

論 文

UDC 621.771.23 : 531.717.8

ホットストリップ粗圧延エッジセットアップモデル

芝原 隆*・美坂 佳助*²・河野 輝雄*
高力 満*³・竹本 裕*³

Edger Set-up Model at Roughing Train in Hot Strip Mill

Takashi SHIBAHARA, Yoshisuke MISAKA, Teruo KONO
Mitsuru KORIKI, and Hiroshi TAKEMOTO

Synopsis:

Width change in roughing train of a hot strip mill is investigated. Formulas by which width spread in vertical and horizontal rolling is predicted are derived according to a regression analysis using measured values on a production mill.

A new mathematical model for edger set-up is developed using above mentioned formulas. A feature of the new model is that it is practicable to adjust the roll opening at each edger depending on a given distribution pattern of width reduction at each stand.

The new set-up model has been applied to Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Ind., Ltd. since March 1979. Compared with the accuracy obtained by the conventional set-up method, width accuracy has been much improved by the present new model.

1. 緒 言

ホットストリップミルの粗ロール列においては垂直圧延(エッジング圧延)、水平圧延がくり返し行われ所定の板幅、板厚にして仕上げロール列に送られる。通常エッジング圧延を行えば圧延材の板幅端部が盛り上がり、いわゆるドッグボーン形状となる。この圧延材を水平圧延すれば板幅端部盛り上がり部のかなりの部分が再び幅方向に拡がり、その板幅変化の挙動は複雑である。近年、この板幅変化の挙動を数式化する試みがなされつつあるが¹⁾²⁾、実機圧延データを用いた解析例は少ない。本論文では、粗ロール列における実機圧延データを用いて、エッジング圧延・水平圧延における板幅変化の挙動について解析し、これに基づいて粗ロール列のエッジセットアップ数式モデルを開発し実機適用をはかった結果について報告する。

2. 熱延粗ロール列における板幅変化の挙動

2.1 エッジングを含む圧延における幅拡がりの考え方

2.1.1 圧延材の板幅変化の挙動と記号の説明

エッジングを含む圧延による圧延材の板幅変化の挙動

を Fig. 1 に示す。いま、板幅 W 、板厚 H 、長さ L の圧延材がエッジング圧延後板幅 W_E 、板厚 H_E 、長さ L_E になり、さらに水平圧延後板幅 w 、板厚 h 、長さ l になった状態について考える。エッジング圧延後生じた板幅

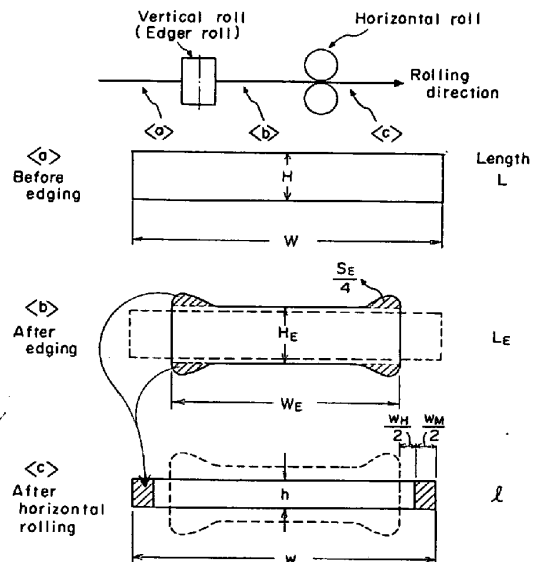


Fig. 1. Deformation of bar by edging and horizontal rolling.

昭和 56 年 3 月 20 日受付 (Received Mar. 20, 1981)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

端部盛り上がり部 (Fig. 1(b) の斜線で示す部分) の存在を考えない場合の水平圧延による幅拡がり量 (以後矩形断面幅拡がり量と称す) を w_H 、板幅端部盛り上がり部の水平圧延による幅拡がり量 (以後盛り上がり幅拡がり量と称す) を w_M とすれば、水平圧延後の板幅 w は次式で表される。

$$w = W_E + w_H + w_M \dots\dots\dots (1)$$

ここで、上記幅拡がり量 w_H, w_M の数式表現のために以下に示す3つのパラメータ c_H, c_E, c_M を定義する。ただし、 c_H は従来より矩形断面材を水平圧延した場合の幅拡がりの係数として定義されているものであるが^{3)~6)}、 c_E, c_M については本論文で新たに定義した。

(i) 矩形断面幅拡がり係数 c_H

$$c_H = \ln\left(\frac{W_E + w_H}{W_E}\right) / \ln\left(\frac{H_E}{h}\right) \dots\dots\dots (2)$$

