
片テーパ付ワークロールシフトミルによる薄鋼板のエッジドロップ制御特性

Edge-Drop Control of Hot and Cold Rolled Strip by Tapered-Crown Work Roll Shifting Mill

北村 邦雄(Kunio Kitamura) 鏝田 征雄(Ikuo Yarita) 菅沼 七三雄(Namio Suganuma) 中西 敏修(Toshinobu Nakanishi) 豊島 貢(Ko Toyoshima)

要旨：

薄鋼板の分野においてはエッジドロップと呼ばれる板幅端部における板厚の急激な減少を改善することが、重要な課題となっている。そこで板幅端部の変形挙動を調査し、さらにラボミルおよび実機ミルにおいて片テーパ付ワークロールシフトミルによるエッジドロップの制御特性を検討した。その結果、エッジドロップは板幅端部の3次元メタルフローによって生じ、ワークロールの扁平変形に大きく影響される。冷間タンデムミルにおいては、前段スタンドから片テーパ付ワークロールシフトミルを適用することにより、エッジドロップを顕著に改善できる。また、ホットストリップミルにおいても、片テーパ付ワークロールシフトミルはエッジドロップの改善に有効であることが判明した。

Synopsis：

Hot and cold rolled strip is demanded to remove the edge-drop which is a nonuniformity of the transverse strip thickness profile at strip edges. The deformation behaviour in strip edges is experimentally studied, and characteristics of edge-drop control by the tapered-crown work roll shifting mill are investigated in a laboratory mill and commercial cold and hot strip rolling mills. The results are as follows: (1) Three dimensional material flow occurs at the strip edge and the material flow causes to the edge-drop, (2) the edge-drop is primarily affected by changes in the work roll profile resulting from roll flattening, (3) the tapered-crown work roll shifting mill is effective in removing the edge-drop, (4) in the tandem cold mill, it is necessary to install the work roll shifting mill from the first stand to successive stands to obtain the edge-drop-free strip, and (5) in the hot strip mill, the work roll shifting mill is also necessary to remove the edge-drop.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

片テーパ付ワークロールシフトミルによる 薄鋼板のエッジドロップ制御特性*

川崎製鉄技報
23 (1991) 4, 265-271

Edge-Drop Control of Hot and Cold Rolled Strip by Tapered-Crown Work Roll Shifting Mill



北村 邦雄
Kunio Kitamura
技術研究本部 加工・制
御研究センター 主任
研究員(課長)**



鐘田 征雄
Ikuo Yarita
技術研究本部 加工・制
御研究センター 主任
研究員(部長補)・工博



菅沼 七三雄
Namio Suganuma
水島製鉄所 冷間圧延
部長



中西 敏修
Toshinobu Nakanishi
水島製鉄所 電磁鋼板
部電磁鋼板課長



豊島 貢
Ko Toyoshima
千葉製鉄所 企画部企
画室 主査(部長)

要旨

薄鋼板の分野においてはエッジドロップと呼ばれる板幅端部における板厚の急激な減少を改善することが、重要な課題となっている。そこで板幅端部の変形挙動を調査し、さらにラボミルおよび実機ミルにおいて片テーパ付ワークロールシフトミルによるエッジドロップの制御特性を検討した。その結果、エッジドロップは板幅端部の3次元メタルフローによって生じ、ワークロールの扁平変形に大きく影響される。冷間タンデムミルにおいては、前段スタンドから片テーパ付ワークロールシフトミルを適用することにより、エッジドロップを顕著に改善できる。また、ホットストリップミルにおいても、片テーパ付ワークロールシフトミルはエッジドロップの改善に有効であることが判明した。

Synopsis:

Hot and cold rolled strip is demanded to remove the edge-drop which is a nonuniformity of the transverse strip thickness profile at strip edges. The deformation behaviour in strip edges is experimentally studied, and characteristics of edge-drop control by the tapered-crown work roll shifting mill are investigated in a laboratory mill and commercial cold and hot strip rolling mills.

The results are as follows: (1) Three dimensional material flow occurs at the strip edge and the material flow causes to the edge-drop, (2) the edge-drop is primarily affected by changes in the work roll profile resulting from roll flattening, (3) the tapered-crown work roll shifting mill is effective in removing the edge-drop, (4) in the tandem cold mill, it is necessary to install the work roll shifting mill from the first stand to successive stands to obtain the edge-drop-free strip, and (5) in the hot strip mill, the work roll shifting mill is also necessary to remove the edge-drop.

