

厚板圧延における平坦度制御技術の開発

磯山 茂*・吉井 誠*・岡村 勇*・大森 和郎*・越智 潔*・吉里 勉*

Development of Shape Control in Plate Rolling

Shigeru ISOYAMA, Makoto YOSHII, Isamu OKAMURA, Kazuo OHMORI, Kiyoshi OCHI and Tutomu YOSHIKATO

Synopsis : Newly developed plate shape control system, using attached shape meter, was put in service in Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp. This system consists of (1)Sensors; attached shape meter, multi head γ ray thickness meter (crown meter) (2)Actuator; oil pressure type work roll bending device and (3)Models: shape prediction model, plate crown prediction model.

The closed loop, comprising attached shape meter and work roll bending system based on the shape prediction model, characterizes this system.

Introduction of this system, enables the improvement of flatness and plate crown accuracy, which meets ever upgrading customer's demand and also yields improvement and chance free rolling.

This report describes the following terms;

- (1)Specification of shape meter and work roll bending device.
- (2)Algorithm of shape control system.
- (3)Results.

Key words: shape control; plate rolling; hot plate; flatness; plate crown; shape meter; work roll bending device.

1. 緒言

近年、需要家での省工程を目的として、厚鋼板に対する平坦度および寸法精度要求が厳格化されつつある。また省エネルギー、省工程を目的としたロールチャンス規制の緩和、および歩留り向上の面からも、平坦度、板クラウン制御技術の開発は重要な課題となっている。

従来、川崎製鉄(株)水島製鉄所厚板ミルでは、ワークロールのイニシャルクラウン最適化およびスケジュール計算上のクラウン比率制御¹⁾によってこれらの制御を行ってきた。しかし、圧延における平坦度不良は、圧延機の変形特性、材料の変形特性、圧延荷重予測精度、あるいはロールプロフィールの変化等が複雑に絡んで発生する。従って、予測のみに基づく制御では、平坦度制御精度がモデル群の精度に依存する点、また板クラウンのみを単独に制御するアクチュエータがない点から、十分な平坦度制御精度が得られないのが実情であった。

そこで当社では、ミル近傍に圧延途中での平坦度測定を可能にする平坦度計を設置するとともに、板クラウン制御用アクチュエータとしてワークロールベンダーを導入することにより、平坦度計の情報をを用いた平坦度制御技術の開発を行った^{2)~5)}。

本報では、平坦度計およびワークロールベンディング装

置の概要、板クラウン制御能力、平坦度制御ロジックの概要、ならびに実機適用結果について報告する。

2. 平坦度制御システム

2・1 システム概要

Fig. 1 に平坦度制御システムの概要を示す。本制御システムは、平坦度計、3ヘッド γ 線厚み計(クラウンメータ)、ロードセル等のセンサー、プロセスコンピュータ等の計算機、およびワークロールベンディング制御装置で構成されており、平坦度計による平坦度測定結果、およびクラウンメータによる板クラウン測定結果をもとに次パスのベンディング力の設定を行う。

本システムを採用することにより、従来の圧延荷重、板クラウン等の予測値にもとづいたオープンループの平坦度制御方式から平坦度計実測情報にもとづいたクローズドループ制御方式とすることができる。

2・2 平坦度測定システム

2・2・1 平坦度測定原理⁶⁾

Fig. 2 に平坦度計による急峻度測定の原理図を示す。鋼板の上下方向の変位がピッチP、振幅H/2で正弦的に変化すると仮定すると、鋼板上の距離d離れた2点A、Bにおける変位の差 Δh は、

