

# 板材圧延における形状制御

Shape Control of Rolled Strips

阿 高 松 男\*

Matsuo ATAKA

板材圧延における形状制御の定性的な考え方および現在までに行なわれているシミュレーション手法の代表的なものの一つを紹介し、さらに形状制御に必要な形状検出装置の原理と実用上の問題点などを整理した。また、完全な自動制御として形状制御を導入してゆくために解決してゆかなければならない問題点などについても簡単な解説を加えた。

## 1. ま え が き

薄板の需要が伸びてくるに従って薄板の寸法精度の要求がきびしくなり、長手方向の板厚変動の制御および形状制御（すなわち、幅方向の板厚分布の制御）の問題が圧延技術の重要な課題となったが、前者は古くから技術課題として注目され現在では工業技術として一応の完成に達している。また、後者すなわち形状制御の問題は近年になって盛んに検討されるようになってきた。

一般に板の形状には図1に示すように板の断面のプロファイルを問題にする場合と板の平坦さを問題にする場合とに大別される。前者は主として幅方向の板厚偏差すなわちクラウンの適正化を目的とする。

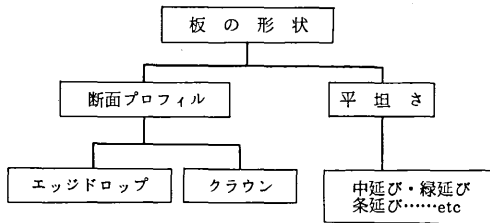


図1 板の形状の分類

特に電磁鋼板は重ねて変圧器やモータなどに使用されるが、クラウンが大きいと板と板の間に空隙ができて効率が下がるので、クラウンの減少が必要である。クラウンの改善のためにはあらかじめロールにクラウンをつけておく方法・油圧式のロールベンディング装置によって圧延中にクラウンを変化させる方法……などがある。また、板端部で急激に板厚が減少する現象をエッジドロップと言っているが、これは板厚が急激に減少すると共に硬い材料の場合には縁破れが生じたり、軟い材料の場合には縁延びが生ずるなどの現象を併発する。これは圧延中に板端部で幅方向の流れが生ずる

こととロールの偏平変形との相互作用とが原因となって必然的に起こる現象である。現場では板の端部を切断することによってエッジドロップの問題を処理しているが、この方面の研究が最近なされるようになってきたので、エッジドロップが理論的に解明され、新しい解決策が採られることも考えられる。しかし一般に形状制御という場合にはエッジドロップを除外して取扱うのが通例であるので、本報でも一応この問題は除外する。次に平坦さは特に薄板の場合に重要な製品価値を決定する因子となる。平坦さは圧延前後のクラウンの変化によって大きな影響を受け、圧延中に板材の幅拡がりや困難な薄板の場合では圧延前後のクラウン形状の変化は圧延方向の伸びの偏差にほぼ対応し、板材の平坦さをそこなう原因となる。数ミクロンのクラウンの変化が中延び・縁延びの原因となることはよく知られている事実である。薄板の圧延では板材の圧延前後の断面形状が相似になるように圧延して圧延方向の伸びが幅方向に均一にすることが必要である。この平坦さの制御にも前述の板クラウンを変化させる種々の方法が採られているが、最近油圧式のロールベンディング装置が効力を発揮している。しかしこれらは圧延作業者が圧延中の板材の状態を監視しながら手で操作しており、完全に自動化したシステムとするにはまだ時間がかかりそうである。

以上述べたように幅方向の板厚偏差すなわちクラウンと平坦さとは密接な関係にあり、薄板の厚延の場合初期の工程（たとえば、熱延の粗圧延および仕上圧延）でクラウンの適正化をはかり、後期の工程（冷間圧延）で平坦さをねらうのが合理的である。このような制御は本質的にはクラウンコントロールによって達成される。最近この方面の研究が盛んに行なわれているが、<sup>11)~12)</sup> 解析的研究の基礎的な考え方および実験的研究の定性的な考え方を紹介し、今後の問題などについてまとめた。

## 2. 形状不良の原因と対策

形状不良として現われる現象として耳波・中延び・

\*東京大学生産技術研究所第2部  
現在新日鉄（株）生産技術研究所

中膨れおよび条延びとがあるが、この原因とその対策として考えられる事項を定性的に述べてみる。

### 2・1 耳 波

これは板の幅方向にみて圧延方向の延びが中央部に比して端部で過大となったために、板端部が局部的に座屈を生じて波形になる現象である。これはロール胴部の過冷却・摩耗・圧下過大および不適当な初期クラウンなどのために圧延中のロール表面形状が板端を極度に延ばすプロファイルになったためと考えられる。対策としてはたとえば中央部の冷却水を絞り両サイドの冷却水を増加し、両サイドに対してロール中央部の温度を相対的に上げて、板クラウンを小さくするようにすればよい。したがって圧下を軽減することも考えられるが、この場合ゲージの変化に注意する必要がある。

