

© 1988 ISIJ

 ///////////////
 論文
 ///////////////

ホットストリップミルにおける 板プロフィール・平坦度制御

高橋亮一*・布川 剛*²・武田 英*³

Profile and Shape Control in Hot Strip Mill

Ryoichi TAKAHASHI, Tsuyoshi NUNOKAWA and Ei TAKEDA

Synopsis :

A new profile and shape control system has been developed for use in hot strip mills at Wakayama Steel Works and Kashima Steel Works.

The control system consists of variable crown (VC) rolls, work roll benders and work roll shifting devices on the last three stands of the finishing train. These devices can be preset so that the desired strip profile can be obtained. To achieve this, new mathematical models were developed which could be used to calculate the thermal roll crown, the roll wear, the VC roll profile and the strip profile. These models are considered to be suitable for use in online calculations.

Key words : rolling ; computer control ; modelling ; process control ; hot strip mill ; profile ; shape ; flatness ; strip crown.

1. 緒 言

ホットストリップミルのスケジュールフリー圧延を実施するためには、ロールカーブを統一し、ロールの熱膨張や摩耗が進んでも常に狙いの板プロフィールが実現できる板プロフィール制御が重要な要素技術である。住友金属工業和歌山製鉄所・鹿島製鉄所では仕上圧延機後段スタンドの VC (Variable Crown) ロール・強力ワークロールベンダー・ワークロールシフトを制御手段とした板プロフィール・平坦度制御システムを開発実用化した。

本報告では、制御システムの数式モデルと実機での適用効果について述べる。

2. 板プロフィール・平坦度制御装置の概要

鹿島製鉄所における板プロフィール・平坦度制御装置の概要は次のとおり (Fig. 1, Table 1) (和歌山製鉄所もほぼ同様)。

(1) VC ロール¹⁾・強力ワークロールベンダー・ワークロールシフトを仕上圧延機後段3スタンドに設置

(2) X線走査型板プロフィール計・光学式平坦度計を仕

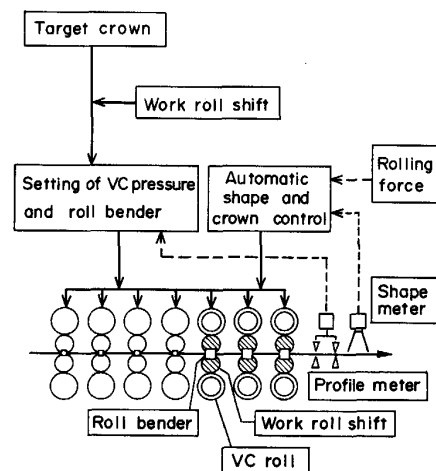


Fig. 1. Profile and shape control system.

Table 1. Specifications of crown control device.

Stand	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
Work roll shift (Stroke)	—	—	—	—	—	—	400 mm
VC roll (Variable crown range)	—	—	—	—	—	—	0.46 mm/dia
Work roll bender	76 t/chock			170 t/chock			

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 10 月 22 日受付 (Received Oct. 22, 1987)

* 住友金属工業(株)システムエンジニアリング本部 (System Engineering Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

上圧延機出口に設置

(3)板プロフィール・平坦度制御のためのプロセスコンピュータを増設

ここで、平坦度計は住友金属工業独自開発のもので、測定原理はつぎのとおりである。すなわち、Ar(アルゴン)イオンレーザー光束を3分割し、振動ミラーで斜め上方より鋼板上に走査照射する。この鋼板上の光束像を高速走査型テレビカメラで撮影することにより鋼板の高さ方向変位を測定し、平坦度を演算するものである²⁾(Fig. 2)。

3. 板プロフィール制御

仕上圧延機の設定計算モデルのフローチャートをFig. 3に示す。圧延荷重を推定してロールギャップとロール周速度を決定する以外に、所望の板プロフィールを実現させるためには、ロールプロフィールを推定することによりロールシフト量を決定し、板プロフィールを精度良く予測することによりVCロール圧力・ロールベンド力を設定することが必要となる。

3.1 ロールプロフィール計算モデル

ロールのプロフィールについてはイニシャルロールカー

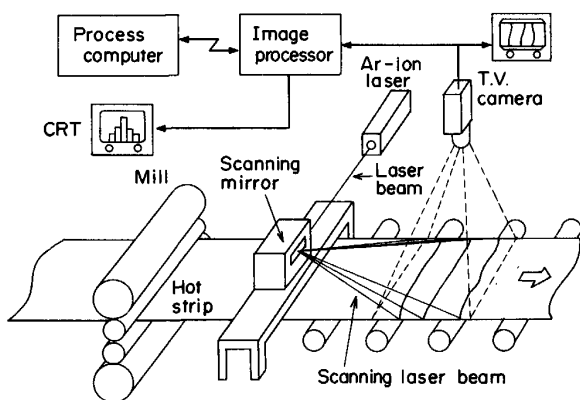


Fig. 2. Schematic drawing of shape meter.