(ii) エッジング圧延による増厚 (あるいは減厚) と盛り上がりの発生度合を示す係数 c_E

$$c_E = \ln\left\{\frac{H_E + (S_E/W_E)}{H}\right\} / \ln\left(\frac{W}{W_E}\right) \dots\dots\dots (3)$$

S_E : 板幅端部盛り上がり断面積

(iii) エッジング圧延による増厚 (あるいは減厚) 部分と盛り上がり部分に対する盛り上がり部分のみの比率を示す係数 c_M

$$c_M = \frac{S_E}{(H_E - H) W_E + S_E} \dots\dots\dots (4)$$

2.1.2 板幅変化の挙動の基本関係式とその解

Fig. 1 に示した圧延材の板幅変化の挙動を以下のように定式化する。まずエッジング圧延前後の圧延材の体積は不変であるから次式が成り立つ。

$$W \cdot H \cdot L = W_E \cdot H_E \cdot L_E + S_E \cdot L_E \dots\dots\dots (5)$$

また水平圧延前後の圧延材の体積は不変であるから板幅端部の盛り上がり部では(6)式が、それ以外の部分では(7)式が成り立つ。

$$S_E \cdot L_E = w_M \cdot h \cdot l \dots\dots\dots (6)$$

$$W_E \cdot H_E \cdot L_E = (W_E + w_H) \cdot h \cdot l \dots\dots\dots (7)$$

以上の(2)~(7)式を解けば次の(8)~(10)式が導かれる。(Appendix I 参照)

(i) エッジング圧延による板幅端部盛り上がり断面積

$$S_E = c_M \cdot \left\{ \left(\frac{W}{W_E} \right)^{c_E} - 1 \right\} \cdot H \cdot W_E \dots\dots\dots (8)$$

(ii) 矩形断面幅拡がり量

$$w_H = \left[\left(\frac{H}{h} \right)^{c_H} \cdot \left\{ c_M + (1 - c_M) \cdot \left(\frac{W}{W_E} \right)^{c_E} \right\}^{c_H - 1} \right] \cdot W_E \dots\dots\dots (9)$$

(iii) 盛り上がり幅拡がり量

$$w_M = c_M \cdot \left\{ \left(\frac{W}{W_E} \right)^{c_E} - 1 \right\} \cdot \left\{ c_M + (1 - c_M) \cdot \left(\frac{W}{W_E} \right)^{c_E} \right\}^{c_H - 1} \cdot \left(\frac{H}{h} \right)^{c_H} \cdot W_E \dots\dots\dots (10)$$

以上の結果からエッジングを含む水平圧延後の板幅 w の計算には係数 c_H, c_M, c_E の値が必要であることがわかる。

2.2 幅拡がり諸係数の推定

上記矩形断面幅拡がり量 w_H 、盛り上がり幅拡がり量 w_M は矩形断面幅拡がり係数 c_H 、盛り上がり幅拡がり係数 $c_{ME} (= c_M \cdot c_E)$ を用いれば近似的に次式となる。

(Appendix II 参照)

$$w_H = \left\{ (H/h)^{c_H} - 1 \right\} \cdot W_E \dots\dots\dots (11)$$

$$w_M = c_{ME} \cdot \Delta W \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 ΔW は幅殺し量であり $\Delta W = W - W_E$ で与えられる。

2.2.1 矩形断面幅拡がり係数 c_H の推定

Fig. 2 に示す鹿島製鉄所熱延粗ロール列において、各

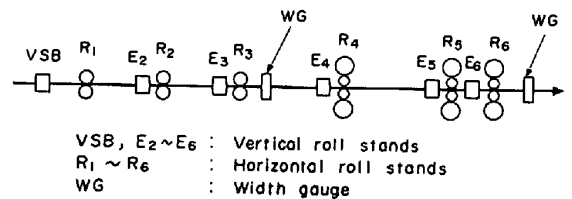


Fig. 2. Roughing stands at Kashima Steel Works.

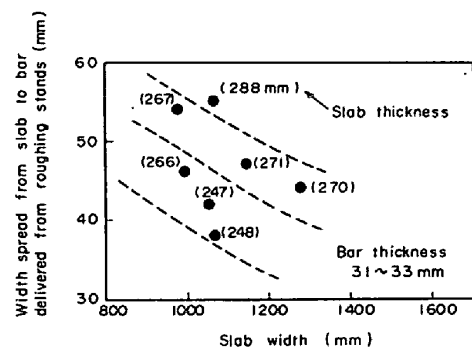


Fig. 3. Width spread by horizontal rolling without edging at roughing stands.