### 2・2 中 延 び

これは板の幅方向のみで圧延方向の延びが板端に比して中央部で過大となったために、中央部一帯が大きな波状を呈する現象である。これはロール胴部の膨張過大・圧下過少・不適当な初期クラウンおよび原板のクラウン過大などのために圧延中のロール表面形状が板中央部を延ばすプロファイルになったためと考えられる。対策としては板クラウンが大きくなるようにすればよい。

### 2・3 ポケットウェーブ

これは板全体でなく、局部的に板が延び過ぎて座屈を生じ甚だしい凹凸を呈する現象である。ロールの局部的温度上昇や原板の厚み・降伏応力値のバラツキなどの不確定要素が原因となることが多く、これを避ける対策としてはバラツキの少ない作業をするようにつとめるしか方法がない。

### 2・4 条 延 び

これは板幅のごく一部のみが極端に延ばされて、圧延方向に一定幅の帯状に突起したもので、板をコイル状に捲取るために顕著となる。原因として考えられる事項を挙げると、ワークロール円周方向に生じた極度の摩耗・肌荒れ・幅方向の不均一冷却によるロールの不均一膨張・熱延コイルの局部的板厚変化および帯状のスケール疵・バックアップロールの円周方向に生じた摩耗……などがある。対策としてはその原因を除くようにすればよく、原因の早期発見が必要である。また通常条延びの幅は3~15mmであるが甚だしい場合には30~50mmに及ぶこともあり、巻き膨れの高さはコイルが巻取られて大きくなればなる程高くなるが、5~7mmを越すことは殆んど稀である。

以上のように形状不良の改善にはロールクラウンを変化させて板クラウンを制御する方法がかなり有効であるので、最近ロールベンディング装置をもうけて圧延中に形状制御を行なう方法が採られその効果が発表されている。次にこの方面の解析的研究の基礎的な考

え方を紹介する。

## 3. 形状制御法のシミュレーション

ロールベンディング法はロール端部に曲げ力を加えこれによるロールの曲がりクラウン効果として利用するもので、任意の量だけクラウン量を変化させることに特徴がある。ロールベンディングによりクラウンコントロールを行なう場合、(イ)曲げ力とクラウン量との関係、(ロ)クラウンカーブの形状、(ハ)ベンディングによるスクリーダウン効果などがあらかじめ明らかでなければならない。これらを明らかにするために圧延機全体をひとつの力学的モデルに置き代えることにより、圧延機の構造寸法と圧延条件が決まった時に上記の値を解析的に計算できるような式の開発・研究が盛んに行なわれるようになった。このような力学モデルの基礎はM. D. Stoneによって提案され<sup>1)</sup>、それ以後多数の研究者によって力学モデルの精度が高められてきた。本報では塩崎のモデル<sup>2)</sup>をロールおよび板にクラウンのある場合にも使用できるように改良した著者のモデルについて述べる<sup>1)3)4)</sup>。

### 3・1 基礎理論

記号

$H$ : 入側平均板厚 (mm)

$h$ : 出側平均板厚 (mm)

$d_1$ : ワークロール径 (mm)

$d_2$ : バックアップロール径 (mm)

$F_R$ : ワークロールバンドカ (kg)

$F_B$ : バックアップロールバンド力 (kg)

$L$ : ロールバレル長さ (mm)

$E_1$ : ワークロールの弾性係数 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$B$ : 板幅 (mm)

$E_2$ : バックアップロールの弾性係数 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$I_1$ : ワークロールの断面2次モーメント ( $\text{mm}^4$ )

$I_2$ : バックアップロールの断面2次モーメント ( $\text{mm}^4$ )

$K_1$ : バックアップロールとワークロール間のばね定数 ( $\text{kg}/\text{mm}/\text{mm}$ )

$K_2$ : ワークロールと材料間のばね定数 ( $\text{kg}/\text{mm}/\text{mm}$ )

$K_2^*$ : ワークロールの材料に接している部分のばね定数 ( $\text{kg}/\text{mm}/\text{mm}$ )

$K_3$ : 軸受・圧下装置・ハウジングのばね定数 ( $\text{kg}/\text{mm}$ )

仮定

- 1) 板の弾性変形は無視する。
- 2) ばねモデルのばね定数は幅方向に一定である。
- 3) ロールの断面2次モーメントは幅方向に一様とする。
- 4) 張力の幅方向分布は考慮しない。

力学モデルの基本概念としては、ワークロールとバックアップロールとの接触部分の弾性歪を板幅方向に均一なばね系 $K_1$ で表わし、ワークロールと圧延材の接触部分の弾性歪もまた板幅方向に均一なばね系 $K_2$ で表わ

