

# 厚板圧延におけるサーマルプロフィール制御と 高精度ミルセッティング技術の構築

大江 憲一\*・森本 禎夫\*・島田 信太郎\*・三好 大介\*

Development of Thermal Profile Control and High Accurate Mill Setting Technology in Plate Rolling

Kenichi OHE, Yoshio MORIMOTO, Shintaro SHIMADA and Daisuke MIYOSHI

**Synopsis** : A new shape control technology with the variable roll cooling of a work roll in plate mill has been proposed by authors.

In this study, to realize this technology in the actual plate mill with the roll-cooling header divided into roll barrel direction, an integral approach has employed combing the following aspects:

- development of accurate plate crown and gauge meter models,
- construction of these models to the pass schedule and mill setting method,
- installing the fuzzy control of roll cooling on rolling campaign.

Results of actual operation of this technology have shown remarkable improvement in plate crown and shape.

**Key words** : plate rolling; shape control; plate crown model; gauge meter model; variable roll cooling; fuzzy control.

## 1. 緒言

需要家での自動化・CIM化の積極的採用に伴って近年ますます鋼板形状に対する要求は厳しくなっており、圧延での形状（板厚、板クラウン、圧延形状）制御は重要な課題である。厚板圧延では、ロール組み替えから大きくサイズの異なる板材が数百本圧延され、材料特性のグレードにより連続圧延される普通圧延と圧延途中で温度調整される制御圧延が適用される。特に、TMCP鋼板は制御圧延後に加速冷却/DQが行われるために、冷却時の不均一冷却を防止する上で圧延仕上がり形状の確保はその品質特性の安定化に絶対条件である。

このような操業下で新たな厚板形状制御法を確立すべく、既報<sup>1)</sup>においてワークロール（以下WRと称す）のサーマルプロフィール制御の可能性を明確にした。それらの基礎的知見を踏まえ、本研究では胴長方向のロール冷却能を可変させた仕上圧延機において、新たに導出したWRプロフィール予測モデル、板クラウン予測モデルおよびそれらを反映できるゲージメータ板厚モデル（以下GMモデルと称す）等を用いて、ファジィ推論を援用したサーマルプロフィール制御による形状制御技術を構築した。

## 2. 形状制御の基本構想

WRの胴長方向のロール冷却パターンを変化させてWRのサーマルプロフィールを制御する形状制御技術を実現する

ために下記の技術課題を具体化させた。

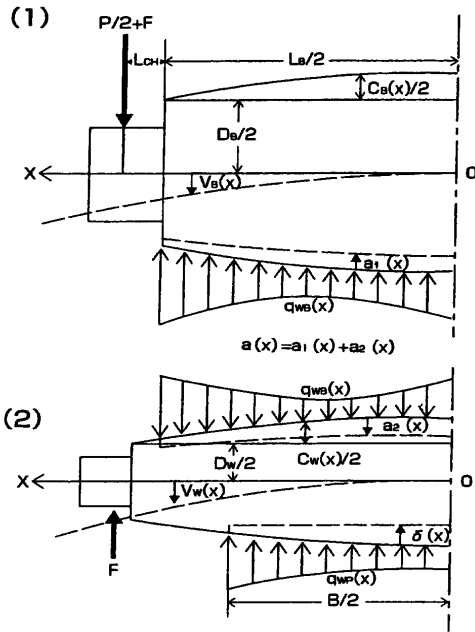
- (1) WRプロフィールに対して、目標の板厚・板クラウンと良好な圧延形状が確保できるパススケジュール設定
- (2) 各パスの設定板厚を守るための高精度なWRギャップ設定
- (3) WRの有効ロールクラウンを最良化するための応答遅れを考慮したロール冷却パターンの設定

## 3. 高精度ミルセッティング技術の構築

WRプロフィールを制御して目標の板厚・板クラウンおよび良好な圧延形状が確保できる適正なパススケジュールを設定するには、過渡的に変化するロールプロフィールの高精度予測モデル<sup>1)</sup>とそれを反映した高精度な板クラウン予測モデルおよびGMモデルの定式化が必要である。本章では、板クラウン予測モデルを中心に論述すると共に板クラウン予測を反映したGMモデルにも簡単に触れる。

### 3.1 板クラウン予測モデル

板材がロールバイト内にある場合の座標系を Fig. 1 に示す。WRと板材の間には、入出側の板幅方向の板厚分布による圧下率分布、板幅方向歪、板幅方向における板材の伸び歪差による内部応力分布等に起因して板幅方向に不均一な面圧分布が生じる<sup>2)</sup>。しかし、これまでの研究では、WRは板材から一様な面圧を受けるとの制約下で定式化されている。以下では、より一般的な取扱いでモデルを導出



(1) Back up roll (2) Work roll

Fig. 1. Coordinate system for formulation of plate crown model.

