

冷間タンデムミルにおける 難圧延材の高精度プロフィール制御技術*

川崎製鉄技報
28 (1996) 2, 103-107

Development of Advanced Transverse Thickness Profile Control of Thin Hard Steel Strips at Tandem Cold Rolling Mill



蛭田 敏樹

Toshiki Hiruta
技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(課長補)



赤木 功

Isao Akagi
水島製鉄所 電磁鋼板部電磁鋼板技術室



水島 成人

Narihito Mizushima
水島製鉄所 制御技術部制御技術室 主査(課長補)

要旨

川崎製鉄水島製鉄所の4スタンド6段圧延機からなるNo.2冷間圧延設備において、片テーパ付きワークロールシフト圧延法を適用し、ワークロールプロフィールを最適化することにより、冷間圧延において鋼板の板幅方向プロフィール制御範囲を拡大した。さらに熱延鋼板のクラウンの大きさに対応したワークロールシフト位置を制御するエッジドロップのフィードフォワード制御、ミル出側に配置したエッジドロップ計を用いたエッジドロップのフィードバック制御を確立した。これら冷間圧延におけるエッジドロップ制御システムを構築したことにより、薄物難圧延材の板幅方向の全長、全幅にわたり、定常部で0.5%以内、非定常部で0.8%以内の高い板厚精度を達成した。

Synopsis:

At No.2 tandem cold rolling mill, consisting of four 6-high stand mills, in Mizushima Works of Kawasaki Steel, by applying a one-side tapered work roll shifting method (K-WRS) and by using suitable taper profile of the work rolls, edge drop control range in cold rolling has been expanded. Furthermore, a feed-forward edge drop control system, corresponding to the amount of crown of hot-rolled material, and a feed-back edge control system using an edge drop sensor, have been established in the tandem cold rolling mill. Consequently, thickness accuracy in transverse direction has been achieved within 0.5% in a steady rolling state (at a middle part of a strip) and within 0.8% in a non-steady rolling state (at lead and tail ends of a strip) over the full length of the thin hard steel strip product.

1 緒 言

近年、省資源、省エネルギーは地球環境保護の立場から改めて重要なテーマと認識されている。鉄鋼製造プロセスにおいてもその最も重要なテーマの一つが、製品歩留りの向上である。他方、最近の需要家の品質要求の厳格化によって、冷延薄板の製造における幅方向板厚精度は極めて重要な品質管理項目となっている。熱延、冷延コイル幅方向板厚精度の向上は例えば珪素鋼板の自動かしめに代表されるように需要家での製造ラインの自動化の推進に寄与するとともに、鉄鋼の製造工程における歩留りを向上させる。

このような背景を踏まえ、水島製鉄所冷間タンデムミル^{1,2)}において、珪素鋼板等の難圧延材を主体とし、定常域で±0.5%以下、非定常域で±0.8%以下である冷延薄板の高精度な幅方向板厚制御が達成可能な技術を開発した。本報告ではその高精度幅方向板厚制御技術について述べる。

2 幅方向板厚制御技術の開発経緯

当社は従来より熱間・冷間圧延において片テーパ付きワークロールシフト圧延方法の適用によるクラウン・エッジドロップ制御技術を先駆的に開発してきた。まず熱間仕上圧延機の後段スタンドに先細りの両テーパワークロールを用いることによりクラウンおよびエッジドロップが低減可能であることが示された³⁻⁵⁾。その後、片テーパ付きワークロールシフト圧延方法を開発し実機適用した⁶⁾。

熱間圧延では千葉製鉄所 No.1 熱間仕上圧延機 (6 スタンド) の F3 ~ F5 の3 スタンドに片テーパ付きワークロールシフト圧延方法を適用⁷⁾ (1983 年 6 月) し、さらに同所 No.2 熱間仕上圧延機 (7 スタンド) の F5 ~ F7 の3 スタンドに適用した。Fig. 1 は No.1 熱間仕上圧延機における片テーパ付きワークロールシフト圧延方法の効果⁷⁾を示したもので、制御無しの場合に比べて、板クラウンは 120 ~ 30 μm から 40 ~ 10 μm に制御されている。

