
厚板圧延における平坦度制御技術

Shape Control Technology in Plate Rolling

吉井 誠 (Makoto Yoshii) 吉里 勉 (Tutomu Yoshizato) 岡村 勇 (Isamu Okamura)

要旨：

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もと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。制御システムは、(1)ミル直近で測定可能な平坦度計、クラウンメータ等のセンサー、(2)最大 3.5MN/チョックのワークロールベンディング装置、(3)平坦度計実測結果をもとにあらたに開発した平坦度モデル、および板クラウンモデル、で構成され、平坦度および板クラウンの実測値をもとに次パスの平坦度を推定し、ワークロールベンディング力を決定することを特徴としている。本システムを実機に適用することにより、平坦度、クラウン精度改善、歩留り向上、およびロールチャンス規制の緩和に貢献している。

Synopsis：

A newly developed plate shape control system, using a laser type shape meter, was put in service in the plate mill in Mizushima Works of Kawasaki Steel. This system consists of (1) sensors: shape meter and multi head γ -ray thickness meter (crown meter), (2) actuator: work roll bending device, and (3) models: newly developed shape prediction model based on data measured by the shape meter and plate crown prediction model. This system is characterized in that the setting of the roll bending force for the next pass is determined on the basis of the results of shape and crown measurements. Introduction of this system enables the improvement of flatness and plate crown accuracy, which meets ever upgrading customer's demand and contributes to yield improvement and chance free rolling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Shape Control Technology in Plate Rolling



吉井 誠
Makoto Yoshii
水島製鉄所 設備技術
部開発設計室 主査(掛
長)



吉里 勉
Tsutomu Yoshizato
経営企画部経営企画
室 主査(部長補)



岡村 勇
Isamu Okamura
水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(課
長補)

要旨

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もと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。制御システムは、(1)ミル直近で測定可能な平坦度計、クラウンメータ等のセンサー、(2)最大3.5 MN/チョックのワークロールベンディング装置、(3)平坦度計実測結果をもとにあらたに開発した平坦度モデル、および板クラウンモデル、で構成され、平坦度および板クラウンの実測値をもとに次パスの平坦度を推定し、ロールベンディング力を決定することの特徴としている。本システムを実機に適用することにより、平坦度、板クラウン精度改善、歩留り向上、およびロールチャンス規制の緩和に貢献している。

Synopsis:

A newly developed plate shape control system, using a laser type shape meter, was put in service in the plate mill in Mizushima Works of Kawasaki Steel. This system consists of (1) sensors: shape meter and multi head γ -ray thickness meter (crown meter), (2) actuator: work roll bending device, and (3) models: newly developed shape prediction model based on data measured by the shape meter and plate crown prediction model. This system is characterized in that the setting of the roll bending force for the next pass is determined on the basis of the results of shape and crown measurements. Introduction of this system enables the improvement of flatness and plate crown accuracy, which meets ever upgrading customer's demand and contributes to yield improvement and chance free rolling.

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、当社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の最適化、および圧延スケジュール計算時のクラウン比率制御¹⁾によって圧延能率の低下を最小限に抑えつつ、平坦度および板クラウンの制御を行う技術を確立してきた。しかしながら平坦度、板クラウンなどの制御に必要な情報を精度良く予測することが困難なこと、および平坦度、板クラウンに対してはモデル精度以外に圧延荷重予測誤差、ロールのサーマルクラウン、摩耗の予測誤差等の種々の要因が影響していることから予測のみにもとづく制御では白ずと限界があるのが実状であった。また板クラウンのみを単独に制御するアクチュエータ、および平坦度を測定するセンサーがないことも制御精度向上を図れない要因であった。

そこで当社では、ミル近傍に圧延中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ディングを導入することにより、平坦度計の情

報を用いた平坦度制御技術の開発を行った。

本報では平坦度に関する剛塑性 FEM 解析および実機実験結果、ベンディングによる板クラウン制御能力、ならびに当社厚板工場で実用化した平坦度制御システムの概要と実機適用結果について報告する。

