分布によって発生する張力分布を補償するのに必要な圧下率である。これから張力フィードバックによる荷重分布は、

$$\begin{aligned} \Delta p_{tf} &= \frac{dp}{dt} \cdot \Delta t \\ &= \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{Cr_1}{H} - \frac{Cr_0}{h} + r_e \right) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

以上の関係をまとめると、

$$\begin{aligned} \Delta Cr &= A \cdot \left\{ p \cdot f(z) + \frac{dp}{dh} \cdot h \cdot \left(\frac{Cr_0}{h} - \frac{Cr_1}{H} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{Cr_1}{H} - \frac{Cr_0}{h} + r_e \right) \right\} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となって、圧延後板クラウン Cr_0 はメカニカル板クラウン Cr^* と偏差荷重によるロール変形 ΔCr との和で表され、

$$\begin{aligned} Cr_0 &= Cr^* + \Delta Cr \\ &= Cr^* + A \cdot \left\{ p \cdot f(z) + \frac{dp}{dh} \cdot h \cdot \left(\frac{Cr_1}{H} - \frac{Cr_0}{h} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{Cr_1}{H} - \frac{Cr_0}{h} + r_e \right) \right\} \\ &= \left[Cr^* + A \cdot \left\{ p \cdot f(z) + \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{Cr_1}{H} + r_e \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{dp}{dh} \cdot h \cdot \frac{Cr_1}{H} \right\} \right] / \\ &\quad \left\{ 1 + A \cdot \left(\frac{dp}{dh} + \frac{1}{h} \cdot \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \right) \right\} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

これから、ロールプロファイルの変化 ΔCr_{wr} に対する板プロファイルの変化 Cr_0 の割合(ロールプロファイル転写率) λ は式(11)に式(2)を代入して微分すれば

$$\lambda = \frac{\Delta Cr_0}{\Delta Cr_{wr}} = -1 / \left\{ 1 + A \cdot \left(\frac{dp}{dh} + \frac{1}{h} \cdot \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \right) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

で表すことができる。エッジドロップの領域に限れば、偏差荷重によるロール変形係数Aの値はロール扁平によるもののみを考えれば良いと考えられ、この場合半無限体の弾性変形解⁴⁾を近似してほぼ次式で表される。

$$A = -a \cdot \sqrt{ld} \dots\dots\dots (12)$$

ここに a は近似係数、ld は接触弧長である。

以上から、張力フィードバック効果を含んだ塑性係数 $\left(\frac{dp}{dh} + \frac{1}{h} \cdot \frac{dp}{dt} \cdot \alpha \cdot E \right)$ の絶対値が大きいほど、またロールが変形し易い(|A|が大きい)ほど、転写率は小さくなることが判る。即ち、板厚が薄いほど、変形抵抗が大きいほど、

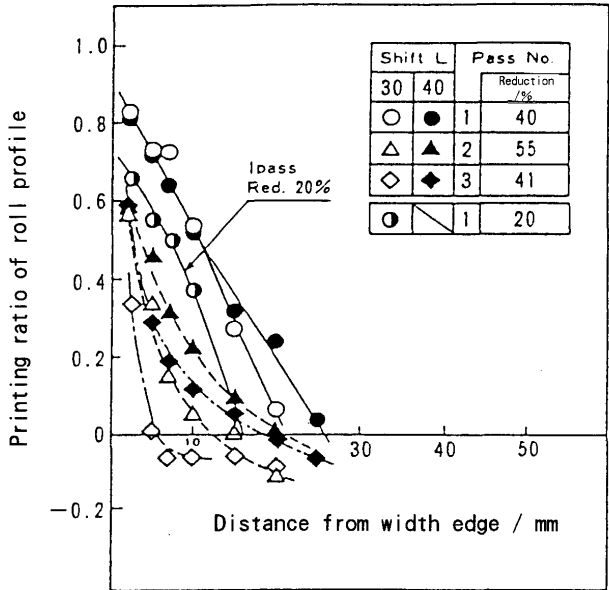


Fig. 10. Printing ratio of work roll profile in the experimental mill.

