

## 第6章

張力分布を制御することによる  
形状制御法（TDC）の開発

## 第6章

# 張力分布を制御することによる 形状制御法（TDC）の開発

### 【概要】

この章では、材料の幅方向張力分布を制御することによる、新しい考え方の形状制御の方法（TDC：Tension Distribution Control）について、解析、実験による検討を行い、実機圧延機へ適用した結果について述べる。

この方法はロールギャップ内での材料の塑性変形に及ぼす、ロールギャップ外の張力分布の影響を利用するもので、その特性は材料の3次元的な塑性変形特性に依存する、プロフィール・形状特性の根幹に直接関係するものと考えられる。

### 6.1 まえがき

前章で解説したように、従来から用いられてきたワークロールベンダーやロールシフトなどの形状制御装置は、圧延機本体を改造し、ロールの弾性変形を制御する方法である。このため、形状制御の自由度は作業ロールの弾性変形特性に依存し、自由な制御特性は得ることが難しいと考えられる。この章では従来の方法とは全く発想を異にして、材料の張力分布の形状に及ぼす影響に着目し、これを制御することによる簡便、かつ効率的な形状制御に関する開発について述べる。

従来から、圧延板に与えられている張力の幅方向不均一が形状に影響することは、経験的によく知られており、特に、圧延機出側のデフレクタロールのミスアライメントが片伸び形状に悪影響を及ぼすことは衆知のことである。これは、材料のロールギャップにおけるメタルフローに、張力分布が何らかの影響を及ぼし、その結果

形状の変化を引き起こすと考えられる。すなわち、第2章の材料変形の節で考察したように、張力分布による材料の3次元的な塑性変形が、ロール弾性変形に加えて、もう1つの大きな要因であることが推定される。

薄板圧延の材料の3次元的な塑性変形を通じた、形状に及ぼす張力分布の影響は、図6.1に示すように表され、大別して、

- ①張力分布変化による圧延荷重の幅方向分布の変化→板厚分布
- ② “ “ “ 3次元塑性流動の変化→伸び率変化

の2つが考えられる。これらはどちらも、圧延歪み分布に変化が生じたとき、これを小さくし、もとの状態に近づけるように作用する。(張力の負のフィードバック効果)

このことは、逆に外力として張力分布を与えてやる

と、これを緩和して与えられた張力分布との合計の張力分布が均一になるように圧延における伸び歪み分布が発生することをも示していることになる。即ち、適切に張力分布を付加することができれば、張力分布に応じた形状制御が可能なが推定できる。

この章では、上の推定を解析、実験によって確認し、プロトタイプの実機装置を開発、これをタンデム冷間圧延機に組み込んで形状制御特性を調べた経緯について述べる。

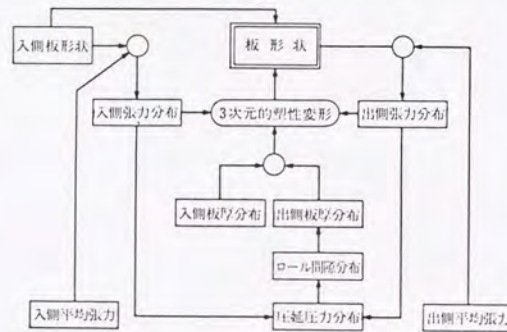


図 6.1 板形状への影響要因

## 6.2 ロール変形解析モデルによる張力分布の影響の解析

①のロール変形の影響については②の塑性変形特性の効果を適当に仮定することによって、第2章のモデルを用いて推定できる。

表6.1に解析条件を示す。

表 6.1 解析条件

支持ロール寸法 :	*1420×1370 mm
作業ロール寸法 :	*610×1426 mm
材料寸法 :	'3.8→3.04×*1270 mm

張力分布の影響をより際立たせるために、分布の形はステップ状の分布を与えた。

横流れ係数  $\alpha$  を1.0(張力フィードバックなし)としたときの板厚分布の変化の解析結果を図6.2に示す。この解析結果によれば、張力分布の付加位置が圧延機入側の場合、出側の場合で効果の差はない。通常、平均張力の圧延荷重への影響は圧延機入側のほうが大きい

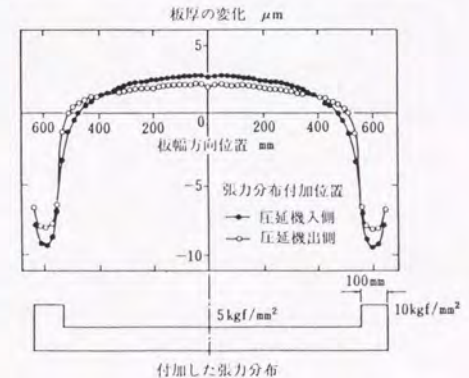


図 6.2 張力分布の板クラウン変化への影響(単純解析)

変形はロールギャップ出口付近での

変形であり、特にロール表面の凹み変形は出側張力の影響を大きく受けるため、ここでの解析では両者の効果の差は小さくなったものと考えられる。入側、出側張力の板厚変化に及ぼす効果はどちらも約4%あり、この時点では形状制御としては十分な効果と言える。

一方②の3次元塑性変形に関しては、第2章で述べたように解析的な試みが行われているが、ここでは実験的な手法によって確認した。

### 6.3 張力分布付加方法の検討

張力の板幅方向分布を与える方法として、板面に垂直方向の変位を与える方法を検討した。この方法による張力分布は有限要素法によって解析した結果(図6.3)から分かるようにSt. Venantの理論によって、変位付加位置から離れるに従って減衰する。このため、より効率的な形状制御を行うために変位付加装置はロールパイトに近い位置への設置が望ましいことが分かる。