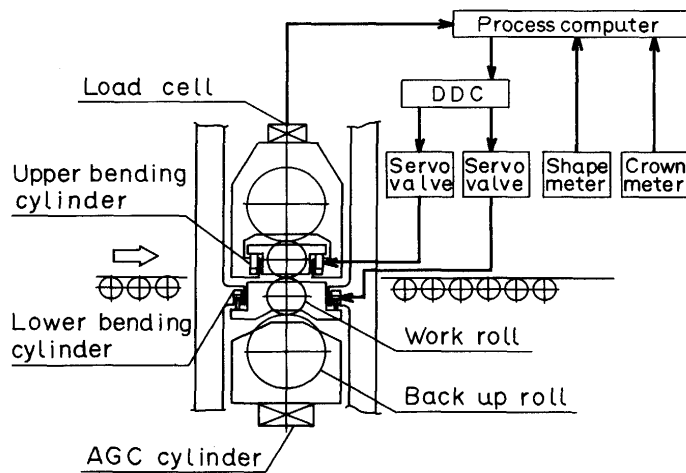
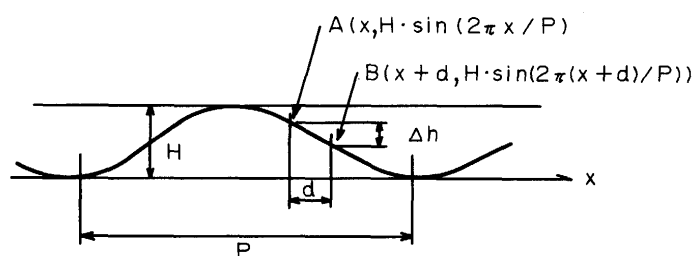


Fig. 1. Structure of shape control system.



P: Wave pitch

H: Maximum displacement

Fig. 2. Explanation of shape measuring.

$$\Delta h = \frac{H}{2} \left\{ \sin \frac{2\pi(x+d)}{P} - \sin \frac{2\pi x}{P} \right\}$$

$$= H \cos \frac{\pi(2x+d)}{P} \cdot \sin \frac{\pi d}{P} \quad \dots \dots \dots (1)$$

で表され、 Δh の最大値 $\Delta h_{\max}$ は

$$\Delta h_{\max} = H \sin \frac{\pi d}{P} \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで $\pi d/P$ が十分小さいとすれば(2)式は

$$\Delta h_{\max} = H \frac{\pi d}{P} \quad \dots \dots \dots (3)$$

と近似することができる。(3)式を変形して

$$\frac{H}{P} = \frac{\Delta h_{\max}}{\pi d} \quad \dots \dots \dots (4)$$

となり、 $\Delta h_{\max}$ から急峻度 H/P を求めることができる。したがって、鋼板の長手方向2点の変位差 Δh を連続的に測定し、 Δh の極値を求めることにより、急峻度を測定することができる。

2.2.2 平坦度計仕様

本平坦度計は仕上げミルから11m、パスラインから4mの位置に設置され、鋼板の急峻度を熱間において測定するものである。Table 1に平坦度計の主仕様を示す。5組の測定ユニットを板幅方向に配置し、板幅方向5点の急峻度を測

定する。各測定ユニットは板幅に応じて板の両端、両コーナーおよび中央に自動位置設定される。

Fig. 3に測定ユニットの構成を示す。半導体レーザ光を鋼板上に斜めからスキャニング照射し、レーザ光が基準センサーで受光されてから鋼板上部の受光器で反射光が受光されるまでのタイミングを検出することにより、鋼板の上下方向の変位を測定する。測定ユニット内には光源と2個の受光器が設置され、長手方向に距離 d 離れた2点の変位差から前述の(4)式を用いて急峻度を算出する。

また、鋼板の平坦度は鋼板の端部の急峻度 λ_e と中央の急峻度 λ_c を用いて以下の式で求める。

$$\lambda^* = \begin{cases} \sqrt{|\lambda_e^2 - \lambda_c^2|} \cdots \lambda_e \geq \lambda_c \\ -\sqrt{|\lambda_e^2 - \lambda_c^2|} \cdots \lambda_e < \lambda_c \end{cases} \quad \dots \dots \dots (5)$$

λ^* : 平坦度 λ_e : 両端部の平均急峻度 λ_c : 中央の急峻度。

平坦度計を熱間圧延の環境で使用するにあたっては、以下に示すような配慮をしている。

(1) 赤外線放射ノイズ対策

赤外線レーザ光を高周波に変調し、受光器にて受光した後、干渉フィルタにて鋼板からの赤外線放射成分を除去してから復調することにより、赤外線放射ノイズの影響を除去している。

(2) 温度・環境対策

専用クーラにより温度管理、および粉塵・熱気対策とし

Table 1. Specification of shape meter.