2 厚板圧延における平坦度制御技術

2.1 従来の平坦度制御技術

当社厚板工場での従来の平坦度制御方法は、クラウン比率一定圧延を基本とした圧下配分による予測制御²⁾である。Fig. 1にこの方式とクラウン比率一定の圧延方式の概念的な比較を示す。クラウン比率変化が形状不良となって現れる限界板厚 H_{cs} 以下の圧延領域を形状制御領域として、この領域では最終パスで平坦を維持できる限界まで途中パスのクラウン比率変化を許容する。したがって、形状制御領域でも圧下量を大きくできるため、クラウン比率一定の圧延方式と比較するとパス回数が減少する。この方式により平坦度および板クラウンを良好に制御をしながら、高能率の圧延が可能となる。

しかしながら板クラウンに対してはモデル予測誤差、あるいは圧延荷重、ロールプロフィール等の予測誤差が影響するため、必ずしも予測通りの板クラウンパターンとはならないことがある。これに対処して予測制御を補正するため、当社厚板工場ではワークロール

* 平成 8 年 4 月 18 日原稿受付

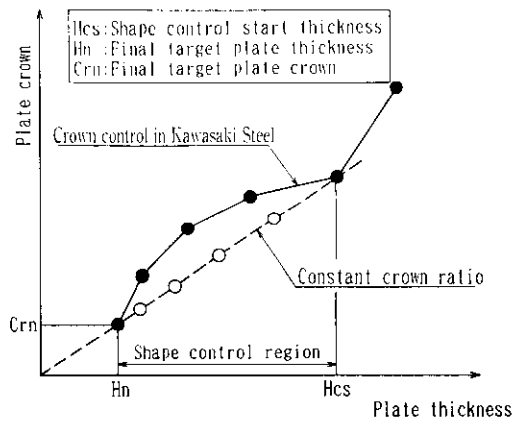


Fig. 1 Conceptual diagram of the finishing rolling schedule

ベンディング、および平坦度計を導入し、平坦度計の実測情報を用いた平坦度制御技術の開発を行った。

2.2 形状変化特性

圧延後の平坦度不良を引き起こす要因は入出側のクラウン比率変化である。クラウン比率変化によって長手方向伸び歪が板幅内で不均一分布となり、圧延材が面外変形を起こして平坦度不良が発生する。この平坦度不良の程度はクラウン比率変化と一対一に対応するわけではなく、圧延条件に応じてクラウン比率変化の一部が平坦度不良として現れる。この平坦度不良発生割合を示す指数として種々のパラメータが提案されている²⁻⁴⁾。

クラウン比率変化が長手方向伸び歪の幅方向分布に及ぼす影響を調べるために、3次元剛塑性FEM⁵⁾により圧延解析を行った。解析は所定のクラウン比率となる入出側板厚プロフィールを与えて行い、ロールバイト出側での長手方向伸び歪の幅方向分布を算出した。Fig. 2に入側板厚8mm、板幅3000mm、クラウン比率変化1%の条件で解析した伸び歪の幅方向分布を示す。図中破線は板幅方向のメタルフローがないと仮定して、圧下量がすべて長手方向伸びに表れた場合の伸び歪分布を示している。これに対して剛塑性FEM解析で求めた結果では、板幅方向のメタルフローの影響により幅方向の伸び歪差が大幅に緩和されていることがわかる。

Fig. 3に剛塑性FEM解析結果から求めた形状変化係数(伸び歪偏差/板厚歪偏差)²⁾と板厚、板幅の関係を示す。形状変化係数は板幅中央と板幅端から100mmの位置での伸び歪偏差、および板厚歪