1 緒 言

薄鋼板の長手方向の板厚精度は、高応答の油圧圧下装置や主機交流モータを用いた自動板厚制御の普及により大きく改善され、加速・減速部の非定常部の板厚精度が残された課題となっている。

一方、幅方向の板厚精度においても、6段 HC (ハイクラウン) ミルやベアクロスミルなどに代表されるクラウン制御ミルの開発により、板幅端部近傍を除いたボディクラウンは制御されるようになった。また、ロールの局所的な摩耗に起因するハイスポットもワークロール (WR) を軸方向にシフトする機能を導入することにより防止されている。これからの大きな課題はエッジドロップと呼ばれる板幅端部の 0~100 mm 位置における板厚の急激な減少部の制御に移ってきた。

K. Saxl はロールの弾性変形解析をもとに、エッジドロップは

WR の扁平変形が急激に変化することにより生じることを示し、圧延材料の幅端部よりもやや内部に相当する部分からロールの胴端部側を先細りテーパ状にすることによりエッジドロップが改善できることを示している¹⁾。鈴木らはロールの扁平変形の影響を調べるために、ゴムロールの硬度を変化させて板状のプラスチックを圧延し、幅端部の3次元変形挙動を調査している²⁾。足立らはホットストリップ仕上げミルの後段スタンドにロールの両端部を先細りテーパ状にした台形クラウン WR を用いることにより、クラウンおよびエッジドロップの減少が可能であることを示した³⁾。筆者らはこれらの考えをさらに発展させた片テーパ付 WR シフト圧延機を実用化し、ホットストリップミル⁴⁾ とコールドストリップミル⁵⁾ に適用し、クラウンやエッジドロップの制御を可能としている。

本報では、薄板圧延におけるエッジドロップに着目して、板幅端

* 平成3年10月9日原稿受付

** 現 (株)レオテック 第2研究部 主任研究員

部の変形挙動を調査した結果および片テーパ付 WR シフトミルによるエッジドロップの制御特性と実機適用結果について述べる。

2 冷間圧延における板幅端部メタルフローの挙動

2.1 実験方法

実機レバース圧延機により冷間圧延時の幅端部の変形挙動を調査した。Table 1 に実験条件を示す。実験材は低炭素鋼であり、板厚 2.6 mm、板クラウン（板幅中央部と板幅端より 25 mm 位置の板厚偏差）0 μm の熱延コイルを用いた。圧延条件は、(1) 第 1 パスの圧下率 10~40%，(2) 30%/pass で 5 パス圧延および (3) WR ベンディング力 0~490 kN/chock とし、それぞれ圧下率の影響、多パス圧延の影響、WR ベンダーの影響について調査した。第 1 パスの圧延では、板幅方向のメタルフローの挙動をみるために幅方向に罫書線を入れ、圧延前後の幅変化を調べた。

2.2 実験結果

Fig. 1 は第 1 パスの圧下率とエッジドロップとの関係を示したものである。ここでのエッジドロップは板幅端部 50 mm 位置と 10 mm 位置における板厚差とし、エッジドロップ比率 ER は (1) 式で表わされる。

Table 1 Experimental conditions in 80'' reversing mill

Material	Low C steel	
Entry thickness (mm)		2.6
Delivery thickness (mm)		0.44
Width (mm)		930
Crown after hot rolled (μm)		0
WR diameter (mm)		546 φ
WR barrel length (mm)		2 032
Rolling conditions		
(1) Reduction at 1st pass (%)	10, 20, 30, and 40	
(2) Rolling pass schedule	5 pass rolling (30%/pass)	
(3) WR bending force (kN/chock)	0, 245, and 490	

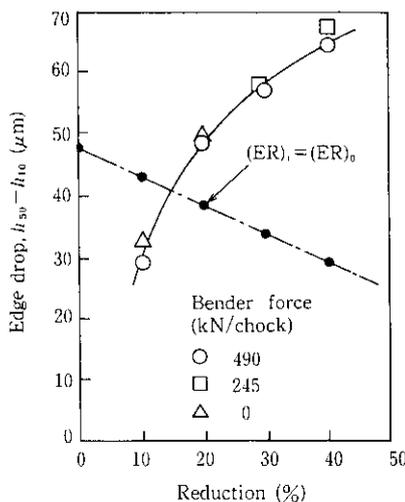


Fig. 1 Relation between reduction and edge drop at first pass

$$(ER_x)_i = \{(h_{50})_i - (h_x)_i\} / (h_{50})_i \dots\dots\dots (1)$$

h_{50} : 板幅端部 50 mm 位置の板厚

h_x : 板幅端部 x mm 位置の板厚 (ここでは $x=10$ mm)