し、ハウジング・圧下装置・軸受などの弾性歪を一括してばね系  $K_3$  で表わし、圧延機系全体を図2に示すよ

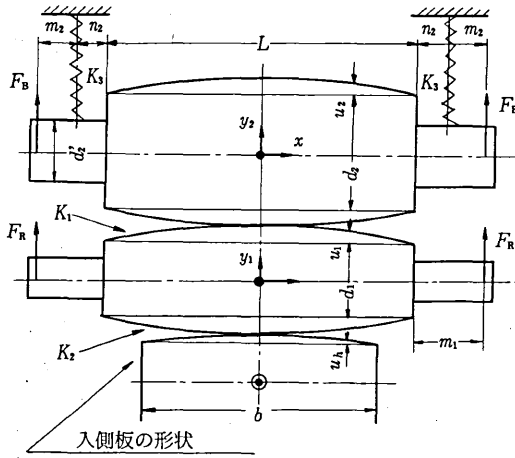


図2 座標系の決め方

うな力学モデルに置きかえる (ただし、力学モデルは上下対称になるので上側半分を示した)。座標系原点および座標軸は図示のとおりである。座標系の正方向に向く変位・圧力・力を正とする。また、ワークロールのクラウン量を  $u_1$ 、バックアップロールのクラウン量を  $u_2$ 、入側板のクラウン量を  $u_h$  で示し、中高になる図2のようなクラウンを正とする。ただし、クラウン  $u_1 \cdot u_2 \cdot u_h$  は片側のクラウン量を示し、 $y$  軸上のクラウン量をおのおの  $u_{1c} \cdot u_{2c} \cdot u_{hc}$  とする。

次に、圧延状態における力の釣合を考える。まず、ワークロールとバックアップロール間の偏平変形量  $\delta_{FR}$  は

$$\delta_{FR} = (y_2 - y_1) + \{(u_{1c} - u_1) + (u_{2c} - u_2)\} \quad (1)$$

また、ワークロールと材料間の接近量  $\delta_{Fn}$  は

$$\delta_{Fn} = y_1 + \{(u_{1c} - u_1) + (u_{2c} - u_2)\} \quad (2)$$

となるので、圧延状態で力の釣合いを考えてバックアップロールおよびワークロールの釣合い方程式は次のようになる。

$$E_2 I_2 D^4 y_2 = -K_1 \delta_{FR} \quad (3)$$

$$E_1 I_1 D^4 y_1 = -2K_2 \delta_{Fn} + K_1 \delta_{FR} \quad (4)$$

(ただし、 $D$ は演算子  $d/dx$  を示し、 $\delta_{FR} > 0$  の場合  $K_1 = 0$ 、 $\delta_{Fn} > 0$  の場合  $K_2 = 0$  である)

これを(a)ロールネック部、(b)圧延材の存在しない胴部、(c)圧延材の存在する胴部の3領域について解く。

(a)  $L/2 \leq x \leq L/2 + n_2$  において

ロールネックではバックアップロールとワークロールは完全に離れているから  $K_1 = 0$  となり、(3)式より

$$E_2 I_2 y_2 = A_1 x^3 + A_2 x^2 + A_3 x + A_4 \quad (5)$$

(ただし、 $I_2$  はバックアップロールネック部の断面2次モーメントを示す)

(b)  $b/2 \leq x \leq L/2$  において

圧延材の存在しない胴部については  $K_2 = 0$  と考え、この部分でワークロールとバックアップロールが接してれば、

$$y_1 = D^{-4} (D^4 + a_1)^{-1} f(x) + A_5 x^3 + A_6 x^2 + A_7 x + A_8 + e^{\gamma x} (A_9 \cos \gamma x + A_{10} \sin \gamma x) + e^{-\gamma x} (A_{11} \cos \gamma x + A_{12} \sin \gamma x) + (u_{1c} - u_1) \quad (6)$$

$$y_2 = (D^4 + a_2)(D^4 + a_1)^{-1} f(x) - a_2 D^4 u_1 + A_5 x^3 + A_6 x^2 + A_7 x + A_8 + k_7 \{ e^{\gamma x} (A_9 \cos \gamma x + A_{10} \sin \gamma x) + e^{-\gamma x} (A_{11} \cos \gamma x + A_{12} \sin \gamma x) \} - (u_{2c} - u_2) \quad (7)$$

ただし、 $a_1 = K_1 \left( \frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)$ 、 $\gamma = (a_1/4)^{1/4}$ 、 $a_2 = E_1 I_1 / K_1$ 、 $k_7 = 1 - 4\gamma^4 a_2$ 、 $f(x) = D^8 u_1$

$$+ \frac{K_1}{E_2 I_2} D^4 u_1 - \frac{K_1}{E_1 I_1} D^4 u_2$$

また、両ロールが離れていれば  $K_1 = 0$  となるから解は

$$E_1 I_1 y_1 = B_5 x^3 + B_6 x^2 + B_7 x + B_8 \quad (8)$$

$$E_2 I_2 y_2 = B_9 x^3 + B_{10} x^2 + B_{11} x + B_{12} \quad (9)$$

(c)  $0 \leq x \leq b/2$  において

この領域では圧延材とワークロール、ワークロールとバックアップロールとがそれぞれ接しているとして解く。

$$y_1 = (D^8 + a_3 D^4 + a_4)^{-1} g(x) + A_{13} \cosh \alpha x \cos \alpha x + A_{14} \sinh \alpha x \sin \alpha x + A_{15} \cosh \beta x \cos \beta x + A_{16} \sinh \beta x + (u_{1c} - u_1) \quad (10)$$

$$y_2 = a_2 (D^4 + a_5)(D^8 + a_3 D^4 + a_4)^{-1} g(x) - a_2 D^4 u_1 + \frac{4K_2}{K_1} \{2(u_{1c} - u_1) + (u_{2c} - u_2)\} + k_\alpha (A_{13} \cosh \alpha x \cos \alpha x + A_{14} \sinh \alpha x \sin \alpha x) + k_\beta (A_{15} \cosh \beta x \cos \beta x + A_{16} \sinh \beta x \sin \beta x) - (u_{2c} - u_2) \quad (11)$$

