

討15 厚板のプレートフラウン制御に関する研究

神戸製鋼 加古川製鉄所○大池美雄, 木川佳明, 小久保一郎
技術開発本部 平野 坦

1. 緒言

厚板圧延におけるプレートフラウン制御は歩留向上に関連する重要な技術課題である。プレートフラウンはロールの摩耗および熱膨張にともなうロールプロファイルの変化と、各種圧延条件に応じて生じるロールの弾性変形のために変動する。また各パスでの板フラウン変化は板の平坦度と密接な関係がある。したがってプレートフラウン制御のためには各パス出側の板フラウンを精度良く予測する必要がある。

筆者らはロールプロファイルの変化および板フラウンをオンラインにて予測するための簡便な計算式を作成し、これを用いて現状のプレートフラウンの変動を解析するとともに、ロールフラウン標準およびパススケジュールの計算方法を検討したので報告する。

2. 板フラウンの予測方法

2.1 ロール摩耗の予測

作業ロールの摩耗量RWはロール間隙におけるロールと板との相対送り距離と接触圧力との積に比例するものとし¹⁾、実測値との関係を回帰分析してつぎの摩耗予測式を得た。

$$RW = a_1 \cdot \Sigma \left\{ \left(\frac{L}{D_w} \right) \cdot (r_e \cdot l) \cdot \left(\frac{P}{B \cdot l} \right)^{a_2} \right\} \quad (1)$$

ここに、L：圧延長さ、 D_w ：作業ロール径、 r_e ：圧下率、 l ：接触弧長、P：圧延荷重、B：板幅、 a_1, a_2 ：回帰定数

図1は補強ロールの偏摩耗量BRWと累積成品長さとの関係を示す。ロール種類別に両者は良い相関関係を示す。したがって補強ロールの偏摩耗量をつぎのように表わした。

$$BRW = a_3 \cdot \Sigma L_f \quad (2)$$

ここに、 L_f ：成品長さ、 a_3 ：ロール種類により異なる定数、補強ロールの摩耗プロファイルは実測結果を参考にして放物線と仮定し、ロール胴長方向各位置の摩耗量を予測することにした。

2.2 サーマルフラウンの予測

ロールの胴部を胴長方向に分割し、各分割要素がロール組込後に受けた熱量を刻々積算し、各要素の直径膨張量がこの積算熱量に比例するものとして、サーマルフラウンの予測式を作成した²⁾。板、ロール冷却水および空気からの入熱で生じるロール要素の直径膨張量を各々つぎのように表わした。

$$\Delta TC_{sj} = b_1 \cdot l / D_w \cdot \theta_s \cdot \Delta t \cdot (b_2 - \theta_{Rj}) \quad (3)$$

$$\Delta TC_{wj} = b_3 \cdot (\theta_w - \theta_{Rj}) \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta TC_{aj} = b_4 \cdot (\theta_a - \theta_{Rj}) \cdot \Delta t \quad (5)$$

ここに、 θ_s ：板温度、 θ_R ：ロール温度、 θ_w ：冷却水温度、 θ_a ：気温、 Δt ：時間刻み、 $b_1 \sim b_4$ ：定数、 j ：要素番号
ロール胴長方向の熱伝導により生じるロール要素の直径膨張量