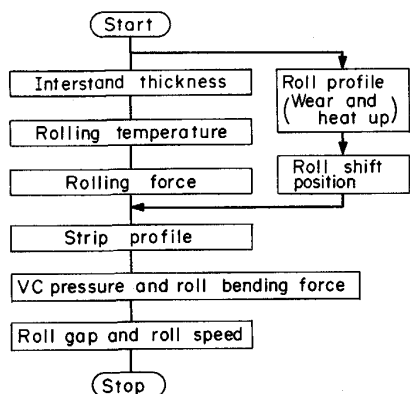


Fig. 3. Flow diagram of setup model.

ブの他に、ワークロールのサーマルクラウンと摩耗及びVCロールのふくらみについて考慮した。

3.1.1 ワークロールのサーマルクラウン³⁾

圧延材からの入熱によりワークロールは熱膨張する。この現象を軸対称の2次元(ロール胴長方向と半径方向)熱伝導方程式にて表し、これを差分法にて解く。

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \dots\dots (1)$$

境界条件

ロール表面において

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = h_w(\theta - \theta_0) - q_s \cdot \delta(z) \dots\dots\dots (2)$$

ロール端部において

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = h_z(\theta - \theta_0) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 θ はロール温度、 t は時間、 r は半径方向座標、 z は胴長方向座標、 c は比熱、 ρ は密度、 λ は熱伝導率、 θ_0 は雰囲気温度、 h_w 、 h_z は熱伝達率である。 q_s は圧延材からの熱流束であり、圧延材とロールとの接触を半無限体の接触と考慮して求める。 $\delta(z)$ は圧延材との接触部で1、非接触部で0となる関数である。(1)式にて求めたロール温度をもとにロールのサーマルクラウン $C_H(z)$ を(4)式にて求める。

$$C_H(z) = \frac{4}{R} (1 + \nu) \alpha \int_0^R (\theta - \theta_0) r dr \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ν はポアソン比、 α は線膨張率、 R はロール半径である。

3.1.2 ワークロールの摩耗クラウン

ロールの摩耗は単位幅当たりの圧延荷重と圧延材との接触回数に依存するとして、摩耗プロフィール $C_W(z)$ を(5)式にて表し、係数 A_W をロール摩耗の実測データにより求めた。

$$C_W(z) = A_W \sum_k \frac{Q_k}{B_k} \cdot \frac{L_k}{2\pi R} \delta_k(z) \dots\dots\dots (5)$$

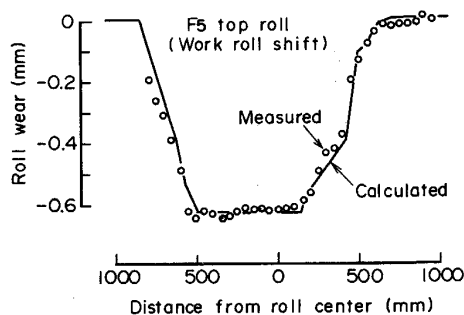


Fig. 4. Comparison between measured and calculated work roll wear profile.

ここで、 Q は圧延荷重、 L は圧延長さ、 B は板幅、添え字 K は K 番目の圧延材を表す添え字である。

ロール替後のワークロールの摩耗プロファイルの実測値と計算値の比較を Fig. 4 に示す。図はロール摩耗分散を目的としてロールをシフトしたスタンドの例であるが実測値と計算値は良く一致している。

3.1.3 VC ロールのふくらみ形状

VC ロールのふくらみ形状については、シェル厚一定な円筒シェルの変形と考え(6)式の解析解によつて、ふくらみ量 $C_V(z)$ を求める⁴⁾。

$$\frac{d^4}{dz^4} C_V(z) + 4\beta^4 C_V(z) = 4\beta^4 \frac{R_B^2}{Eh_V} p_V \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\beta^4 = \frac{3(1-\nu^2)}{R_B^2 h_V^3} \dots\dots\dots (7)$$

R_B はバックアップロール半径、 E はヤング率、 h_V はスリーブ厚、 p_V は VC ロール圧力である。Fig. 5 は冷延レバースミルに導入された VC ロール (ロール径 1447 mm、ロール胴長 2007 mm) のふくらみ量の実測値と計算値の比較であるが両者はかなり良く一致している。

3.2 板プロフィール計算モデル

SHOHET ら⁵⁾ の分割モデルをもとに、板プロフィールをオンライン計算できるように繰り返し計算を必要としない数式モデルを導いた。

板プロフィールを精度良く計算するには、張力応力の幅方向分布を考慮し、圧延荷重の幅方向分布を求める必要がある。従来提案されている板プロフィール計算モデル⁶⁾ では張力応力分布を繰り返し計算するため、計算時間が長くなりオンライン計算には適用できない。このため、オンライン制御には板クラウン (板幅中央部と端部の板厚差) のみに着目した簡略式⁷⁾ が用いられているが、こ

