

ワークロールシフトミルにおける板厚・板クラウン 予測モデルの開発

森本 禎夫*・西川 恒明*²・石川 孝司*³

Development of Simplified Model for Gauge and Plate Crown on Work Roll Shift Mill

Yoshio MORIMOTO, Tsuneaki NISHIKAWA and Takashi ISHIKAWA

Synopsis : In the work roll shift mill, a wide control range of the plate crown can be achieved by using an unsymmetrical work roll profile. The roll deformation of the mill has effected by not only the rolling load and the bending force of the work roll but also the work roll shift position and the work roll profile.

The authors have formulated the simplified models of the gauge and the plate crown considering the above effects. These models consist of the mill housing deformation, the roll deformation in the kiss roll state and the roll deformation in the plate rolling, and are derived by dealing strictly with the roll deformation and the mill stretch.

The accuracy of the new models has been compared with the point matching method and the actual plate rolling data.

It is verified that these models can flexibly follow up the work roll shifting and the unsymmetrical work roll profile.

Key words : plate rolling; work roll shift mill; plate crown; gauge; simplified model.

1. はじめに

当社加古川製鉄所では、厚鋼板の寸法・形状の改善や生産性の向上を図るべく、厚板圧延ラインにワークロールシフトミル(WRSミル)を導入している。WRSミルでは、上下のワークロール(WR)に上下左右非対称なロールプロフィールを付与することによって、板クラウン制御能力を大きくすることができる¹⁾。このような場合、WRとバックアップロール(BUR)の変形は、圧延荷重やWRベンダ力のみならずWRシフト位置やWRプロフィール形状の影響を大きく受けることになり、パススケジュールやミルセッティングに用いる板厚・板クラウンの予測モデルには、これらの影響を考慮しておくことが必要である。

板厚・板クラウンの厳密モデルとして分割モデル²⁾がよく知られている。本モデルにおいては、BURとWR間およびWRと板材間の面圧分布を収束計算により求める必要があり、オフラインの解析には適しているものの、計算時間の点でオンラインへの適用はなされていない。

こうしたことから、圧延機の力学的変形に関して妥当と考えられる前提の下で、分割モデルと同等な精度を有する、WRSミルへの適用可能な板厚・板クラウンの簡易予測モデルを開発した。

2. 簡易予測モデル構築の考え方

当社厚板工場では、板材の板幅端部から100mmを板厚の定義位置とし、その位置で板厚の制御をおこなっている。さらに、板クラウンの予測に基づいてパススケジュール、WRシフト位置、WRベンダ力を設定することで板形状の制御をおこなっている。

このため、板クラウン予測モデルと下式に示す板クラウン予測を含むゲージメータモデルを構築することにした。

ゲージメータモデルの構成要素であるハウジング変形量 Y_H 、ロール変形量 Y_R 、出側板クラウン量 C_h の予測モデルの定式化に際しては、WRのプロフィールとして胴長方向に非対称なロールカーブが採用できるようにした。

以下では、Fig. 1に示すように座標系をとりハウジング変形量 Y_H 、ロール変形量 Y_R 、出側板クラウン量 C_h の予測モデルを定式化する。図中の(1)はキスロール状態を、(2)は圧延状態を示している。

$$\left. \begin{aligned} h_E &= h_C - C_h \\ h_C &= S + Y_H + 2Y_R(0) + 2C_W(-\delta) + C_B(0) + E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 h_E ：板厚定義位置の出側板厚、
 h_C ：板幅中央位置の出側板厚、

平成19年5月31日受付 平成19年9月7日受理 (Received on May 31, 2007; Accepted on Sep. 7, 2007)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼部門加古川製鉄所技術研究センタープロセス技術開発室 (Process Engineering Development Section, Research and Development Laboratory Kakogawa Works, Iron & Steel Sector, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675-0023)

* 2 (株)神戸製鋼所鉄鋼部門加古川製鉄所技術研究センター (Research and Development Laboratory Kakogawa Works, Iron & Steel Sector, Kobe Steel, Ltd.)

* 3 名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻 (Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University)

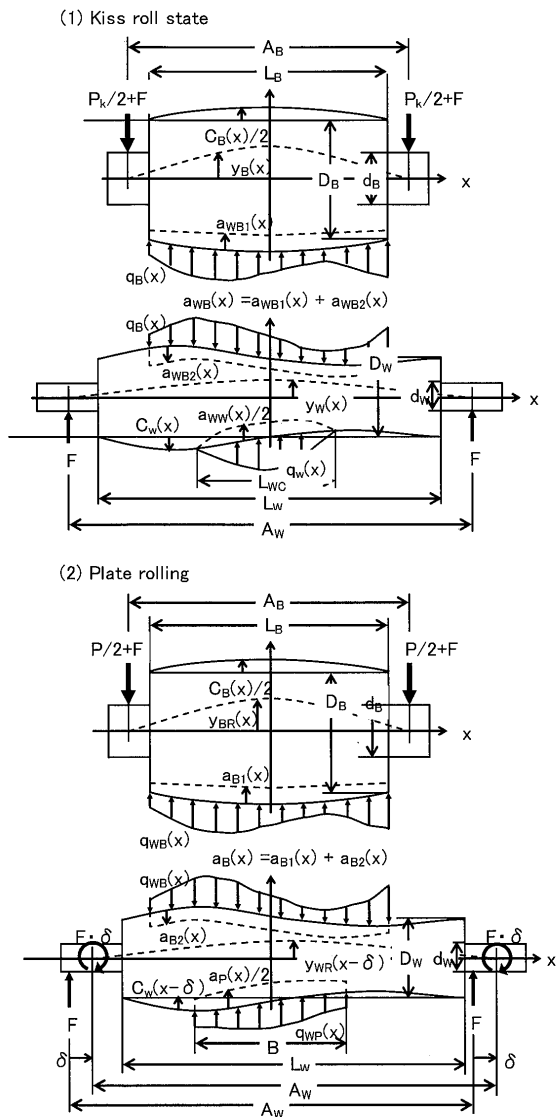


Fig. 1. Coordinate system for formulation of simplified models.

C_h : 出側板クラウン量, Y_H : ハウジング変形量,
 Y_R : ロール変形量, C_W, C_B : WR, BURクラウン量,
 E : 学習項, x : 板幅方向位置 ($x=0$ 板幅中央),
 S : $x=0$ におけるロール間隔, δ : WRシフト量

3. 簡易予測モデルの定式化

3.1 ハウジング変形

上下のWR同士を接触させながら圧下スクリーを締め込んでいくキスロール状態では、BURチョックの変位 ΔS とキスロール荷重 (P_K+2F) の関係すなわち全ミル伸び量が求められる。ここで P_K は上下WR間の反力、 F はWRのペンダ力 (片チョック) である。

ΔS は (2) 式に示すようにロール変形による BUR チョックの変位 ΔS_R とハウジング変形による BUR チョックの変位 ΔS_H の和として表されるため、 ΔS から ΔS_H を分離するためには、 ΔS_R と (P_K+2F) の関係を求める必要がある。

$$\Delta S = S - S_0 = \Delta S_R + \Delta S_H \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 S_0 : $P_K=0$ のときのロール間隔

キスロール状態は WR をシフトしないで行なわれるものとし、下記の (条件1) ~ (条件8) を用いて ΔS_R と (P_K+2F) および ΔS_H と (P_K+2F) の関係式を導出する。