この分布を推定するために、静的な張力分布を実験的に測定した。

図6.4に測定に用いた材料支持装置を示す。張力分布は、板上下面に幅方向に複数枚の歪みゲージを貼付し、個々に静歪み計によって測定した。

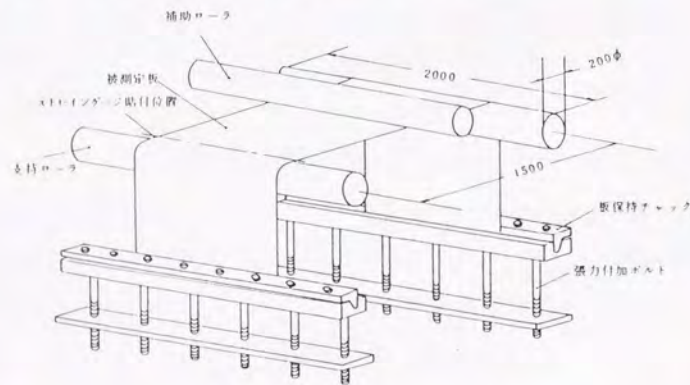


図 6.4 張力分布計測用の材料支持装置

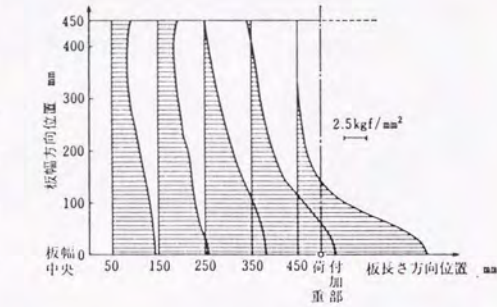


図 6.3 張力分布の発生状況の解析結果(FEMによる)

図6.5, 6.6, 6.7にそれぞれ板幅端部、板幅中央から100mm 端部よった位置、板幅中央部に垂直変位を与えたときの張力分布の測定結果を示す。

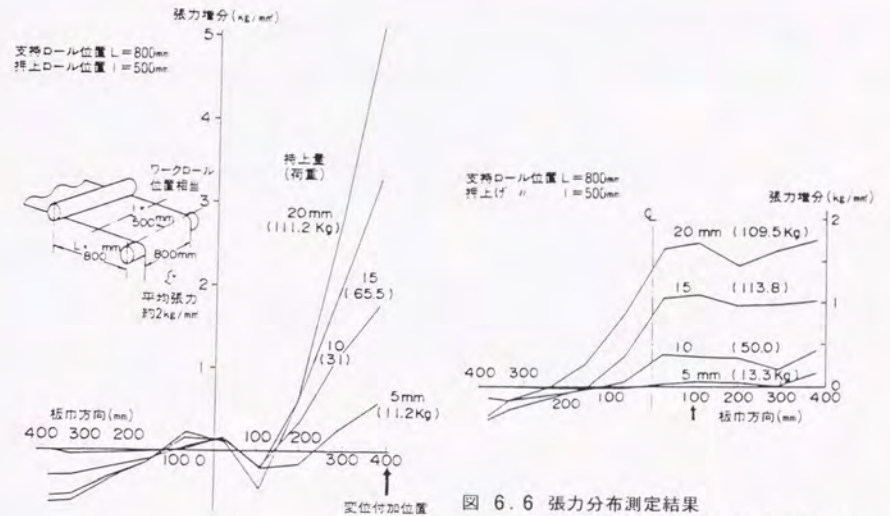


図 6.5 張力分布測定結果  
(変位付加位置: 板端部)

図 6.6 張力分布測定結果  
(変位付加位置: 板幅中央から100mm)

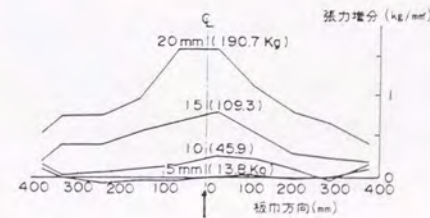


図 6.7 張力分布測定結果  
(変位付加位置: 板幅中央)

これらの結果から、板端部にピークをもった張力分布の付加は比較的容易にできるが、板幅中央部には大きなピークをもった張力分布を付加することは難しく、変位付加位置が板幅中央から若干離れると張力分布のピークの位置が不安定となることが分かった。

以上から、板端部にピークを持つような張力分布を与える方法が効率的であると考えられる。

また、垂直変位付加位置からの距離による張力分布の違いを測定した結果を図 6.8 に示す。

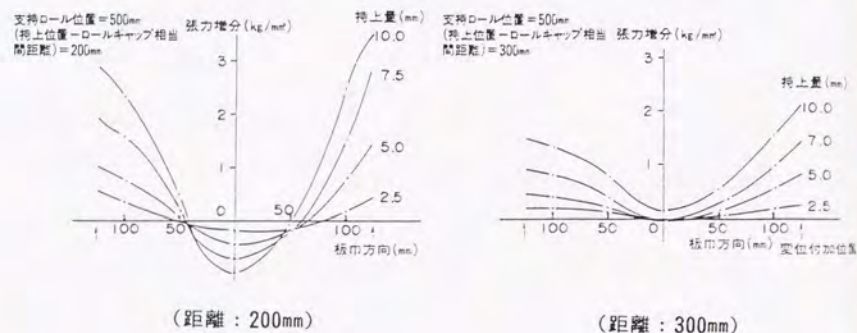


図 6.8 張力分布測定結果 (2点変位)

これから分かるように、有限要素法での解析結果と同様に距離が離れると張力分布が平坦になって来ることが示されている。しかしながら、ロールギャップから 300mm 離れた位置においても 10mm の持ち上げ量で  $2\text{kg}/\text{mm}^2$  程度の張力分布を得ることができることから、ロールギャップからある程度離れた位置での垂直変位によって、板端部にピークをもった張力分布をロールギャップの位置に発生させることは比較的容易であることが確認できた。

## 6.4 実験圧延機による形状制御効果の検討

ロール変形解析では、3次元的な塑性変形の効果を含む張力分布付加の形状に及ぼす効果を、定量的に直接確認解析することは難しいため、実験圧延機による実験を行った。表 6.2 に実験圧延機の概略仕様を示す。