一方、冷間圧延機への適用は水島製鉄所 No.1 TCM の第1スタンドに片テーパ付きワークロールシフト圧延方法を 1984 年 12 月に実用化⁸⁻¹⁰⁾した。さらに Fig. 2 に示すように同所 No.2 TCM (4 スタンド) の全スタンドにその技術を適用し、一般冷延材においてエッジドロップ ($h_{100}-h_{12.5}$) を従来の制御無しの場合に比べて大幅に改善

* 平成 8 年 3 月 21 日原稿受付

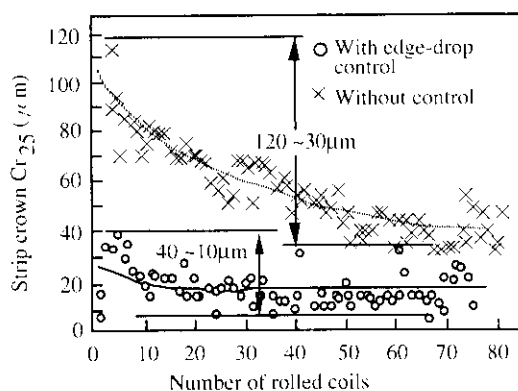


Fig. 1 Effect of one-side tapered work roll shifting method in hot rolling

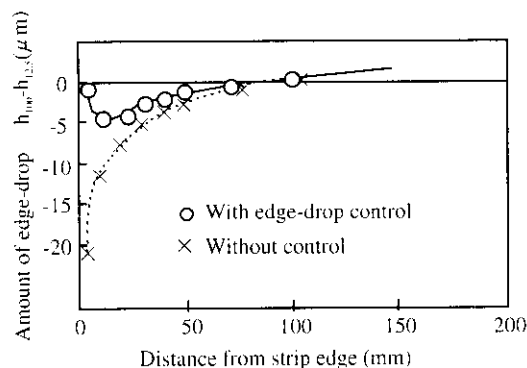


Fig. 2 Effect of one-side tapered work roll shifting method in cold rolling

することが可能となった¹¹⁾。

3 幅方向板厚制御範囲の拡大

一般冷延材のエッジドロップは熱延板のクラウンも小さく、片テーパ付きワークロールシフト圧延方法の適用で比較的容易に制御可能であるが、高変形抵抗難圧延材においては、熱延板のクラウンが大きいことに加えて、冷間圧延でも荷重が大きいためにエッジドロップが大きく、高精度の幅方向板厚制御が困難であった。本章では高変形抵抗難圧延材を対象として板幅方向板厚精度が定常部で±0.5%、非定常部で±0.8%という高い目標を達成するために、冷延で発生するエッジドロップを制御するだけでなく、エッジドロップ制御範囲を従来よりさらに拡大し、熱延板のプロフィールも冷延において修正する幅方向板厚制御について述べる。

3.1 冷間圧延での圧延材断面厚分布

冷間圧延におけるエッジドロップの発生開始位置は Fig. 3¹²⁾に示すように、第1パスでは板端から約50 mm、第3パス、第5パスでは板端から約30 mmより板端側でクラウン比率一定から外れる変形になり、幅方向へのメタルフローは板端部に限定される。また、板端部から50 mm程度よりも内側ではクラウン比率一定の変形をしていることから、冷間圧延時のプロフィールは板端部近傍を除き熱間圧延の板プロフィールの影響を大きく受けることがわかる。

3.2 冷間圧延でのエッジドロップの制御範囲の拡大

冷間圧延におけるエッジドロップ制御範囲を明らかにするため、

小径ラボ圧延機により片テーパ付きワークロールシフト圧延方法の制御特性を調査した。実験条件を Table 1 に示す。ワークロールテーパ位置は Fig. 4 に示すようにテーパ開始位置が板幅端部よりも内側にある場合を正として EL (effective length: 板の幅方向座標における板端からのテーパ開始位置までの距離) = 50 ~ 80 mm の範囲で変化させた。圧延後のプロフィールは Fig. 5 に示すように、テーパ角の大きい 1/375 の場合のほうがエッジアップ量が大きく、各 EL の条件ではほぼテーパの開始位置までテーパ形状が転写されていることがわかる。これは Fig. 3 で示したエッジドロップ発生位置よりもさらに内側のプロフィールを制御できることを示している。プロフィールが変化し始める位置までを制御可能範囲とすると、各テーパロールを用いた場合の制御限界は Fig. 6 に示すようにテーパ角が大きいほど、より内部までテーパの効果が得られる。