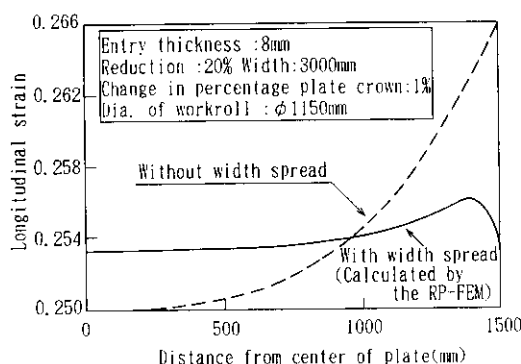


Fig. 2 Calculated result of longitudinal strain by rigid-plastic FEM

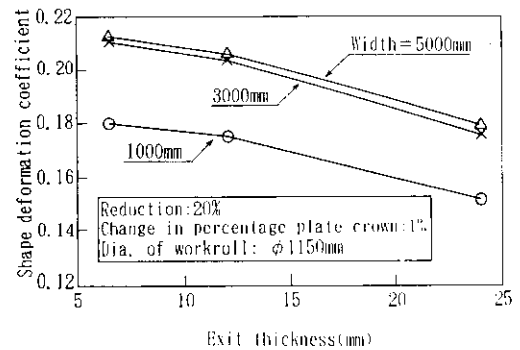


Fig. 3 Calculated result of shape deformation coefficient (deviation of longitudinal strain/deviation of thickness strain) by rigid-plastic FEM

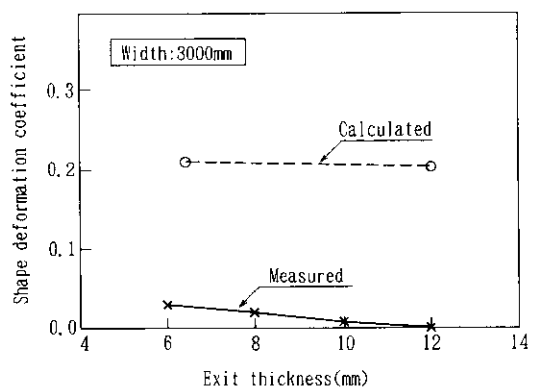


Fig. 4 Comparison of shape deformation coefficient between experimental and calculated result by rigid-plastic FEM

偏差から算出した。板厚が厚いほど、板幅が狭いほど形状変化係数は小さくなっており、板厚歪偏差が伸び歪偏差に現れにくい。このことは実機における傾向をよく表している。

Fig. 4に実圧延材の形状変化特性を把握するために当所厚板ミルにおいて行った平坦度測定実験の結果を示す。平坦度および板クラウンの測定は後述のミル後面に設置した平坦度計およびクラウンメータを用いて行い、圧延前後の急峻度変化から求めた幅方向伸び歪偏差と圧延前後のクラウン比率変化から求めた板厚歪偏差の比を算出した。板厚に依存して形状変化係数が変化しており、計算結果と同一の傾向が得られた。図中、破線は剛塑性FEM解析結果から求めた形状変化係数を示す。計算値に対して実測値の方が小さくなっているのは、計算では鋼板の剛性による座屈の防止効果を考慮していないためと考えられる。

形状変化係数を考慮すると、平坦度制御精度に及ぼす板クラウン制御精度はかなり緩和されるが、板厚6mm、許容急峻度0.5%の場合の板クラウン制御精度は概略10 μ mとなり、形状変化係数を考慮しても高精度の制御が必要である。

3 ワークロールベンディングによるクラウン制御能力

3.1 制御能力シミュレーション

ワークロールベンディングによる板クラウン、平坦度制御能力を

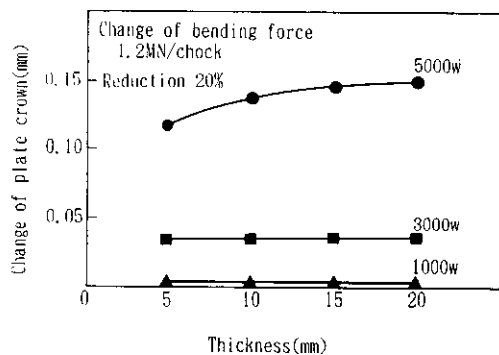


Fig. 5 Calculated effect of work roll bending on plate crown with various thicknesses and widths

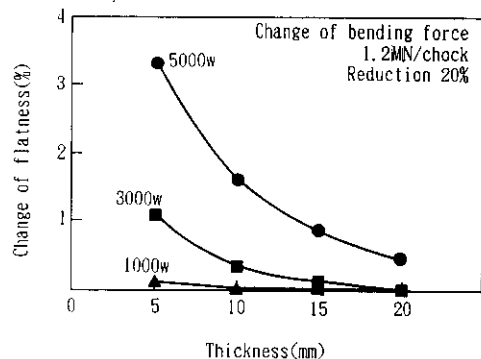


Fig. 6 Calculated effect of work roll bending on flatness with various thicknesses and widths