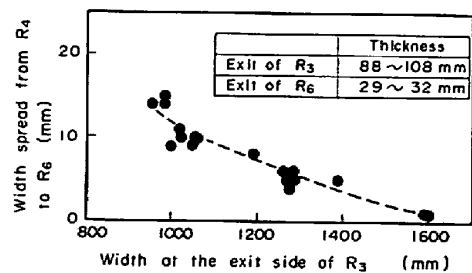


Fig. 4. Width spread from stand R_4 to stand R_6 .

エッジをフリーにして水平圧延のみを行い R₃ スタンド出側および R₆ スタンド出側の各幅計にて板幅を実測した。Fig. 3 にスラブ実測幅と粗ロール列出側実測幅との差から水平ロール6 スタンド合計の幅拡がり量を求めた結果を示すが、スラブ厚が厚く、スラブ幅が狭い程幅拡がり量が多いことがわかる。Fig. 4 は粗ロール列中間の幅計と出側の幅計を用いて R₄~R₆ スタンドの幅拡がり量を調べた結果を示す。Fig. 4 より後段スタンドでも板幅によつて幅拡がり量が相当異なることが明らかとなった。

Fig. 3 および Fig. 4 に示す実機圧延データを用いて、従来より提案されている矩形断面幅拡がり推定諸式^{3)~5)}の検討を行った。Fig. 3 に示す粗ロール列6 スタンドの合計の幅拡がり量の例について計算した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より各推定式とも板幅が狭いほど幅拡がり量が大きくなるという実態を傾向的にはよく表しているが、その絶対値は大幅に異なることがわかる。また Fig. 3 および Fig. 4 に示す実測幅拡がり量と従来の式を用いた計算幅拡がり量の比較を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より粗ロール列後段スタンドにおいても実測幅拡がり量と計算幅拡がり量が相当異なつてることがわかる。すなわち熱延粗ロール列において板幅変化の挙動を推定するには新たに精度のよい矩形断面幅拡がり式を導く必要がある。そこで、以下では Fig. 3 および Fig. 4 に示す実機圧延データを用いて c_H 式を回帰する。

矩形断面幅拡がり係数 c_H の回帰式を実機圧延データから作成する場合問題となるのは、1パス圧延の幅拡がりデータがなく数パスの累積幅拡がり量しか与えられないことである。このため以下で示す手法により c_H を回帰した。

(i) 初期値の設定

前記検討した従来の矩形断面幅拡がり式のうち、実機データに最も近い計算を与える EL-KALAY and SPARLING の式⁴⁾

$$w_H = \left\{ \left(\frac{H}{h} \right)^{c_H} - 1 \right\} \cdot W_E$$

$$c_H = 0.851 \cdot \exp \left\{ -1.766 \left(\frac{W_E}{H} \right)^{0.643} \cdot \left(\frac{H}{R} \right)^{0.386} \cdot \left(\frac{H}{\Delta h} \right)^{0.104} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

R : 水平ロール半径 W_E : 入側幅
 Δh : 圧下量 (Δh = H - h)

を用いて粗ロール列各水平ロール出側での板幅を計算する。

(ii) 1パス圧延での幅拡がりデータ作成

(mm)							
Slab	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
Thickness	271	221	156	98	61	4.4	32

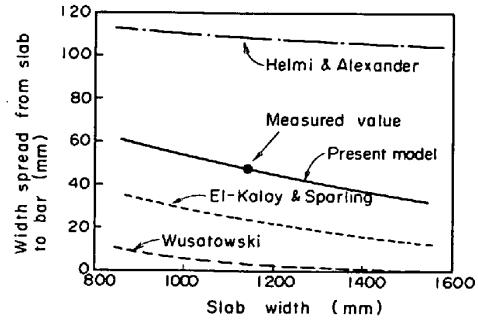


Fig. 5. Relationship between width spread and slab width.

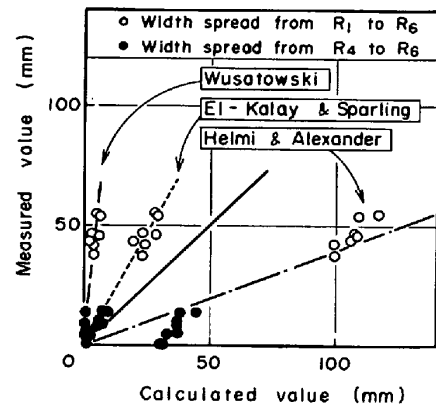


Fig. 6. Comparison of measured and calculated values of width spread at roughing stands.

