

# 討16 非干渉制御による大形仕上圧延機自動厚み制御の開発

新日本製鐵(株) 君津製鐵所 遠山一郎、賀屋和昭、湯井勝彦、福谷和彦、平松洋之、野呂弘幸  
 // 第一技術研究所電子制御研究開発センター 川口忠雄(工博)

## 1. 緒言

水平ロール、及び垂直ロールの2方向からの同時圧下を主制御機能とする形鋼連続圧延設備では、水平ロールで圧延される部位(ウェブ)と垂直ロールで圧延される部位(フランジ)の厚みを自動的に、かつ同時に制御する場合において、ウェブとフランジが一体として圧延されるために、互いの厚み制御間に相互干渉が発生して、ウェブ、フランジ厚みを長手方向に互いに均一に制御することが困難であった。今回、この相互干渉による影響を除去し、製品の互いの長手方向寸法変動を防止し、圧延歩留りの向上を目的として、非干渉制御理論を適用した自動厚み制御(AGC)モデルを開発し、新日鐵君津製鐵所大形工場仕上圧延列の最終段ユニバーサル圧延機に導入した結果、良好な厚み制御が可能となったので、本システムの内容、及び装置構成、実機適用結果について報告する。

## 2. 非干渉制御によるAGCモデルの構築

### 2-1. 圧延現象モデル

図1に今回開発した非干渉型AGCを採用した、形鋼仕上圧延機の構成を示す。圧延機系モデルの主要部をなす圧延現象モデルは、帯鋼圧延理論としては充分研究が成されているが、形鋼圧延の理論モデルは、2方向からの同時圧延によるメタルフローの挙動が非常に複雑となり、未だ理論的に確立されていない。今回形鋼圧延でのAGC化を開発するに当たり、ウェブとフランジの圧延反力非干渉制御を導入した圧延制御モデルを構築する必要がある。圧延現象モデルは強度の非線形性を有しているが、一定の圧延条件近傍の微小変化については、モデルを線形近似可能として扱う。図2は、圧延反力非干渉を前提としたフランジ部の圧延反力と垂直ロール隙、フランジ出側厚みの関係を示したフランジ圧延現象モデルであり、フランジ出側厚みを垂直ロール反力の基準値における値と常に一致するように垂直ロール隙を制御することを意味するものである。図2において $\Delta h_F(i)$ がn回の制御で0になったとすると、最終的には、次に示すモデル式が得られる。

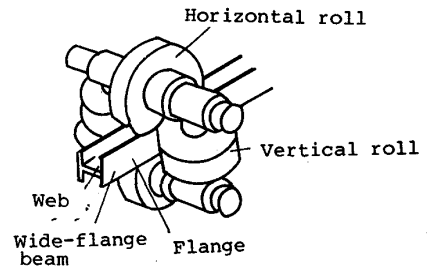


Fig.1 Roll configuration of universal rolling mill

$$\Delta S_F(n) = \frac{M_F + Q_F}{M_F \cdot Q_F} \cdot \{ P_F(n+1) - P_F(1) - \beta_{FW} \cdot (P_W(n+1) - P_W(1)) \} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta h_F(n) = \Delta h_F - \frac{M_F}{M_F + Q_F} \cdot \Delta S_F(n) \dots \dots \dots (2)$$

ウェブ部についても同様にして下記のモデル式が得られる。

$$\Delta S_W(n) = \frac{M_W + Q_W}{M_W \cdot Q_W} \cdot \{ P_W(n+1) - P_W(1) - \beta_{WF} \cdot (P_F(n+1) - P_F(1)) \} \dots \dots \dots (3)$$

$$\Delta h_W(n) = \Delta h_W - \frac{M_W}{M_W + Q_W} \cdot \Delta S_W(n) \dots \dots \dots (4)$$