ただし、 $a_3 = \frac{K}{E_1 I_1} + \frac{K_1}{E_2 I_2}$ 、 $a_4 = \frac{2K_1 K_2}{E_1 I_1 E_2 I_2}$ 、

$$\alpha = \left( \frac{a_3 - \sqrt{a_3^2 - 4a_4}}{8} \right)^{1/4}, \beta = \left( \frac{a_3 + \sqrt{a_3^2 - 4a_4}}{8} \right)^{1/4},$$

$$k_\alpha = \frac{K}{K_1} - 4\alpha^4 \frac{E_1 I_1}{K_1}, k_\beta = \frac{K}{K_1} - 4\beta^4 \frac{E_1 I_1}{K_1}, a_5 = \frac{K}{E_1 I_1},$$

$$g(x) = D^8 u_1 + \left( \frac{4K_2}{E_1 I_1} + \frac{K_1}{E_2 I_2} \right) D^4 u_1 - \frac{K_1}{E_1 I_1} D^4 u_2$$

$$+ \frac{2K_2}{E_1 I_1} D^4 u_h - \frac{2K_1 K_2}{E_1 I_1 E_2 I_2} \{2(u_{1c} - u_1) + (u_{2c} - u_2)\}$$

以上より、解が得られるが、それらの式には積分定数を含んでいるので、これらの定数値を決定すればロール曲がりおよび偏平変形が求まり、出側板の表面形状を求めることができる。積分定数の求め方を述べる。

1) 両ロールが接触している場合

バックアップロールとワークロールとが胴部で完全に接している場合、(5)、(6)、(7)、(10)、(11)を用いて連続の条件および境界条件から前述の積分定数(16個)を

決めればよい。すなわち、

$x = b/2$ において

$y_1, y_2, Dy_1, Dy_2, D^2y_1, D^2y_2, D^3y_1, D^3y_2$ が連続 (8個)

$x = L/2$ において

$y_2, Dy_2, D^2y_2, D^3y_2$ が連続 (4個)

また、この点における曲げモーメントおよび剪断力の境界条件より

$$M_1 = E_1 I_1 D^2 y_1 = m_1 F_R, \quad V_1 = -E_1 I_1 D^3 y_1 = F_R \quad (2 \text{ 個})$$

さらに入側平均板厚  $H$  と出側平均板厚  $h$  とを与えれば

$$M_0 b (H - h) = -4 \int_0^{b/2} K_2 \delta_{F_R} dx \quad (1 \text{ 個})$$

となる。ただし、 $M_0$ は塑性係数を示す。よってこれらより積分定数を求めることができる。

2) 両ロールが離れている場合

ワークロールとバックアップロールとが  $\eta \leq x(b/2 \leq x \leq L/2)$ で離れている場合には、 $\eta \leq x \leq L/2$ では(8)・(9)を採用するので前述の積分定数 (16個) にさらにこれらの式の積分定数が新たに加わる。しかし連続の条件として  $x = \eta$ において

$y_1, y_2, Dy_1, Dy_2, D^2y_2, D^2y_2, D^3y_1, D^3y_2$ が連続 (8個) という条件が加わるので計算可能である。

したがって図3の計算手順に従えば出側板の形状・

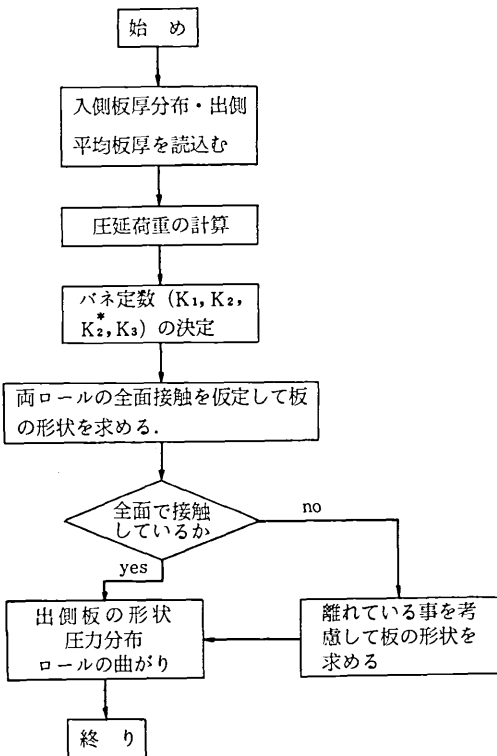


図3 ロールおよび板にクラウンのある場合の計算法

圧力分布・ロールの曲がり量・偏平変形量を求めることができる。ただし、力学モデルの各ばね定数の求め方については久能<sup>15)</sup>・塩崎<sup>2)</sup>の文献に述べられているので説明は省略する。

