

討10 板圧延における形状制御

住友金属 中央技術研究所

岡本豊彦

○河野雅雄

I 緒言 厚板圧延, 冷間圧延, 熱間圧延等板圧延全般にわたって形状制御の問題が注目され種々の研究・実験の報告がなされている。ここではこの問題を多パス圧延の際のクラウンと関連づけた問題として検討したので報告する。

II 用語の定義と記号

表1 用語の定義と記号

項目	記号	計算値	実測値
板厚	h	h_c	h_A
板クラウン量	CR	CR_c	CR_A
クラウン%	C_r	$C_{rc} = \frac{CR_c}{h_c}$ or $\frac{CR_c}{h_A}$	$C_{rA} = \frac{CR_A}{h_A}$
平たん度	FL	FL_c	FL_A

FL: 板の平たん度で次式で定義する。
(図2参照)

$$FL = \frac{l_c - l_e}{l_c} \quad \text{--- (2)}$$

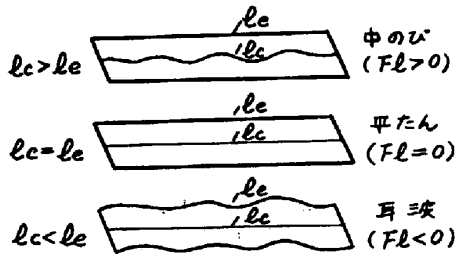


図2 板の平たん度

h_c : いわゆるゲージメータ板厚で次式で示す。

$$h_c = s + \frac{P_A}{K} \quad \text{--- (1)}$$

CR: 板クラウンで図1に示す。

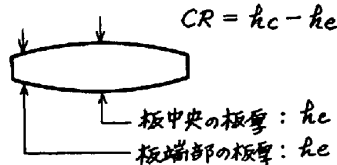


図1 板クラウン量の定義

S : 無荷重時ロールギャップ
 P_A : 実測圧延荷重
 K : ミル剛性

CR_A は2台の厚み計測定値より求める。
 CR_c の求め方は後で説明する。

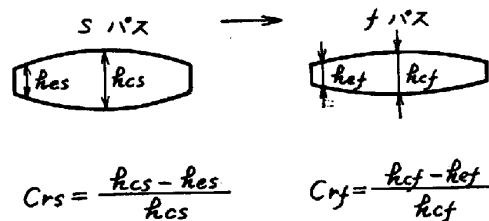


図3 板クラウン%の変化

圧延後に平たんであったパスをSパスとしてfパスまで圧延したときの平たん度 FL は図3を参照して次式により得られる。

$$FL = \frac{l_{cf} - l_{ef}}{l_{cf}} = \frac{C_{rs} - C_{rf}}{1 - C_{rf}} \approx C_{rs} - C_{rf} \quad \text{--- (3)}$$

上式で $s \rightarrow f$ パス中では材料の板中方向の流れ(ラテラルフロー)は無視できるものとし, $C_{rf} \ll 1$ と近似している。