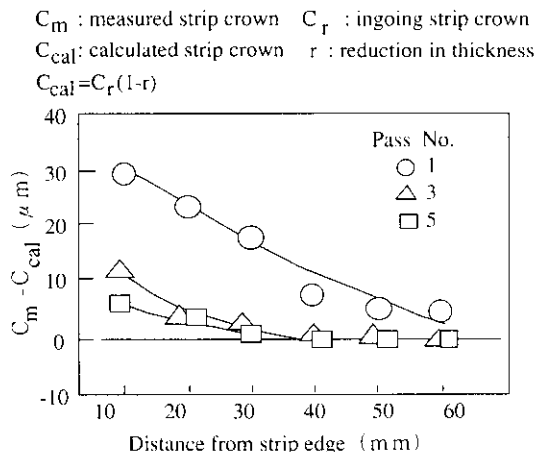


Fig. 3 Comparison of calculated and measured crown

Table 1 Experimental conditions

WR Dia.	(mm)	310
Rolled material	(mm)	Low carbon steel
Strip width	(mm)	200
Strip thickness	(mm)	Inlet/Outlet = 2.3/1.5
Tension	(MPa)	Inlet/Outlet = 78/120
Taper angle tanθ		1/727, 1/600, 1/375, 1/188, 0 (flat)
Shifting position EL (mm)		80, 70, 60, 50

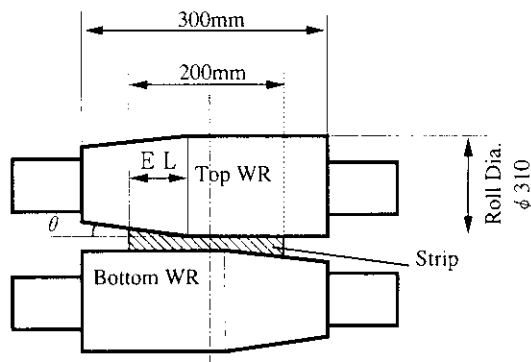


Fig. 4 Definition of WR taper θ and shifting position EL

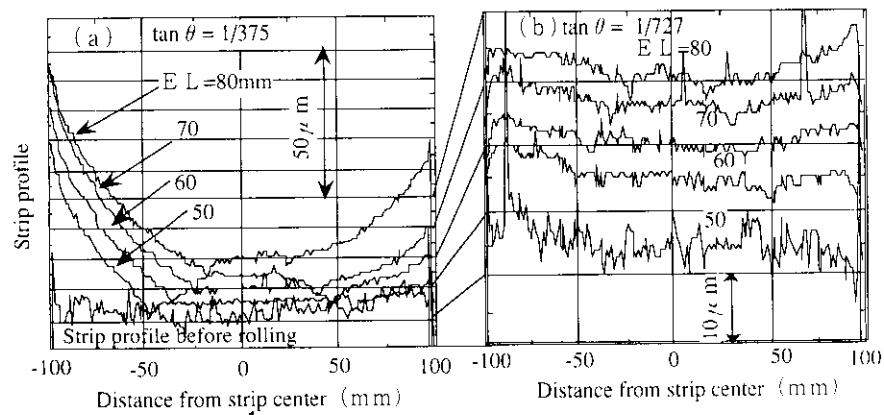
Fig. 5 Strip profile change by rolling with tapered roll, $\tan \theta =$ (a) $1/375$, (b) $1/727$

Fig. 7 に各テーパロール条件における $EL = 80 \text{ mm}$ での伸び差率を測定した結果を示す。テーパ角が大きくなるにしたがい腹伸び形状が大きくなる。テーパ角が $1/375$ ロールでは急峻度 2.8% 以内となるが、 $1/188$ の場合はそれよりも大きな急峻度になる。したがってワークロールに付与するテーパ角度を $1/375$ 程度とすることにより、形状不良を防止して板幅方向のより内部までプロフィール制御が可能である。