評価するために分割モデル⁶⁾によるシミュレーションを行った。

Fig. 5 にワークロールベンディングによる板クラウン制御能力を示す。1.2 MN/チョックのベンディング力変化による板クラウン制御能力は板幅 3 000 mm 以下の幅狭材では小さいが、板幅 5 000 mm の幅広材では 0.10~0.15 mm の大きな制御能力がある。また、板厚が厚いほど制御能力が大きくなる。

Fig. 6 はクラウン比率変化に Fig. 4 に示した形状変化係数を考慮して求めた平坦度制御能力を示す。板幅 5 000 mm での平坦度制御能力は幅狭材に比べてかなり大きく、幅方向メタルフローによる緩和効果を考慮しても十分な制御能力を有すると考えられる。

3.2 アルミ挟圧実験

ベンディングによる板クラウン制御能力を検証するために、実機厚板ミルによるアルミ板挟圧実験を行った。使用したアルミ板は降伏点 74 MPa 相当の板厚 10 mm、板幅 4 000 mm の純アルミである。

Fig. 7 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。ベンディング力に応じて板幅端でプロフィールが大きく変化する。

Fig. 8 に板幅 4 000 mm におけるワークロールベンディングによる板クラウン変化量を示す。ここで板クラウンは板幅端から 100 mm の位置で評価した。図中●印は挟圧実験結果を、実線は分割モデルによる計算結果を示す。計算値と実測値は良く一致しており、シミュレーション結果の妥当性が確認できた。また、1.2 MN/チョックのベンディング力変化で 0.07 mm の板クラウン変化が得られており、ワークロールベンディングによる板クラウン制御も幅広材に対しては有効である。

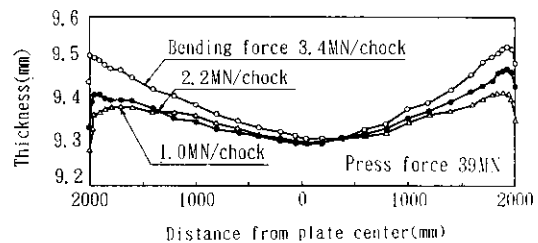


Fig. 7 Comparison of thickness profile with various bending forces in aluminum press test

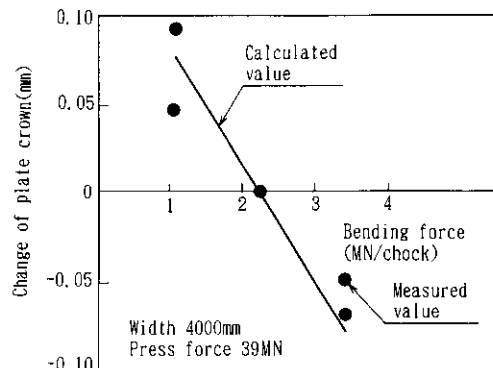


Fig. 8 Comparison of plate crown between experimental and calculated results by simulation model

4 平坦度制御システム

4.1 システム概要

Fig. 9 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平坦度制御方式から平坦度計実測情報にもとづいた制御方式とすることができる。

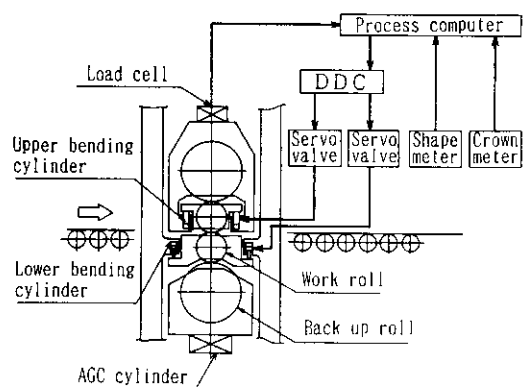


Fig. 9 Structure of shape control system

4.2 平坦度測定システム

鋼板の急峻度が熱間で測定可能な平坦度計をミル後面 11 m の位置に設置し、パス間での測定を可能にしている。

Table 1 に平坦度計の主仕様を示す。測定ユニットを 5 セット有し、各測定ユニットは板幅に応じて両端、両クォータおよび中央にセットされ、板幅方向 5 点の急峻度を測定可能である。