添字 i : i パス圧延後, $i=0$ は母板

また、エッジドロップ比率一定とは、母板のエッジドロップ比率と圧延後のエッジドロップ比率が等しい場合であり、(2) 式で表わされる。

$$(ER_x)_i = (ER_x)_0 \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 1 よりエッジドロップは圧下率の増加とともに大きくなり、圧下率約 15% でエッジドロップ比率が母板のエッジドロップ比率と等しくなる。WR ベンダーの効果は数 μm 以下であり小さい。Fig. 2 に 5 パス圧延を行った場合のエッジドロップの変化を示す。パス数の増加とともにエッジドロップは減少する。母板クラウンが 0 μm の場合、エッジドロップはエッジドロップ比率一定の条件に近い変化を示す。

2.3 エッジドロップ形成機構の検討

冷間圧延時に材料のメタルフローが板幅端部からどの範囲まで生じているかについて検討した。Fig. 3 は 1, 3, 5 パス圧延後におけ

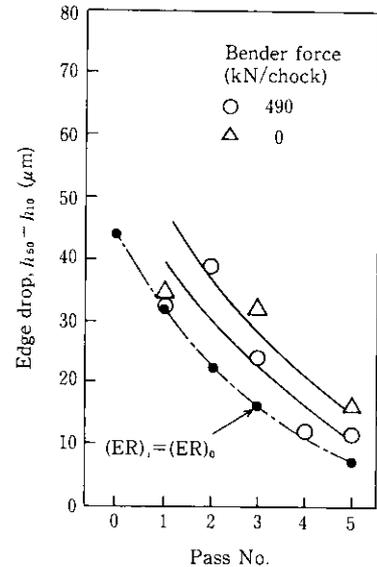


Fig. 2 Relation between pass number and edge drop

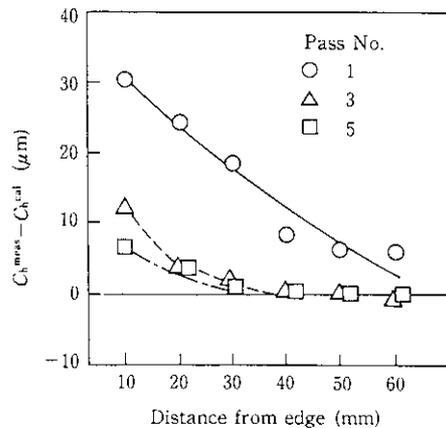


Fig. 3 Change in $C_h^{meas} - C_h^{cal}$ along width direction from strip edge (C_h^{meas} , measured strip crown; $C_h^{cal} = C_H^{meas}(1-r)$, calculated strip crown; C_H^{meas} , strip crown of mother strip; and r , reduction)

る板幅方向の各位置の板クラウン実測値 C_h^{meas} とクラウン比率一定による計算値 C_h^{cal} との差を示したものである。 C_h^{cal} は (3) 式から求められる。

$$C_h^{cal} = C_H^{meas}(1-r) \quad (3)$$

C_H^{meas} : 母板の板クラウンの実測値

r : 全圧下率

板クラウン実測値 C_h^{meas} とクラウン比率一定による計算値 C_h^{cal} の差が $0 \mu m$ であれば、クラウン比率一定条件で変形していることになる。第1パスでは板幅端部からほぼ 50 mm 位置、第3および5パスでは板幅端部から 30 mm 位置より中央部ではクラウン比率一定の条件で変形しており、母板クラウンが最も支配的となる。これよりも板端部側については冷間圧延時にメタルフローが起りやすく、冷間圧延条件が支配的になる。しかも、板厚が薄くなるにしたがって、メタルフローは板幅端部に限定されていく。このことから、冷延鋼板のボディクラウンは母板クラウンにより第一義的に決定されるが、エッジドロップは冷間圧延時に制御できることがわかる。

Fig. 4 は WR の偏平変形量とエッジドロップとの関係を示している。偏平変形量 E_p は (4) 式に示す Hitchcock の式から算出したものである。

$$E_p = \frac{C_0}{8} \cdot P \cdot \ln(2D_w / (H-h + C_0 \cdot P)) \quad (4)$$

E_p : WR の偏平変形量

P : 単位幅圧延荷重

D_w : WR 径

H : 入側板厚

h : 出側板厚

C_0 : 定数 $C_0 = 16(1-\nu^2)/(\pi E)$

従来からいわれているように、偏平変形量の増大とともに、エッジドロップ量は直線的に大きくなる。

Fig. 5 はエッジドロップと幅変化率との関係を示したものである。ここで、 B_T は板幅全体の範囲における幅変化率、 B_{50} は板幅端部と板幅端部から 50 mm の位置の間における幅変化率である。エッジドロップが増大するにしたがって、幅変化率が大きくなっていく。