表 6.2 実験圧延機の概略仕様

作業ロール寸法	: *150mm×350mm
支持ロール寸法	: *400mm×350mm
被圧延材	: 厚さ: 2.5/0.5mm 幅: 50/300mm
圧延速度	: 作業ロール駆動 最高 447 m/分 控えロール駆動 最高 1000 m/分
圧延荷重	: 最大 200 ton
圧延動力	: 150 KW (DC)
圧延張力	: 1000 Kg (最大制御範囲)

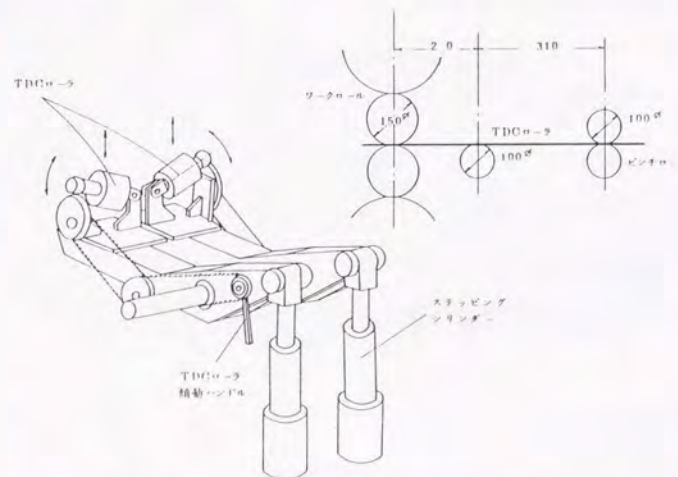


図 6.9 実験機に組み込んだ TDC 装置 (傾斜動、上下動が可能)

張力分布付加を行う装置（TDCと呼ぶ）の概略を 図 6.9 に示す。板端部での材料との接触状態を滑らかにするため、傾動、上下動するTDCローラを設置した。作業ロールからの距離は、装置の配置スペースから、250mmとした。

また、写真 6.1 に圧延機に組み込んだ様子を示す。

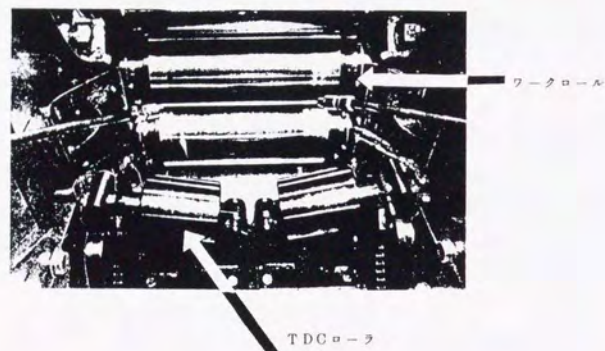


写真 6.1 TDC装置の実験機への組み込み状況

この装置による、形状制御特性を表 6.3 に示す実験条件で明らかにした。

表 6.3 実験条件

圧延材料	: 冷延鋼板 板厚 0.2, 0.5 mm 板幅 250 mm
圧下率	: 1.5~6%
張力	: 前方 2.8~6.5 Kg/mm <sup>2</sup> 後方 8 Kg/mm <sup>2</sup>
TDC操作	: 傾斜角 0~15°

形状の測定は 図 6.10 に示す装置に材料を支持して行った。

図 6.11, 6.12 に測定結果の例を示す。

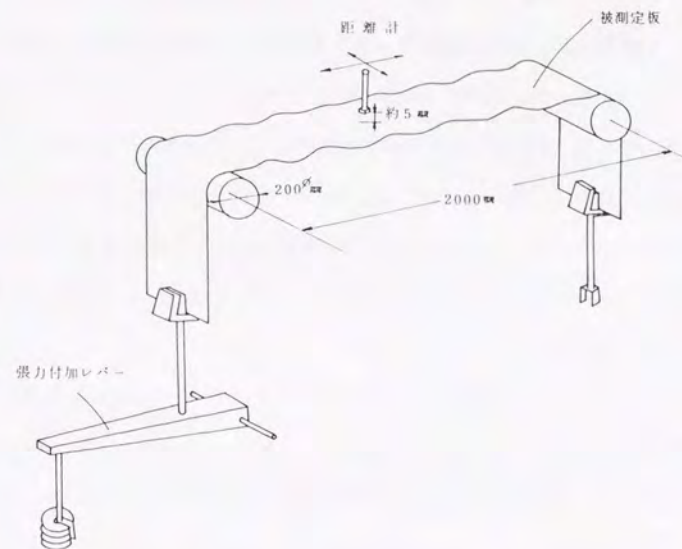


図 6.10 オフライン形状測定装置

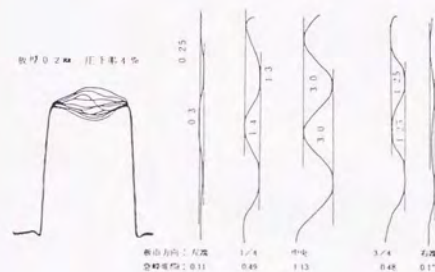


図 6.11 形状測定結果の例

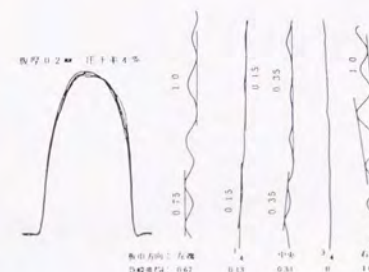


図 6.12 形状測定結果の例

図 6.13 に圧下率をパラメータとして、圧延出側で TDC 傾斜角を変化させたときの、急峻度の変化の計測結果を示す。同図中に、破線で圧延入り側で TDC を作動させたときの特性を記入している。この結果から、圧延機出側で圧下率をある程度与えた状態で板端部に張力分布を付加すると、中伸び形状が順次小さくなり、耳波形状に変化して行くことがわかる。圧下率が小さいときに形状の変化が小さくなる結果は、TDC ロールでの大きな張力分布によって材料が変形しているのではなく、張力分布がロールギャップへ作用して圧延における材料の変形に影響していることを示している。