れではロールの摩耗や熱膨張などによる板プロフィールの複雑な変化を表すことができない。

筆者らの方法は圧延荷重の幅方向分布を影響係数を用いて出入口厚分布・前後方張力応力分布の1次式で表すことにより、張力応力分布の影響をも含めた連立1次方程式を導き、繰り返し計算することなく出口板厚分布・圧延荷重分布を求めるものである。

3.2.1 ロール変形モデル

ワークロールシフトミルを対象とするので、ロール間接触荷重はロールバレル中心に関して左右対称ではないが、接触荷重の上下平均値

$$p = (p^u + p^d) / 2 \dots\dots\dots (8)$$

に着目すれば左右対象となる。そこで、ロールバレル中心から片側 1/2 を細分割し圧延荷重・ロール間接触荷重のロール軸方向の分布を各分割区間内では一様とみなし、ロールバレル中心より i 番目の分割区間におけるロール間の単位幅接触荷重を $p(i)$ 、圧延材からワークロールにかかる単位幅圧延荷重を $q(i)$ 、出口板厚を $h(i)$ 、分割区間幅を Δz_i とするとき、つぎの(9)、(10)式が成り立つ。

ワークロールとバックアップロールの接触部の変位の適合条件

$$\begin{aligned} & - \sum_j p(j) \{ \alpha_B(i, j) + \alpha_W(i, j) \} \Delta z_j \\ & - \frac{1}{K} p(i) + \sum_j q(j) \alpha_W(i, j) \Delta z_j + K_W - \frac{1}{2} S \\ & = \frac{1}{M_H} \cdot \frac{Q+J}{2} - \frac{1}{2} (R_{CW}(i) + R_{CB}(i)) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ワークロールと圧延材の接触部の変位の適合条件

$$\begin{aligned} \frac{h(i)}{2} & = - \sum_j p(j) \alpha_W(i, j) \Delta z_j \\ & + \sum_j q(j) \{ \alpha_W(i, j) \Delta z_j + \alpha_f(i, j) \} \\ & + K_W - \frac{1}{2} R_{CW}(i) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここで、 J はワークロールベンド力、 K_W はワークロール剛体変位、 M_H はハウジング・圧下系の剛性係数、 S は圧下位置である。 $R_C(i)$ はロールのプロファイルであり、上下ロールの平均値、 $\alpha(i, j)$ はロールの軸心変位の影響係数であり、これも上下ロールの平均値、添え字 W, B はそれぞれワークロールとバックアップロールを表す。 $\alpha_f(i, j)$ は圧延材によるワークロール表面の扁平変形の影響係数であり、ロールを半無限体とみなした場合のロール表面変位⁸⁾ を、河野ら⁶⁾ に従いロール半径に等しい深さの点の変位により補正した。また、 K はロール間のばね定数で $1/K = 3.1 \times 10^{-4} \text{ mm}/(\text{kg}/\text{mm})$ とした⁶⁾。

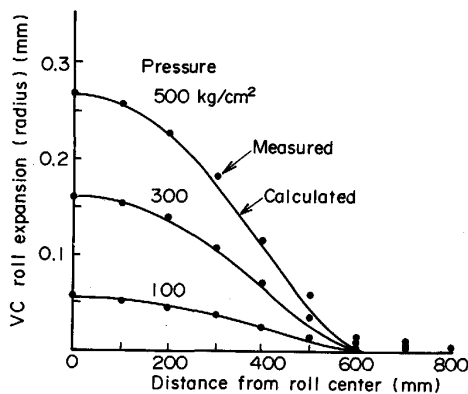


Fig. 5. Relation between roll profile and internal pressure.

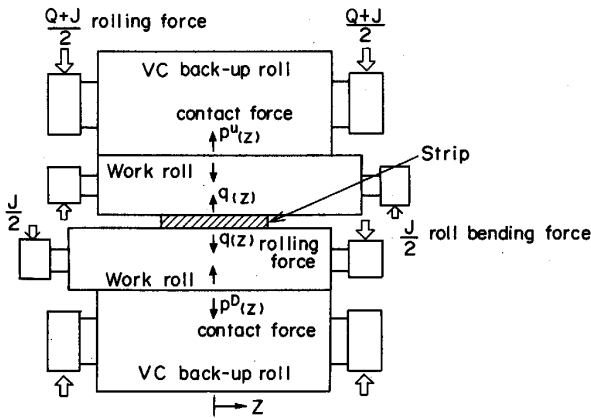


Fig. 6. Elastic deformation of rolls.