したがって、エッジドロップは幅縮み圧延、ロール偏平変形量を小さくするような圧延、またはロール偏平に見合うロールカーブを付与することで改善できることがわかる。

3 片テーパ付 WR シフトミルによるエッジドロップ制御特性

筆者らは、板幅端部における WR の偏平変形の急激な変化を補償するロールカーブを付与することに着目し、K. Saxl や足立らの研究をさらに発展させ、圧延サイクルに組み込まれるあらゆる鋼種、幅、板厚の材料に適用できる片テーパ付 WR シフト圧延を考案し、その有効性を調査した。

3.1 冷間圧延における制御特性

まず小型ラボ圧延機により片テーパ付 WR シフト圧延のエッジドロップに対する制御特性を調査した後、実機においても制御特性の調査を行った。

3.1.1 実験条件

ラボミルにおける実験条件を Table 2 に示す。ロール径 310 mm、胴長 300 mm、テーパ $\tan \theta = 1/250$ であり、板幅 150 mm、降伏応力 300 MPa の素材を用いた。WR テーパ位置 EL は Fig. 6 に示すようにテーパ開始点が板幅端部よりも内側にある場合を正とし、 $EL = -5 \sim 30$ mm の範囲で圧延した。

Table 2 Experimental conditions in laboratory mill

Material		Low C steel
Entry thickness	(mm)	2.3
Delivery thickness	(mm)	0.5
Width	(mm)	150
WR diameter	(mm)	310 ϕ
WR barrel length	(mm)	300
WR taper		$\tan \theta = 1/250$
WR taper position		$EL = -5 \sim 30$ mm
1st pass reduction	(%)	42
2nd pass reduction	(%)	42
3rd pass reduction	(%)	35
Tension	(MPa)	140/80
Speed	(m/min)	5

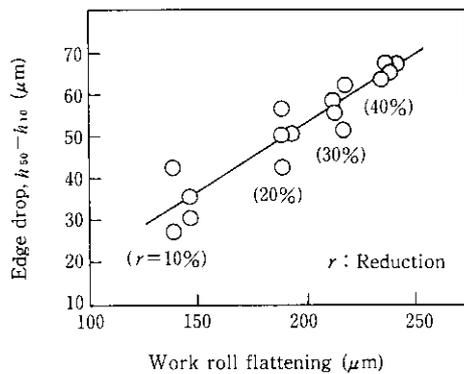


Fig. 4 Relation between work roll flattening and edge drop at first pass

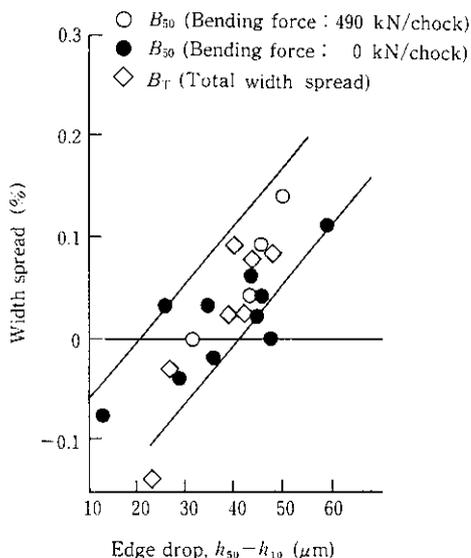


Fig. 5 Relation between width spread and edge drop at first pass

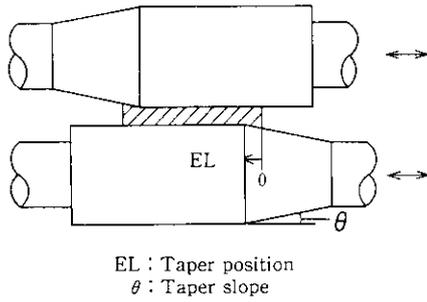


Fig. 6 Schematic diagram of work roll shifting mill

Table 3 Experimental conditions in tandem cold mill

Material		Low C steel
Entry thickness	(mm)	2.3
Delivery thickness	(mm)	0.5
Width	(mm)	1 100
WR diameter	(mm)	360 φ
WR barrel length	(mm)	1 480
WR taper		tan θ=1/400
Rolling speed	(m/min)	50 (at No. 4 stand)

実機ミルにおける実験条件を Table 3 および 4 に示す。実機実験は全スタンドに片テーパ付 WR シフト圧延機を適用した 4 スタンド冷間圧延機で行った。WR 径 360 mm, 胴長 1 480 mm, テーパ tan θ=1/400 である。ケース A は No. 1~4 スタンド片テーパ WR 圧延, ケース B は No. 1~3 スタンド片テーパ WR 圧延, ケース C は No. 1 スタンド片テーパ WR 圧延, ケース D は No. 1~4 スタンド通常フラット WR 圧延相当である。