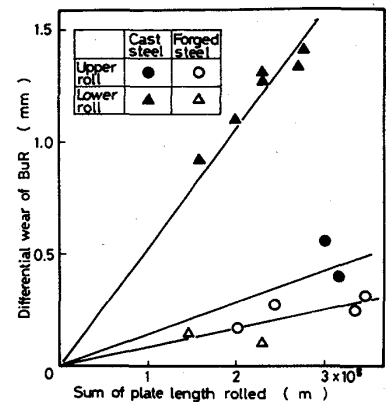


図1. 補強ロール偏摩耗量と累積成品長さとの関係

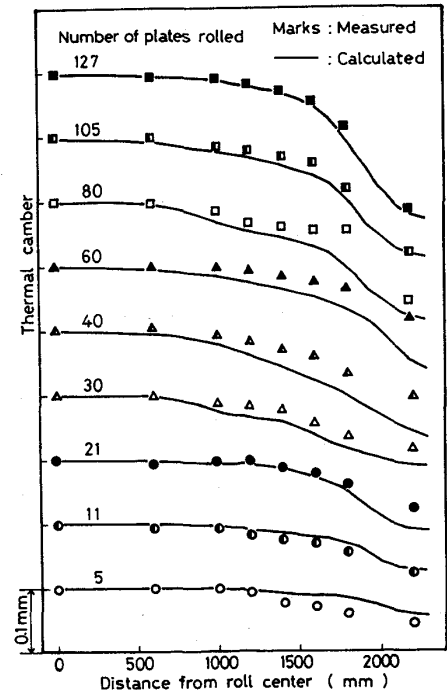


図2. サーマルプロファイルの予測値と実測値との比較

は次式で表わした。

$$\Delta TCR_j = b_5 \cdot (TC_{j-1} + TC_{j+1} - 2TC_j) \cdot \Delta t \quad (6)$$

ここに、 TC ：ロール組込時から現時刻までのロール要素の累積膨張量， b_5 ：定数

(3)～(6)式より単位時間 Δt の間に生じるロール要素の直径膨張量 ΔTC_j は次式で表わされる。

$$\Delta TC_j = \Delta TCS_j + \Delta TCW_j + \Delta TCA_j + \Delta TCR_j \quad (7)$$

なお、(3)～(5)式中のロール温度 θ_{Rj} は次式から求める。

$$\theta_{Rj} = \theta_{R0} + TC_j / (b_6 \cdot Dw) \quad (8)$$

ここに、 θ_{R0} ：組込時のロール温度， b_6 ：定数

図2は予測式を用いて計算したサーマルプロフィールを実測値と対比した例である。実測値は作業ロール間にセットしたアルミニウム棒に転写して得たロールプロフィールを(1)式を用いて摩耗分を補正したものである。

2. 3 ロールの弾性変形の予測

図3は厚板圧延機を用いてアルミニウム板を静的に圧縮して得た作業ロールの表面プロフィールをロールの変形を理論計算して求めた結果と比較した例である。計算では補強ロール支持点でのモーメントの拘束条件を種々変化させたが、完全にモーメントを拘束した場合(固定支持、 $\alpha = 1$)でも計算値は実測値よりも大きな変位を示している。これは板長手方向応力の板幅方向での分布が板の圧縮変形に影響しているためと思われる^{3),4)}。図中の点線は補強ロールを固定支持として、板長手方向応力が板幅全域で釣り合ったと仮定した場合の作業ロールの表面プロフィールを参考として示す。無張力圧延における板長手方向応力の板変形に対する影響度を明らかにすることは困難であるので、以下の計算では便宜的に補強ロールは固定支持、板長手方向の応力分布はないものと仮定した。

2. 4 板クラウン予測式

ロールクラウン、ロール摩耗、サーマルクラウンを考えたロール形状、ロール径、入側板クラウン、および板サイズ等を変化させてロールの変形を計算し、種々の圧延条件下における板クラウンを求めた。この結果をもとに回帰分析を行ない、基準圧延条件での板クラウン、および各種圧延要因の板クラウンに対する影響係数を圧延荷重、板幅等の関数として求めた。基準条件での板クラウン CR_0 および各種圧延要因による板クラウン増分 ΔCR を線形結合し、広範囲の圧延条件下で適用できる板クラウン予測式を作成した。以下に結果の式を示す。

$$PCR = CR_0 + \Delta CR_{WW} + \Delta CR_{WB} + \Delta CR_{TC} + \Delta CR_{CW} + \Delta CR_{CB} + \Delta CR_{DW} + \Delta CR_{DB} + \Delta CR_{PC} \quad (9)$$

$$CR_0 = C_1 B + C_2 B^2 + C_3 P^2 + C_4 P^2/B + C_5 \cdot (P/B)^2 + C_6$$

$$\Delta CR_{WW} = d_1 \cdot (RW_c - RW_b) + (d_2 \cdot B + d_3) \cdot (RW_b + RW_e)$$