3.2.2 圧延荷重の幅方向分布⁹⁾

単位幅圧延荷重 $q(i)$ を入出口厚 $H(i), h(i)$, 入出口張力応力 $\sigma_b(i), \sigma_f(i)$ により(11)式のように表す。

$$q(i) - q_c = \frac{\partial q}{\partial h} (h(i) - h_c) + \frac{\partial q}{\partial H} (H(i) - H_c) + \frac{\partial q}{\partial \sigma_f} (\sigma_f(i) - \sigma_{fc}) + \frac{\partial q}{\partial \sigma_b} (\sigma_b(i) - \sigma_{bc}) \dots (11)$$

ここで、添え字 c は板幅中央部の値を表し、影響係数 $\partial q/\partial h, \partial q/\partial H, \partial q/\partial \sigma_f, \partial q/\partial \sigma_b$ は SIMS の式に張力の補正を加えたものより導くことができる。ところで、出口張力応力分布は伸び歪み偏差 $\Delta \epsilon_l(i)$ (Δ は板幅中央部との差を表す)、板厚方向歪み偏差 $\Delta \epsilon_h(i)$ により(12)式で表せる。

$$\sigma_f(i) - \sigma_{fc} = -E_p \Delta \epsilon_l(i) = -E_p \eta(i) \{ \Delta \epsilon_l^{(-)}(i) - \Delta \epsilon_h(i) \} \dots (12)$$

ここで、 E_p は圧延材のヤング率、 $\Delta \epsilon_l^{(-)}(i)$ は入口での伸び歪み偏差、 η は粟津原¹⁰⁾ が提案した塑性流れ係数であり、伸び歪み偏差 $\Delta \epsilon_l$ と板厚歪み偏差 $\Delta \epsilon_h$ の比 $\eta = -\Delta \epsilon_l / \Delta \epsilon_h$ として定義される。また、松本¹¹⁾ に従って、入出口張力応力分布は等しいとし、さらに $\Delta \epsilon_h$ について、

$$\Delta \epsilon_h(i) = \ln \left(\frac{h(i)}{H(i)} \right) - \ln \left(\frac{h_c}{H_c} \right) \doteq \frac{H(i)}{H_c} - \frac{H(i)}{H_c} \dots (13)$$

とするとき、(10)~(13)式よりワークロールと圧延材の接触部の変位の適合条件(14)式を得る。

$$-\sum_j p(j) \alpha_w(i, j) \Delta z_j + \sum_j q(j) \{ \alpha_w(i, j) \Delta z_j + \alpha_f(i, j) \} - \frac{1}{2} \cdot \{ q(i) - q(1) \} / \left[\frac{\partial q}{\partial h} + \frac{1}{h_c} \left(\frac{\partial q}{\partial \sigma_f} + \frac{\partial q}{\partial \sigma_b} \right) E_p \eta(i) \right] + K_w = \frac{1}{2} \left[R_{cw}(i) + \left\{ \frac{\partial q}{\partial h} \cdot h_c - \frac{\partial q}{\partial H} (H(i) - H_c) \right\} \right]$$

$$+ \left(\frac{\partial q}{\partial \sigma_f} + \frac{\partial q}{\partial \sigma_b} \right) E_p \eta(i) \left(\frac{H(i)}{H_c} + \Delta \epsilon_l^{(-)}(i) \right) / \left[\frac{\partial q}{\partial h} + \frac{1}{h_c} \left(\frac{\partial q}{\partial \sigma_f} + \frac{\partial q}{\partial \sigma_b} \right) E_p \eta(i) \right] \dots (14)$$

塑性流れ係数 η については河野⁶⁾ に従い、板幅/接触弧長 (B/l_d) をパラメーターとして計算板プロフィールが実績プロフィールに一致するように調整したが、Fig. 7 に示すごとく従来報告されている数値よりかなり高い数値となつている。また、河野らは塑性流れ係数 η を板幅方向に一様な値としているが、ここでは板幅端部における圧延材の変形挙動を表すため板幅端部で減少する分布を持たせた。アルミ板 (幅 1000 mm × 厚 5 mm) を実機ミルにて圧延して、伸び歪み偏差 $\Delta \epsilon_l$ と厚み歪み偏差 $\Delta \epsilon_h$ を測定することにより塑性流れ係数 η の幅方向分布を求めたものを Fig. 8 に示すが、板幅端部約 100 mm の範囲において減少していることがわかる。塑性流れ係数の板幅端部での変化と接触弧長・板厚・板幅などとの

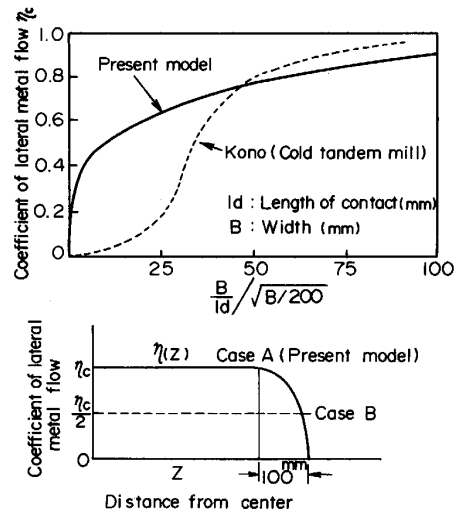


Fig. 7. Coefficient of lateral metal flow.