上記(13)式から求めた計算幅拡がり量 w_{H1} (i: パス No, i=1~6) の6パス合計の値が6パス合計の実測幅拡がり量 w_{HA1-6} に等しくなるように各パスの幅拡がり量 w_{H_i} を各圧延材ごとに作成する。

$$w_{H1}^* = \frac{w_{HA1-6}}{\sum_{i=1}^6 w_{H1}} \cdot w_{H1} \quad (i=1 \sim 6) \dots \dots \dots (14)$$

また R₄~R₆ スタンド3パス合計の実測幅拡がり量 w_{HA4-6} を用いる場合には次式で計算する。

$$w_{H1}^* = \frac{w_{HA4-6}}{\sum_{i=4}^6 w_{H1}} \cdot w_{H1} \quad (i=4 \sim 6) \dots \dots \dots (15)$$

(iii) c_H 式 of 回帰

(14), (15)式を用いて作成したデータ w_{H1}^{*} をあたかもそれぞれの圧延材に対する各パス圧延後の実測データとみなして c_H の回帰を行う。

(iv) c_H くり返し計算

新しく回帰した c_H 式を初期値のかわりに用いて、c_H が収束するまで(ii), (iii)をくり返す。

このような手法にて得られた c_H 式を次式に示す。

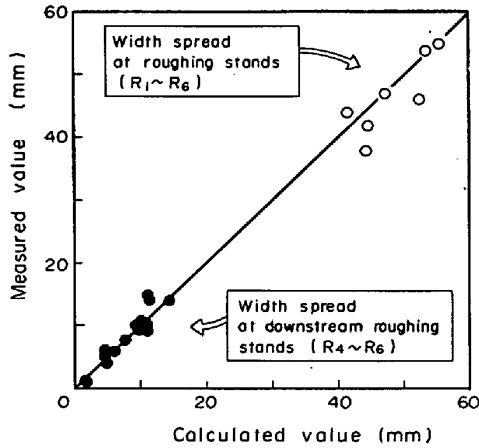


Fig. 7. Comparison of measured and calculated values of width spread at roughing stands.

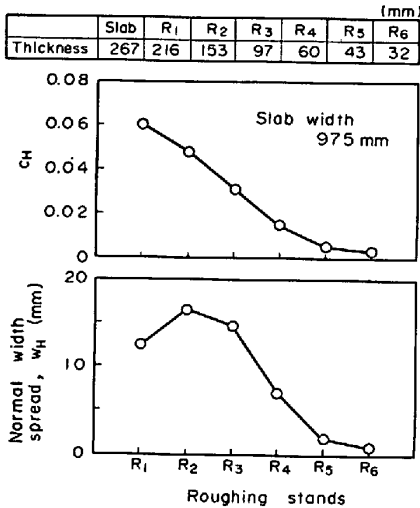


Fig. 8. Example of calculation for w_H at roughing stands.

$$c_H = \exp \left\{ -1.64 \left(\frac{W_E}{H} \right)^{0.376} \cdot \left(\frac{W_E}{ld} \right)^{0.016} \frac{W_E}{H} \cdot \left(\frac{H}{R} \right)^{0.015} \frac{W_E}{H} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

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

(11), (16)式を用いた矩形断面幅拡がり量 w_H の予測精度を Fig. 7 に示すが、粗ロール列 $R_1 \sim R_6$ 間および $R_4 \sim R_6$ 間で高い精度をもつ c_H 式が得られた。また、Fig. 8に粗ロール列において代表的なスケジュールでの c_H , w_H の計算例を示す。後段スタンドになるほど c_H の値は小さくなるが、これは後段スタンドになるほど入側厚が小さくなるためである、一方幅拡がり量 w_H は R_2 スタンドで大きくなつており、これは R_1 スタンドの場合に比較して R_2 で圧下率が大きい影響が c_H の影響よりも大きくでているためである。

2.2.2 盛り上がり幅拡がり係数 c_{ME} の推定

c_{ME} の推定に使用したデータはスラブ幅 750~1600

mm, スラブ厚 210~300mm, 粗ロール列出側板厚 29~32mm の範囲の粗ロール列実績データであり、圧延途中の板幅測定は Fig. 2 に示すように R_3 スタンド出側と R_6 スタンド出側の幅計で行つた。この場合データとして与えられるのは垂直・水平圧延それぞれ複数パス圧延での圧延前の板幅と圧延後の板幅であり、 c_{ME} 回帰にあたり必要な垂直・水平圧延の単独パスの幅拡がりデータがないことが問題となる。そこで、 c_H 式の回帰手法と類似の手法にて c_{ME} 式を回帰した。ただし c_H 式の回帰手法と異なる点は次のとおりである。