Table 4 WR taper position EL in tandem cold mill

	Stand			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Case A	30	30	30	15
Case B	30	30	30	-10
Case C	30	-10	-10	-10
Case D	-10	-10	-10	-10

3.1.2 実験結果

Fig. 7 はテーパ位置 EL を変化させた場合の板幅方向の板厚分布を示したものである。Fig. 7 (a) は 1 パス目の板厚分布を示す。圧延前の材料にはエッジドロップが発生していない。これは、熱延コイルのエッジドロップ部を切り捨ててあるためである。1 パス後の板厚分布をみると EL ≤ 10 mm でエッジドロップが発生しているが、EL の増大とともにエッジドロップが改善され、EL ≥ 20 mm でエッジアップとなっている。Fig. 7 (b) は 3 パス目の板厚分布を示す。圧延前の材料は、1, 2 パスを EL = -5 mm で圧延したものであり、板幅端部 20 mm 程度からエッジドロップが発生している。3 パス目では EL ≥ 20 mm としても板端から約 10 mm 位置のエッジドロップは改善されておらず、ごく板幅端部のエッジドロップが改善されるのみである。前節においてエッジドロップの形成は板幅端部の材料のメタルフローに起因することを示したが、板厚によりメタルフローの生じる程度が異なるために、エッジドロップの挙動も板厚により異なっていることがわかる。

これらの結果をもとに、板幅端部から 7.5 mm および 2.5 mm の位置におけるエッジドロップ比率 ER の変化について整理した。

Fig. 8 にテーパ位置 EL をパラメータとして、各パスにおけるエッジドロップ比率 ER_{7.5} と ER_{2.5} の変化を比較して示す。ER_{7.5} の場合には 2 パス目まではテーパ位置 EL の効果が現われるが、第 3 パスでは EL の影響はほとんどみられない。ER_{2.5} の場合では第 3

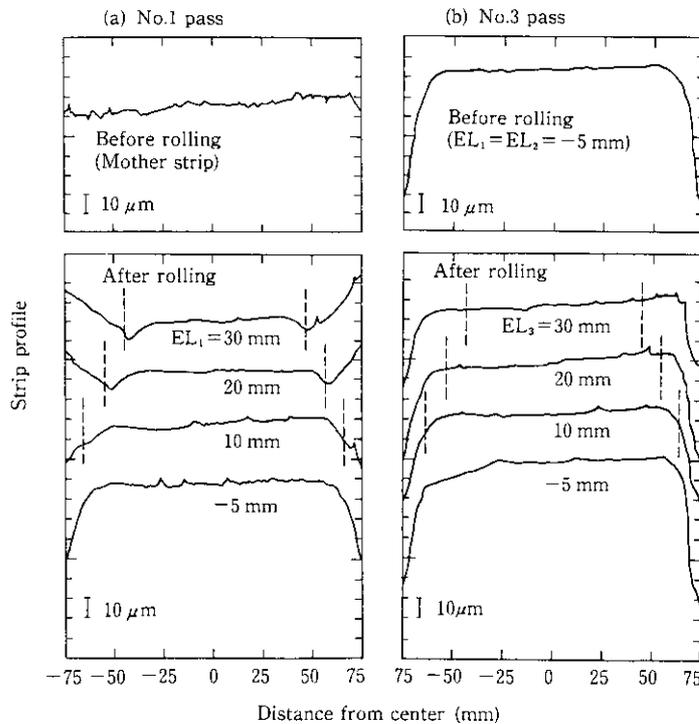


Fig. 7 Effect of taper position (EL) on cold rolled strip profile in small scale laboratory mill