図 6.14 に圧延出側平均張力をパラメータとして TDC の効果を示す。これから、平均張力が小さいと TDC の効果は小さくなるのが分かるが、これは、平均張力が小さいと、板に局所的な垂直変位を与えても幅方向全体が変位してしまい、有効に張力分布が発生しないためと考えられる。

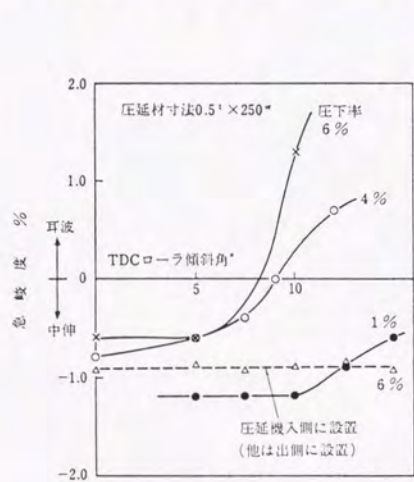


図 6.13 TDCローラ傾斜角の変化による形状変化 (圧下率の影響)

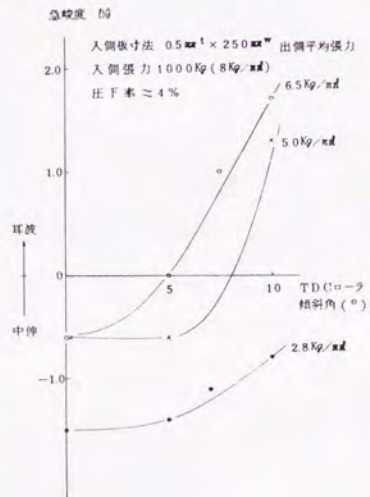


図 6.14 TDCローラ傾斜角の変化による形状変化 (張力の影響)

以上の実験で以下の項目が明らかとなった。

- (1) 張力分布の形状への影響は、圧延機出側のみで現れる。
- (2) TDC ロールによる張力分布の材料の変形への影響はロールギャップで現れていると考えられる。
- (3) 板端部に張力のピークをもつような張力分布を与えることで、急峻度 2% 程度の形状変化が得られる。

## 6.5 実機に組み込むTDC装置

これらの実験結果をもとに実機圧延機に組み込むプロトタイプTDC装置を設計した。実験において確認された結果から、板端部に垂直方向の変位を与えるロールを設置し、傾斜動、上下動を変位制御可能な油圧シリンダにて行う構造とした。

図6.15に装置の組み立て図を示す。

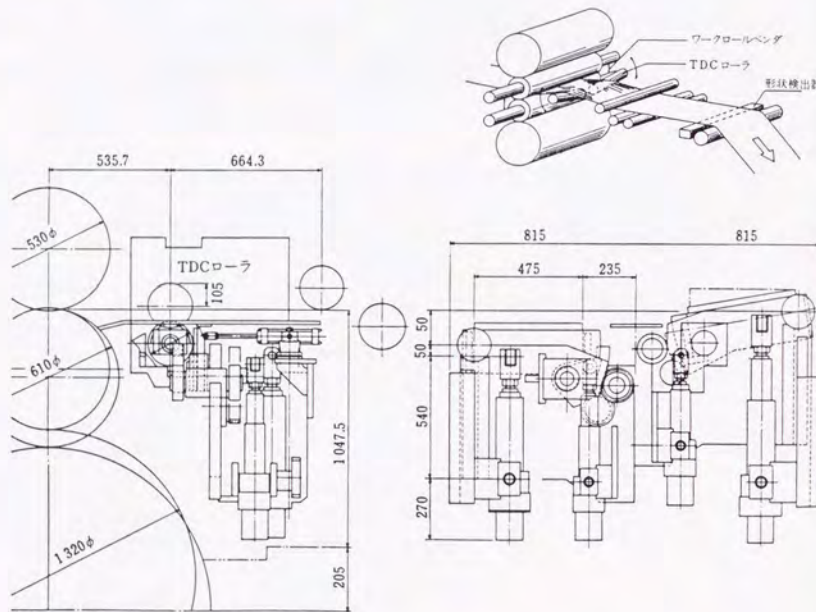


図 6.15 実機に組み込んだTDC装置  
(上図：概念図、下図：組み立て図)

また、表6.4に主な仕様を示す。

表 6.4 実機プロトタイプTDCの主な仕様

対象板厚	: 0.15~1.2mm
対象板幅	: 730~1270mm
ローラ作動	傾斜角: 0~10° 持ち上げ量: -50~105mm
ローラ反力	傾斜: 3.5ton (140kgf/cm <sup>2</sup> ) 持ち上げ: 7.8ton (〃)
ローラ材質	: 高炭素クロム鋼ダル加工硬質クロムメッキ

駆動系統を図6.16に示す。TDCローラの傾斜動、上下動はそれぞれ2本ずつの油圧steppingシリンダで駆動される。ローラは非駆動で、圧延板との接触摩擦力で回転させる形式とした。この装置は冷間タンデムミルの最終5スタンドの出口側に設置した。写真6.2、6.3にそれぞれ第5スタンド出側から、および第5スタンドのロールを抜き取ったハウジングウィンドウからみたTDCローラを示す。

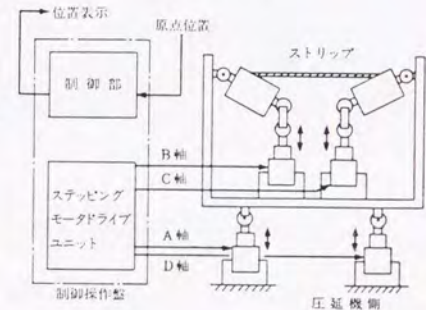


図 6.16 TDC制御系統図



写真 6.2 TDCロールの組み込み状況  
(圧延機出口より)



写真 6.3 TDCロールの組み込み状況  
(組み込みスタンドウィンドウより)



## 6.6 実機における形状制御特性

TDCの形状制御効果を明らかにするために、以下の項目について実機操作中にデータ採取を行った。

- (1) TDCローラ持ち上げ量の効果。
- (2) TDCローラ傾斜角の効果。
- (3) ワークロールベンダの効果。(比較データ)
- (4) 圧延材寸法による上記効果の違い。