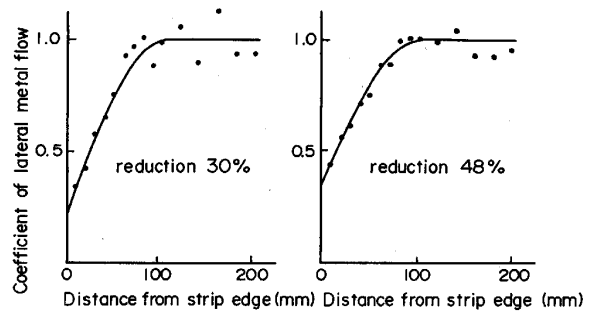


Fig. 8. Coefficient of lateral metal flow (experimental result).

関係、幅拡がりとの関係など3次元の変形挙動解析は今後の研究課題である。

3.2.3 板プロファイルの計算方法

適合条件(9), (14)式と力の釣り合い条件式

$$\sum_j p(j)\Delta z_j = (Q + J)/2 \dots\dots\dots (15)$$

$$\sum_j q(j)\Delta z_j = Q/2 \dots\dots\dots (16)$$

を連立させて、未知数 $p(i), q(i), K_w, S$ について解くことにより出口板厚分布 $h(i)$ を計算できる。上記計算法によつて、上流スタンドから順次出口板厚分布を計算していく。

本計算手法をオンラインに適用するに際し、板幅方向の分割については、板幅中心から片側 1/2 の材料との接触部には等間隔に 13 点、材料と非接触のロール部には 1 点の分割点を取つた。この場合、演算処理能力約 1 MIPS (1s に 100 万回の命令を実行) のオンライン用プロセスコンピューターにて、7 スタンド分の板プロファイル計算を約 4.5s で実行できる。Fig. 9 は河野らの張力応力分布を繰り返し計算により求める手法による板プロファイル計算結果 (ロールバレル片側を 20 分割) と

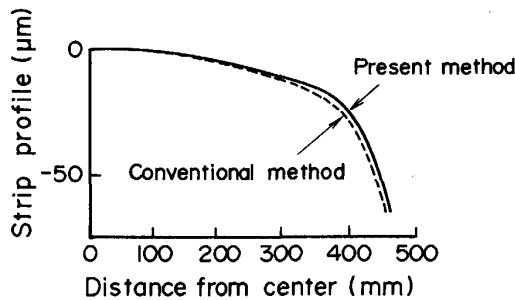


Fig. 9. Comparison of profile calculation method (952×3.5 mm).

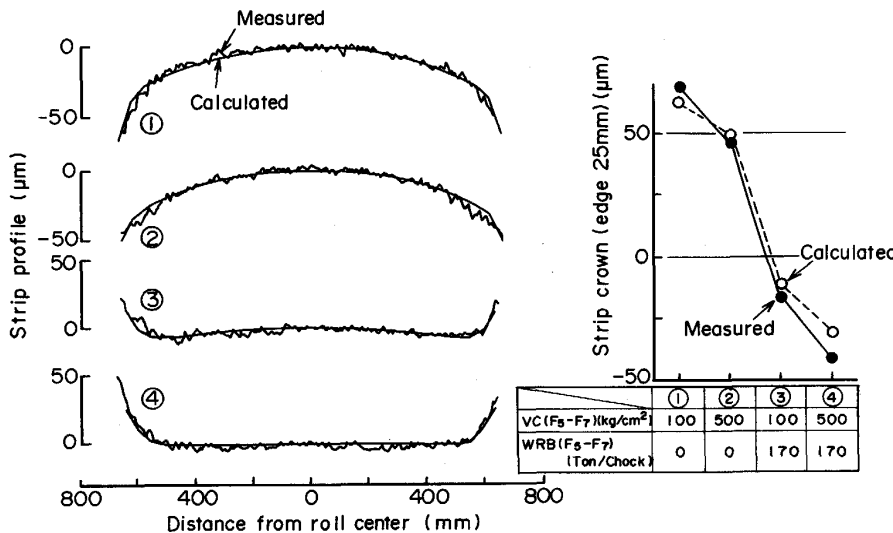


Fig. 10. Comparison between measured and calculated strip profile (1365×4.2 mm).

本方法による計算結果との比較を示すが、両者はほぼ完全に一致している。なお、この場合の計算時間は本方法により約 1/100 に短縮できた。

3.2.4 板プロファイル計算モデルの精度

F_{5-7} 3 スタンドの VC ロール圧力・ロールベンド力を変化させた場合の板プロファイル・板クラウン (エッジ 25 mm) の測定値と計算値の比較を Fig. 10 に示すが、両者はよく一致しており計算モデルの精度が良好であることを示している。Fig. 10 の①と④の圧延条件において、塑性流れ係数 η を Fig. 7 の Case A, Case B 及び Case C ($\eta=0$), Case D ($\eta=1$) とした場合の板プロファイルの計算結果と測定値との比較を Fig. 11 に示すが、Case A (本方式) が測定値と最もよく一致している。さらに、Fig. 12 には板プロファイル制御をしない圧延チャンスにおける板クラウン変化を計算値とともに示すが $\pm 20 \mu\text{m}$ の精度で計算値と測定値は一致している。