あるいは sFL を1パスあたりの平たん度の変化とすれば

$$sFL_j = C_{rj-1} - C_{rj} \quad \text{--- (4)}$$

よって FL_c を最終パスにおける平たん度とすれば

$$FL_c = FL_0 + \sum_{j=1}^f sFL_j \quad \text{--- (5)}$$

ここで FL_0 は圧延前の平たん度で通常は $FL_0 = 0$ である。

Ⅲ 計算板クラウン量 CR_c の求め方

Ⅲ-1 板クラウンの計算式

板クラウンを求めるためにはワークロールの材料接触面のロール表面変位を求めることが必要である。この問題については単にロールを単純支持梁と考え、梁に一樣な分布荷重が加わったときのたわみとしてロールの軸心たわみを求める方法が⁽¹⁾一番簡単な方法であるが、これでは実際上誤差が大きい。この誤差の原因は、前述の考え方によるとワークロールとバックアップロール間のロール軸方向の圧力分布によるロール扁平量の分布を無視していることによる。この点をより厳密に考えた解としては Stone⁽²⁾のものがある。これはワークロールを半無限弾性床土においてワークロールの軸心変位を求めるものであるが、この考え方を一歩進めてバックアップロール、ワークロールの弾性変位を、同時にとり入れた解として鈴木他⁽³⁾、塩崎⁽⁴⁾等の解がある。あるいは別の数学的手法によりワーク・バックアップロール間のロール軸方向圧力分布を求めた解として Shohet 他⁽⁵⁾、鈴木他⁽⁶⁾がある。これらの解は比較的複雑な形をしているが、より単純な仮定に基づき実際上の精度としてはほとんど問題ない解として美坂・横井⁽⁷⁾⁽⁸⁾の解がある。この解はワークロールとバックアップロール間のロール軸方向接触圧力分布を2次曲線(あるいは4次曲線)と仮定して解いたものである。

Shohet の式による解と美坂・横井の式による解の比較を図4に示す。

この場合の計算条件は

バックアップロール直径	1570 φ
ワークロール直径	740 φ
ロールバレル巾	1780 mm
支点間距離	2820 mm
圧延荷重	1000 ton
ワークロールクラウン	0 mm

板巾 1500 mm および 500 mm について計算しているが板巾 1500 mm では厳密解(Shohetの式)とほとんど一致し、板巾が 500 mm の場合もロール間接触圧力分布を4次曲線近似すればよい一致が得られていることがわかる。

Ⅲ-2 板クラウン計算式の実験による確認

下記の条件でアルミ板を圧延しその板クラウン分布を測定した一例を図5に示す。図6にはこれらの板クラウン量の実験値と美坂・横井の式(4次曲線近似)による計算値との比較を示している。これらから理論計算の正しさが裏づけられている。

圧延機	バックアップロール直径	330 φ
	ワークロール直径	80 φ
	ロールバレル巾	400 mm
	支点間距離	850 mm
	ワークロールクラウン	0 mm

圧延試料 半硬質アルミ板
5^t × 300^w × 150^l

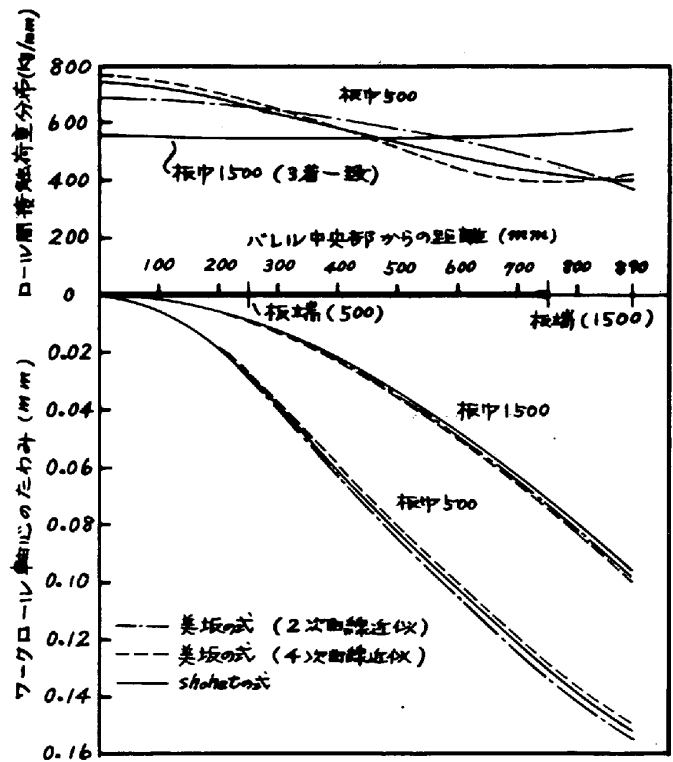


図4 ロールたわみ理論解の比較(圧延荷重1000^{ton})