する。

その際の前提は、

- (1) 圧延時の WR と板材および WR とバックアップロール (以下 BUR と称す) 間の面圧分布  $q_{WP}$ ,  $q_{WB}$  は 4 次多項式で表す。

$$q_{WP}(x) = \langle \mathbf{X}, \mathbf{A} \rangle \quad (0 \leq x \leq B/2) \quad (1)$$

$$q_{WB}(x) = \langle \mathbf{X}, \mathbf{B} \rangle \quad (0 \leq x \leq L_B/2) \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{X} = (x_4, x_2, 1)$ ,  $\mathbf{A} = (A_1, A_2, A_3)$ ,  $\mathbf{B} = (B_1, B_2, B_3)$ ,  $A_i, B_i (i=1, 2, 3)$ : 未知定数,  $x$ : 胴長方向位置,  $L_B$ : BUR の胴長。

- (2) 板材において板幅方向への塑性流れが無い平面歪状態とし、板幅方向の各位置で志田<sup>3)</sup> の圧延荷重式が成り立つ。
- (3) 板材の入出側の板幅方向板厚分布  $H, h$  は、下式で表わされる。

$$H(x) = H(0) - \langle \mathbf{X}_d, \mathbf{C}_H \rangle \quad (3)$$

$$h(x) = h(0) - \langle \mathbf{X}_d, \mathbf{C}_h \rangle \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{C}_H = (C_{H1}, C_{H2})$ ,  $\mathbf{C}_h = (C_{h1}, C_{h2})$ ,  $\mathbf{X}_d = ((x/x_d)^2, (x/x_d)^4)$ ,  $x_d = B/2 - \beta$ ,  $B$ : 板幅,  $x_d$ : 板端部の板厚定義位置,  $\beta$ : 板端からの距離,  $C_{H1}, C_{H2}, C_{h1}, C_{h2}$ : 未知定数。

- (4) WR と BUR 間および WR と板材間のロール偏平変形量は、それぞれ Tsu-Tao-Loo の式<sup>4)</sup>, 中島ら<sup>5)</sup> による修正戸澤の式を適用する。

圧延時の板材と WR 間の面圧分布  $q_{WP}$  は、板幅方向にお

ける伸び歪差に起因した内部応力  $\sigma_f$  を考慮すると下式のように表される<sup>6)</sup>。

$$q_{WP}(x) = (k_f - \sigma_f(x)) \cdot Q_p(x) \cdot I_d(x) \quad (5)$$

$$\sigma_f(x) = \xi E_p (h(x)/h(0) - H(x)/H(0)) + \sigma_0 \quad (6)$$

ただし、 $k_f$ : 板材の変形抵抗,  $Q_p$ : 圧下力関数,  $I_d$ : 接触弧長,  $\xi$ : 板クラウン比率変化による伸び歪差への影響度を表す係数,  $E_p$ : 板材のヤング率,  $\sigma_0$ : 内部応力の釣合い条件から決定される値。

$x$  に関するマクローリン展開を行い、2 次以上の微小項を省略すれば、式 (5) は次のように近似表現される。

$$q_{WP}(x) = \langle \mathbf{X}, \Theta (fh(P)C_h + fH(P)C_H) + (0, 0, P/B) \rangle \quad (7)$$

ただし、 $fh(P) = \xi E_p I_{d0} / h_0 + PZ_1 / (I_{d0} B)$

$$fH(P) = -\xi E_p I_{d0} / H_0 + PZ_2 / (I_{d0} B)$$

$$Z_1 = 0.5 I_{d0} Q_{P0} / \Delta h_0 + 0.45 I_{d0} [(R'_0 / H_0)^{0.5} - 0.5] / H_0$$

$$Z_2 = -0.5 I_{d0} Q_{P0} / \Delta h_0 + 0.45 I_{d0} [(R'_0 / H_0)^{0.5} - 0.5]$$

$$\times (1/H_0 - 1/\Delta h_0) - 0.5 I_{d0} / H_0 (R'_0 / H_0)^{0.5}$$

$$\times (0.45 \Delta h_0 / H_0 + 0.04)$$

$\Delta h_0 = H_0 - h_0$ ,  $R'$ : 扁平後のロール半径

$P$ : 圧延荷重, 添字 0: 板幅中央位置での値

$$\Theta = \begin{bmatrix} 1/x_d^2 & 0 \\ 0 & 1 \\ -B^4/80x_d^4 & -B^2/12x_d^2 \end{bmatrix}$$

故に、

$$\mathbf{A}^T \equiv \Theta (fh(P)C_h + fH(P)C_H) + (0, 0, P/B)^T \quad (8)$$

また、WR と BUR 間の面圧分布は、力の釣り合い条件から

$$q_{WB}(x) = \langle \mathbf{X}_b(x), \mathbf{B}_e \rangle + (P + Fw) / L_B \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{X}_b(x) = (x^4, x^2) - (L_B^4/80, L_B^2/12)$ ,  $\mathbf{B}_e = (B_1, B_2)$ 。

一方、圧延時の WR と BUR の軸心変位量  $V_w(x)$ ,  $V_B(x)$  は、それぞれ曲げ変形と剪断変形の単純和で表され、それらが満たす常微分方程式を各圧延ロール端部における境界条件を考慮して解くと

$$V_w(x) = \langle \Omega_{WP}(x), \mathbf{A} \rangle + \langle \Omega_{WB}(x), \mathbf{B}_e \rangle + \omega_{WB}(x) (P + Fw)$$

$$V_B(x) = \langle \Lambda_{WB}(x), \mathbf{B}_e \rangle + \lambda_{WB}(x) (P + Fw)$$

ただし、 $\Omega_{WP}(x)$ ,  $\Omega_{WB}(x)$ ,  $\Lambda_{WB}(x)$ :  $x$  のベクトル関数,  $\omega_{WB}$ ,  $\lambda_{WB}$ :  $x$  のスカラー関数。

次に、ロール間の偏平変形量  $a$  は、

$$a(x) = K_{WB} \cdot q_{WB}(x) = K_{WB} (\langle \mathbf{X}_b(x), \mathbf{B}_e \rangle + (P + Fw) / L_B)$$