小型ラボミルの検討をもとに実機におけるエッジドロップ制御の検討を結果を以下に述べる。1987 年 1 月に稼働した水島製鉄所の冷間圧延設備 (No. 2 TCM) は Fig. 8 に示すように、エッジドロップ制御のために全スタンドに片テーパ付きワークロールシフト設備を有し、形状制御手段として、全スタンド共に中間ロールシフト、中間ロールベンダー、ワークロールベンダーを有する 4 スタンドの 6 Hi

-UC ミルからなる完全連続式の冷間圧延機であり、最終スタンド出側にエッジドロップ計を設置している。

ワークロールに $1/400$ のテーパを付与し、クラウンが比較的大きな熱延コイルを圧延した場合のプロフィールを Fig. 9(a), (b) に示

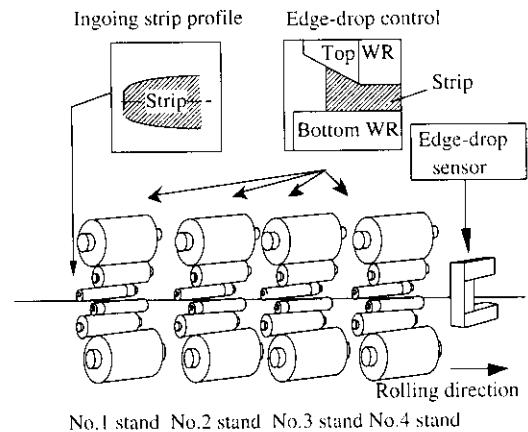


Fig. 8 Schematic diagram of Mizushima No. 2 TCM

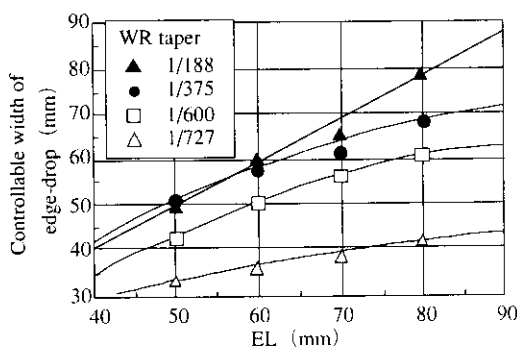


Fig. 6 Comparison of controllable width of edge-drop between taper angle

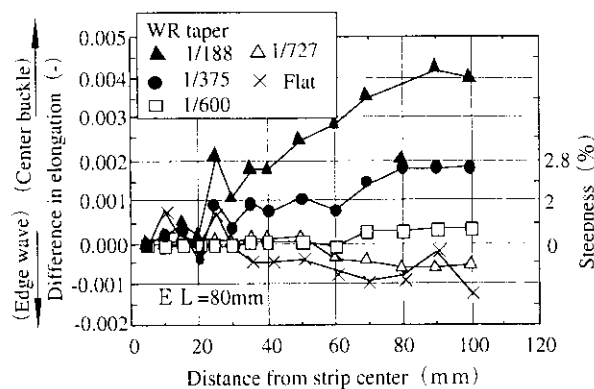


Fig. 7 Comparison of strip flatness after rolling

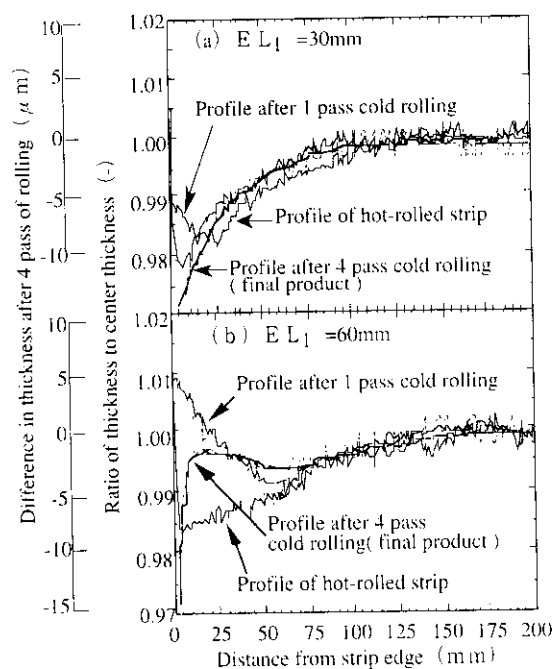


Fig. 9 Result of edge-drop control in Mizushima No. 2 TCM

す。同図の(b)の $EL_1 = 60$ mm の場合では板端 60 mm 程度の範囲のクラウン比率が変化しており、熱間圧延でのクラウン変動を冷間圧延で制御することが可能であることがわかる。本結果の $EL_1 = 60$ mm では2パス目以降も片テーパ付きワークロールシフト圧延方法を適用したので、製品板のエッジドロップはほぼ完全に制御されている。

4 プロフィール制御システムの開発

前節で述べたように、片テーパ付きワークロールシフト圧延方法を適用した冷間圧延のプロフィール制御では、熱延板クラウンの大きさに応じてシフト量 EL_1 を設定することにより、熱間圧延の板クラウンの変動を冷間圧延において制御可能である。さらにコイルの全長に渡って均一なプロフィールを得るために、熱延コイルの長手方向クラウンの変動およびウエッジに対応したエッジドロップのフィードフォワード、フィードバック制御技術を確立した。

4.1 熱延コイルの長手方向クラウン変動に対応したエッジドロップの制御