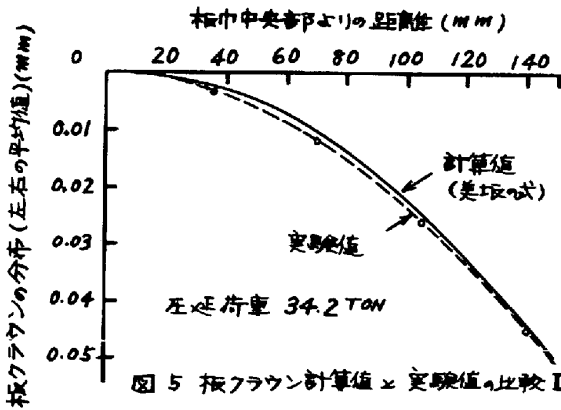


図5 板クラウン計算値と実験値の比較I

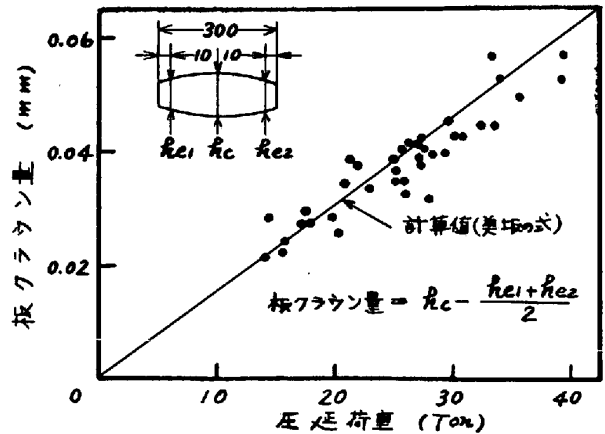


図6 板クラウン計算値と実験値の比較II

III-3 計算板クラウン量 CR_c とロールクラウン変化分 ΔR_c の推定

板クラウン量計算式を一般的な形で表わすと

$$CR_c = f(P, D, d, b, R_c, \Delta R_c) \quad \text{----- (6)}$$

ただしここではロールバレル中、支点間距離は一定と考え、また圧延荷重の板巾方向分布は一様であると考え、 R_c はイニシヤルクラウンで圧延前に既知であるが、一方 ΔR_c は圧延中に徐々に変化する量でありこの値を何らかの方法で実測するあるいは推定する必要がある。具体的な関数 f の形としては例えば、

- P: 圧延荷重
- D: バックアップロール直径
- d: ワークロール直径
- b: 板巾
- R_c : ロールイニシヤルクラウン
- ΔR_c : ヒートアップ摩耗等によるロールクラウン変化分

$$CR_c = P \{ A_2 + A_3 \cdot d + A_4 \cdot D + A_5 \cdot b^2 + (A_6 + A_7 \cdot D) \cdot b^3 + (A_8 + A_9 \cdot d + A_{10} \cdot D) b^4 \} - \{ A_0 - A_1 \cdot b^2 (R_c + \Delta R_c) \} \quad \text{----- (7)}$$

あるいは

$$CR_c = P \cdot f_1(d, D, b) - A_0 + A_1 \cdot b^2 \cdot R_c + A_1 \cdot b^2 \cdot \Delta R_c \quad \text{----- (8)}$$

ただし $A_0 \sim A_{10}$ は定数

実測板クラウン CR_A が板巾方向に並べた2台の厚さ計より求めたとすると(8)式で $CR = CR_A$ $P = P_A$ (実測圧延荷重)として(8)式より(一般には(6)式より) ΔR_c の値が求まる。実際には ΔR_c はロール替からロール替まで徐々に変化する量であるから指数平滑法等により、確からしい ΔR_c を推定する必要がある。