Type	: Scanning type of semiconductor laser
Laser wave length	: 830nm
Laser power	: 40mW
Measuring point	: 5point/width
Measuring Shape	: 0~15%
Measuring plate width	: 1000~5400mm
Distance from mill	: 11m
Distance from pass line	: 4m

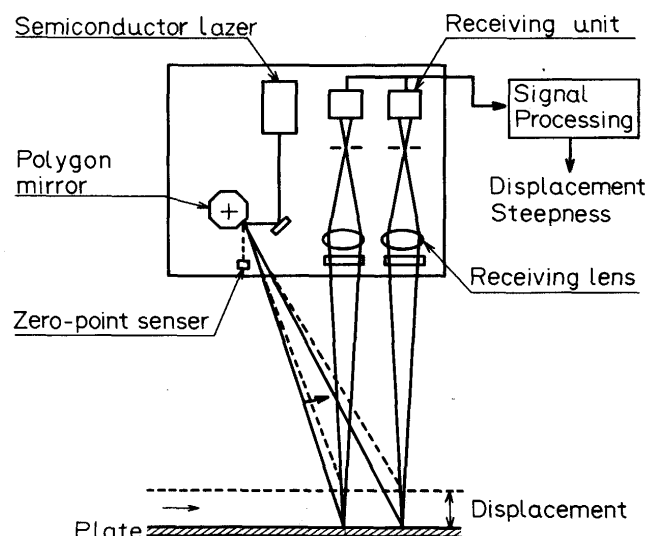


Fig. 3. Outline of shape meter.

て測定部下部のエアパージを行っている。

2・2・3 オンライン測定結果

Fig. 4 は、オンラインでの平坦度測定データを平坦度評価指数（観測値）と比較した結果を示す。両者はよい相関を示し、熱間鋼でも十分測定が可能であることがわかる。

2・3 ワークロールベンディング制御システム

Table 2 にワークロールベンディング装置の仕様を示す。ベンディング力制御範囲は2.2MN±1.2MN/チョックである。高信頼性、高応答性を確保するためにベンディング圧力制御弁に直動型サーボ弁を採用している。ベンディングシリンダーは既設仕上げミルのバランスシリンダーを流用しており、最小限のミル改造でワークロールベンディング装置の実機化を図ることができた。

3. 板クラウン制御能力

3・1 アルミ挟圧実験

ベンディング力による板クラウン制御能力を検証するためにアルミ板を用いた挟圧実験を行った。Table 3 に実験条件を示す。用いたアルミ板は降伏点74MPa相当の純アルミで、板厚10mm、板幅4000mmである。

Fig. 5 にベンディング力を変化させた場合の挟圧後の板厚プロフィールを示す。ベンディング力の変化に応じて、板幅端でプロフィールが大きく変化している。

Fig. 6 に板幅4000mmにおけるベンディングによる板クラ

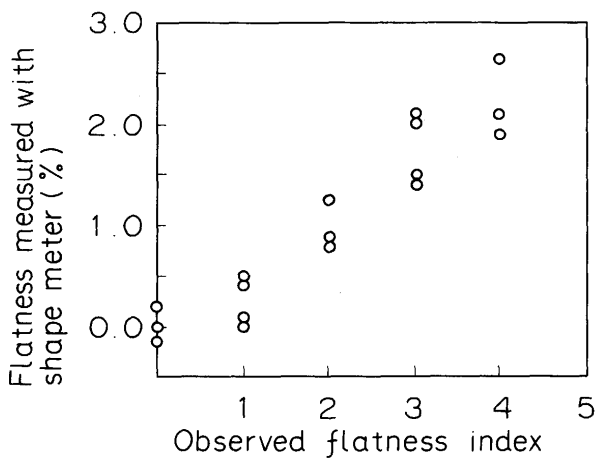


Fig. 4. Comparison between flatness measured with shape meter and observed flatness index.