ただし、 $K_{WB}$ : BUR と WR のバネ定数となるため、各ロールの表面変位は、

$$S_{WB}(x) = V_W(x) - a_1(x) + C^W(x)/2$$

$$= \langle \Omega_{WP}(x), \mathbf{A} \rangle + \langle \Omega_{WB}(x) - K_{WB} \mathbf{X}_b(x)/2, \mathbf{B}_e \rangle$$

$$+ (\omega_{WB}(x) - K_{WB}/2L_B)(P + Fw) + C^W(x)/2 \dots\dots\dots(10)$$

$$S_B(x) = V_B(x) + a_2(x) - C^B(x)/2$$

$$= \langle \Lambda_{WB}(x) + K_{WB} \mathbf{X}_b(x)/2, \mathbf{B}_e \rangle$$

$$+ (\lambda_{WB}(x) + K_{WB}/2L_B)(P + Fw) - C^B(x)/2 \dots\dots\dots(11)$$

ただし,  $C^W(x) = C_I^W(x) + C_T^W(x) - C_W^W(x)$ ,  
 $C^B(x) = C_I^B(x)/2 - C_W^B(x)/2$ ,  
 $C_I^W, C_T^W, C_W^W$ : WRのイニシャルクラウン量,  
 サーマルクラウン量, 摩耗量  
 $C_I^B, C_W^B$ : BURのイニシャルクラウン量, 摩耗量  
 $a(x) = a_1(x) + a_2(x)$

ここで,  $x$ 方向位置に有限個の節点 $\zeta_K$ を採って区分的に連続な多項式でロールプロフィールを表現すると

$$C^W(x) = \sum_K \langle \mathbf{f}_K(x), \mathbf{C}_K^W \rangle \dots\dots\dots(12)$$

$$C^B(x) = \sum_K \langle \mathbf{g}_K(x), \mathbf{C}_K^B \rangle \dots\dots\dots(13)$$

ただし,  $\mathbf{f}_K(x) = (f_K(x), f_K(x), f_K(x))$ ,  $\mathbf{g}_K(x) = (g_K(x), g_K(x))$   
 $f_K(x), g_K(x)$ : 形状関数  
 $f_K(x) = g_K(x) = 0(x, \zeta_K, x \geq \zeta_{K+1}), 1(\zeta_K \leq x < \zeta_{K+1})$   
 $\mathbf{C}_K^W = (C_I^W(\zeta_K), C_T^W(\zeta_K), C_W^W(\zeta_K))$ ,  
 $\mathbf{C}_K^B = (C_I^B(\zeta_K), C_W^B(\zeta_K))$

BURとWRの表面変位の適合条件は,

$$S_{WB}(0) - S_{WB}(x) = S_B(0) - S_B(x) \dots\dots\dots(14)$$

となり, 式(10), (11), (12), (13)を用いて書き換えると

$$\langle \Omega_{WB}(0) - K_{WB} \mathbf{X}_b(0) - \Omega_{WB}(x) + K_{WB} \mathbf{X}_b(x) - \Lambda_{WB}(0) + \Lambda_{WB}(x), \mathbf{B}_e \rangle$$

$$= -\langle \Omega_{WP}(0) - \Omega_{WP}(x), \Theta(fh(P)\mathbf{C}_h + fH(P)\mathbf{C}_H) \rangle + \langle 0, 0, P/B \rangle$$

$$+ (\lambda_{WB}(0) - \lambda_{WB}(x) - \omega_{WB}(0) + \omega_{WB}(x))(P + Fw)$$

$$+ \sum_K \langle -\mathbf{f}_K(0) + \mathbf{f}_K(x), \mathbf{C}_K^W \rangle / 2$$

$$+ \sum_K \langle \mathbf{g}_K(0) - \mathbf{g}_K(x), \mathbf{C}_K^B \rangle / 2 \dots\dots\dots(15)$$

上式は, ロール胴長方向の  $[0, L_B]$  区間における有限個の点列  $\{x_i : i=1, N\}$  に対して上式は成立するため,  $\Pi = [\Omega_{WB}(0) - K_{WB} \mathbf{X}_b(0) - \Omega_{WB}(x_i) + K_{WB} \mathbf{X}_b(x_i) - \Lambda_{WB}(0) + \Lambda_{WB}(x_i)]$ と置き,  $(N, 2)$ の過剰系連立一次方程式を解くと

$$\mathbf{B}_e^T = (\pi^{WP}_{ij})(\Theta(fh(P)\mathbf{C}_h + fH(P)\mathbf{C}_H) + \langle 0, 0, P/B \rangle^T)$$

$$+ (\pi^{WB}_i)(P + Fw) + \sum_K (\pi^{Wpr}_{ij})(\mathbf{C}_K^W)^T / 2$$

$$+ \sum_K (\pi^{Bpr}_{ij})(\mathbf{C}_K^B)^T / 2 \dots\dots\dots(16)$$

ただし,  $\Pi^+ [-\Omega_{WP}(0) + \Omega_{WP}(x_i)] \equiv (\pi^{WP}_{ij})$   
 $\Pi^+ [\lambda_{WB}(0) - \lambda_{WB}(x_i) - \omega_{WB}(0) + \omega_{WB}(x_i)] \equiv (\pi^{WB}_i)$   
 $\Pi^+ [-\mathbf{f}_K(0) + \mathbf{f}_K(x_i)] \equiv (\pi^{Wpr}_{ij})$   
 $\Pi^+ [-\mathbf{g}_K(0) + \mathbf{g}_K(x_i)] \equiv (\pi^{Bpr}_{ij})$   
 $\Pi^+$ :  $\Pi$ の一般化逆行列,  $[\ ]$ :  $N \times 2$ のマトリックス