実機データ採取の対象条件範囲を 表 6.5 に示す。

表 6.5 実機データ採取条件の範囲

第5スタンド圧下率	: 24~28%
第5スタンドテンションリール張力	: 4.4~9.8 Kg/mm <sup>2</sup>
第5スタンド圧延速度	: 1,100~1,800m/分
TDC操作	傾斜角 : 0.5~3°
	持ち上げ量 : 10~30mm
ワークロールベンダ圧力操作	: 40~140 Kg/cm <sup>2</sup>
圧延材料寸法	板厚 : 0.33~1.2 mm
	板幅 : 751~1,225 mm

形状の変化は最終第5スタンド出側のテンションメータロールとテンションリールの間に設置されている、走査型振動振幅測定方式の形状検出機の出力を急峻度に変換することで定量化した。

図 6.17 にワークロールベンダ圧およびTDCローラ持ち上げ量を一定にして、TDCの傾斜角を変化させた場合、図 6.18 に傾斜角を一定にして持ち上げ量を変えた場合の形状検出機の出力の例を示す。

形状の変化は中伸び、耳波、複合形状と様々なパターンとなるが、これらを定量

的にとらえるため、値の正負で耳波、中伸びを表す $\lambda_e$ と、クォーターバックルと

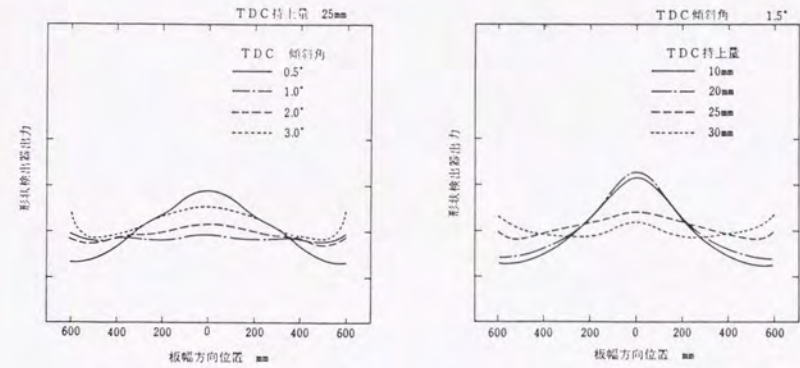


図 6.17 形状計の出力例

複合形状を表す $\lambda_q$ を定義し

た。

$$\lambda_e = \frac{\lambda(e_l) + \lambda(e_r)}{2} - \lambda(c)$$

$$\lambda_q = \frac{\lambda(q_l) + \lambda(q_r)}{2} - \lambda(c)$$

ここに

$\lambda(x)$ : 図 6.19 に示す板幅方向位置  $x$  における急峻度。

$\lambda_q$ ,  $\lambda_e$ の値によってそれぞれのパターン間を連続的に表すことができる。

図 6.20 に傾斜角 0.5°、図 6.21

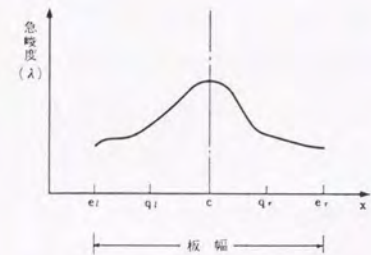


図 6.18 形状定量化の定義

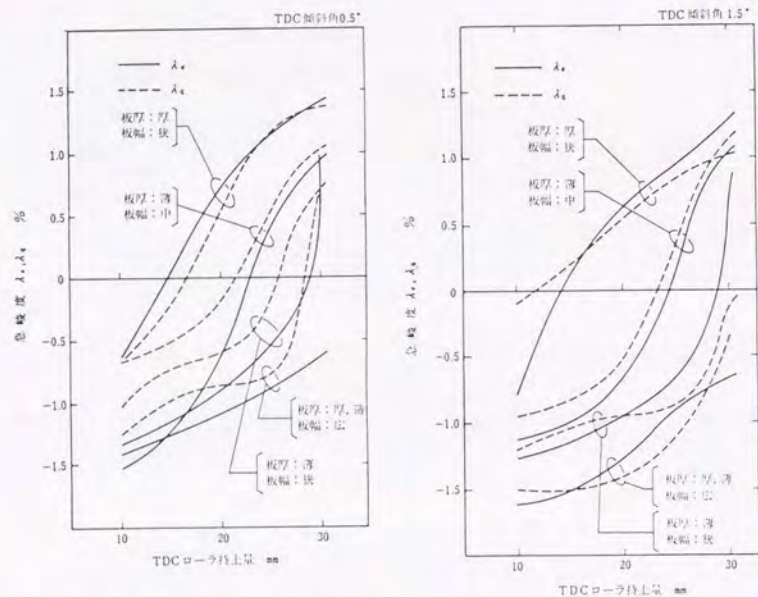


図 6.19 実機 TDC 装置の形状制御効果 (傾斜角 0.5°)      図 6.20 実機 TDC 装置の形状制御効果 (傾斜角 1.5°)

に傾斜角 1.5° の場合に TDC ローラの持ち上げ量を変化させた場合の  $\lambda_q$ ,  $\lambda_e$  の変化を示す。これらの両者を比較して、板厚が薄く、板幅が中間の材料の場合を除いて、TDC の傾斜角を小さくすると、持ち上げ量の変化に対する  $\lambda_q$  の変化が、傾斜角の大きいときに比べて大きくなるのがわかる。また、持ち上げ量 10mm から 30mm の 20mm の変化に対して、急峻度 1~2% 程度の形状変化が得られることがわかる。

図 6.22 に TDC の操作を一定にしておき、作業ロールベンダ圧を変化させた場合の形状の変化を示す。TDC の持ち上げ量が小さい場合は、全体に中伸び形状の範囲で変化しているが、TDC の持ち上げ量を大きくすると形状は耳波傾向のほうへシフトして平坦な形状が得られることがわかる。