3・2 計算結果について

まず、ロールおよび板にクラウンのない場合について示す。筆者らがすでに提案したように<sup>14)</sup> ロールベンディング効果は横剛性相当量の大小で論じられ、その時のスクリュウダウン効果については縦剛性相当量で論ずることができるので、そのような整理のしかたをした図が図4～図8である。まず、縦剛性相当量・横剛性相当量の定義を簡単に示す。ロール設定間隙を  $s_r$ 、圧延荷重を  $P$  とすると  $\Delta m = h - s_r$  となり  $\kappa_v = P/\Delta m$  を縦剛性相当量と定義し、圧延前後のクラウン変化量を  $\Delta b = (h_c - h_e) - (H_c - H_e)/2$  とすると (ただし、 $\frac{1}{2}(H_c - H_e)$ ,  $\frac{1}{2}(h_c - h_e)$  は圧延前後の板のクラウン量)  $\kappa_\ell = P/\Delta b$  を横剛性相当量と定義した。その時のデータを表1に示し、ロールベンディング力が作用していない時の  $\kappa_v$ ,  $\kappa_\ell$  の値で無次元化して図示した。

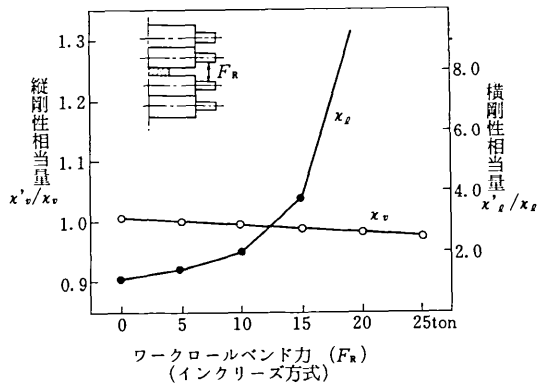


図4 ワークロールバンド力の効果とスクリュウダウン効果 ( $L/d_1=2.60$ の場合)

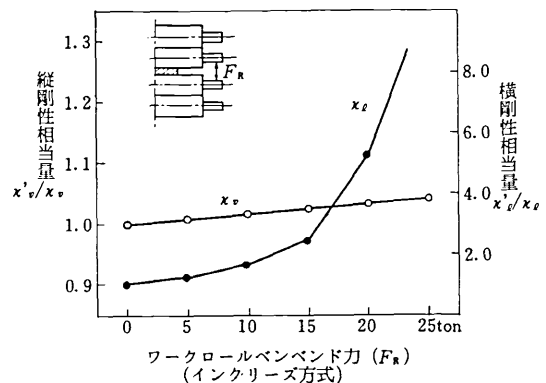


図5 ワークロールバンド力の効果とスクリュウダウン効果 ( $L/d_1=4.34$ の場合)

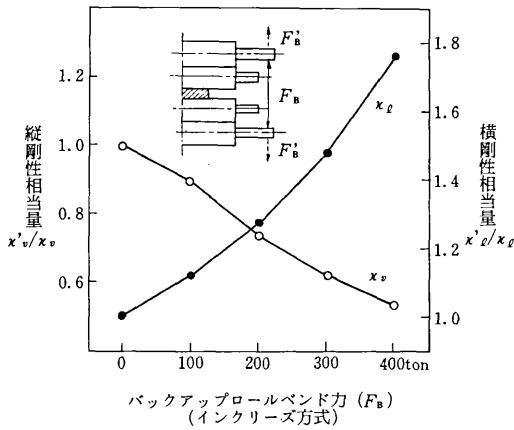


図6 バックアップロールベンド力の効果とスクリュウダウン効果 ( $L/d_1=2.60$ の場合)

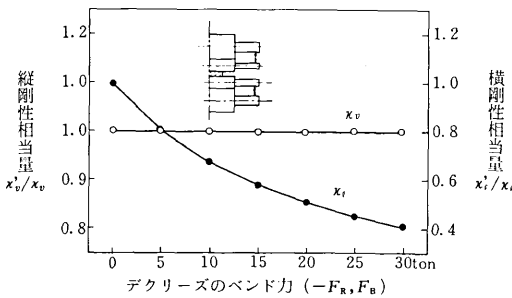


図7 デクリーズのベンド力の効果とスクリュウダウン効果 ( $L/d_1=2.60$ の場合)

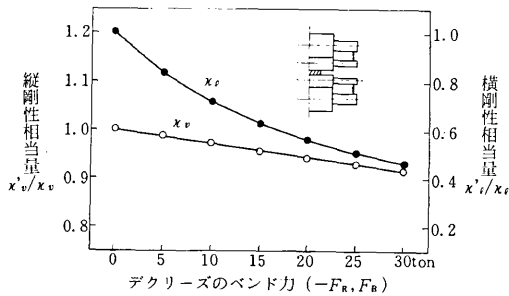


図8 デクリーズのベンド力の効果とスクリュウダウン効果 ( $L/d_1=4.34$ の場合)