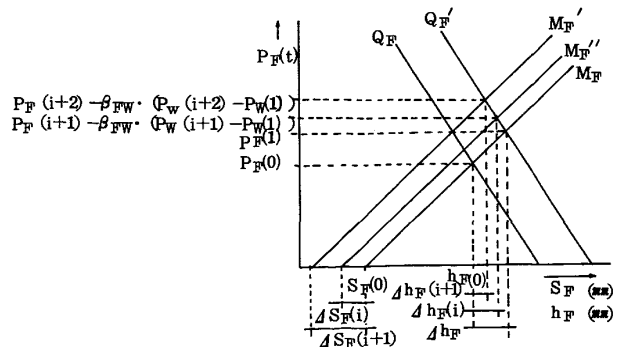


Fig.2 Model of rolling phenomena at flange

- ここで、 $\Delta SF$  ; 垂直ロール際制御量
- $\Delta SW$  ; 水平ロール際制御量
- $\Delta h_F$  ; フランジ出側厚み変化
- $\Delta h_W$  ; ウェブ出側厚み変化
- $M_F, M_F', M_F''$  ; 垂直ロールミル定数
- $M_W$  ; 水平ロールミル定数
- $Q_F, Q_F'$  ; フランジ部塑性係数
- $Q_W$  ; ウェブ部塑性係数
- $P_F$  ; フランジ圧延反力
- $P_W$  ; ウェブ圧延反力
- $\beta_{FW}$  ; ウェブの圧下によるフランジへの反力干渉係数
- $\beta_{WF}$  ; フランジの圧下によるウェブへの反力干渉係数

従って、ウェブ、及びフランジの同時圧下時の圧延反力を検出することにより、各々の制御量が決定できる。

2-2. 圧下制御系モデル

2-1項で得られた圧延現象モデルに対して、ウェブ、フランジ間の圧延反力非干渉制御系を導入した圧下制御モデルについて検討を行う。AGC方式には種々の方案が提示されているが、今回は被圧延材の長手方向温度変化による製品の厚み変動を防止することが目的であるので、通常帯鋼圧延にて採用されている一般的なゲージメータ式AGCを基本として採用した。

ウェブとフランジ間の相互干渉は、各々の圧延反力のロックオン値からの偏差により次式にて定義した。

$$\Delta P_W' \triangleq \Delta P_W - M_W \cdot \beta_{WF} \cdot \Delta P_F \dots\dots\dots (5) \quad , \quad \Delta P_F' \triangleq \Delta P_F - M_F \cdot \beta_{FW} \cdot \Delta P_W \dots\dots\dots (6)$$

従って、ウェブ、及びフランジの出側厚み変化は次式により求まる。

$$\Delta h_W = \frac{\Delta P_W'}{M_W} + \Delta S_W = \frac{\Delta P_W}{M_W} + \Delta S_W - \beta_{WF} \cdot \Delta P_F \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta h_F = \frac{\Delta P_F'}{M_F} + \Delta S_F = \frac{\Delta P_F}{M_F} + \Delta S_F - \beta_{FW} \cdot \Delta P_W \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\Delta P_W$  ; ウェブ、フランジ同時圧下時のウェブ圧延反力偏差

$\Delta P_F$  ; ウェブ、フランジ同時圧下時のフランジ圧延反力偏差

$\Delta P_W'$  ; ウェブ単独圧下に相当するウェブ圧延反力偏差

$\Delta P_F'$  ; フランジ単独圧下に相当するフランジ圧延反力偏差

(7)、(8)式より得られる出側厚み変化を0とするように水平ロール、及び垂直ロール際制御を行う。

(5)~(8)式より図3に示す圧下制御系モデルが構成される。図3において、 $\alpha_W, \alpha_F, G_{RF(W)}, G_{RF(F)}$ は、それぞれウェブ、及びフランジのチューニング率、及びAGCゲインを示す。

又、各定数の決定については、現場テストを繰り返し実施し、各種データ解析により決定した。表1に代表的圧延サイズのモデル定数を示す。これらの定数、及び、相互干渉係数等は、制御用計算機のメモリーにサイズ別データテーブルとして格納している。

Table 1 Numerical data of model

	Horizontal roll (web)	Vertical roll (flange)
Mill modulus (t/mm)	$M_W = 500$	$M_F = 300$
Plastic deformation coefficient (t/mm)	$Q_W = 170$	$Q_F = 115$
Time constant of screwdown motor (sec)	$T_W = 0.1$	$T_F = 0.1$
Tuning ratio	$\alpha_W = 0.9$	$\alpha_F = 0.9$
AGC gain	$G_{RF(W)} = 1.0$	$G_{RF(F)} = 1.0$