一方, 板材と接触している時のWRの偏平変形量 $U$ は, 中島ら<sup>5)</sup>による修正戸澤の式より,

$$U(x) = K_{WP}(x) \mathbf{A}^T \dots\dots\dots(17)$$

ただし,  $K_{WP}(x) = \iint_S K(x, \eta, \theta) X(\eta) d\eta d\theta$   
 $S$ : 接触領域,  $\eta, \theta$ : 幅および圧延方向位置  
 だから, 板材と接触する位置のWRの表面変位量は,

$$S_{WP}(x) = V_W(x) + V_B(x) - \delta(x) - U(x) + C^W(x)/2 + C^B(x)/2$$

$$= \alpha(x)(\Theta(fh(P)\mathbf{C}_h + fH(P)\mathbf{C}_H) + \langle 0, 0, P/B \rangle^T)$$

$$+ (\langle \Omega_{WB}(x), (\pi^{WB}_i) \rangle + \omega_{WB}(x))(P + Fw)$$

$$+ \Omega_{WB}(x)((\pi^{Wpr}_{ij})(\mathbf{C}_K^W(x))^T / 2 + (\pi^{Bpr}_{ij})(\mathbf{C}_K^B)^T / 2)$$

$$- \langle \mathbf{f}_K(x), \mathbf{C}_K^W \rangle / 2 \dots\dots\dots(18)$$

ただし,  $\alpha(x) = \Omega_{WP}(x) + K_{WP}(x) + \Omega_{WB}(\pi^{WP}_{ij})$

次に, 板材とWRの変位の適合条件は,

$$(h(0) - h(x))/2 = S_{WP}(0) - S_{WP}(x) \dots\dots\dots(19)$$

となるから, 幅方向位置の $x_d$ を含む有限個の点列  $\{z_j : j=1, s\}$ においても成り立つ。

$$\Gamma = [x_{zij}] - fh(P) [\alpha_{aj}]$$

$$\equiv [\mathbf{X}_d(z_j)/2] - fh(P) [\alpha(0) - \alpha(z_j)] \theta$$

と置き,  $(s, 2)$ の $C_h$ に関する過剰系の連立一次方程式を解くと $\Gamma^T \Gamma$ が正則行列であれば, マクローリン展開により $N$ 次までの有限項表示で $\Gamma^+$ は,

$$\Gamma^+ = \left( \sum_m \varepsilon_m fh(P)^m \right) ([x_{zij}]^T - fh(P) [\alpha_{aj}]^T) \dots\dots\dots(20)$$

ただし,  $\varepsilon_m$ :  $\Omega_{WP}, K_{WP}, \Omega_{WB}, z_j, B, x_d$ で決まる定数と表示でき, 板クラウン式は次のように導出される。

$$\mathbf{C}_h = \Gamma^+ [f_H(P) [\alpha_{aj}] \mathbf{C}_H$$

$$+ [\Omega_{WP}(0) - \Omega_{WP}(z_j) + K_{WP}(0) - K_{WP}(z_j)$$

$$+ (\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j))(\pi^{WB}_i)] \langle 0, 0, P/B \rangle^T$$

$$+ [(\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j))(\pi^{WB}_i) + \omega_{WB}(0) - \omega_{WB}(z_j)](P + Fw)$$

$$+ \{ [(\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j))(\pi^{Wpr}_{ij})$$

$$+ [-f_K(0) + f_K(z_j)] \} (\mathbf{C}_K^W)^T / 2$$

$$+ [(\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j))(\pi^{Bpr}_{ij})] (\mathbf{C}_K^B)^T / 2 \dots\dots\dots(21)$$

式(21)の第1項, 第4, 5項を入側板クラウンの空間 $C_H$ および圧延ロールプロフィールの空間( $C^W, C^B$ )から出側クラ

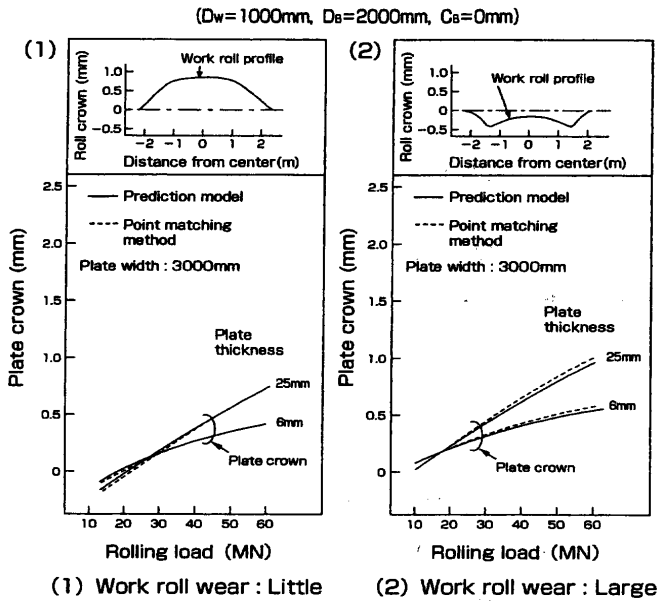


Fig. 2. Accuracy of plate crown model.