Table 2. Specification of work roll bending.

Bending cylinder	: Upper $\phi 220\text{mm} \times 4/\text{chock}$ Lower $\phi 190\text{mm} \times 6/\text{chock}$
Pressure of system	: Max 25MPa
Used pressure	: Max 22MPa
Bending force	: Max 3.4MN/chock Controlled range 2.2±1.2MN/chock
Control valve	: Servo valve

Table 3. Experimental condition of indentation test.

Material	: Aluminum (A1050P-H24)
Thickness×Width	: 10mm×4000mm
Work roll diameter×Barrel length	: $\phi 1186\text{mm} \times 5490\text{mm}$
Back up roll diameter×Barrel length	: $\phi 2330\text{mm} \times 5390\text{mm}$
Initial crown of work roll	: 0.40mm/diameter
Press force	: 9.8KN/mm
Bending force	: 1.0, 2.2, 3.4MN/chock

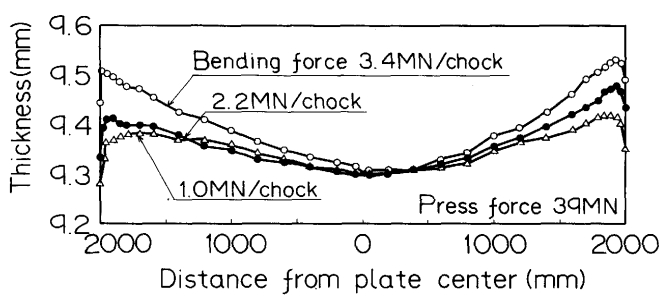


Fig. 5. Comparison of thickness profile with various bending forces in aluminum press test.

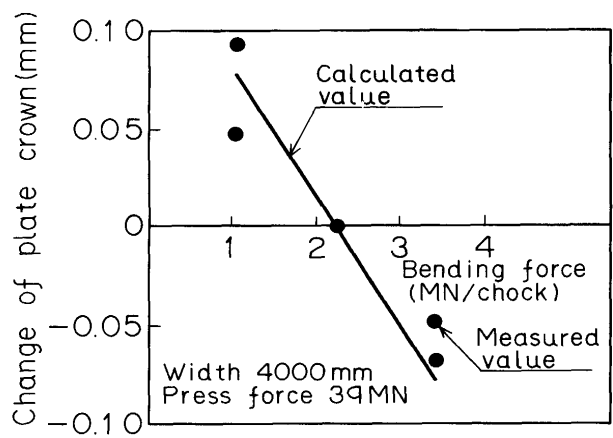


Fig. 6. Comparison between experimental results and plate crown calculated by simulation model.

ウン変化量を示す。ここで板クラウンは板幅端から100mmの位置で評価した。図中●印は挟圧実験結果を、実線は分割モデル⁷⁾による計算結果を示す。±1.2MN/チョックのベンディング力変化で、±0.07mmの板クラウン変化量が得られた。また、実験結果と計算結果でほぼ同等の板クラウン制御能力が得られていることから分割モデルを用いたベンディング能力のシミュレーションが可能である。

3・2 制御能力シミュレーション

ベンディングによる板クラウン、平坦度制御能力について、分割モデルおよび平坦度モデルを用いたシミュレーションを行った。Table 4 にシミュレーション条件を示す。板厚5～20mm、板幅1000, 3000, 5000mmの材料についてベンディング力を1.2MN/チョック変化させた。

Fig. 7 にベンディングによる板クラウン制御能力を示す。板幅3000mm以下の幅狭材では板クラウン制御能力は小さいが、板幅5000mmの広幅材では0.10～0.15mm程度の大きな

Table 4. Condition for calculation of work roll bending effect on plate crown and flatness.