(i) c_{ME} の初期値としては、Table 1 の条件で鉛試験片を垂直・水平各1パス圧延して得られた次式⁶⁾を使用した。その精度を Fig. 9 に示す。

$$c_{ME} = 0.22 \left(\frac{W}{H} \right)^{0.18} \cdot \left(\frac{W}{\Delta W} \right)^{0.19} \dots \dots \dots (17)$$

(ii) R_3 および R_6 スタンド出側で計算幅と実測幅が一致するように c_{ME} 式を次式で補正して、1パス圧延時の盛り上がり幅拡がりデータを作成した。

$$c_{MEi}^* = \alpha \cdot c_{MEi} \quad (i=1 \sim 6)$$

α : 補正係数 (実際にはくり返し計算で各圧延材ごとに決定する。)

このような手法にて得られた c_{ME} 式を次式に示す。

Table 1. Experimental rolling with lead specimen.

Specimen	Thickness (mm)	5, 10, 20, 30
	Width (mm)	90, 120, 150
Diameter of edger roll (mm)		80
Diameter of horizontal roll (mm)		105
Width reduction (mm)		1~6
Fractional reduction at horizontal rolling (%)		10~30

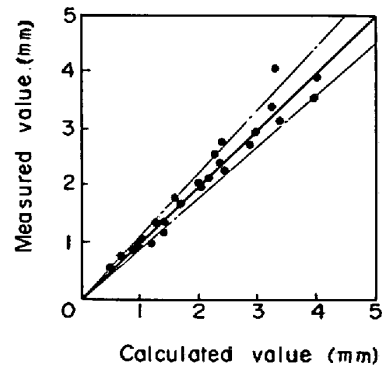


Fig. 9. Comparison of measured and calculated values of width spread, w_M . (Lead specimens)

$$c_{ME} = \exp \left\{ -1.877 \left(\frac{\Delta W}{W} \right)^{0.063} \left(\frac{H}{R_E} \right)^{0.441} \cdot \left(\frac{R_E}{W} \right)^{0.989} \left(\frac{W}{W_E} \right)^{7.591} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

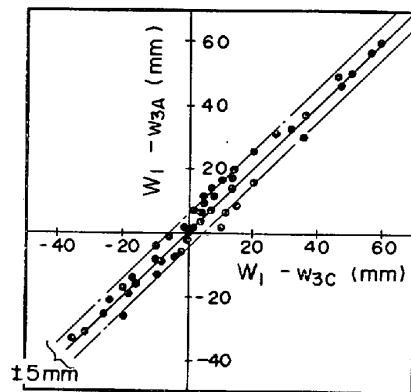
R_E : エッジロール半径

2.3 幅拡がり予測式の精度

(16), (18)式の幅拡がり係数を用いた場合の粗ロール列中間スタンド R_3 出側幅の予測精度と粗ロール列最終スタンド R_6 出側幅の予測精度を Fig. 10 および Fig. 11 に示す. R_3 出側幅についてはほぼ ± 5 mm, R_6 出側幅についてはほぼ ± 3 mm の予測精度が得られている.

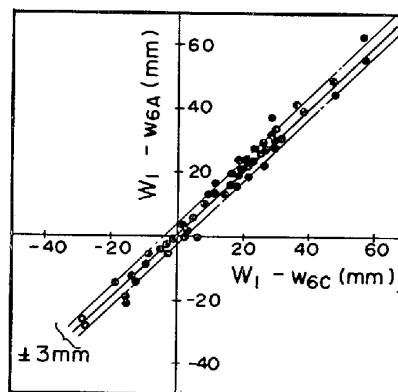
実機における実際の板幅変化の挙動をさらに詳しく調

査するため, 同一寸法, 同一加熱条件のスラブを Fig. 2 に示す粗ロール列において同一スケジュールで圧延し, R_3, E_4, R_4 スタンド出側でそれぞれ圧延材を圧延ラインから取り出し, 寸法測定を行つた. Photo. 1 に R_3, E_4, R_4 スタンド出側での圧延材断面形状サンプル写真を示す. エッジ E_4 出側では幅殺しによる板幅端部の盛り上がりが見られる. また R_4 スタンド出側では盛り上がりによる幅拡がりや矩形断面幅拡がりを生じ, E_4 出側に比較して R_4 出側で再び板幅が広がっていることがわかる. E_4 出側での盛り上がり形状を詳細に測定した結果を Fig. 12 に示す. E_4 出側で板幅端部の盛り上がりは上下面合わせて4ヶ所発生するが, Fig. 12 はこの4ヶ所の平均値を示している. E_4 での幅殺し量は



W_1 : Slab width
 w_{3A}, w_{3C} : Measured and calculated width at the exit side of stand R_3

Fig. 10. Accuracy of width prediction for upstream roughing stands.