図3のAGCモデルにより、系の伝達関数行列を求める。状態変数( $x_i$ )、出力変数( $y_i$ )、入力変数( $u_i$ )を次のように定める。

- $x_1$ : 垂直ロール隙制御量偏差 ( $\Delta S_F$ )
- $x_2$ : 水平ロール隙制御量偏差 ( $\Delta S_W$ )
- $y_1$ : フランジ出側厚み変化 ( $\Delta h_F$ )
- $y_2$ : ウェブ出側厚み変化 ( $\Delta h_W$ )
- $u_1$ : フランジ圧延反力偏差 ( $\Delta P_F$ )
- $u_2$ : ウェブ圧延反力偏差 ( $\Delta P_W$ )

図3より外乱  $\Delta H_F$ ,  $\Delta H_W$  をそれぞれ0とすると次式が求まる。

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

ここで

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{G_F}{T_F} & 0 \\ 0 & -\frac{G_W}{T_W} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{G_F \cdot \alpha_F}{T_F \cdot M_F} & \frac{G_F \cdot \beta_{FW}}{T_F} \\ \frac{G_W \cdot \beta_{WF}}{T_W} & -\frac{G_W \cdot \alpha_W}{T_W \cdot M_W} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} \frac{M_F}{M_F + Q_F} & 0 \\ 0 & \frac{M_W}{M_W + Q_W} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$x = (x_1, x_2)^T, \quad y = (y_1, y_2)^T, \quad u = (u_1, u_2)^T \dots\dots\dots (11)$$

(9)~(11)式より、伝達関数行列は、(12)式となる。

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} \cdot B = \frac{1}{(s + \frac{G_F}{T_F}) \cdot (s + \frac{G_W}{T_W})} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{M_F + Q_F} \cdot \frac{G_W}{T_W} \cdot \frac{G_F \cdot \alpha_F}{T_F} & -\frac{M_F}{M_F + Q_F} \cdot \frac{G_W}{T_W} \cdot \frac{G_F \cdot \beta_{FW}}{T_F} \\ -\frac{M_W}{M_W + Q_W} \cdot \frac{G_F}{T_F} \cdot \frac{G_W \cdot \beta_{WF}}{T_W} & \frac{1}{M_W + Q_W} \cdot \frac{G_F}{T_F} \cdot \frac{G_W \cdot \alpha_W}{T_W} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

(12)式において、現場データの解析から反力干渉係数  $\beta_{FW}$  は  $\beta_{WF}$  に比較して、無視できる程小さいことが判明したので近似的に0としたが、対角要素以外の成分が0でないので、明らかにウェブとフランジの厚み制御に相互干渉が発生することがわかる。

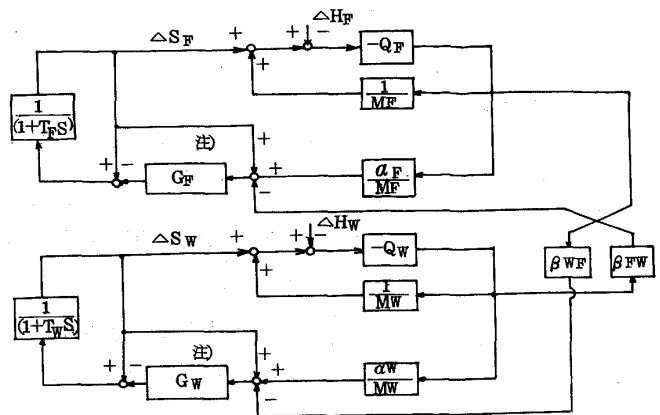
2-3. 非干渉AGCモデル

図3に示すAGCモデルに対して、非干渉化を行なうための制御法則として、次に示すような状態フィードバックを考える。

$$u = K \cdot x + L \cdot v \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $K \in R^{r \times n}$  はフィードバックの係数行列であり、 $L \in R^{m \times m}$  は入力  $u$  と新しい入力  $v$  との間の線形変換の係数行列である。

(13)式で示す行列  $L$ 、及び  $K$  の各要素を選定することにより、非干渉化が可能であり、かつシステムの応答性を改善するための極配置を行なうことが可能である。図3のAGCモデルを非干渉化した非干渉



$$G_F = \frac{M_F + \alpha_F \cdot Q_F}{M_F} \cdot G_{RF}(F)$$

$$G_W = \frac{M_W + \alpha_W \cdot Q_W}{M_W} \cdot G_{RF}(W)$$

Fig.3 AGC model

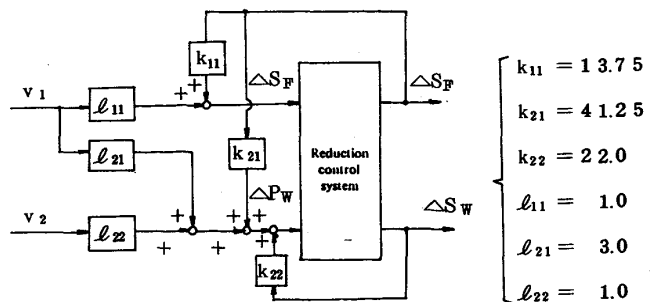


Fig.4 Decoupled AGC model

- $k_{11} = 13.75$
- $k_{21} = 41.25$
- $k_{22} = 22.0$
- $l_{11} = 1.0$
- $l_{21} = 3.0$
- $l_{22} = 1.0$