Thickness	: 5~20mm
Width	: 1000~5000mm
Reduction	: 20%
Work roll diameter×Barrel length	: ϕ 1200mm×5490mm
Back up roll diameter×Barrel length	: ϕ 2400mm×5390mm
Initial crown of work roll	: 0.40mm/diameter
Rolling force	: 9.8kN/mm
Change of bending force	: 1.2MN/chock

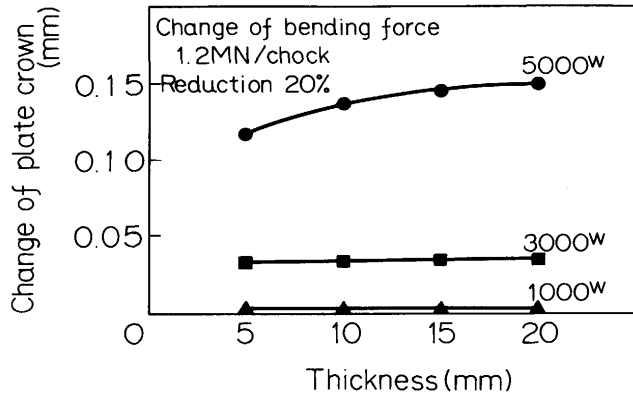


Fig. 7. Calculated effect of work roll bending on plate crown with various thicknesses and widths.

板クラウン制御能力が得られており、板厚が厚くなるほど制御能力は大きくなる。

Fig. 8 に平坦度制御能力を示す。板幅5000mmでは板クラウン制御能力が大きいこと、および板幅が広いほどクラウン率変化が平坦度に表れやすいことからベンディングによる平坦度制御能力も大きい。

4. 平坦度制御ロジック

4・1 ベンディング力のセットアップアルゴリズム

平坦度制御を実圧延に適用する場合には、最終板クラウンを目標板クラウンに近づけ、しかも平坦度の優れた鋼板を製造する制御方法が必要である。Fig. 9 に平坦度制御ロジックを示す。最終パス付近では、平坦度計の実測データにもとづき平坦度が良好となるようにベンディング力を設定し、途中パスでは各パスの目標板クラウンに一致させるようにベンディング力を設定する。次パスのベンディング力セットアップ値は次のようにして算出する。

(1) 最終狙い板クラウン比率に圧延能率を向上させるための板クラウン比率増分を考慮して、次パス目標板クラウン CR_2 を求める。

(2) 直近 γ 線板厚計、クラウンメータ、および平坦度計により前パスの板厚 H_1 、板クラウン CR_1 、平坦度 λ_1 の実績収集を行う。

(3) 平坦度モデルにより次パスの平坦度を計算し、許容平坦度 α を越えると予測される場合には、次パス目標板クラウン CR_2 を変更する。

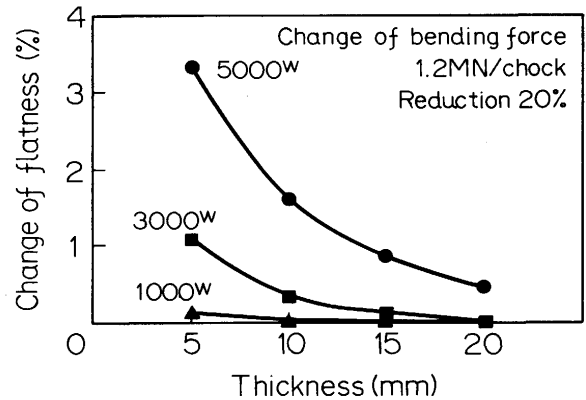


Fig. 8. Calculated effect of work roll bending on flatness with various thicknesses and widths.