ウン  $C_h$  への写像  $\pi_1, \pi_2$  として捉えればこれまで実験式でしか明確にされていなかった入側板クラウンおよび圧延ロールプロファイルの影響係数すなわち遺伝係数<sup>7)</sup>と転写係数<sup>8)</sup>が理論的に導出されたと言える。

$$\pi^1: C_H \rightarrow C_h$$

$$= \Gamma^+ fH(P) [\alpha_{ij}] C_H$$

$$\pi^2: (C^W, C^B) \rightarrow C_h$$

$$= \Gamma^+ \{ (\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j)) (\pi^{Wpr}_{ij}) + [-f_k(0) + f_k(z_j)] (C^W_k)^{T/2} + \Gamma^+ [(\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j)) (\pi^{Bpr}_{ij})] (C^B_k)^{T/2} \}$$

式 (21) を簡略化するために、板幅方向の板厚分布を4次のみで表わし、板材とWRの表面変位を板厚定義点で適合させると板クラウン予測式は以下ようになる。

$$C_h = (2fH(P)\alpha_d / (1-2fh(P))) C_H + 2(((A_{WPd} + A_{WBd}\pi^{WP})/B + A_{WBd}\pi^{WB} + \omega_{WBd}) / (1-2fh(P))) P + 2((A_{WBd}\pi^{WB} + \omega_{WBd}) / (1-2fh(P))) Fw + ((A_{fWBdk}) + (-\delta_{K0} + f_k(x_d)), C^W_k) / (1-2fh(P)) + ((A_{gWBdk}), C^B_k) / (1-2fh(P)) \dots \dots \dots (22)$$

ただし、 $\alpha_d, A_{WPd}, A_{WBd}, \pi^{WP}, \pi^{WB}, \omega_{WBd}, (A_{fWBdk}), (A_{gWBdk})$  : ロール径, ロール胴長等から決まる定数

板クラウン予測モデル式 (22) と分割モデルの精度比較結果を Fig. 2 に示す。その際にWRプロファイルは、ロール摩耗が非常に小さくサーマルクラウンが成長した場合と摩耗が非常に進行した場合を仮定した。式 (6) 中の係数  $\xi$  は、中島ら<sup>7)</sup> により整理された幾何学的パラメータ  $\gamma$  との関係  $\xi = \gamma^2$  を用いて近似した式を採用した。それぞれの計算値の差は、いずれの場合においても  $50 \mu\text{m}$  以内にあり、高精度

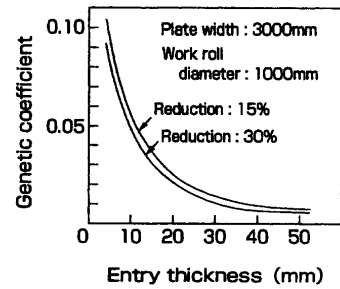


Fig. 3. Example of genetic coefficient (Number of pass=1).

な予測モデルであることがわかる。

この時に  $\pi_1$  で定義される遺伝係数の具体的な計算例を Fig. 3 に示す。

### 3.2 板クラウン予測モデルと結合させた高精度GMモデル

種々のサイズの板材に対して多様な圧延条件の下で高精度なロールギャップ設定を行うために、著者ら<sup>9)</sup> は、板クラウン予測モデルを反映した下記のGMモデルを新たに構築した。その定式化の詳細は割愛するが、GMモデルの構成は下式のとおりである。

$$h_G(x) = S + Y_H + 2Y_{R0} + P_W(0) + P_B(0) - X_d(x)C_h + a \dots \dots \dots (23)$$

ただし、 $h$  : 任意の板幅方向位置  $x$  での出側板厚,  $S$  : 無負荷時のロールギャップ,  $Y_H$  : ハウジング変形量,  $Y_{R0}$  : 胴中央位置でのロール変形量 (片側ロール),  $a$  : 学習項。

この時、板厚定義点  $x_d$  におけるGMモデル  $h_G(x_d)$  は、

$$h_G(x) = S + Y_H + 2Y_{R0} + P_W(0) + P_B(0) - [1, 1] C_h + a \dots \dots \dots (24)$$

GMモデル式 (24) における圧延時のロール変形量  $Y_{R0}$  について分割モデルとの精度比較した場合の差は  $50 \mu\text{m}$  以内である<sup>9)</sup>。既報<sup>1)</sup> で導出したロールプロファイル予測モデルも高精度で高い追従性を有していることから、大きく変動する操業条件下に対して本GMモデルの精度は正確に確保されることがわかる。

## 4. ファジィ推論による胴長方向のロール冷却水量パターンを設定

異なるサイズの板材が数百本圧延される圧延順編成において、経験的な方法によって適正なロール冷却水量パターンを設定することは困難である。

### 4.1 考え方

応答遅れを反映させたロール冷却水量パターン設定の基本構想は以下のとおりである。

(1) 加熱炉内の複数のスラブを対象に現時点のWRプロファイルを評価し、一定本数の板材が圧延されるごとにロール冷却パターンを逐次設定し直すことによって、最良

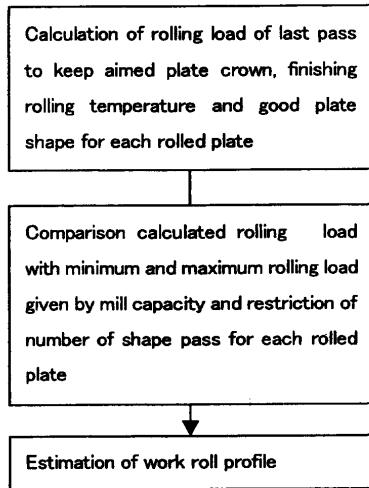


Fig. 4. Flow chart of estimation for work roll profile.