3.3 VC ロール・ロールベンダーの設定計算

VC ロール圧力・ロールベンド力の設定計算のフローチャートを Fig. 13 を示す。まず初期設定条件に対する板クラウン予測値 c_R^0 を求めるとともに、該予測近傍における出口板クラウンへの影響係数 $\alpha_P, \alpha_B, \alpha_V, \alpha_H$ を (9), (14), (15), (16) 式より求める。このとき、出口板クラウン c_R は (17) 式で表せる。

$$c_R = c_R^0 + \alpha_P \Delta Q + \alpha_B \Delta J + \alpha_V \Delta p_V + \alpha_H \Delta C_R \dots (17)$$

ここで、 C_R は入口板クラウン、記号 Δ は初期設定値からの変化量を表す。

つぎに、板クラウン予測値 c_R^0 近傍における板クラウン推定簡略式(17)をもとに、板クラウン狙い値を実現し、かつ、平坦度が許容範囲に入るような VC ロール圧力・ロールベンド力を下流側スタンドから順次決定し

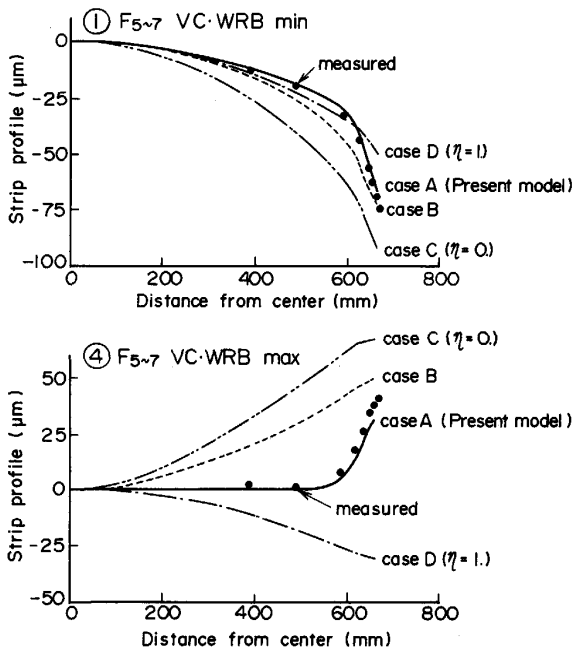


Fig. 11. Comparison between measured and calculated strip profile (1 365×4.2 mm).

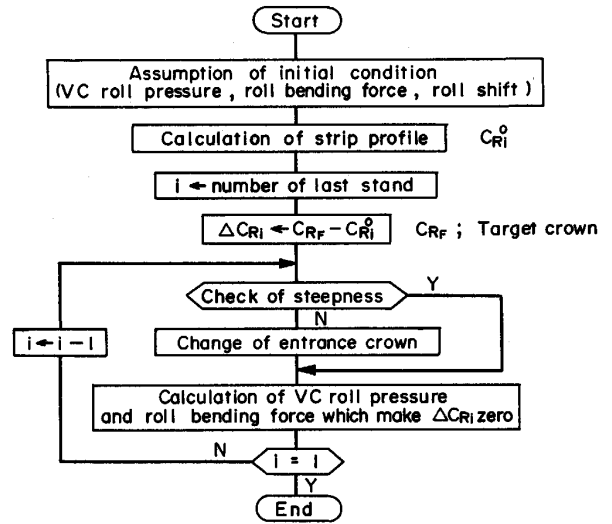


Fig. 13. Flow diagram of crown set up calculation.

$$-\left(\frac{\pi}{2} \lambda_{max}\right)^2 \leq \eta \left(\frac{C_R}{h_c} - \frac{C_R}{H_c} \right) \leq \left(\frac{\pi}{2} \lambda_{max}\right)^2 \quad (18)$$

にて制約した。なお、急峻度許容値 λ_{max} については実機にて目視観察して限界を求め 2.5% とした。

3.4 制御結果

制御結果の一例を Fig. 14 に示す。図には板クラウン狙い値を 60 μm と 30 μm とした場合の VC ロール圧力、ロールベンド力、板プロフィールを示すが、狙いクラウンに制御されていることがわかる。Fig. 15 は板クラウン狙い値を一定とした圧延チャンスにおける制御結果であり、Fig. 16 には板クラウン狙い値に対する板クラウン実績値の関係を示すが ±20 μm 以内の偏差に制御されていることがわかる。

4. 平坦度制御

平坦度制御は平坦度計出力信号を比例積分して VC ロール圧力・ロールベンド力を操作するが、このとき板厚に影響を与えないように(19)式にもとづいて圧下も同時に操作する。

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta P_{LC} - \Delta P_B}{M} + \frac{\Delta P_B}{M_B} - \beta_B K_V \Delta p_V - \beta_W \Delta C_H \quad (19)$$

ここで、記号 Δ はコイル先端部の基準値からの偏差を表しており、 P_{LC} はロードセル検出荷重、 P_B はロールベンド力、 C_H はワークロールのサーマルクラウン、 M は圧延荷重に対する剛性係数、 M_B はロールベンド力に対する剛性係数、 β_W 、 β_B はそれぞれワークロール、パッ