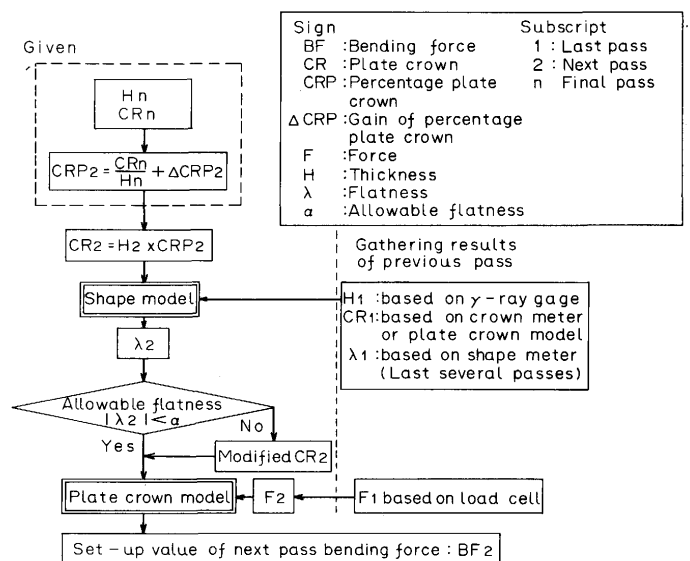


Fig. 9. Set-up logic of work roll bending force based on shape meter data.

(4) 平坦度計の情報を用いた最終数パスでは、許容平坦度 α の値を小さくし、最終の平坦度が良好となる次パス目標板クラウン CR_2 とする。

(5) 次パス予測荷重 F_2 をもとに板クラウンモデルを用いて、次パスの板クラウンが CR_2 となるようなベンディング力セットアップ値 BF_2 を算出する。

4・2 平坦度制御モデル

4・2・1 板クラウンモデル

板クラウンモデルは、ロールの変形状態を表す基礎式を分割モデル⁷⁾によるシミュレーション結果で補正することにより作成した簡易式⁸⁾であり、出側板クラウン CR_2 は圧延荷重影響項 CR_F 、ベンディング力影響項 CR_{FB} 、ワークロールプロフィール影響項 CR_W 、バックアップロールクラウン影響項 CR_B 、入側板クラウン影響項 CR_P の線型結合として次式のように表す。

$$CR_2 = CR_F + CR_{FB} + CR_W + CR_B + CR_P \cdots \cdots (6)$$

ここで、

$$CR_F = f(F, W, H_2, r)$$

$$CR_{FB} = f(FB, F, W, H_2)$$

$$CR_W = f(C_i, C_H, C_W, F, W, H_2)$$

$$CR_B = f(C_B, F, W, H_2)$$

$$CR_P = f(CR_1, F, W, H_2)$$

F: 圧延荷重

W: 板幅

H₂: 出側板厚

r: 圧下率

FB: ベンディング力

C_i: イニシャルクラウン

C_H: サーマルクラウン

C_W: 摩耗量

C_B: バックアップロールクラウン CR₁: 入側板クラウン

4.2.2 ロールプロフィールモデル

ロールプロフィールはイニシャルクラウンプロフィールにサーマルクラウンおよび摩耗による変化量を考慮することによって求められる。

(1) サーマルクラウンモデル⁸⁾

サーマルクラウンは軸対称2次元非定常差分モデルを用いて算出可能であるが、オンラインでは計算時間が制約されるため、簡易モデル⁹⁾を用いている。簡易モデルはサーマルクラウンの圧延時の増加、冷却時の減少を表す式と幅方向分布形状を示す式とで構成される。

Fig.10に幅方向サーマルクラウン分布の実測値と計算値の比較を示す。実測値は材料を20本圧延した後、鉛棒を挟圧してサーマルクラウンを測定した結果である。ロールバレル方向分布形状、絶対値とも両者は良く一致しており、精度良くサーマルクラウンが予測できている。

(2) 摩耗モデル

ワークロールの摩耗はロール負荷（圧延荷重／板幅×圧延長さ）の累積値にはほぼ比例することが知られている¹⁰⁾。これに幅方向圧延荷重分布の影響を考慮した摩耗モデルを用いた⁸⁾。

$$C_{Wj} = f(D, H_s) \times \sum (F_j \times L/D) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

C_{Wj}: 幅方向 j 点におけるワークロール摩耗量

f(D, H_s): ワークロール径と硬度で決まる補正係数

F_j: j 点における単位幅荷重

L: 圧延長さ

D: ワークロール径

Fig.11に255本圧延後の摩耗によりロールプロフィール変化の実測値と摩耗モデルによる計算値の比較を示す。ロール摩耗に関しても、精度良く予測することが可能である。