に近いWRプロフィールを確保できるようにする。

(2) WRプロフィールの適正度の評価に対して、既報で定式化されたサーマルプロフィール予測モデル<sup>1)</sup>、第3章で導出された板クラウン予測モデル、圧延荷重予測モデル<sup>10)</sup>および圧延温度予測モデル<sup>11)</sup>を用いて、圧延完了時の目標板厚と板クラウンを確保し、形状調整パスの圧下パターンが形状不感帯の範囲に入るように圧延パススケジュールを計算し、その時の圧延仕上り荷重レベルで判断する。

(3) 圧延仕上り荷重レベルから、WRのプロフィール状態に関する情報を定義し、ファジィ推論を適用してロール冷却水量パターンを選定する。

#### 4.2 ロール冷却パターン選定のファジィ制御規則

板クラウン予測モデル式 (22) による圧延ロールプロフィールの転写係数は、圧延ロールプロフィールの空間 ( $C_w$ ,  $C_b$ ) から出側クラウン  $C_h$  への写像  $\pi_2$  で定義されることは前掲のとおりである。この写像  $\pi_2$  を制約したWRプロフィール空間 ( $C_w$ ) から出側クラウン  $C_h$  への写像  $\pi_{2w}$  に着目して、WRプロフィールに関するファジィ制御規則を作ることが重要である。

$$\begin{aligned} \pi_{2w}: (C_w) \rightarrow C_h \\ = \Gamma^+ \{ [(\Omega_{WB}(0) - \Omega_{WB}(z_j)) (\pi^{pr}_{ij})] \\ + [-f_k(0) + f_k(z_j)] \} (C_w^K)^{T/2} \end{aligned}$$

まず、任意の対象スラブKに対して圧延仕上り荷重レベル ( $P_{FM}^K$ ) を算出するに際して、現時点のWRプロフィールを初期値として、当該スラブが圧延されるまでの間にWRが受ける熱履歴を基にサーマルプロフィール予測モデルにより圧延直前のWRプロフィールを計算する。

そのWR状態下において圧延パススケジュールの設定計算を行って圧延仕上り荷重レベルを求め、WRプロフィールの適正度を評価する。

すなわち、Fig. 4 に示すように、各種サイズの板材に対して、目標板クラウン、最終圧延温度、最終圧延形状を確

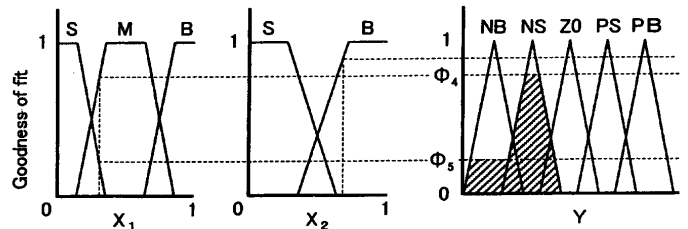


Fig. 5. Membership function in fuzzy rule.

保するために、最小限の調整圧延パス数の確保と設備能力の制約等の点から上下限の圧延仕上り荷重 ( $P_{FM}^L, P_{FM}^U$ ) をあらかじめ決定し、その板材に充当されるスラブの圧延パススケジュール計算から割り付けられる圧延仕上り荷重との比較によって現時点のWRプロフィール状態の適正さを評価することになる。しかし、ロール冷却水量パターンの変更に伴うWRサーマルプロフィールの変化には応答遅れが生じるため、すべてのスラブの圧延ごとに最良のWRプロフィールを形成させることは不可能である。

以下では、対象スラブの総数Nに対して、WRサーマルプロフィール制御に必要なWRプロフィールの状態に関する変数 ( $X_1, X_2$ ) を定義することによって、ファジィ推論を援用した一定数のスラブ単位でのWRプロフィールの適正評価法を導入する。

$$X_1 = n\{K; P_{FM}^K \in [P_{FM}^L, P_{FM}^U]\} / N \dots\dots\dots (25)$$

$$X_2 = n\{K; P_{FM}^K \in (P_{FM}^U, \infty)\} / N \dots\dots\dots (26)$$

ただし、 $n$ : 集合  $\{K\}$  の特性を満たすスラブの総数

その際、WRプロフィールの状態変数 ( $X_1, X_2$ ) とWRのサーマルプロフィールの修正方向を表す変数Yをファジィ数として、ファジィ推論によってWRの胴長方向のロール冷却水量パターンを設定する。

水量パターン設定に関するファジィ制御規則において、前件部の ( $X_1, X_2$ ) のファジィ変数の数は、それぞれ Small (S), Medium (M), Big (B) の3つと Small (S), Big (B) の2つである。Yのファジィ変数の数は、WRプロフィール量をかなり小さくする (NB: Negative Big), やや小さくする (NS: Negative Small), 保持する (Z0: Zero), やや大きくする (PS: Positive Small), かなり大きくする (PB: Positive Big) の5つである。 ( $X_1, X_2$ ), Yのファジィ変数を Fig. 5 に示す。

この時、ロール冷却条件設定のための制御規則は、以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} R_1: & \text{if } X_1 \text{ is } S \text{ and } X_2 \text{ is } S \text{ then } Y \text{ is } PB \\ R_2: & \text{if } X_1 \text{ is } M \text{ and } X_2 \text{ is } S \text{ then } Y \text{ is } PS \\ R_3: & \text{if } X_1 \text{ is } B \text{ and } X_2 \text{ is } S \text{ then } Y \text{ is } Z0 \\ R_4: & \text{if } X_1 \text{ is } M \text{ and } X_2 \text{ is } B \text{ then } Y \text{ is } NS \\ R_5: & \text{if } X_1 \text{ is } S \text{ and } X_2 \text{ is } B \text{ then } Y \text{ is } NB \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