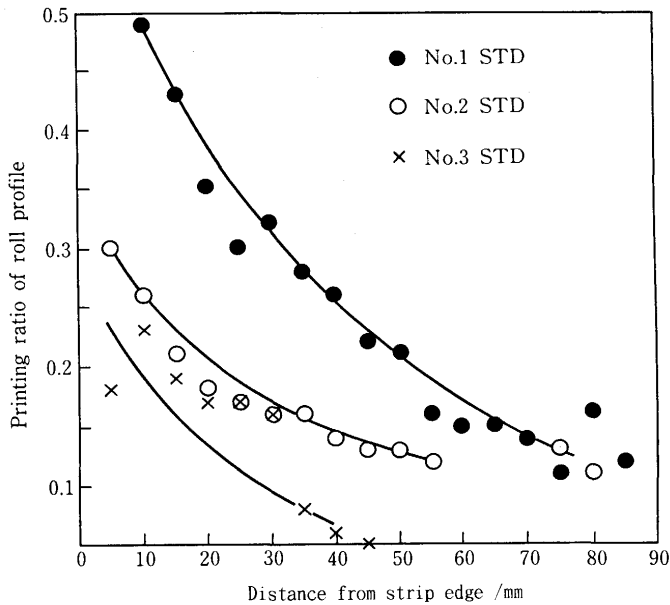


Fig. 11. Measured printing ratio of work roll profile in the real mill.

また平面歪み状態に近い ($\frac{dp}{dt} \cdot \alpha$ の絶対値が大きい) ほど、転写率は小さくなる。

ロールプロフィール転写率の実測値をFig.10に実験圧延機の場合、Fig.11に実機の場合をそれぞれ示す。

4.2 板幅端部の応力状態について

Fig.10, 11のロールプロフィール転写率の板幅方向の分布の仕方から推測されるように、板幅端部では平面応力状態で、板幅中央に向かって平面歪み状態になっていると推測される。ここで、板圧延中の板幅端部での応力状態について考察を加える。

板幅端部での応力状態は、(5)式で表されるような平面応力状態によるフリクションヒルのでき方に直接起因する違いと、(8)式で表される弾力フィードバックの影響の仕方が平面応力状態によって影響されるためによる違いとが考えられる。前者のフリクションヒルのでき方の違いはMisesの降伏条件の平面歪みと平面応力との違いから推察できるように、平面歪み状態で圧延方向の応力が圧縮応力のときに生じるフリクションヒルは、平面応力の場合には生じない。この様子をFig.12に示す。この圧延圧力分布を直線で近似して、面積を求める方法で圧延荷重 p を求めると、平面歪み状態のときには

$$p \doteq ld \cdot Q_p \cdot (2 \cdot k - t) \quad \dots\dots\dots (13)$$

平面応力状態で張力が引っ張りのときにはほぼ

$$p \doteq \sqrt{3} \cdot k \cdot ld - \frac{h \cdot t^2}{(\sqrt{3} \cdot k - t)} \cdot \frac{(\sqrt{3} \cdot k - t) \cdot ld}{2 \cdot h} > t \quad \dots\dots\dots (14)$$

または

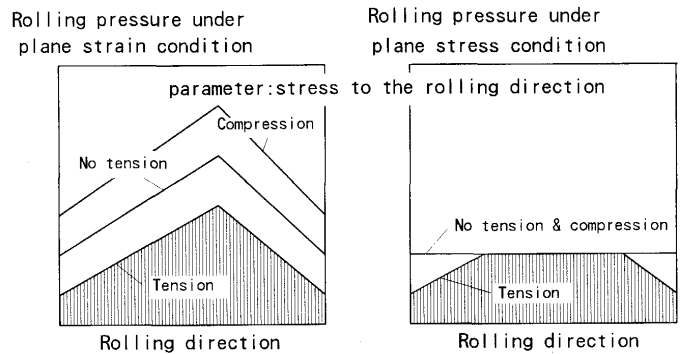


Fig. 12. Friction hill formation under plane strain condition and plane stress condition.

$$p \doteq (\sqrt{3} \cdot k - t) \cdot \left(\frac{\mu \cdot ld^2}{4 \cdot h} + ld \right) \\ - t \cdot ld : \frac{(\sqrt{3} \cdot k - t) \cdot \mu \cdot ld}{2 \cdot h} \leq t \quad \dots\dots\dots (15)$$

で表される。張力が圧縮のときはフリクションヒルが無く、

$$p \doteq \sqrt{3} \cdot k \cdot ld \quad \dots\dots\dots (16)$$

で表される。ここに ld は接触弧長、 Q_p は荷重関係、 k は一軸変形抵抗、 h は板厚、 t は平均張力である。

さらに、同様な考え方によって、張力分布による圧延荷重分布変化 $\frac{dp}{dt}$ は応力状態と張力の絶対値で異なり、ほぼ

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= ld && \text{(平面歪み)} \\ &= 0 && \text{(平面応力：圧縮張力)} \\ &= 0 \sim ld && \text{(平面応力：引張張力)} \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

のように変化する。

以上のような考察によって、板幅端部における応力状態が板幅中央部の平面歪み状態と比較して明らかにされ、張力フィードバックを含んだ材料の塑性曲線をそれぞれ板幅中央部と端部とについて得ることができる。しかしながら、板幅端部の平面応力状態の影響範囲については、幅広がり挙動が支配的な要因であると考えられ、これを求めるには、3次元的な変形解析が必要である。