W_1 : Slab width
 w_{6A}, w_{6C} : Measured and calculated width at the exit side of stand R_6

Fig. 11. Accuracy of width prediction for all roughing stands.

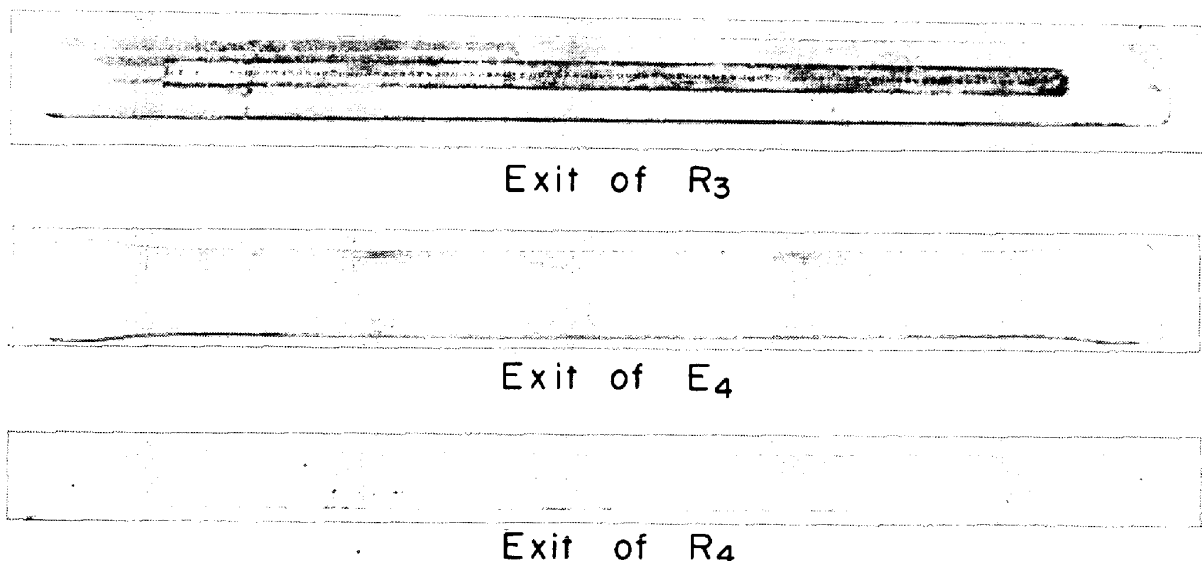


Photo. 1. Cross-profiles of rolled bars at the exit side of stand R_3, E_4 and R_4 .

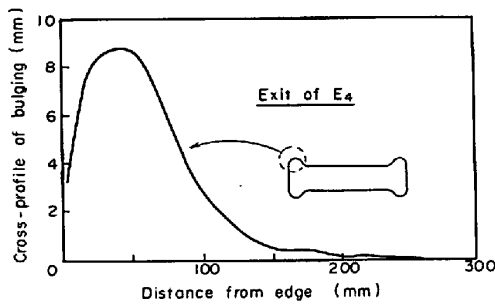


Fig. 12. Measured cross-profile of bulging after edging pass.

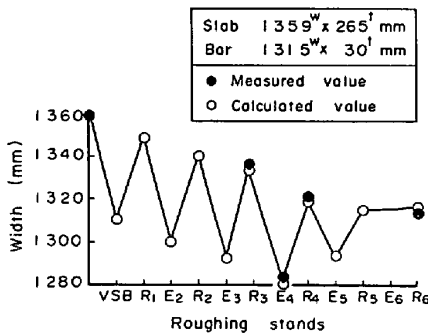


Fig. 13. Width change in roughing stands.