$i$  番目の制御規則の適合度を  $\phi_i$  とすると

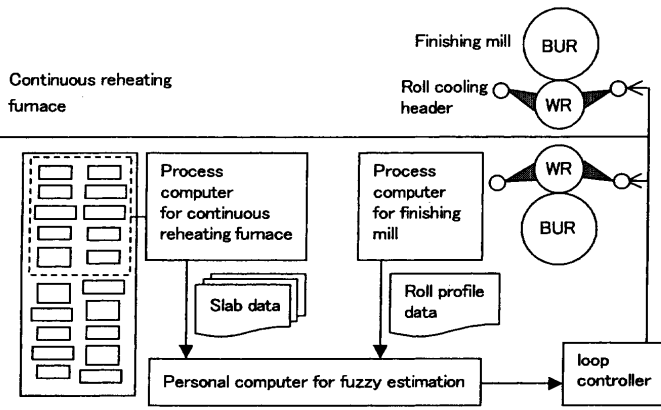


Fig. 6. Fuzzy estimation system for roll cooling pattern setting.

Table 1. Roll cooling pattern.

Roll cooling pattern No.	Water distribution	Amount of water (Center of roll barrel)
1	Uniform	Large ↓ Small
2		
3		
4	Concave	

$$\left. \begin{aligned}
 \phi_1 &= S(X_1) \wedge S(X_2) \\
 \phi_2 &= M(X_1) \wedge S(X_2) \\
 \phi_3 &= B(X_1) \wedge S(X_2) \\
 \phi_4 &= M(X_1) \wedge B(X_2) \\
 \phi_5 &= S(X_1) \wedge B(X_2)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

推論結果  $E(Y)$  は,

$$E(Y) = (\phi_1 \wedge PB(Y)) \vee (\phi_2 \wedge PS(Y)) \vee (\phi_3 \wedge ZO(Y)) \vee (\phi_4 \wedge NS(Y)) \vee NB(Y) \dots\dots\dots (29)$$

$Y$  とロール冷却パターンの対応関係をあらかじめ設定することによって、推論結果  $E$  の非ファジィ化が行え下記のパターン  $W$  選定式が導かれる。

$$W = [4 \int E(Y) Y dY / \int Y dY - g]_{\text{Gaussian}} \dots\dots\dots (30)$$

ただし、 $g$  : ロール冷却パターンの種類によって決まる値。

### 5. サーマルプロフィール制御による形状制御技術の実機適用と考察

分割型のロール冷却ヘッダーを組み込んだ厚板仕上げ圧延機において、Fig. 6 に示すファジィ推論による水量パターン設定システムを稼働させ、WRサーマルプロフィール制御による厚板形状制御技術を実機適用した。その際のロール冷却パターンの例を Table 1 に示す。3水準の一様型

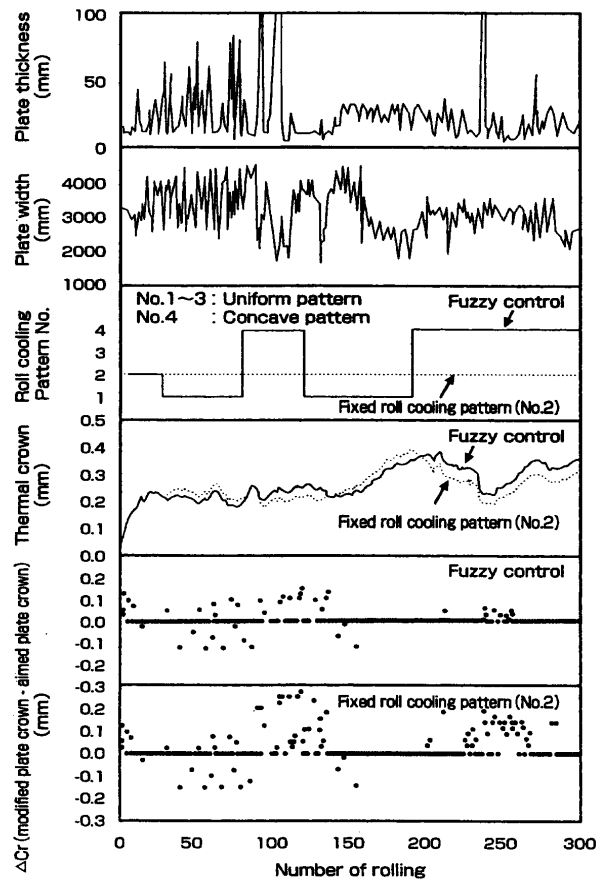


Fig. 7. Effect of thermal profile control by fuzzy estimation system.

と凹型の4パターンの水量分布を離散的に選別して冷却パターンを変更する。

圧延順編成におけるファジィ推論の対象スラブは、表4に示すように現圧延材から10本逆上ったスラブを含むようにした。また、ロールプロフィールを反映させた圧延パススケジュールの設定には、第3章で導出された板クラウン予測式(22)を適用した。

圧延に際しては、パス回数およびミル能力制約の点からWRプロフィールが適正でない場合には、圧延仕上がり荷重の許容範囲内で圧延できるように目標板クラウンを修正して圧延形状と板厚が確保される圧延パススケジュールを再設定させる。この時、修正板クラウンと目標板クラウンの差  $\Delta Cr$  に関して、従来の一様な分布の場合とファジィ推論によるサーマルプロフィール制御の場合の効果比較を行った。