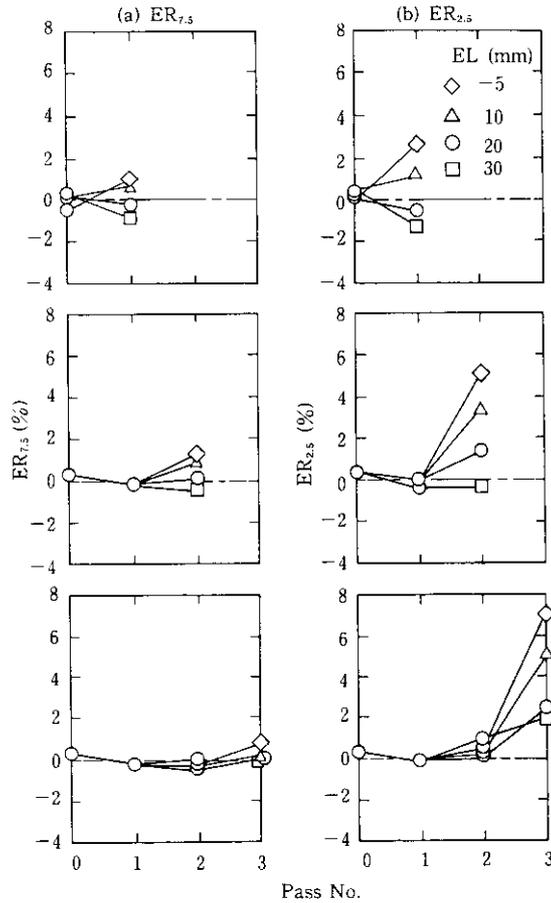


Fig. 8 Effect of taper position (EL) on edge drop ratio (ER) of cold rolled strip in small scale laboratory mill

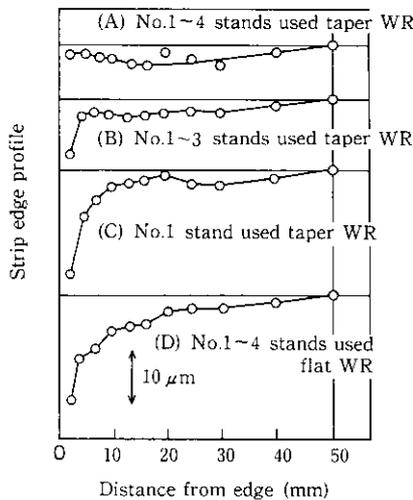


Fig. 9 Effect of taper work roll on edge profile of cold rolled strip in tandem cold mill

パスでも EL の効果が大きく現われている。このことから、タンデムミルの前段スタンドではテーパ位置を板幅端部から幾分内部に入った位置に、後段スタンドでは板幅端部直近に位置させることにより、エッジドロップを効果的に改善できることがわかる。

つぎに実機 4 スタンドタンデムミルにおいて、エッジドロップの制御特性を調査した結果を示す。Fig. 9 は圧延材の板幅端部 50 mm の板厚プロフィールを示したもので、全スタンドに片テーパ WR を使用することにより、板幅の最端部におけるエッジドロップも改善できることがわかる。Fig. 10 には各スタンドにおけるエッジドロ

ップの変化を示す。端部 17 mm でのエッジドロップ ($h_{50}-h_{17}$) でみると、No. 1 スタンドでは片テーパ WR の効果が現われているが、後段スタンドでは効果が現われない。端部 7.5 mm でのエッジドロップ ($h_{50}-h_{7.5}$) でみると No. 1 スタンドだけでなく、No. 2, 3 スタンドでの片テーパ WR の使用効果が現われている。端部 3 mm でのエッジドロップ ($h_{50}-h_3$) になると、後段スタンドで使用するほど改善効果は顕著になる。逆に No. 1 スタンドのみ使用した場合には No. 1 スタンドでの改善効果は大きいですが、後段スタンドでの板幅端部のメタルフローによりその効果が減少し、フラット WR と同程度のエッジドロップとなる。

冷間圧延において片テーパ WR シフトミルの適用スタンドは、板幅最端部までのエッジドロップ制御を目的とするならば全スタンドに必要であり、板幅端部からある程度内部まででのエッジドロップ制御でよい場合には、片テーパ WR シフトミルの使用は前段スタンドのみでよいことがわかる。

3.2 熱間圧延における制御特性

熱間圧延では板厚が厚く、変形抵抗も小さいため、後段スタンドでも十分にエッジドロップの制御が期待できる。ここでは実機 6 スタンド熱間仕上げ圧延機の No. 5 スタンドにおいて、片テーパ付 WR シフト圧延を適用した場合の制御特性を示す。

3.2.1 実験方法

Table 5 に実験条件を示す。WR 径 678 mm, テーパ $\tan \theta = 0.03/100$, テーパ部長さ 550 mm である。No. 6 スタンドを空パスとした 5 スタンド仕上とし、No. 5 スタンドで 4.5 mm から 3.8 mm または 3.2 mm に圧延している。板幅は 927 mm であり、No. 5 スタンド入側における板クラウン C_{h25} (板幅中央部と板幅端より 25 mm