以上の結果をまとめて、作業ロールの特性と比較するため、図 6.23 に示すように形状の変化を  $\lambda_q - \lambda_e$  平面に表した。

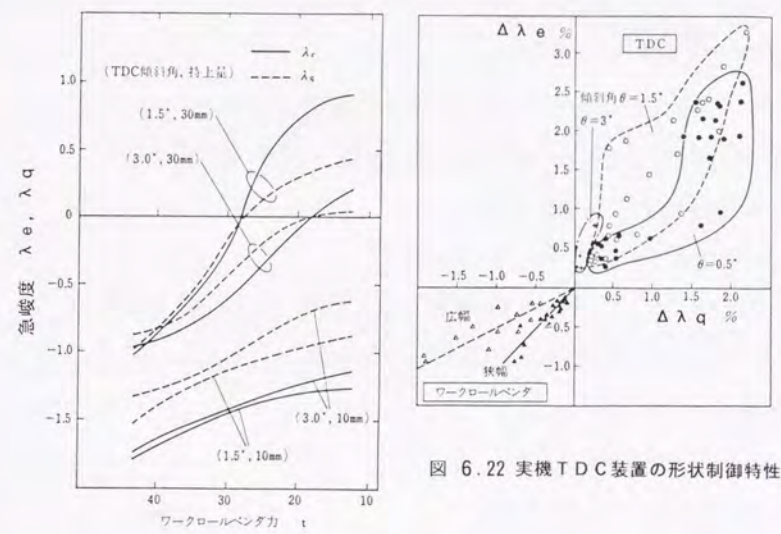


図 6.21 実機 TDC 装置の形状制御効果 (作業ロールベンダとの組み合わせ効果)

図 6.22 実機 TDC 装置の形状制御特性

TDC の場合は、操作することによって、 $\lambda_q$ ,  $\lambda_e$  が共に大きくなることから第 1 象限に、作業ロールベンダの場合にはともに小さくなることから第 3 象限にそれぞれ制御範囲が分布している。TDC はローラの傾斜角が小さいと  $\lambda_q$  が大きい領域にあり、大きいと小さい領域にある。また、作業ロールベンダは圧延材の幅で制御特性が異なり、広幅では  $\lambda_q$  の変化が大きく、狭幅で小さくなる。

全体的には、TDC の形状制御範囲は TDC ローラの傾斜角度と持ち上げ量の 2 つの制御量があるため広い範囲を覆い、作業ロールベンダは圧延材の幅で決まる線

の上の範囲しか取れないことが分かる。

しかしながら両者は競合し合うものではなく、互いに組み合わせることによって、より有効な形状制御が可能になるものである。

## 6.7 考察

本章での形状制御方法は、圧延機近傍の材料に外部から張力分布を与えて、ロールギャップでの塑性変形の幅方向分布を変える方法であり、従来から追及されていた、ロール弾性系の変形を制御するなどして直接ロールギャップの幅方向分布を変化させる方法と根本的に異なるものである。

ロールギャップ入り口に張力分布を与えたときには、圧延後の形状に殆ど変化がなく、ロールギャップ出口に与えたときのみ効果を表したが、入側形状が出側形状に影響を与えないと同様なメカニズムで説明できると考えられる。即ち、ロールギャップの中での塑性変形量は、ロールギャップ入り口に与えられた張力分布に相当する歪み分布に比べると桁違いに大きく、ロールギャップ内の変形の影響によって入り口で与えられた張力分布の効果は打ち消されてしまうと考えられる。

また、入り口の張力分布がロールギャップ内の変形に影響したとしても、中立点位置の変化の観点からすると、入り口に張力分布を与えた場合と、出口に与えた場合とで出側の伸びに対して逆の作用をすると考えられる。

これらの現象に対しての理論的、定量的な実証はまだできていないが、本章での実験結果からは現実の圧延では、どちらか、または両方が作用していると推定される。

圧延板に張力の幅方向分布を外部から与える方法は、現在のところロールギャップから若干離れたところに、板面に垂直な変位を与える方法が考えられているが、この方法は、サンブナンの定理によって、変位を与えた所での張力分布が最も大き

く、効果を期待したいロールギャップでは、距離に応じてなまった分布になってしまふことが解った。また、板端部の伸びを大きくする方向の制御は比較的容易であるが、幅中央部を伸ばす方向の制御は難しい。これは、材料の幾何学的な条件で、拘束の無い板端部にピークを持った張力分布を与えるのは比較的容易であるが、板幅中央部に大きなピークを持った分布を与えるのは難しいこと、更に、材料の3次元的な変形のし易さが板端部と板幅中央部で異なることも影響していると考えられる。このような特性から、本方法は中伸びを制御する有効な方法であると結論づけられる。即ち、耳伸びを制御するロールベンダとの組み合わせで、冷間圧延における任意性のある形状制御システムが構築可能な方法であると言える。

本章での例のようにロールで垂直変位を与える場合は、接触部の張力、面圧が大きくなり、これらによる材料表面の損傷、塑性変形などの心配もあり、非接触の方法が望ましい。

## 6.8 この章のまとめ

従来の形状制御法の考えとは異なる、新しい発想による、薄板冷間圧延における形状制御法である張力分布型形状制御法(TDC)を開発した。実験圧延機、実機圧延機での特性試験によって、本方式が作業ロールベンダに代表される従来の制御法とは異なる特性を持ち、これらの方法と組み合わせることによって、より広い形状制御が可能となることを明らかにした。

本章では、TDCの開発を通して、張力分布の形状すなわち、3次元的な材料変形への影響について、主に実験結果を中心に議論を進めた。この結果によれば、張力分布を付加することによる形状制御の効果はロールギャップ入り口では殆ど現れず、出側でのみ現れる事が判った。疑似3次元解析において、中立点の板幅方向分布がほぼ一樣になるように考えると、ロールギャップ入り口の張力分布の形は、出