インクリーズタイプのロールベンディング力の効果を示したのが図4～図6である。図4と図6よりワークロールベンディングの方がバックアップロールベン

ディングより小さな力で効果が大きいことがわかる。また、図4よりワークロールベンディング力が作用すると $x_v$ が小さくなるので、出側の平均板厚を不変にするためにはロール間隙をしめ込まなければならない。すなわち、ワークロールベンディング力を作用させると出側平均板厚が大きくなる。また、バックアップロールベンディング力の場合も同様のことがいえる。しかしこの場合は $L/d_1=2.60$ であるが、 $L/d_1=4.34$ の場合が図5である。この場合は図4とは逆に、出側平均板厚は小さくなるので、出側平均板厚を不変にするためにはロール間隙を開かなければならない。図4と図5より $L/d_1$ の小さい方がワークロールベンディング力のききがよいことになる。

デクリーズタイプのロールベンディング力の効果を示したのが図7・図8である。この場合板のクラウンに与える効果はインクリーズタイプとは逆である。また、この力を作用させた場合 $L/d_1=2.60$ の時には出側の平均板厚はほとんど変わらないが、 $L/d_1=4.34$ の時にはそれは大きくなることを示す。

3・3 タンデム圧延への応用

前述した力学モデルを用いてタンデム圧延における各スタンドの板のクラウン形状変化・ワークロールの曲がり・バックアップロール間の扁平変形量間の扁平変形量・圧延圧力分布等の諸量が各スタンドを通過するに従い変化してゆく過程を明らかにした。ただし、この場合各スタンドの平均板厚を各図とも同じ条件にし、しかも中央部と端部の圧下率の差がいくら大きく

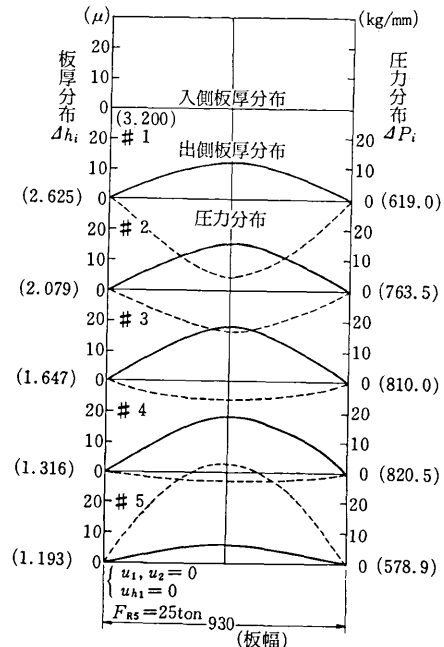


図9 板厚分布および圧力分布

表1 標準状態のデータ

圧延機の構造寸法 (mm)					
ワークロール径 $d_1$	546	バックアップロール径 $d_2$	1,420	バックアップロールネック径 $d_2'$	852
ロールバレル長さ $L$	1,420	ハウジングポストの厚み $B_1$	700	ハウジングポストの幅 $W_1$	730
圧下スクリー径 $d_s$	400	降下ネジ長さ $l_s$	300	バックアップロールネックと軸受中心との距離 $n_2$	450
ワークロールバンド力の腕の長さ $m_1$	500	バックアップロールバンド力の腕の長さ $m_2$	300	$L/d_1$	2.6

圧延条件に関するもの					
ワークロールの弾性係数 $E_1$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^4$	バックアップロールの弾性係数 $E_2$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^4$	摩擦係数 $\mu$ (無次元)	0.06
前方張力 $t_f$ (kg/mm <sup>2</sup> )	10.0	後方張力 $t_b$ (kg/mm <sup>2</sup> )	10.0	板幅 $b$ (mm)	930
入側平均板厚 $H$ (mm)	1.0	出側平均板厚 $h$ (mm)	0.7	ワークロールバンド力 $F_R$ (kg)	0.0
材料の変形抵抗 $Y=84.6(\gamma+0.00817)^{0.3}$				バックアップロールバンド力 $F_B$ (kg)	0.0