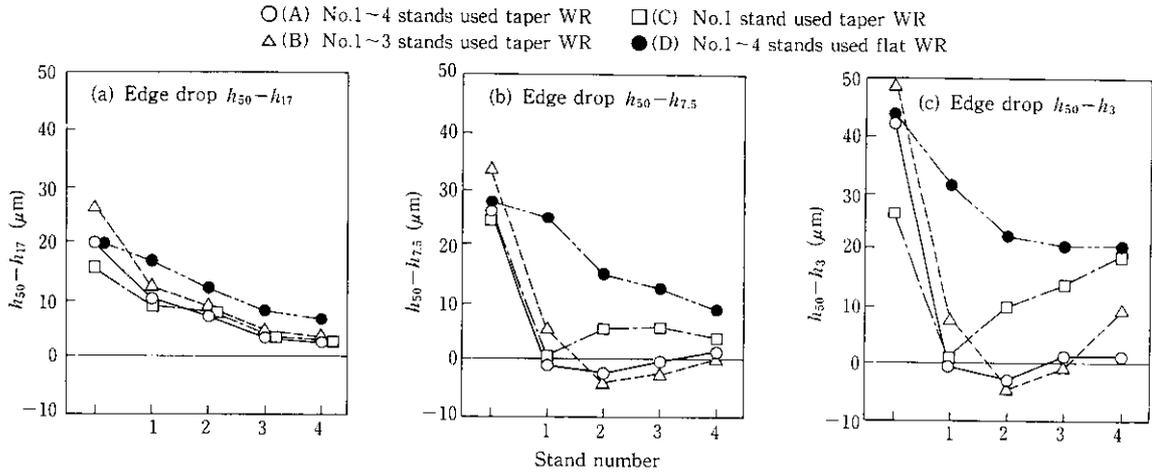


Fig. 10 Effect of taper work roll on edge drop of cold rolled strip in tandem cold mill

Table 5 Experimental conditions in hot strip mill

Material		Low C steel
Entry thickness	(mm)	4.5
Exit thickness	(mm)	3.2, 3.8
Width	(mm)	927
WR diameter	(mm)	678
WR barrel length	(mm)	1 422
WR taper		$\tan \theta = 0.03/100$
WR taper position		EL=50~250 mm

位置の板厚偏差)は60~70 μm程度である。コイルごとにELを変えて圧延し、オンラインプロフィールメータにより、板プロフィールを測定した。

3.2.2 実験結果

Fig. 11 に出側板厚 3.8 mm の場合について、WR テーパ位置

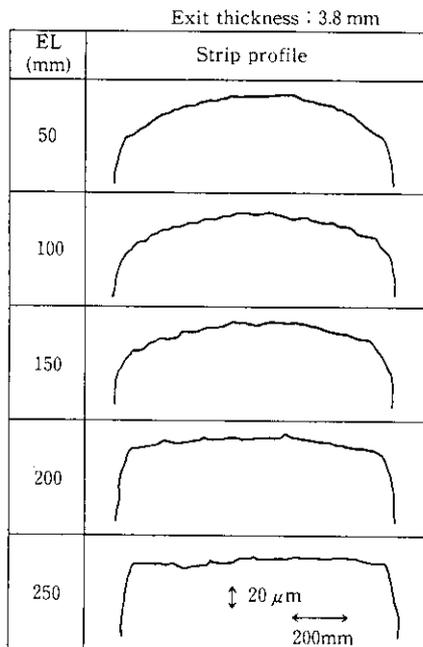


Fig. 11 Effect of taper position (EL) on hot rolled strip profile

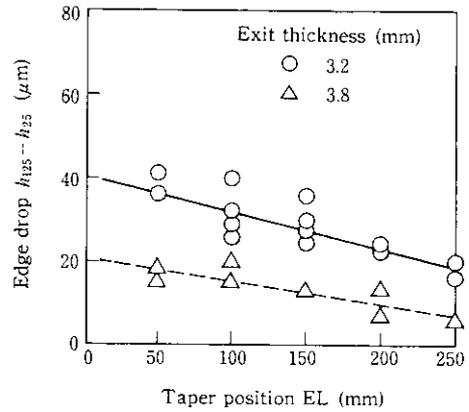


Fig. 12 Effect of taper position (EL) on edge drop of hot rolled strip

ELによる板プロフィールの変化を示す。ELの増大にともない、板幅方向の板厚偏差は小さくなり、よりフラットに近い板プロフィールが得られている。Fig. 12にWRテーパ位置ELとエッジドロップ ($h_{125}-h_{25}$) との関係を示す。ELの増大にともない、エッジドロップは直線的に減少している。同じテーパ位置ELで比較すると、エッジドロップは板厚3.2 mmの方が大きい。これは板厚3.2 mmの方が板厚3.8 mmよりも圧延荷重が高いため、WRの偏平変形量が大きくなったためである。このような場合には、より大きなテーパが必要となる。

4 片テーパ付WRシフトミルの実機適用

ここでは実操業における片テーパ付WRシフトミルによるエッジドロップの制御結果を示す。

Fig. 13は、水島製鉄所の4スタンド冷間圧延機の全スタンドに片テーパ付WRシフト圧延機を適用した場合の、エッジドロップの改善効果を示したものである。エッジドロップ ($h_{100}-h_{12.5}$) は制御なしの場合17 μmであるが、本制御を実施することによりその約1/3の5 μm以内に改善されている。