4.3 エッジドロップ制御のシミュレーション

厳密なエッジドロップの解析には3次元塑性変形を解析する方法によらなければならないが、ここでは簡易にロールの弾性変形を解析するモデルに、材料の塑性曲線を導入する方法²⁾でエッジドロップの形成、制御のシミュレーションを行なった。ここでの考察による応力状態を用いてエッジドロップをシミュレートするためには、平面応力状態の影響を適切に与える必要が有る。ここでは前節での考察によって得られた $\frac{dp}{dt} \cdot \alpha$ の値と、フリクションヒル形成の違いによる圧延荷重分布を板幅端部からの距離 z の2次関数 $g(z)$ で変化するとして与え、

$$g(z) = \frac{z^2}{lg^2} - \frac{2z}{lg} + 1.0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

Table 7. Condition of simulation.

Pas No.	1	2	3	4	
Work roll diameter	750mm				
Back-up roll diameter	1,500mm				
Roll barrel length	2,000mm				
Strip width	900mm				
Strip thickness /mm	3.125	2.483	1.833	1.395	1.232
Tension /Nmm ⁻²	45.1	162.8	172.6	178.5	58.8
Roll force /MN	7.72	8.52	8.7	7.85	
Work roll shift length, L/mm					
Case No.	A	0	0	0	0
	B	100	0	0	0
	C	0	100	0	0
	D	0	0	100	0
	E	100	100	50	0

Table 8. Stress condition factors for the simulation.

Pass No.	1	2	3	4	
a	0.9				
Plane stress affecting lange, lg/mm					
Case	①	60	40	30	20
	②	40	30	20	10
	③	0	0	0	0

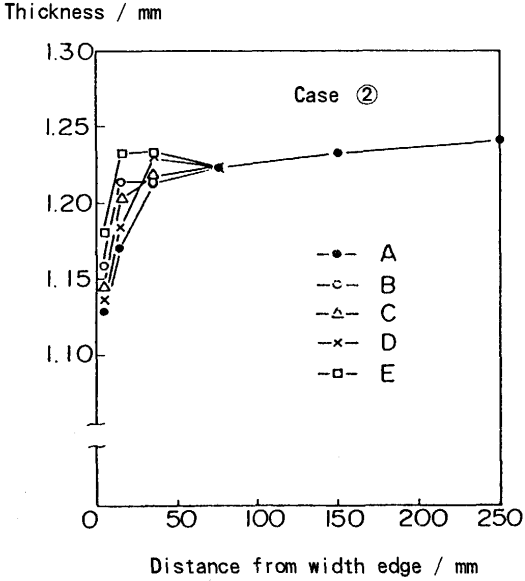


Fig. 13. Calculated profile for case ②.

平面応力状態の影響範囲 lg を各パスで仮定して与える方法で解析した。Table 7に解析条件を示す。また、Table 8に各パスの lg の組み合わせを示す。Fig.13に lg の組み合わせCase②の各シフト条件A, B, C, D, Eの最終プロフィール解析結果を示す。また、Fig.14に lg のCase①②③でシフト条件A, Eの場合の各パス毎のプロフィール変化を示す。先の実験結果との比較から、 lg 値Case②が適切であることが推定できる。