4.1.1 エッジドロップのフィードフォワード制御

Fig. 10 に熱延板のクラウン (Cr_{25}) が異なるコイルについて、冷延後の板端から 20 mm 位置でのエッジドロップ (エッジ 20 mm とエッジ 100 mm 位置での板厚差で定義) が $0 \mu\text{m}$ になる EL_1 を実験的に求めた結果¹⁹⁾を示す。熱延クラウンに対応した最適な EL_1 が存在し、エッジドロップを $0 \mu\text{m}$ にするには、熱延クラウンが大きくなるにしたがい、シフト量 EL_1 をほぼ比例して大きくする必要がある。エッジドロップのフィードフォワード制御は、熱間圧延設備出側に設置されたプロフィール計の測定値情報を No. 2 TCM に転送し、Fig. 10 に示した関係から熱延コイル内のクラウン変動に対応して第1スタンドのシフト量 EL_1 を制御する方法である。

4.1.2 エッジドロップのフィードバック制御

第1スタンドワークロールシフト量 EL_1 が最終スタンド出側のエッジドロップに及ぼす影響を実験的に調査した結果を Fig. 11 に示す。板厚変化量とシフト変化量には以下の関係がある。

$$\Delta E_x = f(\Delta EL_1) \quad (1)$$

ΔE_x : x mm 位置での板厚変化量 (μm)

ΔEL_1 : シフト変化量 (mm)

f: 各位置での ΔE_x と ΔEL_1 関係を表す関数

エッジドロップのフィードバック制御は本式を用いて、目標のエッジドロップ量になるようにワークロールシフト量を調整する方法である。

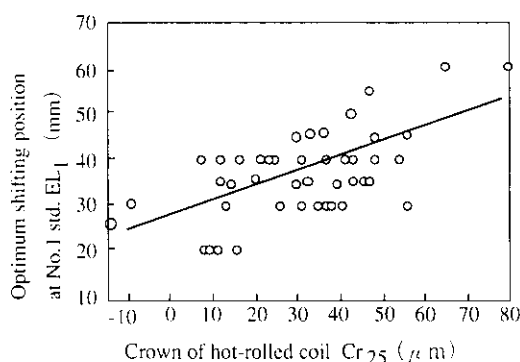


Fig. 10 Optimum shifting position at No. 1 stand according to crown of hot-rolled strip

4.2 エッジドロップの制御目標の設定と上下非対称ワークロールシフト

1/400 のテーパ角を付与したワークロールを用いてエッジドロップ制御を行ったときの板端部のプロフィールを Fig. 12 に示す。板端から 10 ~ 15 mm 位置でエッジアップ傾向になっている。この範囲においてエッジドロップが $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内の目標とし、かつ板厚が薄くなる板端から 25 ~ 30 mm 位置において $-5 \mu\text{m}$ 以内とする制御を実施している。このような制御により、より高精度の幅方向板厚精度が達成できる。