Fig. 14は、千葉製鉄所のNo.1熱間上圧延機(6スタンド)のF3, F4, F5の3スタンドに片テーパ付WRシフト圧延機を適

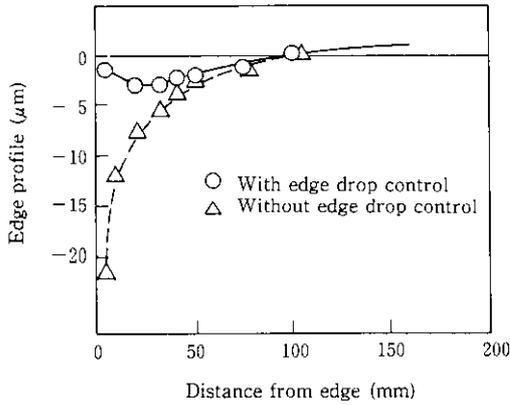


Fig. 13 Effect of edge drop control at tandem cold strip mill

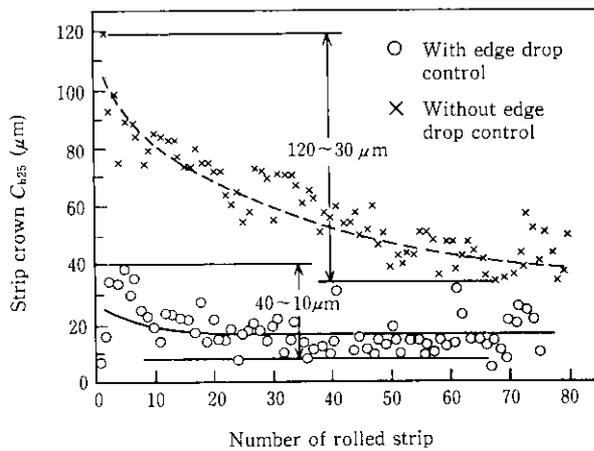


Fig. 14 Effect of edge drop control at the No. 1 hot strip mill

用した場合の、板クラウン C_{k25} の改善効果を示したものである。本制御を実施した場合の板クラウンは、制御なしの場合に比較して $80 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度改善されており、またサイクル内での変化も小さくなっている。

5 結 言

薄板圧延における材料の板幅端部近傍の変形挙動を調査し、この結果をもとに片テーパ付 WR シフト圧延機を考案した。この圧延機のエッジドロップ制御特性をラボ実験により検討し、その有効性を示すとともに、実機コールドストリップミル、ホットストリップミルに適用した。これらの結果から以下の事項が判明した。

- (1) 冷間圧延実験から、板圧延においても板幅端部近傍では3次元のメタルフローが生じており、これがエッジドロップの発生に影響する。この3次元のメタルフローは板厚が厚い段階では幅方向の内部まで及ぶが、薄くなると幅端部のみに生じる。
- (2) エッジドロップは WR の偏平変形量とはほぼ直線的な関係があり、偏平変形量の増大とともに大きくなる。このことから、WR の板幅端部相当部における偏平変形量の急激な変化と3次元のメタルフローによりエッジドロップは発生する。
- (3) 冷間圧延においてエッジドロップに及ぼすテーパ位置 EL の影響は、板厚の厚い初期パスでは顕著に現われ、板厚の薄い後半パスでは板幅の最端部近傍のみに限定される。
- (4) タンデムコールドミルにおける片テーパ付 WR 圧延機の適用スタンド数は、板幅のどの位置までのエッジドロップを制御するかで決まる。最端部まで改善する場合は全スタンドに片テーパ付 WR 圧延機が必要となる。
- (5) ホットストリップミルにおけるエッジドロップは、後段スタンドに片テーパ付 WR 圧延機を適用することにより改善できる。

引 用 文 献

- 1) K. Saxl: *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 172 (1958) 22, 727
- 2) 鈴木 弘, 阿高松男, 安居栄蔵: 第26回塑加連講論集, (1975), 41
- 3) 足立明夫, 豊島 貢, 福島巖夫, 浅川長正, 北村邦雄, 鐘田征雄, 片岡健二, 中川吉左衛門: 昭和53年塑加春講論集, (1978), 45
- 4) 三宅祐史, 鐘田征雄, 浜田圭一, 広瀬 勇, 小川洋三, 豊島 貢: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 4, 235
- 5) 水上 進, 小野智睦, 黒田 茂, 侍留 誠, 広畑和宏, 北村邦雄: 材料とプロセス, 2 (1989) 2, 465