(条件1) WR-BUR間および上下WR間の面圧分布 q_B, q_W

$$q_B(x) = q_{B0} + q_{B1}x + q_{B2}x^2 + q_{B3}x^3 + q_{B4}x^4 + q_{B5}x^5 \dots\dots\dots (3)$$

$$q_W(x) = q_{W0} + q_{W2}x^2 + q_{W4}x^4 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $q_{B0} \sim q_{B5}, q_{W0}, q_{W2}, q_{W4}$: 未知数

(条件2) BURとWRの撓み量 y_B, y_W

$$\left. \begin{aligned} y_B(x) &= \int_{-L_B/2}^{L_B/2} \alpha_B(x, \xi) q_B(\xi) d\xi \\ y_W(x) &= \int_{-L_{WC}/2}^{L_{WC}/2} \alpha_W(x, \xi) q_W(\xi) d\xi - \int_{-L_B/2}^{L_B/2} \alpha_W(x, \xi) q_B(\xi) d\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 α_B, α_W : 面圧分布が作用したときの曲げとせん断による BUR と WR の撓みの影響係数、

L_B : BUR 胴長, L_{WC} : 上下WR間の接触長

(条件3) WR-BUR間および上下WR間の扁平量 a_{WB}

a_{WB}, a_{WB}, a_{WW} は、(6) 式に示す Too-Tau-Loo の式³⁾を $q=K_1$ のまわりでべき級数展開し2次以上の微小項を省略すると(7)式、(8)式のように定数 k_{WB}, k_{WW} を用いて表すことができる。

$$a = (K_0 - 1 + \ln(K_1 - K_2/q)) K_1 \cdot q \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 a : 上下ロール間の扁平量、

- D_1, D_2 : 上下ロール径、
- E_1, E_2 : 上下ロールのヤング率、
- ν_1, ν_2 : 上下ロールのポアソン比、
- q : 単位幅当りの荷重、
- $K_0 = \ln(D_1 D_2), K_1 = 4(D_1^2 + D_2^2)/(D_1^2 D_2^2)$
- $K_2 = 2\pi(D_1 + D_2)E_1 E_2 / (D_1 D_2 ((1 - \nu_1^2)E_1 + (1 - \nu_2^2)E_2)),$
- $K_3 = (1 - \nu_1^2)/(\pi E_1) + (1 - \nu_2^2)/(\pi E_2)$

$$a_{WB}(x) = k_{WB} \cdot q_B(x) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $k_{WB} = K_3(((K_0 - 1)K_1^2 - (K_0 - 2)K_2 + (K_1^2 - K_2) \ln(K_1 - K_2/K_1)) - K_1 \cdot K_2) / (\pi(K_1^2 - K_2)),$
 $D_1 = D_B, D_2 = D_W, E_1 = E_B, E_2 = E_W, \nu_1 = \nu_B, \nu_2 = \nu_W,$
 D_B : BUR 径, E_B : BUR のヤング率,
 ν_B : BUR のポアソン比, D_W : WR 径,
 E_W : WR ヤング率, ν_W : WR のポアソン比

$$a_{WW}(x) = k_{WW} \cdot q_W(x) \dots\dots\dots (8)$$

ただし, $k_{WW} = K_3(((K_0-1)K_1^2 - (K_0-2)K_2) + (K_1^2 - K_2) \ln(K_1 - K_2/K_1)) - K_1 \cdot K_2) / (\pi(K_1^2 - K_2))$,
 $D_1 = D_2 = D_W, E_1 = E_2 = E_W, v_1 = v_2 = v_W$
 (条件4) BURとWRの力の釣り合い条件

$$\left. \begin{aligned} \int_{-L_B/2}^{L_B/2} q_B(x) dx &= P_K + 2F \\ \int_{-L_B/2}^{L_B/2} q_B(x) dx - \int_{-L_W/2}^{L_W/2} q_W(x) dx &= 2F : [L_{WC} = L_W] \\ \int_{-L_B/2}^{L_B/2} q_B(x) dx - \int_{-L_{WC}/2}^{L_{WC}/2} q_W(x) dx &= 2F : [L_{WC} < L_W] \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

ただし, L_W : WR 胴長
 (条件5) BURのモーメントの釣り合い条件

$$\int_{-L_B/2}^{L_B/2} q_B(x)x dx = 0 \dots\dots\dots(10)$$

(条件6) 上下WR間の面圧分布 $q_W(x)$ が満たす条件

$$\left. \begin{aligned} q_W(x)|_{x=-L_{WC}/2} &= 0 : [L_{WC} < L_W] \\ \int_{-L_W/2}^{L_W/2} q_W(x) dx &= P_K : [L_{WC} = L_W] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

(条件7) WR-BUR間の表面変位の適合条件

WR-BUR間の表面変位の適合条件は, WR-BUR間のBUR表面変位とWR表面変位が等しいと置くことにより(12)式となる。

$$y_B(x) - y_W(x) + a_{WB}(x) + (x/A_W - 0.5)Y_{W1} - (x/A_W + 0.5)Y_{W2} + \Delta S_R = (C_B(x) + C_W(x))/2 \dots\dots\dots(12)$$

ただし, C_B : BURクラウン量, C_W : WRクラウン量,
 A_W : WRのチョック間(支点間)距離,
 Y_{W1}, Y_{W2} : 左右のWRチョックの変位

(条件8) 上下WR間の表面変位の適合条件

上下WR間においては, 上WR表面変位 Δ_{WW} は(13)式で表される。ここで, $x=0$ の接触点の表面変位は $\Delta S_R/2$ であり, ここを除く上下WR同士の接触点が $x=0$ の接触点に対して点対称になることから, 上下WR間の表面変位の適合条件は(14)式となる。

$$\Delta_{WW}(x) = -(x/A_W - 0.5)Y_{W1} + (x/A_W + 0.5)Y_{W2} + y_W(x) + a_{WW}(x)/2 - C_W(x)/2 \dots\dots\dots(13)$$

$$y_W(x) + y_W(-x) + (a_{WW}(x) + a_{WW}(-x))/2 + Y_{W1} + Y_{W2} - \Delta S_R = (C_W(x) + C_W(-x))/2 \dots\dots\dots(14)$$

3・1・1 ΔS_R と $(P_K + 2F)$ の関係式

(1) $L_{WC} \leq L_W$ の場合の ΔS_R と $(P_K + 2F)$ の関係

(9)~(11)式を用いて(3)式, (4)式の未知数 q_{B0}, q_{B1}, q_{W0}

を消去する。次に, これらと(7), (8)式を用いると(12), (14)式は下式のように整理される。

$$\sum_{i=2}^5 \Phi_i(x)q_{Bi} + \Phi_6(L_{WC}, x)q_{W2} + \Phi_7(L_{WC}, x)q_{W4} + (x/A_W - 0.5)Y_{W1} - (x/A_W + 0.5)Y_{W2} + \Delta S_R = (C_B(x) + C_W(x))/2 - \Phi_0(x)F \dots\dots\dots(15)$$

ただし, $\Phi_0, \Phi_2 \sim \Phi_5$: x の既知関数,
 Φ_6, Φ_7 : L_{WC} と x の既知関数

$$\Psi_2(x)q_{B2} + \Psi_4(x)q_{B4} + \Psi_6(L_{WC}, x)q_{W2} + \Psi_7(L_{WC}, x)q_{W4} + Y_{W1} + Y_{W2} - \Delta S_R = (C_W(x) + C_W(-x))/2 - \Psi_0(x)F \dots\dots\dots(16)$$