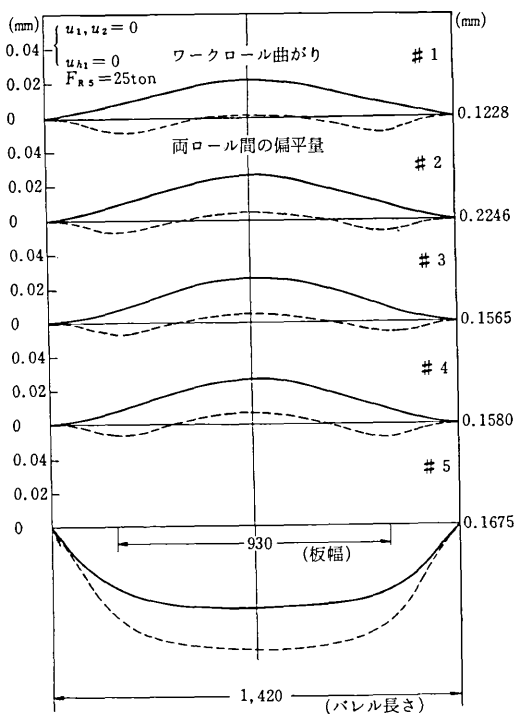


図10 ワークロール曲りと両ロール間の偏平量

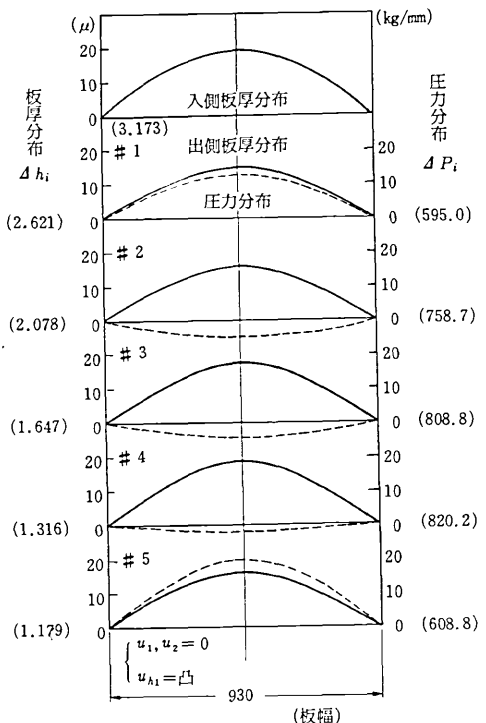


図11 板厚分布および圧力分布

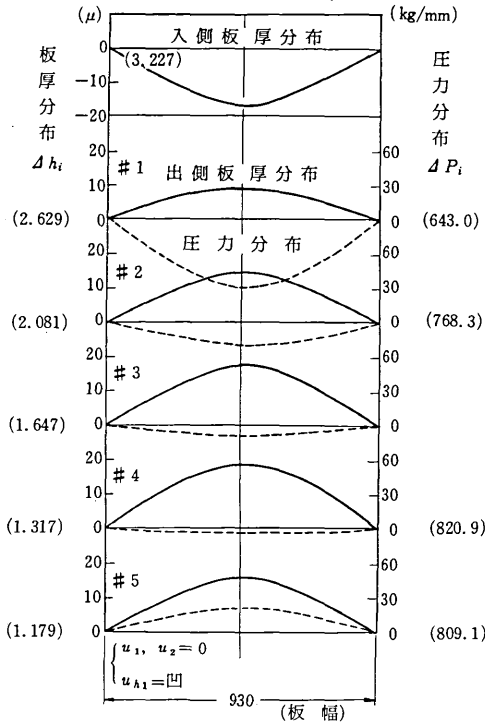


図12 板厚分布および圧力分布

なっても正常な圧延が行なわれるものとし、ロールのクラウンは零とした。

図9・図11・図12は入側板のクラウン形状が平坦・凸・凹の場合について、各スタンドの出側板のクラウンの大きさを実線で示し、点線はその時の圧力分布を示す。図9のみ最終スタンドにワークロールベンディング力（インクリーズ方式）を作用させた場合を扱った。クラウン量は板の片側のクラウンを示し、端部板厚を基準としている（その基準値を左側の（ ）内にmm単位で示す）。また圧力も端部の値を基準とし、その値を右側の（ ）内に示した。上流のクラウンの影響は途中スタンドで緩和されてゆく。したがって形状制御力の効果は下流スタンドほど大きい。

図10は図9の場合のワークロール軸線の曲がり量を実線で示し、バックアップロールとワークロール間の偏平変形量を点線で示した。ただし軸心の接近量は端部の値を基準とし、その値を右側の（ ）内に示してある。ワークロールの曲がり量は圧下率の小さい1号スタンドでは他のスタンドに比して少なく、5号スタンドではワークロールベンディング力の効果が出ている。また、偏平変形量の分布パターンは各スタンドよく似ているが、5号スタンドは形状制御力の影響が出ている。

本報の解析では張力は幅方向には一様とし、ロールのクラウンは零としているので、実際問題にこの結果

を適用する際には次の点に注意しなければならない。すなわち、幅方向の張力分布を考慮に入れば板のクラウンは次のスタンドで修正される傾向があること、またロールにクラウンがあれば、クラウンの大きさに比例した修正効果があることを忘れてはならない。

#### 4. 形状検出装置<sup>16)</sup>

おもな形状検出方式として原理的に可能と考えられる方式を列挙し、その問題点を述べてみる。

- 1) 幅方向の伸び量の差を検出する（接触式ロールにより幅方向の速度差を利用する）
- 2) 幅方向の張力差を検出する（分割ロールおよび接触ロールにかかる荷重差を利用する）
- 3) 幅方向の板厚分布を検出する（放射線、フライングマイクロメータ、エヤマイクロメータなどを利用する）
- 4) 振動現象として検出する（フラックス、容量変化などを利用する）
- 5) ストリップの残留応力を検出する（磁気ひずみを利用する）
- 6) 光学的に検出する（虚像、反射などの変化を利用する）