4.2.3 平坦度モデル

平坦度モデルは中島ら¹¹⁾が提案している形状変化係数を用いて次式のように表す。ここで形状変化係数は実機平坦度データに基づいて補正したものを採用している。

$$\varepsilon_2 = \xi \times (CR_2/H_2 - CR_1/H_1) + \alpha \times \varepsilon_1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\lambda_2 = 2/\pi \times \sqrt{\varepsilon_2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

ε₁: 入側伸び差率

ε₂: 出側伸び差率

H₁: 入側板厚

H₂: 出側板厚

CR₁: 入側板クラウン

CR₂: 出側板クラウン

ξ: 形状変化係数

λ₂: 出側平坦度

α: 入側伸び差率遺伝係数

5. 実機適用結果

平坦度制御システムを実機に適用し、平坦度および板クラウン制御効果について検証した。

Fig.12, 13は平坦度計の情報を用いずに最終パスまで目標板クラウンを狙った制御を適用した場合の平坦度、板クラウン制御結果である。制御の適用によって平坦度の向上が見られ、目標平坦度±0.5%以内の発生率も制御無で66%、制御有で74%と制御効果が認められる。また、狙い板クラウン精度についても平均値、ばらつきともに向上し、制御

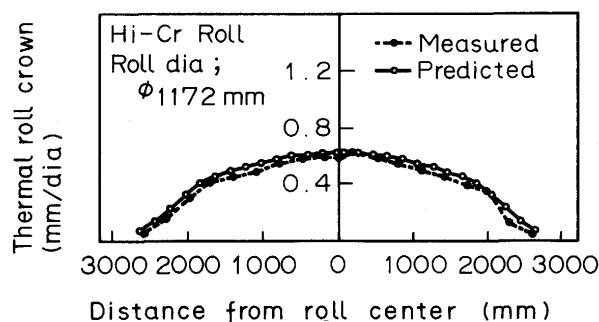


Fig. 10. Comparison of measured and predicted thermal roll crown.

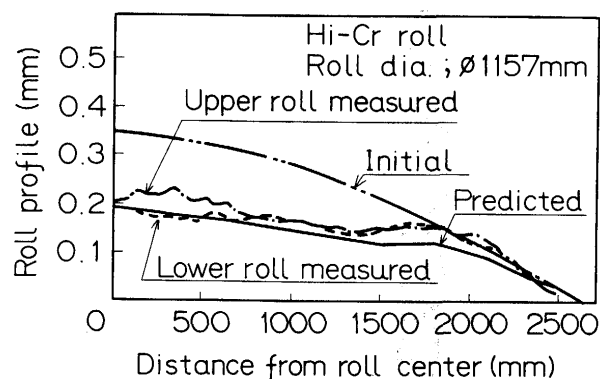


Fig. 11. Comparison of measured and predicted roll wear.

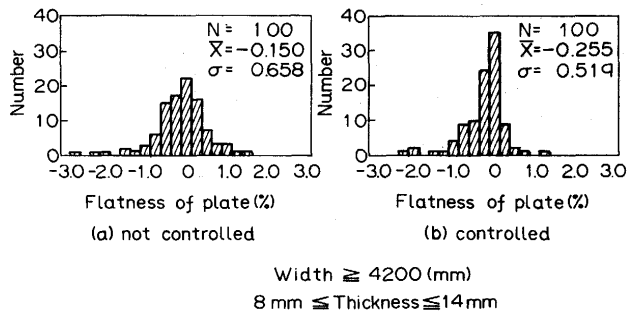


Fig. 12. Result of plate crown control without shape meter data (Effect on flatness).

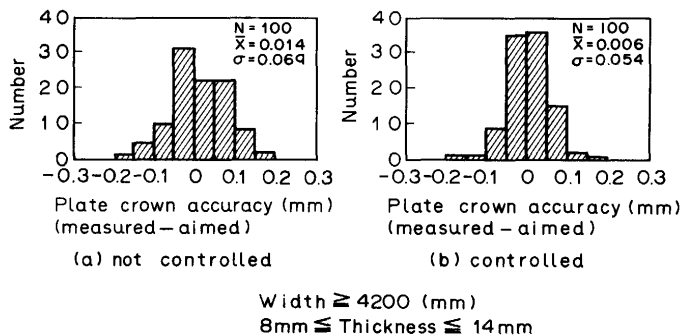


Fig. 13. Result of plate crown control without shape meter data (Effect on plate crown).