$$\Delta CR_{WB} = (d_4 + d_5 \cdot B) \cdot (BRW_c - BRW_b)$$

$$\Delta CR_{TC} = d_6 \cdot B^{-e_1} \cdot (TC_c - TC_b)$$

$$\Delta CR_{CW} = d_6 \cdot B^{-e_1} \cdot (CW_c - CW_b)$$

$$\Delta CR_{CB} = (-d_4 + d_5 \cdot B) \cdot (CB_c - CB_b)$$

$$\Delta CR_{DW} = (d_7 + d_8 \cdot B) \cdot \Delta Dw$$

$$\Delta CR_{DB} = d_9 \cdot B^{e_2} \cdot \Delta Db$$

$$\Delta CR_{PC} = d_{10} \cdot B^{e_3} \cdot H^{-e_4} \cdot PC_{k-1}$$

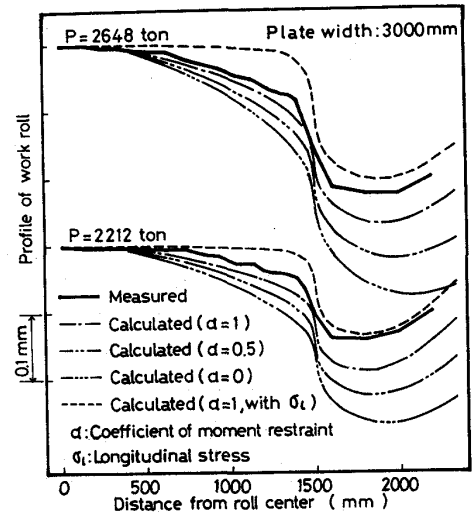


図3. 作業ロール表面プロフィールの計算値と実測値の比較

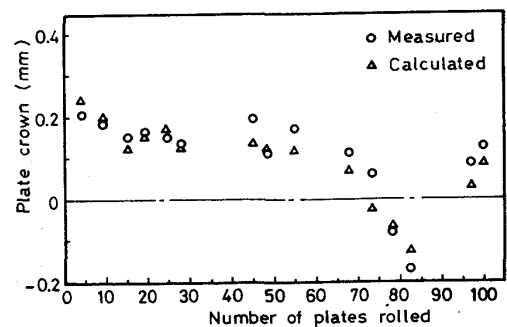


図4. プレートクラウン予測値と実測値の比較

ここに、 PC_k : Kパス出側の板クラウン, CW : 作業ロールクラウン, CB : 補強ロールクラウン, ΔD_w , ΔD_B : 作業ロールおよび補強ロールの基準径からの偏差, H : 入側板厚, $C_1 \sim C_6$, $d_1 \sim d_{10}$, $e_1 \sim e_4$: 回帰定数, 添字 C , e , b : 各々ロール中央, ロール端, 板幅端の位置を表わす。

2 ロールサイクルにわたり約350枚のプレートクラウンを実測し、(9)式の精度を調べた。図4に圧延の進行にともなうプレートクラウンの変動を実測値と予測値を対比して示す。両者はよく対応しており、(9)式の精度がすぐれていることを示している。

3. プレートクラウンを形成する因子の影響度合

図5は最終パスについて(9)式を用いて各要因別にプレートクラウンの増分を求めた例を示す。各々の板について左側がプレートクラウンを増大させる要因、右側が減少させる要因である。したがって左右の棒グラフの差がプレートクラウンを表わす。多数の例について各要因の影響度合を調べた結果、つぎのことがわかった。

1) 基準のプレートクラウン CR_0 は最終パス荷重と対応して、 $-0.05 \sim 0.4 \text{ mm}$ の間で変動する。

2) 作業ロール摩耗による増分 ΔCR_{ww} は 0.1 mm 以下のものが多い。当該板よりも板幅の狭い板が多く圧延された後では 0.2 mm 程度になる場合がある。