ただし, Ψ_0, Ψ_2, Ψ_4 : x の既知関数,

Ψ_6, Ψ_7 : L_{WC} と x の既知関数

$-L_B/2 \leq x_1 < x_2 < x_3 < x_4 < x_5 < x_6 \leq L_B/2$ となる各 x 位置で(15)式が成り立つ, さらに, $0 \leq x_7 < x_8 < x_9 \leq L_{WC}/2$ の各 x 位置で(16)式が成り立つとすると $\{q_{B2} \sim q_{B5}, q_{W2}, q_{W4}, Y_{W1}, Y_{W2}, \Delta S_R\}$ を未知数とする9元連立方程式が得られる。ここでは, $x_1 \sim x_9$ の値として $x_1 = -x_6 = -L_B/2, x_2 = -x_5 = 2 \cdot x_1/3, x_3 = -x_4 = x_1/3, x_7 = 0, x_9 = L_{WC}/2, x_8 = x_9/2$ を採用した。

WRベンダ力 F と上下WR間の接触長 L_{WC} を与えて, この連立方程式を解くと $\Delta S_R, q_{W2}, q_{W4}$ が求まる。さらに, P_K は q_{W2}, q_{W4} の解と(9), (11)式を用いることで下式のように求まる。

$$P_K = -(L_{WC}^3/6)q_{W2} - (L_{WC}^3/20)q_{W4} \dots\dots\dots(17)$$

したがって, $0 < L_{WC1} < L_{WC2} \dots < L_{WCm} < L_W$ を満たすようにとった m 個の異なる上下WR間の接触長 $\{L_{WCi} : i=1, m\}$ について $\{(P_{Ki} + 2F, \Delta S_{Ri}) : i=1, m\}$ が求まる。

(2) $L_{WC} = L_W$ の場合の ΔS_R と $(P_K + 2F)$ の関係

この場合も同様にして, (7), (8), (9)~(11)式を用いると(12), (14)式は下式のように整理され, $\{q_{B2} \sim q_{B5}, q_{W2}, q_{W4}, Y_{W1}, Y_{W2}, \Delta S_R\}$ を未知数とする9元連立方程式が得られる。

$$\sum_{i=2}^5 \Phi_i(x)q_{Bi} + \Phi'_6(x)q_{W2} + \Phi'_7(x)q_{W4} + (x/A_W - 0.5)Y_{W1} - (x/A_W + 0.5)Y_{W2} + \Delta S_R = (C_B(x) + C_W(x))/2 - \Phi_0(x)F - \Phi_1(x)P_K \dots\dots\dots(18)$$

ただし, Φ_1, Φ'_6, Φ'_7 : x の既知関数

$$\Psi_2(x)q_{B2} + \Psi_4(x)q_{B4} + \Psi'_6(x)q_{W2} + \Psi'_7(x)q_{W4} + Y_{W1} + Y_{W2} - \Delta S_R = (C_W(x) + C_W(-x))/2 - \Psi_0(x)F \dots\dots\dots(19)$$

ただし, Ψ'_6, Ψ'_7 : x の既知関数

WRベンダ力 F と上下WR間の反力 P_K を与えて, この連立方程式を解くと ΔS_R が求まる。

したがって, L_{WCm} のときの P_{Km} に対して $P_{Km} < P_{Km+1} < P_{Km+2} < \dots < P_{Kn}$ となる n 個の異なる $\{P_{Ki} : i=m+1, n\}$ をとる

と、各 P_{Ki} について $\{(P_{Ki}+2F, \Delta S_{Ri}): i=m+1, n\}$ が求まる。

(3) ΔS_R と (P_K+2F) の関係式

得られた有限個の数列 $\{(P_{Ki}+2F, \Delta S_{Ri}): i=1, m\}$ と $\{(P_{Ki}+2F, \Delta S_{Ri}): i=m+1, n\}$ に対して、 k 次の多項式近似を適用すると、下記の ΔS と P_K との関係式が得られる。

$$\Delta S_R = \sum_{i=0}^k a_{1i} (P_K + 2F)^i \dots\dots\dots (20)$$

ただし、 a_{1i} : 多項式近似で決まる定数

3.1.2 ΔS_H と (P_K+2F) の関係式

キスロール状態で測定された有限個の数列 $\{(P_{Ki}+2F, \Delta S_{Hi}): i=1, n\}$ に対して、 k 次の多項式近似を適用すると下記の ΔS と P_K との関係式が得られる。

$$\Delta S = \sum_{i=0}^k a_{2i} (P_K + 2F)^i \dots\dots\dots (21)$$

ただし、 a_{2i} : 多項式近似で決まる定数

次に、(2), (20)式を用いると、 ΔS_H と P_K 関係式は下式となる。

$$\Delta S_H = \sum_{i=0}^k (a_{2i} - a_{1i}) (P_K + 2F)^i \dots\dots\dots (22)$$

ここで、(22)式は、板材からの反力 P とベンダ力 F が WR に作用したときのハウジングの変形量を与える式と見なせることから、ハウジング変形量 Y_H のモデル式は下式となる。

$$Y_H = \sum_{i=0}^k (a_{2i} - a_{1i}) (P + 2F)^i \dots\dots\dots (23)$$

3.2 圧延時のロール変形

圧延時のロール変形 Y_R は、(24)式で表される。この式を用いると、出側板クラウン量 C_h は(25)式で与えられる。

$$Y_R(x) = y_{BR}(x) + a_B(x) + a_P(x) \dots\dots\dots (24)$$

ただし、 y_{BR} : BUR の撓み量、 a_B : BUR と WR 間の扁平量、 a_P : WR と板材間の扁平量

$$C_h = 2(Y_R(0) - (Y_R(-x_E) + Y_R(x_E))/2) + C_W(-\delta) - (C_W(-x_E - \delta) + C_W(x_E - \delta))/2 \dots\dots\dots (25)$$

ただし、 x_E : 板幅端部の板厚定義

以下では、下記の (条件9) ~ (条件18) を用いて Y_R の算出式を導出し、出側板クラウン量 C_h とゲージメータモデルにおける板幅中央部のロール変形量 $Y_R(0)$ の予測モデルを定式化する。

(条件9) 板材の入出側板厚分布 H, h

$$\left. \begin{aligned} H(x) &= H_0 - C_H \cdot (x/x_E)^2 \\ h(x) &= h_0 - C_h \cdot (x/x_E)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

ただし、 H_0 : 板幅中央の入側板厚、 C_H : 入側板クラウン量、 h_0 : 板幅中央の出側板厚

(条件10) 板材と WR 間の面圧分布 q_{WP}

板材の板幅方向位置で、圧下力関数 Q_p として志田の式⁴⁾、接触弧長 L_d としてヒッチコックの式⁵⁾ が成り立つものとする。さらに、圧延時の板幅方向の伸び歪差に起因した板材内部に生じる圧延方向の応力分布 σ として河野らの式⁶⁾ を用いると q_{WP} は(27)式となる。

$$q_{WP}(x) = Q_p(x) \cdot L_d(x) \cdot (k_f - \sigma(x)) \dots\dots\dots (27)$$

ただし、 $\sigma(x) = \xi \cdot E_p (h(x)/h_0 - H(x)/H_0)^2 + \sigma_0$

$$Q_p(x) = 0.8 + (0.04 + 0.45(H(x) - h(x))/H(x))$$

$$\cdot (\sqrt{R/H(x)} - 0.5)$$

$$L_d(x) = \sqrt{(H(x) - h(x)) \cdot R}$$

$$R = D_w/2 \cdot (1 + 16(1 - \nu_w)/(\pi \cdot E_w) \cdot P/(B \cdot (H(x) - h(x))))$$

k_f : 板材の変形抵抗、

ξ : 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、 P : 圧延荷重、

σ_0 : 内部応力分布の釣合い条件から決まる定数

(条件11) 内部応力分布 σ と板材と WR 間の面圧分布 q_{WP} の釣り合い条件

$$\left. \begin{aligned} \int_{-B/2}^{B/2} \sigma(x) \cdot h(x) dx &= 0 \\ \int_{-B/2}^{B/2} q_{WP}(x) dx &= P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