熱間圧延において、板幅左右での温度差、荷重差等の発生あるいは通板時の蛇行等により、板幅左右でのクラウンが異なる。より高精度の板幅方向板厚制御を行うためには、この板幅左右における板厚差を制御する必要がある。そこで板幅左右での板厚の非対称性を制御可能な上下ワークロールの非対称シフトを実施している。Fig. 13

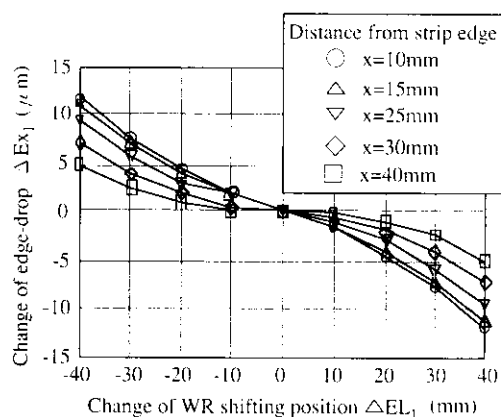


Fig. 11 Edge-drop change by changing WR shifting position (Experimental results)

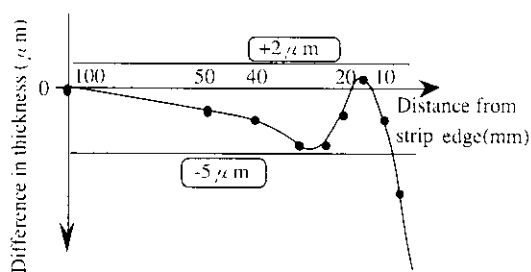


Fig. 12 Result of strip edge-profile by feedback control

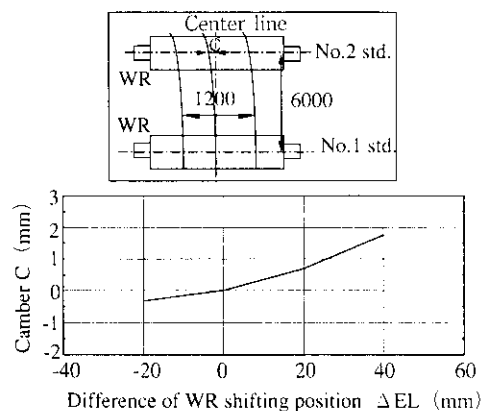


Fig. 13 Amount of strip camber

に非対称圧延が考慮可能な分割モデル¹⁴⁾により、上下ワークロールを非対称シフトした場合の次スタンドでのキャンパー量を示す。上下ワークロールを非対称にシフトしても冷間圧延で発生するキャンパーは小さく、上下ワークロールシフト差が20 mm 以内であれば次スタンドでのキャンパー量を1 mm 以下に抑えることができ、安定した操業が可能である。実際、上下ワークロール非対称シフトによる操業上の問題は発生していない。

4.3 プロフィール制御システムと効果

No. 2 TCM に適用した片テーパ付きワークロールシフト圧延方法の効果を最大限に発揮させる、エッジドロップのフィードフォワード、フィードバック制御システムを Fig. 14 に示す。

本開発プロフィール制御システムを水島製鉄所 No. 2 TCM に適用し

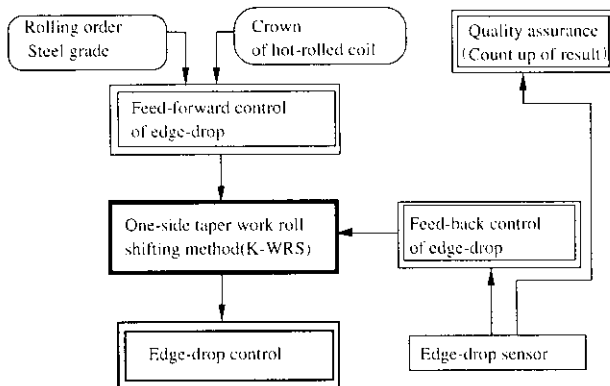


Fig. 14 System of transverse thickness control

た効果を Fig. 15 および Table 2 に示す。従来の制御に比べ幅方向板厚精度が大きく改善され、高変形抵抗難圧延材の圧延において当初の開発目標である定常部 $\pm 0.5\%$ 、非定常部 $\pm 0.8\%$ をほぼ達成でき、歩留りの向上に寄与している。