IV 計算平坦度 FL_c

計算上の最終パスの平坦度 FL_c は(5)式で与えられるが、より一般的には(5)式中の各パスの平坦度の変化分 δFL_c の寄与率が各パス一様でないと考えれば次のごとくなる。すなわち形状制御を行わないとき S パスまでは平坦であり、 S パス以降形状がくずれはじめるものとし、 N パスを最終パスとすれば次の(9)式あるいは(9')式が得られる。

$$FL_c = f_s'(\delta FL_{s+1}, \delta FL_{s+2}, \dots, \delta FL_f) \quad \text{----- (9)}$$

あるいは(9)式に(4)式の関係代入すれば

$$FL_c = f_s(CR_{c,s}, CR_{c,s+1}, \dots, CR_{c,f}) \quad \text{----- (9')}$$

(9')式は(3)式で途中のパスのクラウン%の影響を考慮した式と考えたこともできる。

ここで Crc_j は先に示した計算クラウン量 Crc と計算板厚(ゲージメータ厚) t_c により求まる各パスでの計算クラウン%である。

V 形状制御の具体的方法

最終成品の形状を平坦 ($FLA = 0$) にするように各パスの目標クラウン量を考え、圧延する(通常は形状制御パスで各パスの板クラウン% Crc_j が一定になるように圧延する)が圧延後の板の実際の形状 FLA が圧延実績(圧延荷重 etc)より求めた計算平坦度 Flc と等しくない場合には目標クラウン%を修正する。

V-1 形状評価の補正項 ΔFL

実際平坦度 FLA と計算平坦度 Flc の差を形状評価の補正項 ΔFL とする。

$$\Delta FL = Flc - FLA \quad \text{----- (10)}$$

実際には ΔFL は各コイルあるいは各スラブ毎に変化するものではなく長期的に指数平滑されるべき値である。 ΔFL が検出されたら、 ΔFL によって目標クラウン% (Crc) を決定する。

V-2 目標クラウン% Crc の決定法

今新しい目標クラウン%通り圧延が行なわれたときの計算平坦度を $Flce$ とすれば(9)式で $Crc_j = Crc_{E,j}$ ($j = s \sim f$)とおき(11)式が得られる。

$$Flce = f_s (Crc_{E,s}, Crc_{E,s+1}, \dots, Crc_{E,f}) \quad \text{----- (11)}$$

すべてが理論通りであれば板の形状は $Flce$ になるべきであるが(10)式のごとく計算平坦度と実際平坦度の間には ΔFL の差があるので期待される実際平坦度 FLA は次のごとく予想される。

$$FLA = Flce - \Delta FL \quad \text{----- (12)}$$

平坦に圧延するのが目標であるから、 $FLA = 0$ になるよう目標クラウン% ($Crc_{E,j}$) を決定する必要がある。よって(12)式で $FLA = 0$ とおき(13)式あるいは(13)式が得られる。

$$Flce = \Delta FL \quad \text{----- (13)}$$

$$f_s (Crc_{E,s}, Crc_{E,s+1}, \dots, Crc_{E,f}) = \Delta FL \quad \text{----- (13')}$$

(13)式より ΔFL が求めれば $Crc_{E,s}, \dots, Crc_{E,f}$ が求まるが、もし図7に示すように $Crc_{E,s} \sim Crc_{E,f}$ まで均等にクラウン%が減少し(あるいは増加)するように目標クラウン%を決定することにするれば

$$Crc_{E,j} = Crc_{E,f} + \Delta Crc \cdot \frac{f-j}{f-s} \quad (j = s \sim f) \quad \text{----- (14)}$$

ただし $\Delta Crc = Crc_{E,s} - Crc_{E,f}$ ----- (15) (図7参照)

また成品クラウン%の目標値 $Crc_{E,f}$ が与えられたとき(14)式を(13)式に代入すると未知数は ΔCrc のみとなり ΔCrc が求まる。これを(14)式に代入すれば各パスの目標クラウン%が求められる。