ただし、 B : 板幅

(条件12) 圧延時の WR と BUR 間の面圧分布 q_{WB}

荷重分布 q_{WB} の分布を x の5次式とする。

$$q_{WB}(x) = q_{WB0} + q_{WB1}x + q_{WB2}x^2 + q_{WB3}x^3 + q_{WB4}x^4 + q_{WB5}x^5 \dots\dots (29)$$

ただし、 $q_{WB0} \sim q_{WB5}$: 未知数

(条件13) WR の撓み量 y_{WR}

WR のシフト時には、WR の作用する面圧分布 q_{WP} 、 q_{WB} による撓みに加え、ベンダ力 F とシフト量 δ のモーメント $F \cdot \delta$ による撓みが生じることから y_{WR} は(30)式となる。

$$y_{WR}(x, \delta) = \int_{-B/2}^{B/2} \alpha_W(x - \delta, \xi) q_{WP}(\xi) d\xi - \int_{-L_n/2}^{L_n/2} \alpha_W(x - \delta, \xi) q_{WB}(\xi) d\xi + \alpha_F(x - \delta) \cdot F \cdot \delta \dots\dots\dots (30)$$

ただし、 α_F : ベンダ力とシフト量によるモーメントが作用したときの WR の撓みの影響係数

(条件14) BUR撓み量 y_{BR}

$$y_{BR}(x) = \int_{-L_B/2}^{L_B/2} \alpha_B(x, \xi) q_{WB}(\xi) d\xi \dots\dots\dots(31)$$

(条件15) WR-BUR間の扁平量 a_B

a_B は、キスロール状態の場合と同様にして下式のように表すことができる。

$$a_B(x) = k_{WB} \cdot q_{WP}(x) \dots\dots\dots(32)$$

(条件16) 板材-WR間の扁平量 a_P

a_P は、(33)式に示す中島らによる修正戸澤の式⁷⁾で表す。

$$a_P(x) = (1 - v_W^2) / (\pi \cdot E_W) \cdot \int_0^{l_d} \int_{-B/2}^{B/2} \left(1 / \sqrt{(x - \eta)^2 + \tau^2} - 1 / \sqrt{(x - \eta)^2 + d} \right) (q_{WP}(\eta) / l_d) d\eta d\tau \dots\dots\dots(33)$$

ただし、 $l_d = \sqrt{(D_W/2)(H_0 - h_0)}$ 、 $d = (D_W/e)^2$ 、

e ：自然対数の底

(条件17) WR-BUR間の表面変位の適合条件

WR-BUR間の表面変位の適合条件は、WRのシフト量 δ を考慮してWR-BUR間のBUR表面変位とWR表面変位が等しいと置くことにより下式となる。

$$y_{BR}(x) - y_{WR}(x, \delta) + a_B(x) + ((x - \delta) / A_W - 0.5) Y_{WR1} - ((x - \delta) / A_W - 0.5) Y_{WR2} = (C_B(x) + C_W(x - \delta)) / 2 \dots\dots\dots(34)$$

ただし、 Y_{WR1} 、 Y_{WR2} ：左右のWRチョックの変位

(条件18) BURの力とモーメントの釣り合い条件

$$\left. \begin{aligned} \int_{-L_B/2}^{L_B/2} q_{WB}(x) dx &= P + 2F \\ \int_{-L_B/2}^{L_B/2} q_{WB}(x) x dx &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(35)$$

3.2.1 板材とWR間の面圧分布 q_{WP} の算出式

(27)式の k_f と σ_0 は、(28)式を用いると消去できる。次いで、(27)式に(26)式を代入後 $C_H=0$ 、 $C_h=0$ のまわりでべき級数展開し2次以上の項を省略すると q_{WP} は下式で表すことができる。

$$q_{WP}(x) = z_0 \cdot P + z_1(x) \cdot C_H + z_2(x) \cdot C_h + z_3(x) \cdot P \cdot C_H + z_4(x) \cdot P \cdot C_h \dots\dots\dots(36)$$

ただし、 z_0 ：既知関数、 $z_1 \sim z_4$ ： x の既知関数

3.2.2 WRとBUR間の荷重分布 q_{WB} の算出式

(35)式を用いて(29)式の q_{WB0} と q_{WB1} を消去すると、 q_{WB} は下式で表すことができる。

$$q_{WB}(x) = s_0 \cdot P + s_1 \cdot F + s_2(x) \cdot q_{WB2} + s_3(x) \cdot q_{WB3} + s_4(x) \cdot q_{WB4} + s_5(x) \cdot q_{WB5} \dots\dots\dots(37)$$

ただし、 s_0, s_1 ：既知関数、 $s_1 \sim s_5$ ： x の既知関数

(34)、(30)、(32)式に(36)、(37)式を代入すると y_{BR} 、 a_B 、 y_{WR} は下式のように整理できる。

$$y_{BR}(x) = t_0(x) \cdot P + t_1(x) \cdot F + t_2(x) \cdot q_{WB2} + t_3(x) \cdot q_{WB3} + t_4(x) \cdot q_{WB4} + t_5(x) \cdot q_{WB5} \dots\dots\dots(38)$$

$$a_B(x) = a_0 \cdot P + a_1 \cdot F + a_2(x) \cdot q_{WB2} + a_3(x) \cdot q_{WB3} + a_4(x) \cdot q_{WB4} + a_5(x) \cdot q_{WB5} \dots\dots\dots(39)$$

$$y_{WR}(x, \delta) = u_0(x, \delta) \cdot P + u_1(x, \delta) \cdot F + u_2(x, \delta) \cdot q_{WB2} + u_3(x, \delta) \cdot q_{WB3} + u_4(x, \delta) \cdot q_{WB4} + u_5(x, \delta) \cdot q_{WB5} + u_6(x, \delta) \cdot C_H + u_7(x, \delta) \cdot C_h + u_8(x, \delta) \cdot C_H \cdot P + u_9(x, \delta) \cdot C_h \cdot P \dots\dots\dots(40)$$

ただし、 $t_0 \sim t_5$ ： x の既知関数、 a_0, a_1 ：既知関数、

$a_2 \sim a_5$ ： x の既知関数、 $u_0 \sim u_9$ ： x と δ の既知関数

これらの式をWR-BUR間の表面変位の適合条件を与える(34)式に代入し、得られた適合条件式がキスロール状態の場合と同様にして $-L_B/2 \leq x_1 < x_2 < x_3 < x_4 < x_5 < x_6 \leq L_B/2$ となる各 x 位置で成り立つとすると、 $\{q_{WB2} \sim q_{WB5}, y_{WB1}, y_{WB2}\}$ を未知数とする6元連立方程式が得られる。