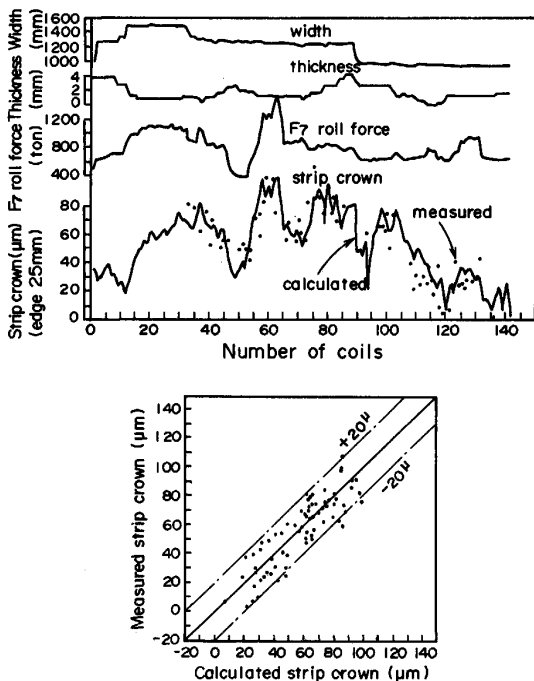


Fig. 12. Comparison between strip crown (edge 25 mm) measured and calculated (strip crown control off).

ていく。ここで、VC ロール圧力とロールベンド力は同じ比率で変化させ平坦条件としては板クラウン比率の変化を

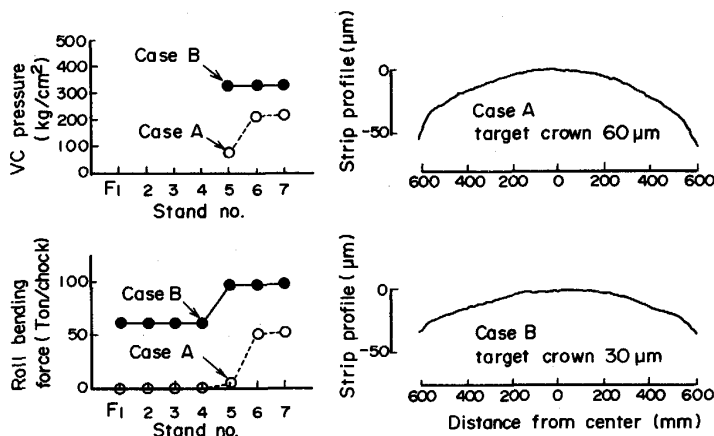


Fig. 14. Examples of strip profile control (1250×2.3 mm).

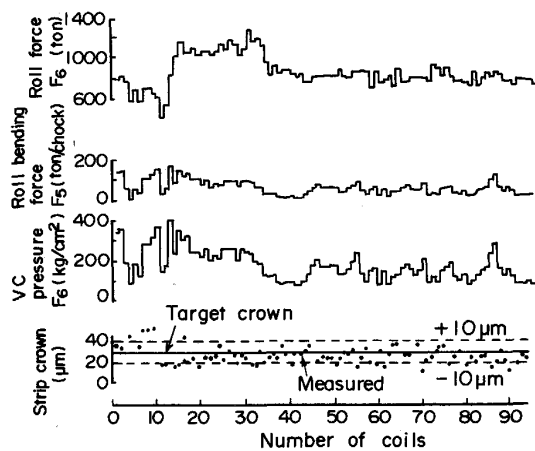


Fig. 15. Example of strip crown variation within one roll change.

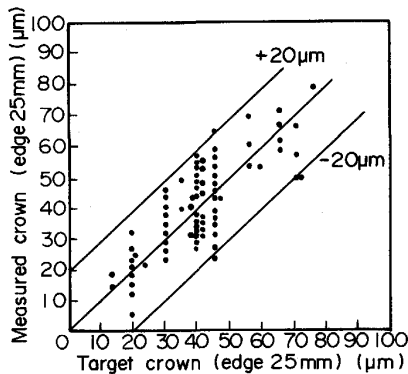


Fig. 16. Result of crown control.

クアッパロールクラウンのロールギャップに与える影響係数、 K_V はVCロール圧力によるバックアッパロールクラウンの変化率である。

制御実施例を Fig. 17 に示すが、コイル先端で発生した平坦不良は速やかに修正されている。

5. スケジュールフリー圧延

鹿島製鉄所では省エネルギーを目的として、No. 3 CC とホットストリップミルを直結化し、高温スラブを直接熱片専用加熱炉に装入する操業形態となっている。この際、両者の生産能力差を補うため、No. 3 CC スラブと他の CC で铸込まれたスラブを混合して圧延することになる。これを円滑に実施し、さらに注文の小ロット短納期化に対応するため、スケジュールフリー圧延が重要な技術課題となる。これへの対応として板プロフィール・平坦度制御システムを開発し、スケジュール制約を緩和することが可能となった。