5 結 言

水島製鉄所 No. 2 TCM に片テーパワークロールシフト方法を適用し、高精度板幅方向板厚精度が得られる技術を確立し、得られた知

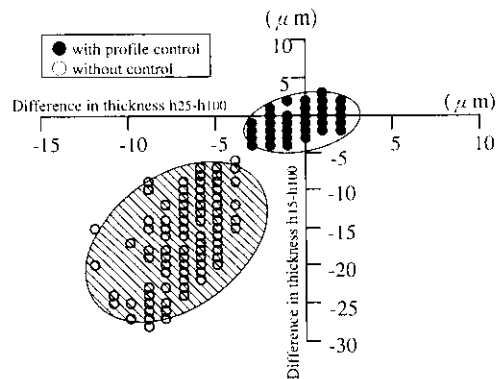


Fig. 15 Effect of transverse thickness profile control system

Table 2 Comparison of accuracy of transverse thickness ($h_{100}-h_{15}$) (%)

	Achievement ratio within $\pm 0.5\%$ in steady state	Achievement ratio within $\pm 0.8\%$ in non-steady state
Former	85.7	82.1
The present development	96.8	96.4

見を以下に示す。

- (1) 薄物難圧延材の板幅方向の全長、全幅に渡り、定常部で 0.5% 以内、非定常部で 0.8% 以内の高い板厚精度を達成した。
- (2) 熱延鋼板のクラウンの大きさに対応したワークロールシフト位置のエッジドロップのフィードフォワード制御を確立した。
- (3) ミル出側に配置したエッジドロップ計を用いたエッジドロップのフィードバック制御を確立した。
- (4) ワークロールプロフィールを最適化することにより、冷間圧延における板幅方向プロフィール制御範囲を拡大した。

今後熱延板の幅変動に対応した板幅方向板厚制御、走間板厚変更時の板幅方向板厚制御および形状制御のレベルアップを行い、さらなる板厚精度の向上に取り組む予定である。

参 考 文 献

- 1) T. Ono, T. Teshiba, and N. Suganuma: *Iron & Steel Eng.*, 3 (1988), 32-37
- 2) 小野智睦, 手柴東光, 上井克彦, 広畑和宏, 侍留 誠, 内藤 康: 材料とプロセス, 1(1988)5, 1536
- 3) 北村邦雄, 足立明夫, 鎌田征雄, 弦田 登, 片岡健二, 福島 蔵, 中川吉左衛門, 浅川長正: 第28回製加連講論, (1977), 92
- 4) 足立明夫, 豊島 貢, 福島 蔵, 浅川長正, 北村邦雄, 鎌田征雄, 片岡健二, 中川吉左衛門: 昭和53年製加連講論, (1978), 45
- 5) 鎌田征雄, 北村邦雄, 片岡健二, 中川吉左衛門: 川崎製鉄技報, 11 (1979)1, 78
- 6) たとえば 特公昭60-51921
- 7) 北浜正法, 北村邦雄, 田中富夫, 豊島 貢: 塑性と加工, 23(1982)263, 1165
- 8) 菅沼七三雄, 三上昌男, 北村邦雄, 後藤健夫, 侍留 誠, 本城 恒: 第35回製加連講論, (1984), 211
- 9) 菅沼七三雄, 小松富夫, 内藤 康, 渋谷 聡, 広畑和宏, 山本和明: 昭和60年製加連講論, (1985), 41
- 10) 小松富夫, 進 修, 菅沼七三雄, 中西敏修, 渋谷 聡, 黒田 茂: 昭和60年製加連講論, (1985), 45
- 11) 水士 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
- 12) 北村邦雄, 竹林克浩, 鎌田征雄, 菅沼七三雄: 材料とプロセス, 5 (1992)2, 479
- 13) 赤木 功, 早瀬直樹, 小野智睦, 中西敏修, 蛭田敏樹, 北浜正法: 材料とプロセス, 7(1994)2, 444
- 14) 蛭田敏樹, 中田直樹, 北浜正法, 鎌田征雄: 第45回製加連講論, (1994), 371