53 mm であり、この場合盛り上がりは板端から約 200 mm 付近より発生しており、板端より約 45 mm 付近で最大盛り上がり高さ約 8.8 mm となっている。次に前記幅拡がり係数 c_H , c_{ME} を用いて粗ロール列各スタンド出側での板幅を予測した結果を Fig. 13 に示す。エッジャで幅殺しを行つても次の水平ロールで相当幅戻りが生じていることがわかる。また実測値と予測値がほぼ一致しており、先に導いた c_H , c_{ME} 式の精度が高いことを示している。

3. エッジャセットアップモデル

前記幅拡がり係数 c_H , c_{ME} を用いて、Fig. 2 に示す粗ロール列におけるエッジャセットアップモデルを開発した⁷⁾。Fig. 14 にこのモデルの計算フローチャートを示すが、このフローは概略以下のステップからなる。

- (i) VSB の幅殺し量を基準とした各エッジャの幅殺し量配分 Z_i を設定する。
- (ii) 幅殺し量配分により各エッジャの幅殺し量 ΔW_i を計算する。
- (iii) c_H , c_{ME} 式を用いて粗ロール列各スタンド出側板幅を計算する。
- (iv) 粗ロール列出側計算幅と目標幅との差が許容範囲内になるまで収束計算する。
- (v) エッジング荷重式⁸⁾、エッジャミル剛性係数を

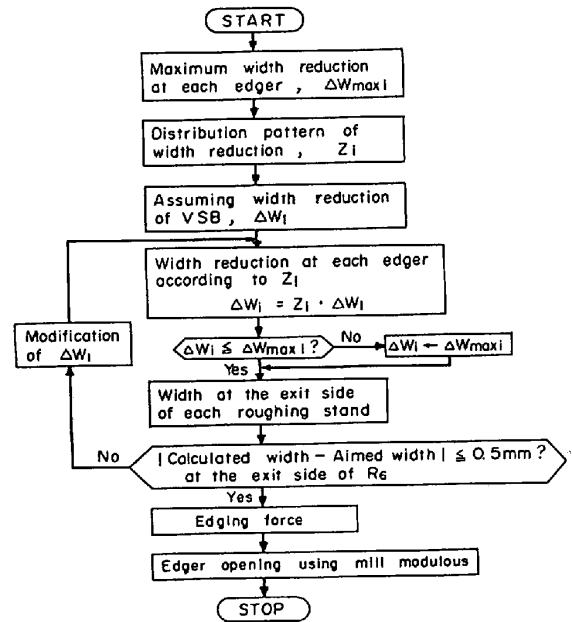


Fig. 14. Flow diagram of new edger set-up calculation.

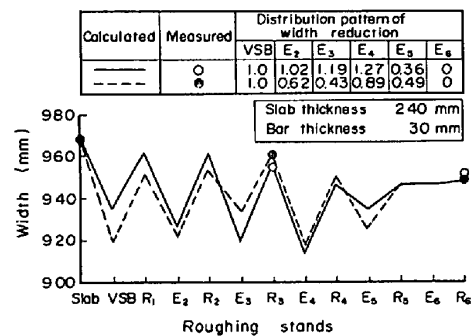


Fig. 15. Width change in roughing stands.

用いて各エッジャロール設定開度を計算する。

このように本モデルの特徴としては、各エッジャでの実質の幅殺し量の配分を任意に与えることができることにある。Fig. 15 に本エッジャセットアップ方法で幅殺し量配分を変えて圧延した例を示す。実線はエッジャ E₂ ~ E₄ の幅殺し量を大きくした場合、破線は E₂, E₃ の幅殺し量を小さくした場合であり、幅殺し量配分を変えてもよい設定精度が得られており、本モデルの精度の高ことが再確認された。

1979年3月より鹿島製鉄所のホットストリップミルにおいて本エッジャセットアップ方法を実施しており、Fig. 16 に示すように従来経験的な簡便法にて行つていたセットアップ方法と比較して大幅な板幅精度の向上をはかることができた。

4. 結 言

ホットストリップミルの粗ロール列における実機圧延

Δw (mm)	Conventional set-up			New set-up by present model			
	10	20	30 (%)	10	20	30	40 (%)
14~15	$\bar{x} = 3.7 \text{ mm}$ $\sigma = 4.0 \text{ mm}$ $n = 226 \text{ coil}$			$\bar{x} = 0.9 \text{ mm}$ $\sigma = 2.0 \text{ mm}$ $n = 376 \text{ coil}$			
12~13							
10~11							
8~9							
6~7							
4~5							
2~3							
0~1							
-2~-1							
-4~-3							
-6~-5							

Δw : Width deviation
(Measured width - Aimed width)

Fig. 16. Comparison of new and conventional edger set-up.