この連立方程式を解いて(37)式の未知数 $\{q_{WB2} \sim q_{WB5}\}$ を求め、これらを整理すると下式となる。

$$q_{WB_i} = q_{i0}(x, \delta) \cdot P + q_{i1}(x, \delta) \cdot F + q_{i2}(x, \delta) \cdot C_H + q_{i3}(x, \delta) \cdot C_h + q_{i4}(x, \delta) \cdot C_H \cdot P + q_{i5}(x, \delta) \cdot C_h \cdot P \dots\dots\dots(41)$$

ただし、 $q_{i0} \sim q_{i5}$ ： x と δ の既知関数、 $i = -2 \sim 5$

3.2.3 ロール変形量 Y_R の算出式

y_{BR} 、 a_B は(41)式を(38)、(39)式に代入することで容易に求めることができる。一方、(33)式の a_P は(36)式を代入すると下式となる。

$$a_P(x) = v_0 \cdot P + v_1(x) \cdot C_H + v_2(x) \cdot C_h + v_3(x) \cdot P \cdot C_H + v_4(x) \cdot P \cdot C_h \dots\dots\dots(42)$$

ただし、 v_0 ：既知関数、 $v_1 \sim v_4$ ： x の既知関数

こうして求めた y_{BR} 、 a_B 、 a_P を(24)式の右辺に代入することにより、 Y_R は下式となる。

$$Y_R(x) = w_0(x, \delta) + w_1(x, \delta) \cdot P + w_2 \cdot F + w_3(x, \delta) \cdot C_H + w_4(x, \delta) \cdot C_h + w_5(x, \delta) \cdot C_H \cdot P + w_6(x, \delta) \cdot C_h \cdot P \dots\dots\dots(43)$$

ただし、 $w_0 \sim w_6$ ： x と δ の既知関数

3.2.4 出側板クラウン量 C_h 、板幅中央部のロール変形量 $Y_R(0)$ の簡易予測モデル

(43)式に $x = -x_E$ 、 $x = 0$ 、 $x = x_E$ をそれぞれ代入する。次に、これらの式を(25)式の右辺に代入し、 C_h について解くことにより、出側板クラウン量は下式のように定式化できる。

$$C_h = (f_0(\delta) + f_1(\delta) \cdot P + f_2(\delta) \cdot F + f_3(\delta) \cdot C_H$$

$$+f_4(\delta) \cdot C_H \cdot P / (f_5(\delta) + f_6(\delta) \cdot P) \dots\dots\dots(44)$$

ただし、 $f_0 \sim f_6$: δ の既知関数

さらに、(44)式を(43)式に代入し、 $x=0$ と置くことにより板幅中央部のロール変形量は下式のように定式化できる。

$$Y_R(0) = f_7(\delta) + f_8(\delta) \cdot P + f_9(\delta) \cdot F + f_{10}(\delta) \cdot C_H + f_{11}(\delta) \cdot C_H \cdot P \\ + \{f_{12}(\delta) + f_{13}(\delta) \cdot P + f_{14}(\delta) \cdot F + f_{15}(\delta) \cdot C_H + f_{16}(\delta) \cdot C_H \cdot P \\ + f_{17}(\delta) \cdot P^2 + f_{18}(\delta) \cdot F \cdot P + f_{19}(\delta) \cdot C_H \cdot P^2\} / (f_5(\delta) + f_6(\delta) \cdot P) \dots\dots\dots(45)$$

ただし、 $f_7 \sim f_{19}$: δ の既知関数

4. 簡易予測モデルの精度検証と考察

(23)式のハウジング変形量予測モデルの導出に用いる有限個の数列 $\{(P_{Ki} + 2F, \Delta S_{Ri}) : i=1, n\}$ の計算では、数列の要素毎に9元連立方程式を構成し、その求解をおこなう必要がある。連立方程式の係数 ($L_{WC} \leq L_W$ の場合は $\Phi_0, \Phi_2 \sim \Phi_7, \Psi_0, \Psi_2, \Psi_4, \Psi_6, \Psi_7, L_{WC} = L_W$ の場合は $\Phi_0 \sim \Phi_5, \Phi_6', \Phi_7', \Psi_0, \Psi_2, \Psi_4, \Psi_6', \Psi_7'$) については、前述した手順に従えば、容易に数式で表現できる。さらに、連立方程式の次元は高々9元であり、求める解は、 $L_{WC} \leq L_W$ の場合、 $\Delta S_R, q_{w2}, q_{w4}$ の3個 ($L_{WC} = L_W$ の場合は ΔS_R の1個) であることから、多少複雑になるもののこれらの解を数式で表現することができる。また、(44), (45)式の板クラウン量と板幅中央部のロール変形量の各予測モデルについても、ハウジング変形量予測モデルと同様に、6元連立方程式の係数とその解を数式化でき、それらによりモデル式の係数 $f_0 \sim f_{19}$ も数式で表現がすることができる。こうしたことから、今回の簡易予測モデルでは、1連の数式を単に計算するだけであることから、分割モデルのようにBURとWR間の面圧分布等の収束計算が不要であり、計算時間が短くなりオンラインへの適用が可能になる。

以下では、新たに構築した簡易予測モデルについて、分割モデルによる計算値および実機圧延データとの比較を行うことで精度を検証した結果を示す。

4.1 分割モデルとの比較

分割モデルとの精度比較は、Table 1に示すWRSミルのロール諸元の下で行なった。WRのプロフィールは、同表に示すように、上下左右非対称な形状とした。

キスロール状態でのロール変形によるBURチョックの変位 ΔS_R について、簡易予測モデルと分割モデルによる計算値の比較をFig. 2に示す。図中のSimplified modelは簡易予測モデル、Point matching method⁸⁾は分割モデルを示しており、キスロール荷重によらず簡易予測モデルによる ΔS_R は分割モデルのそれと良く一致している。

キスロール荷重が小さく上下WR間の接触長がWR胴長

Table. 1. Specification of work roll and back up roll for calculation.

Back up roll	$A_B = 5900\text{mm}, L_B = 4600\text{mm}$ $D_B = 2000\text{mm}, d_B = 1370\text{mm}$ $C_B(x) = 0.1\sin(\pi(0.5 - x/L_B))$
Work roll	$A_W = 5900\text{mm}, L_W = 4700\text{mm}$ $D_W = 1000\text{mm}, d_W = 685\text{mm}$ Top roll: $C_W(x) = 0.60\cos(\pi x/L_W) - 0.66\sin(2\pi x/L_W)$ Bottom roll: $C_W(x) = 0.66\sin(2\pi x/L_W) - 0.60\cos(-\pi x/L_W)$

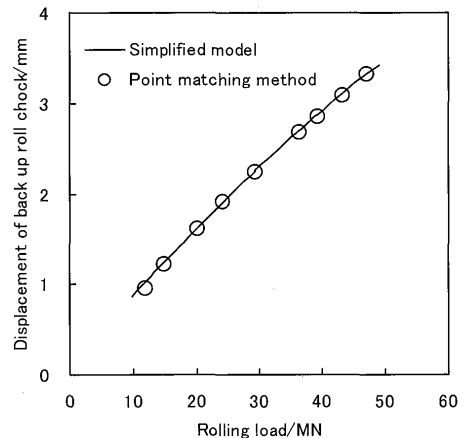


Fig. 2. Comparison of calculated displacement of back up roll chock with point matching method and simplified model of roll deformation in kiss roll state.