以上のうち、1)～5)項については各社で実験がかなり行なわれ、その結果も報告され、また実際に製品化しているものもある。各方式の問題点を示すと、1), 2)では接触式のためストリップにきずがつく恐れがある。3)では板厚分布の検出精度が得にくい。4)では機械自身の振動まで検出する恐れがある。5)では温度変化により残留応力が変化するので測定誤差を生じ易い。また1)～5)に共通して、ストリップに接触させるかまたは接近させなければ精度を上げることができないため、板切れや尻抜けなどによりセンサの破損が考えられる。6)の場合は光学方式のため、冷延の場合はヒュームの影響を受け易く、またスキンプラス圧延の場合はストリップの表面状態が問題となる。

それぞれ問題点を持っているがそれらを克服して製品化され、実用に供されているものもいくつかある。またその使用結果を報告したものなどがあるが、現状では形状制御はまだ完全なフィードバック型の自動制御にはなっておらず、検出（人また装置により）形状の手動制御の形態を採っているのがほとんどである。その原因は検出量と操作量（形状制御力）および制御量（板の形状）との関係が定量的に把握できていないことである。まず、そのためには形状制御関係の精度の高いシミュレーションモデルの開発が必要である。

#### 5. む す び

形状制御はその必要性を痛感されながら、いまだ現場作業者の勘に頼っているところが大きい。その原因

の一つは検出量・操作量・制御量の3者の関係を定量的に把握できる式ができていないことである。そのような関係式を確立するためにはまず次のような困難な問題を解決してゆかなければならない。

- 1) 非軸対称な分布荷重に対する有限円柱の表面変位
- 2) ロールギャップ内の材料の変形と張力分布との関係
- 3) 非軸対称な分布熱源が存在する場合のロール内の温度分布およびサーマルクラウン
- 4) ロール摩耗のパターン
- 5) 入側板のクラウンおよびロールクラウンが圧延に及ぼす影響

主なものとしてはこれらであるが、板の形状としては上記の種々要因の適合条件として求まるものである。

1)については圧延荷重分布が判明すれば、たとえば有限要素法の適用で比較的正確に求めることができる。2)については外的な因子により張力分布を生じロールギャップ内の材料の変形を拘束する場合とエッジドロップのようにロールギャップ内の材料の変形の結果から張力分布を生ぜしめる場合とがあるので、各圧延状況により両者の現象を正確に把握する必要がある。3)については伝熱問題としては非常に困難であり、しかも冷却水というように不確実な熱伝達の要因を含んでいるため、現象に全く忠実にしかも厳密に解いてゆくのは現在では不可能に近いが、モデルをかなりの精度で簡略化してゆけば何らかの解は得られると思う。4)については現場のデータを分析してゆくのがまず解決への第一歩となろう。5)については正確には従来の平面歪の圧延理論としては解決できず、三次元変形を考慮してゆく必要があり、かなり高度の問題である。さらにもう一つはすぐれた検出装置と検出量の定量化という問題がある。

本報では形状制御の定性的な考え方および現在までに行なわれているシミュレーションの方法の一つを紹介したが、それらでは上記の困難な問題点を簡略化あるいは無視する方法を採ってきた。したがってさらに精度の高いシミュレーションモデルや諸関係式を開発するには上記の困難な問題を解決しなければならないが、電子計算機が普及した今日ではたとえ解析解が出なくても数値解は求め易くなったので、近い将来には解決されるものと信じる。

なお、形状制御関係の文献は多数発表されているが、紙面の都合で参考文献として網羅できなかったことをお詫びいたします。また、本研究を進める際適切なご助言を賜った鈴木教授に謝意を表します。

(1975年5月6日受理)

#### 参考文献

- 1) Stone, M. D. & Gray, R.; Iron & Steel Engr., 42-8 (1965), 73
- 2) 塩崎; 塑性と加工, 9-88 (1968), 315
- 3) 鈴木・本城; 生産研究, 20-7 (1968), 365
- 4) 鈴木・河野; 生産研究, 21-4 (1969), 133
- 5) 鈴木・鮫島; 日本機械学会講演論文集, (1969-4)
- 6) 鈴木・上田; 生産研究, 22-4 (1970), 187
- 7) Shohet & Townsend; J. I. S. I., (1968-11), 1088
- 8) Shohet & Boyce; J. I. S. I., (1968-11), 1099
- 9) 水田・藤田; 24回塑加連講論, (1973-11)
- 10) Wilmotte, S. & Mignon, J.; C. R. M., No. 34, (1973-3), 17
- 11) 岩脇・塩崎・関・東藤; 昭49春塑加講論, (1974-5)
- 12) 有村・岡戸・藤田; 塑性と加工, 16-168 (1975-1), 44
- 13) 阿高; 塑性と加工, 12-124 (1971-5), 376
- 14) 阿高・鈴木; 塑性と加工, 13-143 (1972-12), 960
- 15) 久能; 塑性と加工, 7-60 (1966) 20
- 16) 柴田・江森ら; 塑性と加工, 12-124, (1971-5), 353