口での形とほぼ同じであると仮定できること。すなわち、圧延前の形状の圧延時の材料変形への影響は殆どないと考えられることが、本章の実験で直接明らかにされたと言える。この関係は、プロフィール・形状推定モデルの材料変形の張力フィードバックの項に既に反映させている。この関係についての厳密な理論的評価については、今後の研究の発展に期待したい。

## 第7章

### 作業ロール水平曲げを利用した 新形式冷間圧延機の開発

## 第7章

# 作業ロール水平曲げを利用した 新形式冷間圧延機の開発

### 【概要】

この章では、新形式の形状・プロフィール制御ミルである、FFC (Flexible Flatness Control) ミルの開発と、この形状制御特性の検討を前章で開発した形状・プロフィール推定モデルによる解析および、実機データの採取によって明らかにした結果について述べる。この形式の圧延機は作業ロールの直径が小さくでき、比較的任意なロール変形を起こさせることのできる機構を持っているため、質の高い形状制御を行う可能性のあるものである。また、小径の作業ロールの使用によって、従来のロール径による圧延に較べて、圧延荷重、圧延動力なども小さくできる圧延特性も明らかにした。

### 7.1 まえがき

近年の薄鋼板に対するニーズは、板厚、形状などの一般的な品質の高さはもとより、より硬質に、より薄く、より表面光沢度を高くなど、多角化する傾向にあり、高い形状制御能力とともに、圧延性能の高い圧延機が望まれている。これらのニーズを満足するには、一般により作業ロール径の小さい圧延機を用いることが有効である。ステンレスなどの圧延に用いられている、センジミアミルに代表される多段圧延機は、これらのニーズを高いレベルで満たすものであるが、形状制御能力、生産能率の点では従来の鉄鋼圧延ミルに較べて相当見劣りするものである。そこで、従来のミル構造から余り逸脱しない範囲で、小径の作業ロールが採用でき、製品品質、生産性の両方を満足する圧延機が考えられる。このような圧延機では、作業ロールの水平方向の曲がりが生じ易く、なんらかの安定させる構造を付加する必要がある。

ある。この考えによる圧延機は MKWミル<sup>51)</sup>や、Z-hi<sup>52)</sup>ミルとして知られているが、これらは小径の作業ロールを水平方向に配置したロールで支えて、水平方向に安定させる構造を取っている。

また、作業ロール径が小さくなると、従来方式のベンダでは、第3章での解析のように安定した形状制御特性が得られず、他の方法によって形状制御を実現する必要がある。

そこで、MKWミル方式の圧延機構造で、水平方向のサポートロールによって、作業ロールに水平方向の曲げ力分布を直接加える方式による形状制御方法をもつ圧延機を考案した。(図7.1)

この構造によれば、従来の作業ロールベンダのようにロール曲げモーメントを与える位置的な制約がなく、水平曲げ力の与え方によって比較的任意のパターンのロールの変形が得られる。しかしながら、この方法では水平方向のロール曲げ変位を垂直方向のロールギャップ分布に効率良く変換することが必要であり、作業ロール、控えロールの直径の組み合わせ、ロール軸の中心を圧延方向に水平にずらせて配置するオフセットの量などが重要な要因となる。これらの要因の効果を事前に検討することによって、適切な圧延機構造、寸法を選ぶことが可能となる。

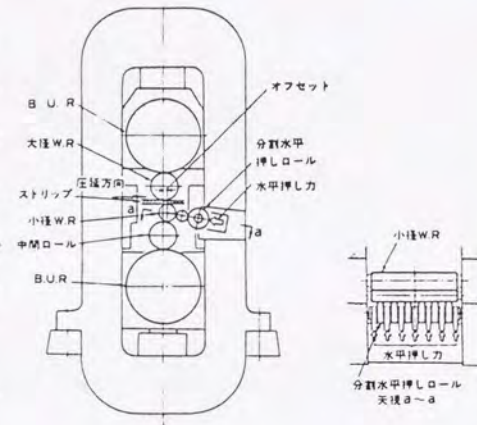


図 7.1 FFCミルの構想図

## 7.2 水平曲げによるロールギャップの分布の制御の可能性の検討

水平方向の曲げによる水平変位分布の、垂直方向のロールギャップ分布への寄与は、次式によるように水平方向曲げを与える作業ロールとこれに接触する控えロールの直径の和と、両ロール間のオフセット量に比例する。

$$\Delta y = \Delta x \cdot \theta$$

$$= \Delta x \cdot x_0 / (R_B + R_w)$$

この関係から、ロールギャップ分布の制御を効率良く行うためには、作業ロールとこれを支える控えロールの直径を小さくし、両ロール間のオフセットを大きくする必要がある。しかしながら、圧延荷重を支えるためには、十分大きな控えロール直径が必要であり、この両者の要求を満足するためには、控えロールよりも直径の小さい中間ロールを作業ロールと控えロールの間に配置する構造

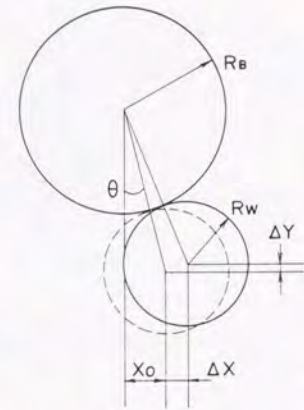


図 7.2 ロールオフセットの効果

が有効である。またこの中間ロールに垂直方向のベンディング力を与えることによって、作業ロールの水平方向曲げによるものとは異なる形状制御特性が得られ、両者の組み合わせによって、より広い特性が得られると考えられる。

この圧延機の形状制御特性を事前に検討するため、第2章の解析モデルに水平方向曲げ力および、中間ロールとの間の接触荷重の水平分力による水平方向の変位を解析する取束計算を導入した。