その結果を Fig. 7 に示す。ロール冷却パターンを Table 1 の No. 2 の一様な水量分布に固定した場合は、 $\Delta Cr$  は大きく変化して目標値を修正しているが、ファジィ推論によるロール冷却パターン設定システムを適用した場合には、板厚、板幅が大きく変化する場合において  $\Delta Cr$  の変化は小さくほとんど板材について目標板クラウンを満たすパススケジュールが設定できている。さらに、目標板クラウンを外れる場合でもその修正量は小さくなっており、圧延順に応

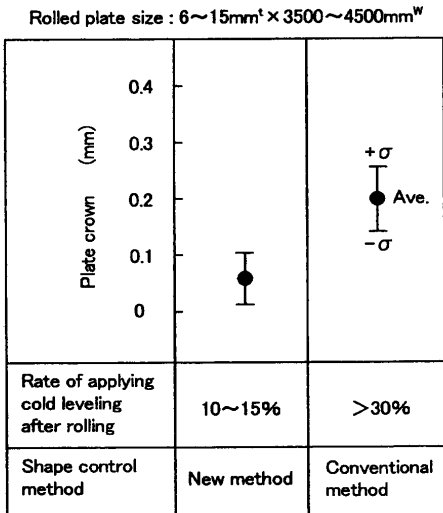


Fig. 8. Effect of newly developed shape control technology.

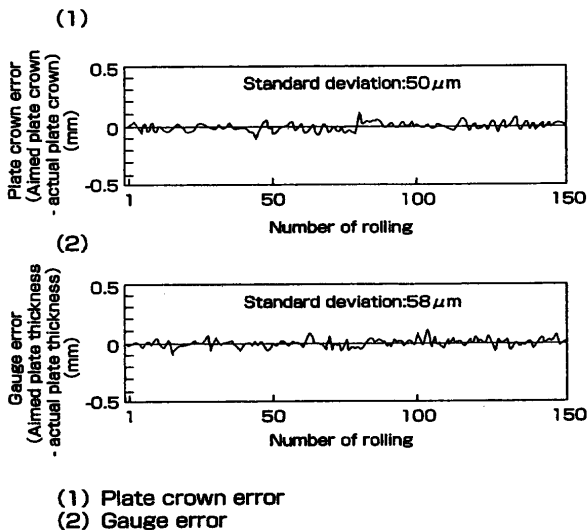


Fig. 9. Change of plate crown and gauge error in rolling campaign.

じて適正なロール冷却パターンが設定できていることがわかる。

ロール組み替えから、ファジィ推論による形状制御技術を実機適用した場合において、実板クラウン量と圧延形状の改善効果例を Fig. 8 に示す。板クラウンは従来に比べ約 20% 以上小さくなっている。さらに板幅 3500 mm 以上の広幅材の圧延形状も大幅に改善され、冷間での再矯正率は半減している。

また、その際の板クラウンとゲージメータ板厚の予測精

度を Fig. 9 に示す。ロール冷却条件や操業条件が変化する中で板クラウン予測モデルの精度は約 50 μm と極めて高精度であり、それを構成するサーマルプロフィール等の予測モデルの高追従性をも実証できていると言える。一方、GM モデルの予測精度は約 60 μm であり、高精度なロールギャップの設定ができていることがわかる。

以上より、ファジィ制御による WR プロフィルの適正化およびそれに追従できる板クラウン予測モデルによるパススケジュール設定と高精度ロールギャップ設定の実現によって、全板幅にわたり板クラウンと形状の大幅な低減が図られている。

## 6. 結言

胴長方向に分割されたロール冷却ヘッダーを有する現行 4hi ミルにおいて、以下の技術から構成される WR サーマルプロフィール制御による厚板形状制御技術を構築し、板クラウン低減と圧延形状の改善効果を実証した。

- (1) 経時的に変化するロールプロフィールを反映させた板クラウン予測モデルによる正確な圧延パススケジュール設定
- (2) 高精度な GM モデルによる各パスでの設定板厚に対する正確な WR ギャップの設定
- (3) ファジィ制御を援用による応答遅れを考慮した胴長方向ロール冷却パターンの設定

## 文 献

- 1) K.Ohe and Y.Morimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 793.
- 2) H.Matamoto, K.Nakajima, T.Kikuma and Y.Uehori: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **23** (1982), 1201.
- 3) S.Sida: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **7** (1966), 424.
- 4) Tsu-Tao-Loo: *J. Appl. Mech.*, **25** (1958), 122.
- 5) K.Nakajima and H.Matamoto: Proc. of 24th Japanese Joint Conf. for the Technology of Plasticity, JSTP, Tokyo, (1979), 123.
- 6) 松本絃美: 圧延技術発展の歴史と最近の進歩, 圧延理論部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1985), 155.
- 7) K.Nakajima, T.Kikuma, H.Matamoto, H.Awazuhara, T.Kimura, S.Sida and T.Kajiura: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **23** (1982), 1172.
- 8) T.Kono: Proc. of 1972 Japanese Spring Conf. for Technology of Plasticity, Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, (1972), 169.
- 9) K.Ohe, Y.Morimoto, S.Kajiura, K.Higashi, K.Anraku, T.Ohnishi and T.Fujino: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 318.
- 10) Y.Morimoto, K.Ohe, T.Tada, D.Miyoshi, S.Nishino and H.Narasaki: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 350.
- 11) Y.Yasuda, K.Ohe, T.Ueda and A.Mizuta: Proc. of 42nd Japanese Joint Conf. for the Technology of Plasticity, Vol. I, JSTP, Tokyo, (1991), 307.