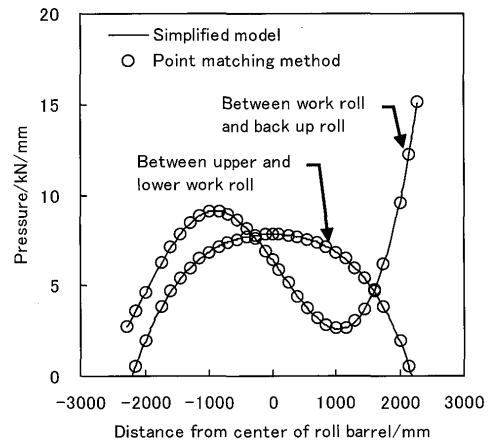


Fig. 3. Comparison of calculated pressure distribution in case of $L_{WC} < L_W$ with point matching method and simplified model of roll deformation in kiss roll state.

よりも短い場合と、逆にキスロール荷重が大きく上下のWR同士が全胴長で接触している場合について、上下WR間とWR-BUR間に生じる面圧分布を比較した結果をそれぞれFig. 3, Fig. 4に示す。簡易予測モデルによる面圧分布は、上下WR間の接触長によらず分割モデルによるそれとよく一致していることがわかる。このように、WRプロフィールに応じてWRとBURに作用する面圧分布が正しく

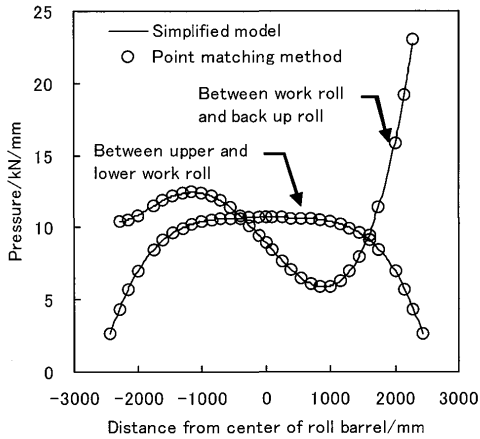


Fig. 4. Comparison of calculated pressure distribution in case of $L_{WC}=L_W$ with point matching method and simplified model of roll deformation in kiss roll state.

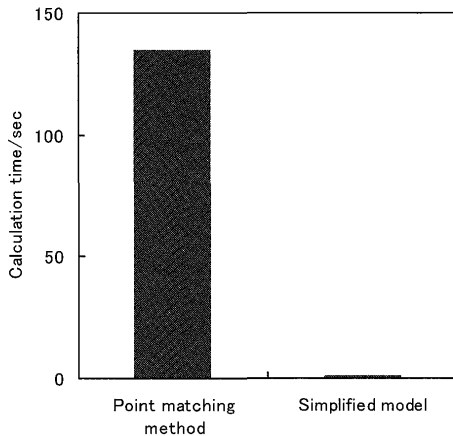


Fig. 5. Comparison of calculation time with point matching method and simplified model of roll deformation in kiss roll state (CPU frequency 500 MHz).

算定されていることから、簡易予測モデルによるBURショックの変位 ΔS_R の予測精度が確保されているものと推察される。また、前掲のFig. 2に示した9点のプロットについて、簡易予測モデルによる計算時間と分割モデルのそれを比較した結果は、Fig. 5に示すとおりであり、簡易予測モデルは1s未満で計算が完了している。WR交換後、キスロール状態の圧延機の変形量を計測してから20~30秒後には1本目の板材の圧延を開始することを考慮すれば、簡易予測モデルは計算処理の面からも十分な速度を有していると推察される。

次に、出側板クラウン量 C_h と板幅中央部におけるロール変形量 $Y_R(0)$ の簡易予測モデルの予測精度をFig. 6, Fig. 7に示す。ロール諸元は、キスロール状態の場合と同じものを採用した。Fig. 6は、WRシフト量を一定($\delta=100$ mm)にしてWRベンダ力を変えたときの C_h と $Y_R(0)$ の予測精度を示しているが、分割モデルと良く一致している。また、 $Y_R(0)$ は、ベンダ力の影響をほとんど受けていない。一方、WRシフト量を変えたとき($\delta=+150$ mmおよび -150 mm)

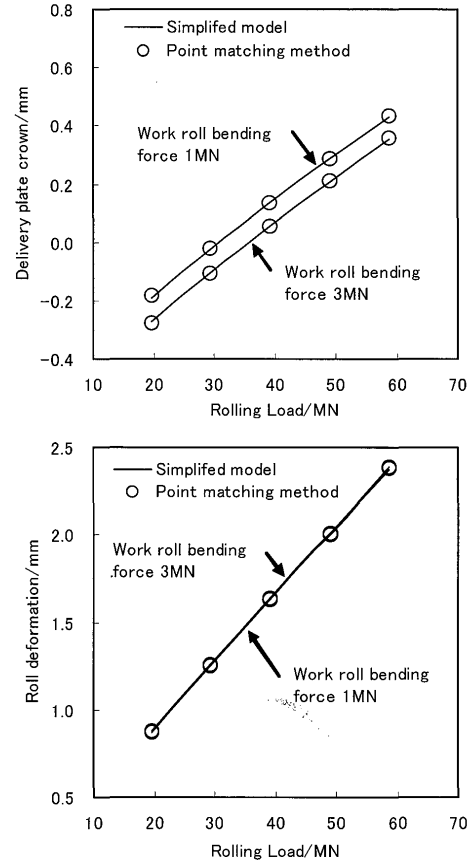


Fig. 6. Comparison of calculated delivery plate crown and roll deformation at center of rolled plate width in case of work roll shift position 100 mm with point matching method and simplified models of plate crown and roll deformation in plate rolling (rolled plate size: 15 mm \times 3000 mm).

の C_h と $Y_R(0)$ の予測精度をFig. 7に示しているが、この場合も分割モデルと良く一致していることがわかる。また、WRシフトにともなうWRクラウン量の変化によって、 C_h と $Y_R(0)$ のいずれにも、WRシフト量による差が生じている。

キスロール状態の場合と同様に、簡易予測モデルが分割モデルと良好な対応を示すことを検証するために、圧延時の板材とWR間およびWRとBUR間の面圧分布の比較をおこなった。Fig. 8, Fig. 9に結果を示す。WRシフト量や圧延荷重によらず、板材とWR間およびWRとBUR間の面圧分布は板幅端部やロール胴端部の近傍を除く大部分の領域で一致しており、簡易予測モデルが分割モデルと同等の予測精度を有していることが明らかである。さらに、出側板クラウン量と板幅中央部のロール変形量の計算時間は、Fig. 10に示すように極めて短くなっており、簡易予測モデルを用いたときの計算処理速度は、実圧延における5~10秒程度の板材間やパス間時間でのパススケジュールの設定やミルセッティングに十分対応できることがわかる。

4.2 実機データとの比較

実機データにより、新たに定式化したハウジング変形量 Y_H 、出側板クラウン量 C_h および板幅中央部におけるロー

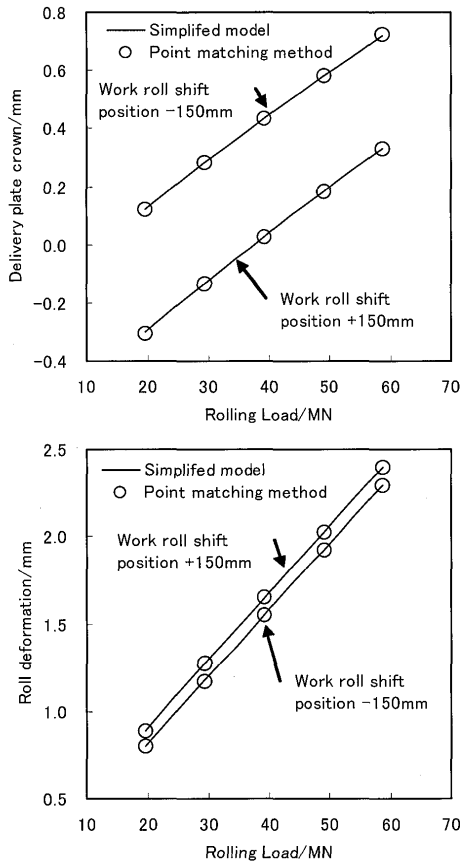


Fig. 7. Comparison of calculated delivery plate crown and roll deformation at center of rolled plate width in case of work roll bending force 2MN with point matching method and simplified models of plate crown and roll deformation in plate rolling (rolled plate size: 15 mm×3000 mm).