Fig. 10 に測定ユニットの構成を示す。半導体レーザー光を鋼板上に照射し、レーザー光が基準センサーで受光されるまでの時間を検出することにより、鋼板の上下方向位置を検出する。測定ユニット内には光源と 2 個の受光部が設置され、長手方向 2 点の変位差から急峻度を算出する。

また、鋼板の平坦度は鋼板端部の急峻度 λ_e と中央の急峻度 λ_c を用いて式 (1) で求める。

$$\left. \begin{aligned} \lambda^* &= \sqrt{|\lambda_e^2 - \lambda_c^2|} & (\lambda_e \geq \lambda_c : \text{耳波}) \\ \lambda^* &= -\sqrt{|\lambda_e^2 - \lambda_c^2|} & (\lambda_e \leq \lambda_c : \text{中伸び}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

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

4.3 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。ベンディング力の制御範囲は 2.2 MN $\pm$ 1.2 MN / 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。

Table 1 Specification of shape meter

Type	Scanning type of semiconductor laser
Laser wave length (nm)	830
Laser power (mW)	40
Measuring point	5 point/width
Measuring shape (%)	0 ~ 15
Measuring plate width (mm)	1 000 ~ 5 400

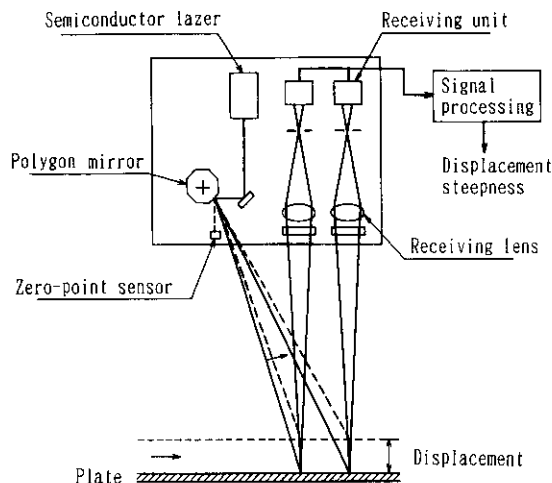


Fig. 10 Outline of shape meter

Table 2 Specification of work roll bending device

Bending cylinder (mm)	Upper $\phi 220 \times 4/\text{chock}$ Lower $\phi 190 \times 6/\text{chock}$
Bending pressure (MPa)	Max. 22
Bending force (MN)	Max. 3.4/chock Controlled range $2.2 \pm 1.2/\text{chock}$
Control valve	Servo valve

5 平坦度制御ロジック

5.1 制御モデル

5.1.1 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力学的基礎式に分割モデルシミュレーション結果を反映した簡易式⁷⁾で、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プロフィール影響項 CR_B 、入側クラウン影響項 CR_P の線形結合式としている。

$$CR_2 = CR_F + CR_{FB} + CR_W + CR_B + CR_P \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

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

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

$$CR_W = f(C_1, C_H, C_W, F, W, H_2)$$

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

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

F : 圧延荷重

W : 板幅

H_2 : 出側板厚

r : 圧下率

FB : ベンディング力

C_1 : ワークロールイニシャルクラウン

C_H : サーマルクラウン

C_W : ワークロール摩耗量

C_B : バックアップロールクラウン

CR_1 : 入側板クラウン

CR_2 : 出側板クラウン

5.1.2 ロールプロフィールモデル⁷⁾

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、およびロール摩耗による変化量を考慮して推定している。

(1) サーマルクラウンモデル

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⁸⁾を用いている。簡易モデルはロール中央部の圧延、冷却中の熱膨張を表す式とロールバレル方向の分布形状を表す式とで構成される。