3) 補強ロール摩耗の影響 ΔCR_{wb} は補強ロール替直前のロールサイクルで最大 0.3 mm になる。

4) サーマルクラウンの影響 ΔCR_{tc} はロール組込後、次第に増大し、20~30枚圧延後で $-0.1 \text{ mm} \sim -0.2 \text{ mm}$ になる。当該板の直前にその板よりも板幅の狭い板が圧延されている場合は -0.2 mm を越える場合がある。

5) 入側板クラウンの影響 ΔCR_{pc} はとくに薄物で大きく、最大 0.3 mm 程度になる。板厚 10 mm 以上では 0.1 mm 以下のものが多い。

4. ロールクラウン標準の検討

ロールクラウンは各種圧延要因によるプレートクラウンの変化量を補うように決定することが必要である。補強ロールにはクラウンを付与しない場合、最終パスについて(9)式をつぎのように変形する。

$$CW_0 = \{PC_f - (CR_0 + \Delta CR_{ww} + \Delta CR_{wb} + \Delta CR_{tc} + \Delta CR_{pc})\} / (\alpha_{cw} \cdot \beta_{cw}) \quad \text{--- (10)}$$

ただし、 $\Delta CR_{dw} \approx 0$, $\Delta CR_{db} \approx 0$, $\Delta CR_{cw} = \alpha_{cw} \cdot CW$, $CW = \beta_{cw} \cdot CW_0$
 CW_0 はバレル全長での作業ロールクラウン, CW は板幅相当部に存在するクラウンである。 α_{cw} は影響係数, β_{cw} はロールクラウンの幾何学的形状で決まる係数であり、ともに板幅の関数である。 PC_f は目標成品クラウンである。(9)式で示したように CR_0 , ΔCR_{ww} , ΔCR_{wb} , ΔCR_{tc} , ΔCR_{pc} はいずれも板幅に依存する量である。したがって(10)式から算出される CW_0 は板幅別に異なる最適値をもつことになる。ここでは中央サイズであること、およびプレートクラウンの実績値が大きいことを考えて、板幅 3000 mm に合わせてロールクラウン標準を作成する。

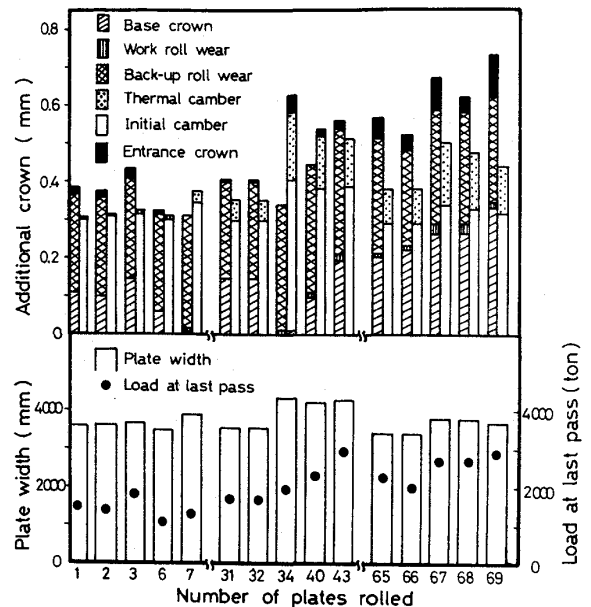


図5. 各種要因によるプレートクラウン増分
(補強ロール替直前の例)

表I. ロールクラウン標準
(mm)

Number of WR set changed	Material of lower BuR	
	Cast steel	Forged steel
1 ~ 2	0.30	0.30
3 ~ 4	0.33	
5 ~ 6	0.36	0.32
7 ~ 8	0.39	
9 ~ 10	0.42	0.34
11 ~ 12	0.45	
13 ~ 14	0.48	0.36
15 ~ 16	0.51	
17 ~ 18	0.54	0.38
19 ~ 20	0.57	

補強ロールの偏摩耗量BRWはロールサイクル毎に変化する量である。1ロールサイクル当たりの累積成品長さを仮定して(2)式をロールサイクル数の関数として表わす。またCR₀は圧延荷重Pにより調節できる量である。CR₀が0.3mm(P=2100ton)の場合について、前項で調べた各要因のプレートフラウンに対する影響度合を参考にして得たロールフラウンの標準を表Iに示す。