効果があることを確認することができた。

Fig.14は最終数パスで平坦度計の実測データを用いて制御した場合の最終パスの入側と出側の平坦度を示したものである。制御無の場合の薄物材の平坦度は最終パスで大きく悪化するのに対し、制御の適用により平均値・ばらつきともに向上しており、出側鋼板形状の改善が確認できた。

6. 結言

厚板圧延における平坦度制御技術として、平坦度の実測情報に基づいて、ワークロールベンディング力を制御する新制御技術を開発した。

(1)ミル近傍において熱間での鋼板急峻度を連続測定できる平坦度計を開発した。

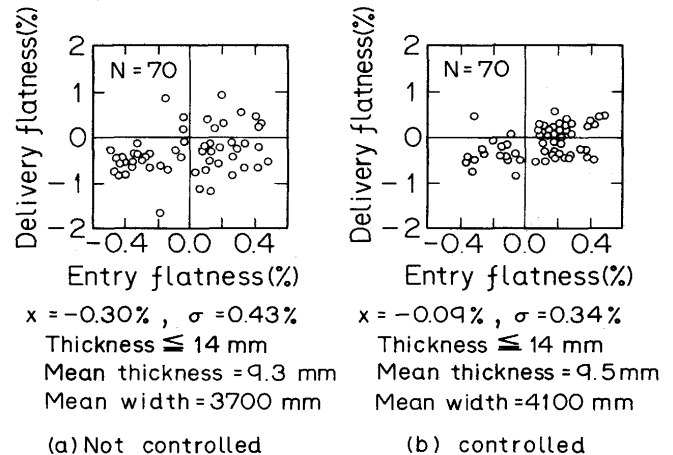


Fig. 14. Result of work roll bending control based on shape meter data.

(2)前パスまでの平坦度、板クラウン、圧延荷重等の実測値と、許容平坦度により求まる次パスの狙い板クラウンに基づき、ベンディング力を制御するシステムを開発した。

(3)本制御を実機に適用し、平坦度の改善および板クラウン精度の向上が見られることを確認した。

文 献

- 1) 瀬川佑二郎, 坪田一哉, 井上正敏, 本城 恒, 樋口均一, 江森隆: 塑性と加工, 20 (1979), p.119
- 2) 吉井 誠, 大森和郎, 越智 潔, 磯山 茂, 重田春樹, 岡村 勇: 材料とプロセス, 5 (1992), p.585
- 3) 重田春樹, 西田俊一, 岡村 勇, 川島俊明, 吉井 誠, 大森和郎: 材料とプロセス, 5 (1992), p.586
- 4) 伊藤高幸, 西田俊一, 吉井 誠, 大森和郎, 川島俊明, 岡村 勇: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1567
- 5) 吉井 誠, 大森和郎, 西田俊一, 磯山 茂, 川島俊明, 岡村 勇: 第43回塑性加工連合講演会, (1992), p.675
- 6) 公開特許: 平3-180710, 板の平坦度測定装置, (株)セルテック, 小笠原昭宣
- 7) K. N. Shohet and N. A. Townsend: J. Iron Steel Inst., (1968) Nov., p.1088
- 8) 竹内 徹, 大森和郎, 小川隆生, 井上正敏, 岡村 勇: 鉄と鋼, 71 (1985), S1171
- 9) 北浜正法, 鎌田征雄, 佐々木徹, 成田健次郎, 鴨志田隆, 栗津原博: 第35回塑性加工連合講演会, (1984), p.238
- 10) 鎌田征雄, 北村邦雄, 中川吉左衛門, 玉井敏行, 足立明夫, 福島 巖, 君島英彦: 鉄と鋼, 63 (1977), A107
- 11) 中島浩衛, 松本紘美, 木村智明, 梶原利幸, 菊間敏夫, 栗津原博, 志田 茂: 塑性と加工, 23 (1982), p.1172