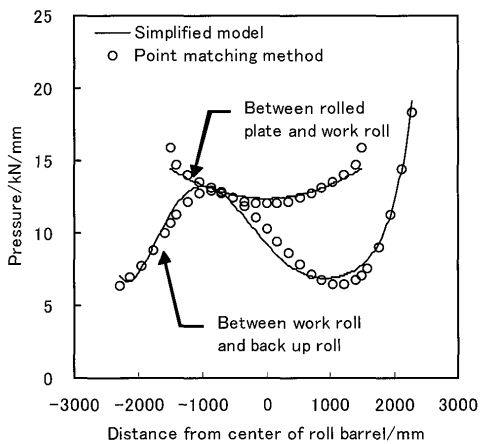


Fig. 8. Comparison of calculated pressure distribution in case of work roll shift position -150 mm with point matching method and simplified models of plate crown and roll deformation in plate rolling.

ル変形量 $Y_R(0)$ の簡易予測モデルを構成要素とする (1) 式の精度を調査した。この際、出側板クラウン量 C_h は板幅中央と板幅端部から 100 mm の位置の板厚差、ゲージメータ板厚 h_E は板幅端部から 100 mm の位置の板厚とした。

WR 交換後 1 本目の板材を圧延する前に、キスロール状態で全ミル伸び量 (BUR チョックの変位 ΔS とキスロール

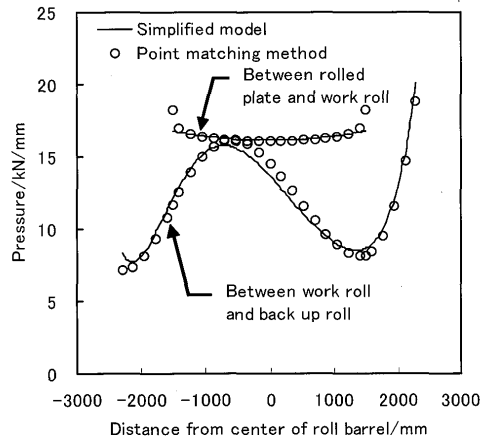


Fig. 9. Comparison of calculated pressure distribution in case of work roll shift position +100 mm with point matching method and simplified models of plate crown and roll deformation in plate rolling.

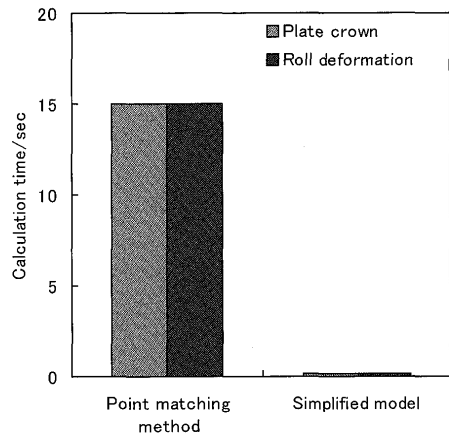


Fig. 10. Comparison of calculation time with point matching method and simplified models of plate crown and roll deformation in plate rolling (CPU frequency 500MHz).

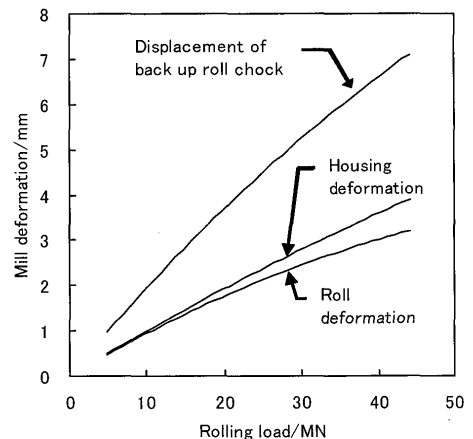


Fig. 11. Relation of displacement of back up roll, roll deformation and housing deformation.

荷重 (P_K+2F) を測定するとともに、計測されたキスロール荷重 (P_K+2F) に対して、前述の 3・1・1 項の方法にて BUR チョックの変位 ΔS_R を算定した。これらの値と (20)~(23) 式を用いてハウジング変形量 Y_H の簡易予測モデ

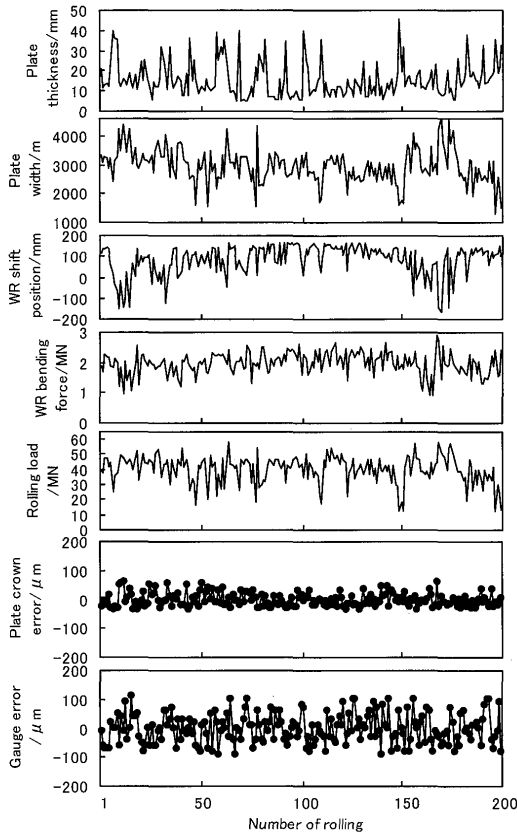


Fig. 12. Accuracy of simplified models of plate crown and gauge meter.