データを用いて、エッジング圧延・水平圧延における圧延材の板幅変化の挙動について検討し、以下の結論が得られた。

(1) エッジング圧延・水平圧延における幅拡がり量を盛り上がり幅拡がり量と矩形断面幅拡がり量の和とし、それぞれの幅拡がり係数 c_{ME} , c_H について実機圧延データを用いて高精度の回帰式を導いた。

(2) c_H , c_{ME} 式を用いて粗ロール列各スタンドにおける板幅変化の挙動を明らかにした。またエッジ E_4 出側で板幅端部の盛り上がり形状を実測した。

(3) 上記幅拡がり諸式を用いて粗ロール列におけるエッジセットアップモデルを開発した。本モデルの特徴としては、粗ロール列各エッジの幅殺し量配分を任意に与えることができることにある。

1979年3月より鹿島製鉄所のホットストリップミルに本エッジセットアップ方法を実施しており、従来のセットアップ方法に比較して大幅な板幅精度の向上をはかることができた。

Appendix I (8)~(10)式の誘導

(3)式を書きかえると次式のようにになる。

$$H_E = H \cdot \left(\frac{W}{W_E}\right)^{c_E} - \frac{S_E}{W_E} \dots\dots\dots (A-1)$$

(A-1) 式を(4)式に代入すれば(8)式が得られる。(2)式を書きかえると次式となる。

$$w_H = \left\{ \left(\frac{H_E}{h}\right)^{c_H} - 1 \right\} \cdot W_E \dots\dots\dots (A-2)$$

(8)式を(A-1)式に代入すれば次式が得られる。

$$H_E = \left\{ c_M + (1 - c_M) \cdot \left(\frac{W}{W_E}\right)^{c_E} \right\} \cdot H \dots\dots\dots (A-3)$$

さらに(A-3)式を(A-2)式に代入すれば(9)式が得られる。(6), (7)式より L_E , h , l を消去し, w_M を求めれば次式のようにになる。

$$w_M = \frac{(W_E + w_H) \cdot S_E}{W_E \cdot H_E} \dots\dots\dots (A-4)$$

(A-4)式に(8), (9), (A-3)式を代入すれば(10)式が得られる。

Appendix II (11), (12)式の誘導

(8)式で幅殺し量 $\Delta W (= W - W_E)$ を用いれば次式のように表される。

$$S_E = c_M \cdot \left\{ \left(1 + \frac{\Delta W}{W_E}\right)^{c_E} - 1 \right\} \cdot H \cdot W_E \dots\dots\dots (A-5)$$

通常 $(\Delta W/W_E) \ll 1$ であるから(A-5)式は次のように近似できる。

$$S_E = c_M \cdot \{1 + c_E \cdot (\Delta W/W_E) - 1\} \cdot H \cdot W_E = c_M \cdot c_E \cdot H \cdot \Delta W \dots\dots\dots (A-6)$$

また、エッジング圧延を行つても板幅中央部の板厚はほとんど変わらないので $H_E = H$ とおける。したがつて(A-2)式は次のように表される。

$$w_H = \left\{ \left(\frac{H}{h}\right)^{c_H} - 1 \right\} \cdot W_E \dots\dots\dots (A-7)$$

さらに(A-4)式に(A-6)式を代入し, $H_E = H$ とおけば次式が得られる。

$$w_M = \left(1 + \frac{w_H}{W_E}\right) \cdot c_M \cdot c_E \cdot \Delta W \dots\dots\dots (A-8)$$

ここで、板幅 W_E と幅拡がり量 w_H を比較すれば、通常熱延粗ロール列では $(w_H/W_E) \ll 1$ とおける。そこで、(A-8)式は次のように近似できる。

$$w_M = c_M \cdot c_E \cdot \Delta W \dots\dots\dots (A-9)$$

文 献

- 1) 井端治広, 上田長正, 小久保一郎, 平野 坦: 昭和 54 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1979), p. 461
- 2) 長田修次, 荒木省一, 中島浩衛, 神山藤雄, 吉田一: 昭和54年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1979), p. 489
- 3) Z. WUSATOWSKI: Iron Steel, 28(1955), p. 49
- 4) A. K. E. A. EL-KALAY and L. G. M. SPARLING: JISI, 206(1968), p. 152
- 5) A. HELMI and J. M. ALEXANDER: JISI, 206(1968), p. 1110
- 6) 山口道広, 美坂佳助, 河野輝雄, 芝原 隆, 布川剛, 平松照生: 第 29 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1978), p. 142
- 7) 芝原 隆, 美坂佳助, 河野輝雄, 山口道広, 高力満, 竹本 裕: 第 30 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1979), p. 17
- 8) 横井玉雄, 美坂佳助, 吉原佳久次: 鉄と鋼, 67(1981) 15, p. 2356