Fig. 18 に示す例では、板厚・板幅の移行制約、同一幅連続圧延本数制約を大幅に緩和しても、板クラウンは狙い値 $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内に制御できている。図には同一幅連続圧延時とロール替直前の板プロフィールを示すが、ハイスポット（異常突起）のない良好なプロフィールとなっている。なお、この時ロール摩耗を分散させるために1コイル圧延ごとに50 mm ずつワークロールをシフトさせた。

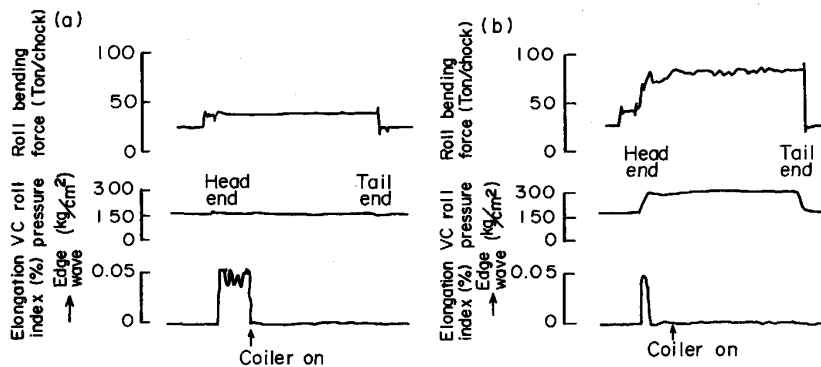
6. 結 言

ホットストリップミルの板プロフィール・平坦度制御法を開発し、住友金属工業和歌山製鉄所・鹿島製鉄所の計算機制御システムに適用した。

本制御システムは仕上ミル後段3スタンドに設置されたVCロール・強力ワークロールベンダー・ワークロールシフト装置と、仕上ミル出口に設置された板プロフィール計・平坦度計及びこれらを制御するプロセスコンピュータからなる。

本システムの機能はつぎのとおり。

- (1) 狙い板クラウンにするためのVCロール圧力・ロールバンド力を決定するプリセット制御



(a) Without shape control
(b) With shape control
Size : 1 259 mm × 2.50 mm
Fig. 17. Example of automatic shape control.

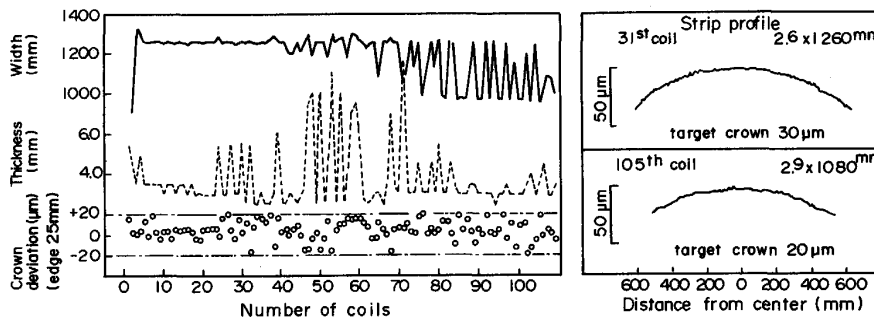


Fig. 18. Example of strip crown control within schedule free rolling.

(2) ロール摩耗・サーマルクラウンを分散させるためのワークロールシフト量を決定するプリセット制御

(3) 圧延中の平坦度計出力信号にもとづいて VC ロール圧力・ロールバンド力を操作するダイナミック制御

上記の機能を実現するため、ロールのサーマルクラウン・摩耗クラウン・VC ロールのふくらみ及び板プロフィールをオンライン計算できる数式モデルを導いた。

本システムの実用化により板クラウン精度向上、圧延制約緩和に大きな成果をあげ、品質向上、省エネルギーに寄与している。

文 献

1) 益居 健, 山田純造, 長井俊彦, 西野隆夫: 塑性と加工,

23 (1982), p. 1188

2) 松井健一, 橘 秀文: 鉄と鋼, 72 (1986), S399
3) 有村 透, 岡戸 克, 藤田文夫: 塑性と加工, 16 (1975), p. 44
4) P. B. J. GRAVINA: 回転シェルの理論と計算 (1966), p. 174 [宇野書店]
5) K. N. SHOHET and N. A. TOWNSEND: J. Iron Steel Inst. (1968), p. 1088
6) 河野輝雄, 美坂佳助: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 286
7) 板圧延の理論と実際 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 101
8) 戸澤康壽, 上田雅信: 塑性と加工, 11 (1970), p. 29
9) 高橋亮一, 美坂佳助, 布川 剛, 八木英剛, 佐藤啓弘: 鉄と鋼, 69 (1983), S355
10) 粟津原博, 安田健一, 志田 茂, 梶原利幸: 昭和 52 年度塑性加工春季講演会 (1977), p. 25
11) 松本紘美, 中島浩衛, 菊間敏夫, 上堀雄司: 塑性と加工, 23 (1982), p. 1201