を求めた。ここで、各多項式の次数はいずれも2次 ($k=2$)とした。キスロール状態における ΔS , ΔS_R , Y_H の関係を Fig.11 に示す。ハウジング変形量は、全ミル伸び量の約 1/2 になっていることがわかる。

WR 交換から 200 本の板材を圧延したときの出側板クラウン量 C_h とゲージメータ板厚 h_E の予測精度を Fig.12 に示す。ここで、ゲージメータに含まれる WR クラウン量と BUR クラウン量については、これまでの 4Hi ミルに用いてきたサーマルと磨耗のプロファイル予測モデル^{9,10}を WR シフト用に改造したモデルによって求めている。また、出側板クラウン量 C_h とゲージメータ板厚 h_E の実測値は、WRS ミルの後方に設置されている 3ヘッド γ 線板厚計で測定した。板材の板厚、板幅、圧延荷重、WR ベンダ力および WRS シフト量が大幅に変動しているにもかかわらず、出側板クラウン量 C_h とゲージメータ板厚 h_E の予測誤差はそれぞれ $\pm 75 \mu\text{m}$, $\pm 120 \mu\text{m}$, 以内に収まっており、新たに定式化した簡易予測モデルは、WRS ミルへの適用が可能であることが明らかである。

5. おわりに

WRS ミルにおいて板厚・板クラウン制御の高精度化を図るために、キスロールおよび板材の圧延時に生じる圧延機の力学的変形を正しく取り扱うことにより、オンライン

適用が可能な板厚・板クラウンの簡易予測モデルを開発した。

これらの簡易予測モデルは、分割モデルとの比較において、WR プロフィールに対し上下 WR 間、WR と BUR 間および WR と板材間の面圧分布がいずれも正しく算定されていることから、良好な予測精度を有していることを示した。また、実機データとの対応においても、板材サイズの変動や圧延荷重や WR シフト量等の圧延条件の変化に十分な追従性を示すことも明らかにした。

今後、WRS ミルの板厚・板クラウンの高精度化と良好な圧延形状の確保を図るために、新たに開発した簡易予測モデルをパススケジュールの設定とミルセッティングに活用していく予定である。

記号

h_E	: 板厚定義位置の出側板厚
h_C	: 板幅中央位置の出側板厚
C_h	: 出側板クラウン量
Y_H	: ハウジング変形量
Y_R	: ロール変形量
C_W, C_B	: WR クラウン量, BUR クラウン量
E	: 学習項
x	: 板幅方向位置 ($x=0$: 板幅中央)
S	: $x=0$ におけるロール間隙
δ	: WR シフト量
ΔS	: BUR チョックの変位
ΔS_R	: ロール変形による BUR チョックの変位
ΔS_H	: ハウジング変形による BUR チョックの変位
P_K	: キスロール状態での上下 WR 間の反力
F	: WR ベンダ力 (片チョック)
S_0	: $P_K=0$ のときのロール間隙
q_B, q_W	: キスロール状態での WR-BUR 間と上下 WR 間の面圧分布
$q_{B0} \sim q_{B5}$: (3) 式中の未知数
q_{W0}, q_{W2}, q_{W4}	: (4) 式中の未知数
y_B, y_W	: キスロール状態での BUR と WR の撓み量
L_B, A_B	: BUR の胴長, チョック間 (支点間) 距離
α_B, α_W	: 面圧分布が作用したときの曲げとせん断による BUR と WR の撓みの影響係数
a_{WB}, a_{WW}	: キスロール状態での WR-BUR 間と上下 WR 間の扁平量
a	: 上下ロール間の扁平量
q	: 単位幅当りの荷重
D_1, D_2	: 上下ロール径
E_1, E_2	: 上下ロールのヤング率
ν_1, ν_2	: 上下ロールのポアソン比
K_0, K_1	: (6) 式中の D_1, D_2 の既知関数
K_2	: (6) 式中の $D_1, D_2, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$ の既知関数
K_3	: (6) 式中の E_1, E_2, ν_1, ν_2 の既知関数
k_{WB}	: (7) 式中の定数
D_B, d_B	: BUR 径, BUR チョック径
E_B, ν_B	: BUR のヤング率, ポアソン比
D_W, d_W	: WR 径, WR チョック径
E_W, ν_W	: WR のヤング率, ポアソン比
k_{WW}	: (8) 式中の定数
L_W, A_W	: WR 胴長, WR チョック間 (支点間) 距離
L_{WC}	: 上下 WR 間の接触長
C_B, C_W	: BUR クラウン量, WR クラウン量
Y_{W1}, Y_{W2}	: 左右の WR チョックの変位
Δ_{WW}	: 上 WR 表面変位
$\Phi_0, \Phi_2 \sim \Phi_3$: (15) 式中の x の既知関数
Φ_6, Φ_7	: (15) 式中の L_{WC}, x の既知関数
Ψ_0, Ψ_2, Ψ_4	: (16) 式中の x の既知関数

Ψ_6, Ψ_7	: (16)式中の L_{WC} , x の既知関数
$x_1 \sim x_9$: x 方向の位置
Φ_1, Φ_6', Φ_7'	: (18)式中の x の既知関数
Ψ_6', Ψ_7'	: (19)式中の x の既知関数
a_1, a_2, a_i	: 多項式近似で決まる定数
P	: 板材からの反力 (圧延荷重)
Y_R	: 圧延時のロール変形
y_{BR}, y_{WR}	: 圧延時の BUR と WR の撓み量
a_B, a_p	: 圧延時の BUR-WR 間と WR-板材間の扁平量
x_E	: 板幅端部の板厚定義位置
H, h	: 入側板厚分布, 出側板厚分布
H_0, h_0	: 板幅中央の入側板厚, 出側板厚
C_H	: 入側板クラウン量
q_{WP}	: 板材-WR間の面圧分布
Q_P	: 圧下力関数
L_d	: 接触弧長
R	: (27)式中の $D_w, v_w, E_w, P, B, H, h$ の既知関数
σ	: 板材内部に生じる圧延方向の応力分布
k_f	: 板材の変形抵抗
ξ	: 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
σ_0	: 内部応力分布の釣合い条件から決まる定数
B	: 板幅
q_{WB}	: 圧延時の WR-BUR間の面圧分布
$q_{WB0} \sim q_{WB5}$: (29)式中の未知数
αF	: ベンダカとシフト量によるモーメントが作用したときの WR の撓みの影響係数
l_d	: (33)式中の D_w, H_0, h_0 の既知関数
d	: (33)式中の D_w, e の既知関数
e	: 自然対数の底
Y_{WR1}, Y_{WR2}	: 圧延時の左右の WR チョックの変位
z_0	: (36)式中の既知関数

$z_1 \sim z_4$: (36)式中の x の既知関数
s_0, s_1	: (37)式中の既知関数
$s_2 \sim s_5$: (37)式中の x の既知関数
$t_0 \sim t_5$: (38)式中の x の既知関数
a_0, a_1	: (39)式中の既知関数
$a_2 \sim a_5$: (39)式中の x の既知関数
$u_0 \sim u_9$: (40)式中の x と δ の既知関数
$q_{i0} \sim q_{i5}$: (41)式中の x と δ の既知関数
v_0	: (42)式中の既知関数
$v_1 \sim v_4$: (42)式中の x の既知関数
$w_0 \sim w_6$: (43)式中の x と δ の既知関数
$f_0 \sim f_6$: (44)式中の δ の既知関数
$f_7 \sim f_9$: (45)式中の δ の既知関数

文 献

- 1) 鈴木 弘: 圧延百話 圧延の理論と常識, 養賢堂, (2000), 137.
- 2) K.N.Shohet and N.A.Townsend: *J. Iron Steel Inst.*, **206** (1968), No. 11, 1088.
- 3) T.-T.Loo: *J. Appl. Mech.*, **25** (1958), No. 1, 122.
- 4) S.Shida: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **7** (1966), 424.
- 5) Ed. by J.H.Hitchcock, ASME, N.Y., (1935), 33.
- 6) 河野輝雄, 松田行雄, 桑山哲也: 第30回塑性加工連合講演会公演論文集, (1979), 115.
- 7) 中島浩衛, 松本絃美: 第24回塑性加工連合講演会公演論文集, (1973), 29.
- 8) S.Sida and K.Yasuda: Proc. Int. Conf. on Steel Rolling, ISIJ, Tokyo, 1, (1980), 532.
- 9) K.Ooe and Y.Morimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 793.
- 10) K.Ooe, Y.Morimoto, S.Kajiura, K.Higashi, K.Anraku and T.Fujino: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1993), 318.