Fig. 11 に幅方向サーマルクラウン分布の実測値と計算値の比

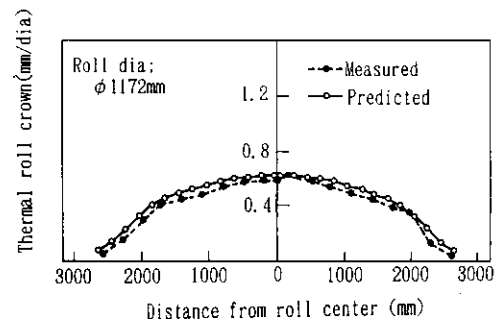


Fig. 11 Comparison between measured and predicted thermal roll crown

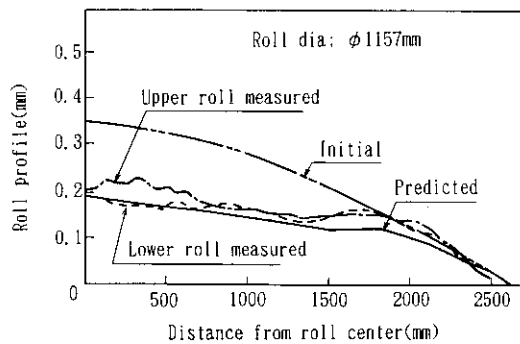


Fig. 12 Comparison between measured and predicted roll wear

較を示す。実測は圧延材を20本圧延した後、鉛棒を挟圧して行った。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の予測が可能である。

(2) 摩耗モデル

ワークロールの摩耗はロール面圧（圧延荷重／板幅）と圧延長さの積の累積値に比例することが知られている⁹⁾。これに幅方向の圧延荷重分布の影響を考慮してモデル化を行った。

$$C_{wj} = f(D, H_s) \times \Sigma (F_j \times L / D) \quad (3)$$

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 : 幅方向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. 12に255本圧延後のロール摩耗プロフィールの実測値と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。

5.1.3 平坦度モデル

平坦度モデルは形状変化係数⁹⁾と入側伸び差率遺伝係数を用いて次式のように表す。ここで形状変化係数はFig. 4に示す実機平坦度測定データにもとづいてモデル化した。また、圧延入側の形状が出力形状に及ぼす影響を補正するために入側伸び差率遺伝係数を用いた。

$$\varepsilon_2 = \xi \times (CR_2 / H_2 - CR_1 / H_1) + \zeta \times \varepsilon_1 \quad (4)$$

$$\lambda_2 = (2 / \pi) \times \sqrt{\varepsilon_2} \quad (5)$$

ここで

ε_1 : 入側伸び差率 ε_2 : 出側伸び差率
 H_1 : 入側板厚 ξ : 形状変化係数
 λ_2 : 出側平坦度 ζ : 入側伸び差率遺伝係数

5.2 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. 13に平坦度制御ロジックを示す。圧延途中パスでは各パスでの目標板クラウンになるようにベンディング力を設定し、最終パス付近では平坦度計の実測データにもとづいて平坦度が良好とな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 ΔCRP_2 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) 平坦度モデル式(4)、(5)を解き次パスの平坦度 λ_2 を計算し、許容平坦度 λ_a 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。
- (4) 平坦度計の情報をを用いた最終数パスでは許容平坦度 λ_a 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^* を求める。
- (5) 次パス予測荷重 F_2 をもとに板クラウンモデル式(2)を用いて、次パスの板クラウンが CR_2^* となるベンディング力 FB_2 を算出する。