5. パススケジュール計算法の検討

ロールフラウン標準はプレートフラウンの平均レベルを定めるためのものであり、個々の板のプレートフラウンはパススケジュールを調節して制御しなければならない。

パススケジュールは最終パスから計算し、目標の成品フラウンを得るために全てのサイズについて最終2パスをフラウン制御パスとした。フラウン制御パスでは入側板フラウンを仮定して出側板フラウンを(9)式で計算し、比率フラウン一定となるように圧下量を決める。最終2パスをフラウン制御パスとしたのは、入側板フラウンの仮定誤差の成品フラウンに対する影響を十分小さくするためである。またモデル実験の結果およびラインでの形状観察結果をもとに板の平坦度を考えて板幅と入側板厚の比が160以上の場合はフラウン制御パスとした。

図6は目標成品フラウンを0.1mmとして表Iのロールフラウン標準に従ってパススケジュールを計算した例である。図6に示す板フラウンは計算されたパススケジュールに従って再計算して求めたものであるが、目標通りの成品フラウンが得られている。板幅4000mm以上では圧延荷重がミル限界値で制限されて成品フラウンが目標値よりも小さくなる場合がある。一方終期パスでは比率フラウンもほぼ一定になっており、板の平坦度も良好であることが予想される。

表IIは仕上げパス数の例を示す。粗い厚6mm、板幅3000~3500mmのサイズでパス数が10パスを越えている。このようなサイズでは目標成品フラウンを大きめに設定しパス数を減じる必要がある。他のサイズではパス数はいずれも8~9パス以下となっており問題ない。

6. 結 言

1) ロールの摩耗、サーマルフラウンおよび弾性変形について、実験での実験結果をもとに検討し定量化を行なった。これらの結果を総合して広範囲の圧延条件に対して適用できる板フラウン予測式を作成した。

2) ラインに於いてプレートフラウンを実測し、上記の予測式を用いて現状のプレートフラウンに対する各圧延要因の影響度合を明らかにした。

3) 2)の解析結果をもとにロールフラウン標準を作成した。

4) プレートフラウン予測式を用いて板のフラウン、形状を考えた最適パススケジュールを検討した。

7. 参考文献

1) 大池他:鉄と鋼, 63-4(1977), S222

3) K.N. Shohet 他:J.I.S.I., 1968-Nov., P1088

5) 中島他:才45回圧理資料(1972-2), 45-14

2) 平野他:神戸製鋼技報, 29-4(1978), P62

4) 戸沢他:塑性と加工, 11-108(1970), P29

6) 木川他:才28回塑加連講論(1977), P88

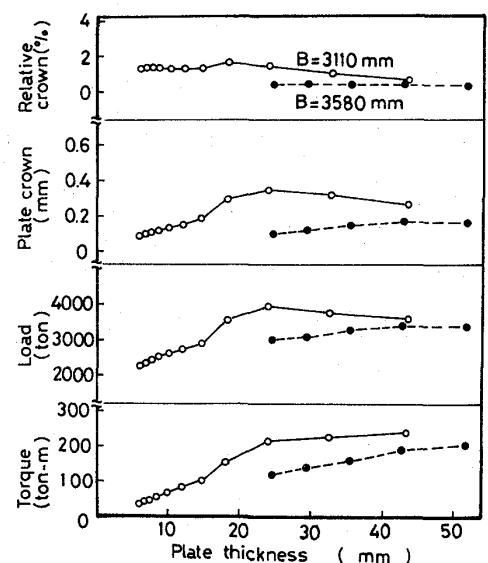


図6. パススケジュールの計算例

表II. 板サイズと仕上げパス数の関係

Plate size	6.2tx 3110 ^W	7.7tx 1770 ^W	9.4tx 3530 ^W	18.8tx 4360 ^W	22.2tx 2850 ^W
Pass number	11	5	9	8	5