AGCモデルを図4に示す。

3. 実機適用結果

図4に示す非干渉AGCモデルを新日鐵君津製鐵所大形工場の仕上最終段ユニバーサル圧延機に導入し、圧延した結果について説明する。

図5は、非干渉AGCを使用しない通常圧延、及び非干渉AGCを使用した場合のウェブ、フランジの出側厚み変化のモデル式によるオンラインでのシミュレーション結果を示す。非干渉AGCを採用することにより、製品の長手方向温度降下(約10℃~30℃)に起因する長手方向の厚み変化が、ウェブでは160 $\mu m$ から100 $\mu m$ にフランジでは180 $\mu m$ から70 $\mu m$ にそれぞれ減少していることがわかり、非干渉AGC導入の有効性が確証された。

一方図6は、圧延された後の製品の長手方向に対するウェブ中央厚み及びフランジ中央厚みの実測値をプロットしたものである。

長手方向に対して、狙い厚からの厚み変動が、通常圧延に比較して非干渉AGCを使用することにより、ウェブでは、210 $\mu m$ から100 $\mu m$ にフランジでは220 $\mu m$ から90 $\mu m$ へと大幅に減少しており、かつ図5でのオンラインシミュレーション結果とほぼ一致していることがわかる。提示したデータは、ウェブ幅350 $mm$ 、フランジ幅175 $mm$ サイズであり、他の全サイズについても調整を完了し、良好な結果が得られている。

4. 結言

本システムは、1983年9月に実機導入を完了し、3ヶ月にわたって全サイズへの調整を完了した後、1984年1月より全サイズについて適用率100%で順調に稼動中であり、当初の目標を達成している。

(参考文献)

- (1). 福谷、川口；「大形仕上圧延機自動厚み制御の開発」  
計測自動制御学会技術報告23-10(1984).
- (2). 伊藤、木村、細江；「線形制御系の設計理論」  
計測自動制御学会(1983).
- (3). 多田隈、田中、田村、内藤；「非干渉制御理論を適用した循環電流制御法の検討」  
電気学会論文誌104-2(1984).
- (4). K. FUKUTANI, K. KAYA, T. KAWAGUCHI；「Development of Automatic Gauge Control using Decoupled Control for Universal Rolling Mills.」  
IEEE-IAS-85 Annual Meeting, Toronto, Canada (1985).

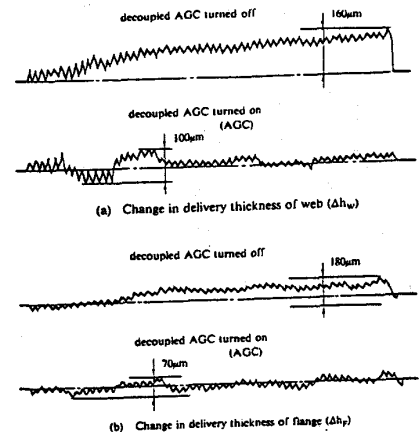


Fig.5 Thickness variation in longitudinal direction (as calculated by model equation)

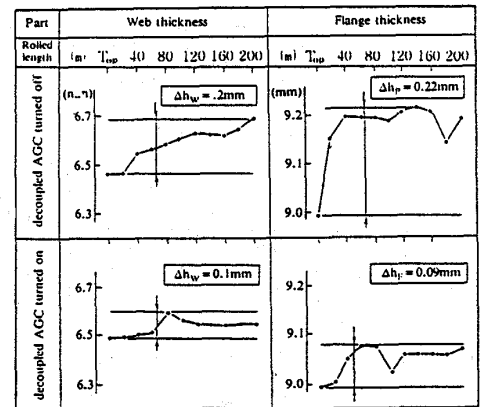


Fig.6 Thickness variation in longitudinal direction (measured)