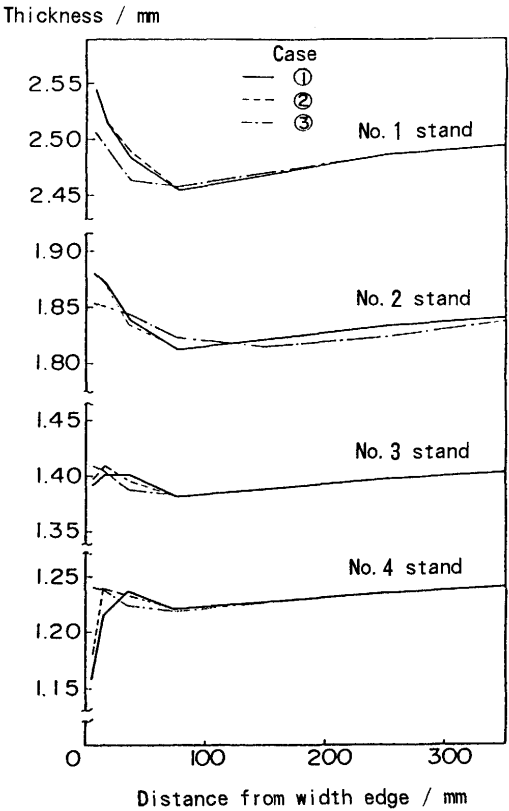
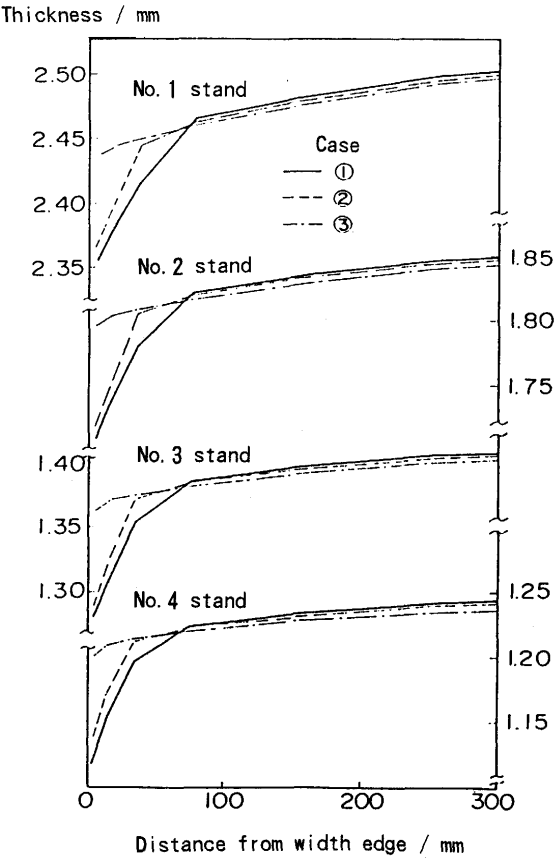


Fig. 14. Calculated profile for shift A, E of Case ①, ② and ③.

これから、前節での応力の考察が適切であり、ここでの圧延条件の場合、平面応力状態の影響範囲 lg はほぼ板厚の10倍程度であるといえる。この lg がエッジドロップの形成および制御特性を決定している材料側の重要な要因であると考えられる。

実験機実験と実機実験の両者の共通な結果として、ある程度以上のロールプロフィール変化を与えると、ロールプロフィール転写率が急に大きくなって、制御効果が大きくなることが推定される。この効果については、大きな張力の発生によるロールギャップ外での材料の塑性変形が生じ、張力分布がそれ以上は発生しないようになる可能性や、板幅端部の応力状態の違いによる形状変化係数 α への影響であると推定される。しかし、定量的な検討は3次元変形を考慮した検討による必要がある。

5. 結論

実験圧延機と実圧延機でのワークロールシフトの実験、および板幅端部での応力状態の考察によって、エッジドロップの形成と制御の特性を明らかにした。

また、板幅端部付近での応力と歪み状態の考察によって、フリクションヒルの形成や張力の圧延荷重変化への影響の仕方などが、板幅中央部付近と比べて異なることを明らかにした。

さらに、この考察から得られた塑性曲線をロール変形解

析モデルに組み込み、エッジドロップの形成と制御の解析を行ない、応力状態の変化の仕方に対して適切な仮定を設けることによって、実際の現象と良く一致した結果が得られることを示した。

これらの結果から、エッジドロップは、張力フィードバックを含んだ塑性曲線が板幅端部付近で応力と歪み状態の変化によって大きく変化することと、この応力状態による圧延荷重分布によるロールの弾性変形が板幅端部付近で大きく変化することによって形成され、これを制御するにはこれらの特性が大きく関与していることが明らかとなった。しかしながら、板幅端部での平面応力状態の影響の仕方については、シフト効果の非線型性の説明などと共に、材料の3次元的な解析が必要であり、近年発達してきているFEM解析⁷⁾⁸⁾などによって定量的に明かにされることを期待したい。

文 献

- 1) 鈴木 弘, 阿高松男, 安居栄蔵:第26回塑性加工連合講演会, (1975), p.41
- 2) 藤田文夫:第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.319
- 3) 粟津原博, 志田 茂:第33回塑性加工連合講演会, (1982), p.143
- 4) 戸澤康壽, 中村雅勇, 石川孝司:塑性と加工, **17** (1976), p.37
- 5) 河野輝雄:昭和47年度塑性加工春期講演会前刷, (1972), p.169
- 6) 松本絃美, 中島浩衛, 菊間敏夫, 上堀雄司:塑性と加工, **23**(1982), p.1201
- 7) 佐々木保, 河野輝男, 柳本 潤, 木内 学:平成3年塑性加工春期講演会, (1991), p.41
- 8) 渋谷 聡, 直井孝之, 二階堂英幸, 柴田克己:第33回塑性加工連合講演会, (1982), p.147