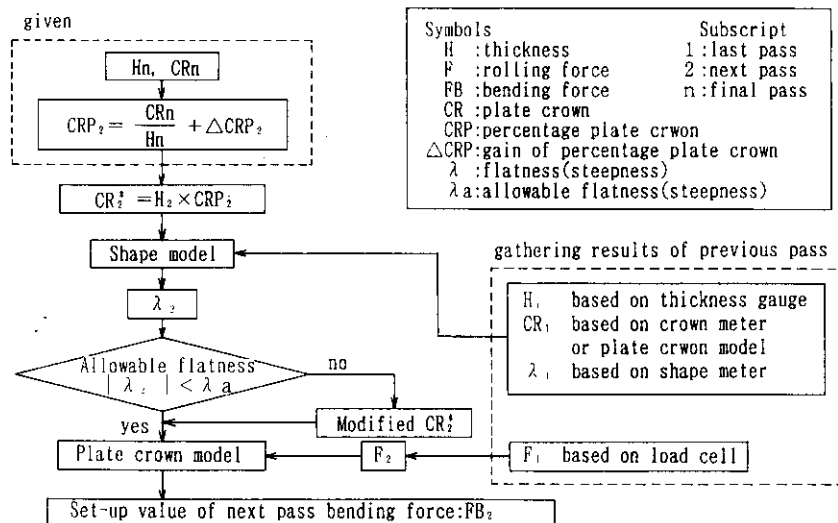


Fig. 13 Set-up algorithm for work roll bending force based on shape meter data

6 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。制御モードとしては、板クラウン狙い制御、および平坦度制御の二つのモードがあり、圧延材の構成、生産量に応じて選択可能である。

Fig. 14 は板クラウン狙い制御を適用した場合の板クラウン、平坦度制御効果である。制御の適用によって、薄物・広幅材の狙い板クラウン精度は平均値、ばらつきともに向上した。また、圧延途中パスにおいて許容急峻度以内に制御することによって平坦度制御精度についても向上が見られ、目標平坦度 $\pm 0.5\%$ 以内の達成率も制御なしで 66% であったのに対し、制御ありで 74% と制御効果が認められる。

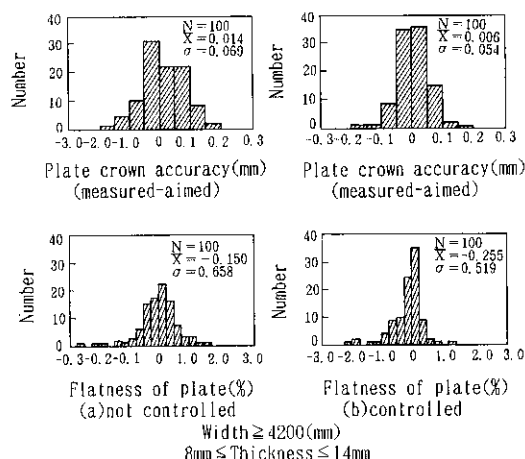


Fig. 14 Effect on plate crown and flatness with plate crown control

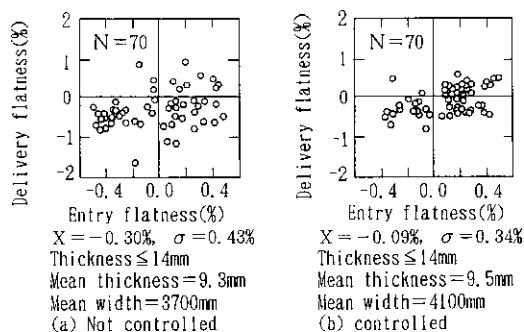


Fig. 15 Result of work roll bending control based on shape meter data

Fig. 15 は最終数パスで平坦度計による実測データにもとづいて制御した場合の制御効果を確認したもので、最終パス入出側の平坦度の比較結果である。一般に薄物材の平坦度は最終パスで大幅に悪化するのに対し、制御の適用により平均値、ばらつきとも向上しており、制御の有効性が確認できた。

7 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もとづいてワークロールベンディング力を制御する技術を開発した。

- (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実用化した。
- (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める次パスの狙い板クラウンにもとづき、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を確認した。

参 考 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), 119
- 2) 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), 1172
- 3) 辻 邦夫, 平野 坦, 小久保一郎, 大池美雄, 木川佳明: 神戸製鋼技報, 30(1980)1, 20
- 4) 升田貞和, 平沢猛志, 市之瀬弘之, 平部謙二, 小川幸文, 鎌田正誠: 鉄と鋼, 67(1981)15, 2433
- 5) 谷口 徹, 侍留 誠, 岡田公之, 二階堂英幸: 第44回塑性加工連合講演会, (1993), 19
- 6) K. N. Shohet and N. A. Townsend: J. Iron Steel Inst., (1968), 1088
- 7) 竹内 徹, 大森和郎, 小川隆夫, 井上正敏, 岡村 勇: 鉄と鋼, 71(1985)12, S 1171
- 8) 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), 238
- 9) 鎌田征雄, 北村邦雄, 中川吉左衛門, 玉井敏行, 足立明夫, 福島 敏, 君島英彦: 鉄と鋼, 63(1977)9, A 107