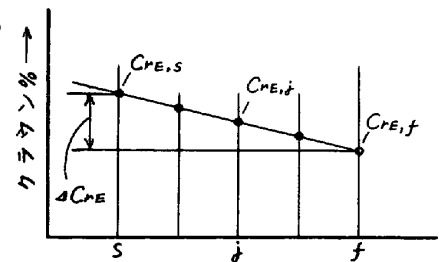


図7 目標クラウン%の決め方

VI 目標クラウン%決定の具体例

(9)式の具体的な形として計算平坦度を次式で定義してみる。

(図8参照)

$$Flc = f_s = \sum_{j=s+1}^f \sigma_j \cdot (Crc_{j-1} - Crc_j) \quad \text{----- (16)}$$

ここで σ_j は各パスに対する重みで最終パスで $\sigma_f = 1$ を基準として各パスのクラウン%の変化に対して重みをつける ($\sigma_j \leq 1$)。

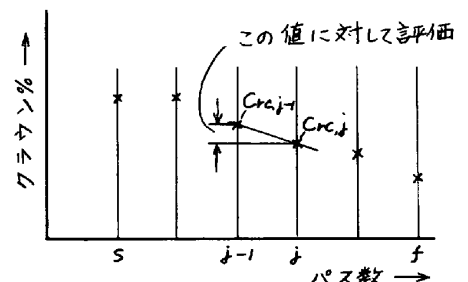


図8 計算平坦度の具体例

(16) 式を (13) 式に代入すると

$$\Delta FL = \sum_{j=S+1}^f \sigma_j \cdot (C_{RE,j-1} - C_{RE,j}) \quad \text{----- (17)}$$

この式に (14) 式の関係を用いると

$$\Delta FL = \sum_{j=S+1}^f \sigma_j \cdot \frac{\Delta C_{RE}}{f-S} = \frac{\Delta C_{RE}}{f-S} \sum_{j=S+1}^f \sigma_j \quad \text{----- (18)}$$

この関係を (14) 式に入れたら

$$C_{RE,j} = C_{RE,f} + \frac{\Delta FL}{\sum_{j=S+1}^f \sigma_j} \cdot (f-j) \quad (j=S \sim f) \quad \text{----- (19)}$$

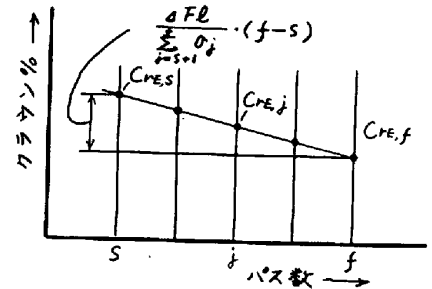


図9 目標クラウン%のきめ方具体例

VII 結 言

板圧延全般における目標クラウン%のきめ方につき検討したが、形状評価の問題、板中方向張力分布の問題、またより実際的な問題としては形状検出器の開発・実用化等今後に残された問題は多い。

VIII 参 考 文 献

- 1) Larke, 鈴木他訳: 板材の圧延 (1960)
- 2) Stone, Gray: Iron & Steel Engr. (1965-8) P 73
- 3) 鈴木, 本城: 生産研究 (1968-7) P 53, 第18回塑性加工連合講演会前刷 (1967-11) P 257
- 4) 塩崎: 塑性と加工 (1968) vol.9 no 88 P 315
- 5) Shohet, Townsend: J. of Iron & Steel Inst. (1968-11) P 1088
- 6) 鈴木, 河野; 生産研究 (1969-4) P 25, 第19回塑性加工連合講演会前刷 (1968-11) P 225
- 7) 美坂: 第20回塑性加工連合講演会前刷 (1969-11)
- 8) 美坂, 横井: 第38回圧延理論分科会資料 No 38-3 (1969-12)