図7.3に解析の対象とした圧延機の構成を示す。解析の流れを図7.4に示す。



解析条件を表7.1に示す。

表7.1 解析条件

ロール寸法	小径作業ロール	φ 320mm × 1400mm
	大径作業ロール、中間ロール	φ 520 mm × 1400mm
	控えロール	φ 1435mm × 1400mm
	作業ロールオフセット	40mm
圧延条件	板幅	900, 1200mm
	入側板厚	1.0mm
	出側板厚	0.7mm
	圧延荷重	675, 900 TON
	張力 入側/出側	15/5 kg/mm <sup>2</sup>
ベンディング力	大径作業ロール及び中間ロール	0~70 TON/CHOCK
	小径作業ロール水平押し力	合計 0~240 TON

水平曲げ力は幅方向7箇所を与える場合を想定し、これらの力の組み合わせの様々なパターンについての解析を行った。図7.5に垂直ベンダ力と水平曲げ力の定義を示す。また、図7.6に水平曲げ力の代表的な6つのパターンを示す。

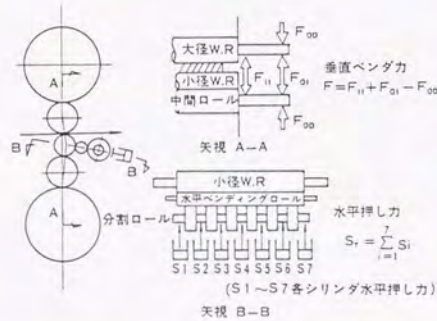


図7.5 水平曲げ力、垂直ベンダ力の定義

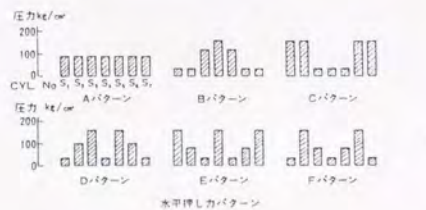


図7.6 水平曲げ力の代表的なパターン

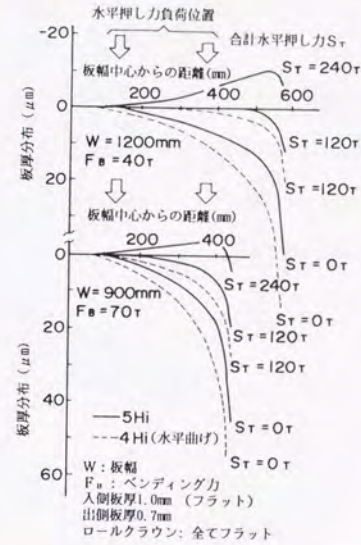


図7.7 水平曲げ力の効果 (解析結果)

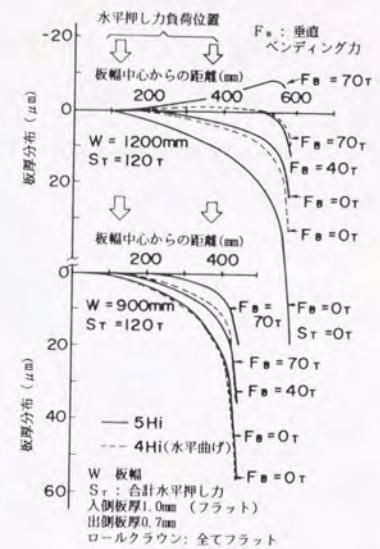


図7.8 垂直ベンダの効果 (解析結果)

図7.7に水平押し力の位置を固定して合計押し力を変化させた場合の解析結果を示す。同図中に中間ロール配置の影響を見るために中間ロールを配置しない4段ロール構造のミルによる解析例を記入している。

これから、4段圧延機による板クラウンは5段圧延機に比べて大きくなっているが、水平曲げ力による制御範囲は4段圧延機と5段圧延機とあまり差が無いことがわかる。

図7.8に水平曲げ力の付加位置と大きさを一定にして、垂直ベンダ力を変化させた場合の板厚分布の変化を示す。4段圧延機は大径作業ロールのみに垂直ベンダ力を負荷し、5段圧延機には大径作業ロールと中間ロールの両方に負荷した。この結果から、5段圧延機では中間ロールベンダの分だけ4段圧延機に比べて制御効果



が大きいこと、水平押し力とロールベンドの組み合わせによって大きな制御能力が得られることが解る。

図 7.9, 7.10 に水平押し力のパターンを変化させたときの板厚分布の解析結果を水平押し力の付加位置の数を6と5の場合について示す。この結果から水平押し力を付加した位置の板厚が相対的に薄くなる傾向が認められ、水平押し力のパターンによって多様性のある形状制御の可能性がわかる。

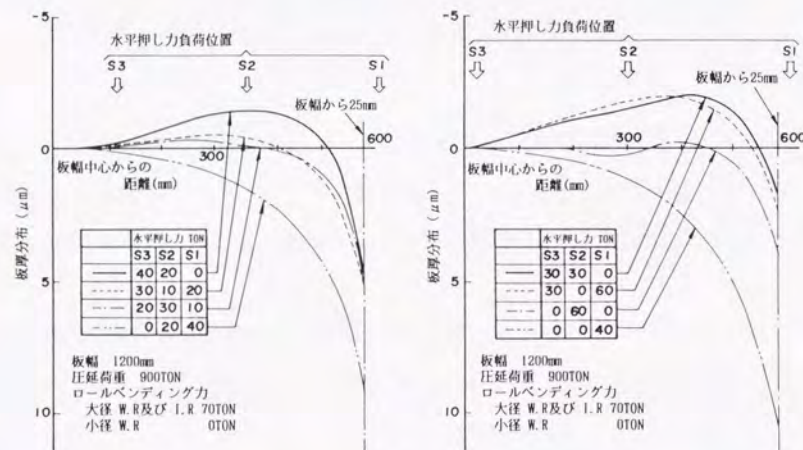


図 7.9 水平曲げパターンの効果 (解析結果) (付加位置の数: 6)      図 7.10 水平曲げパターンの効果 (解析結果) (付加位置の数: 5)

DとEのパターンと、垂直ベンドの組み合わせによる形状制御特性の、圧延要因による変化を解析した。図 7.11, 7.12 に板幅 1000mm, 1200mm の場合の特性の違いを示す。板幅が広いほうが制御範囲が広がることが示されているが、基本的な制御特性には大きな違いはないことがわかる。

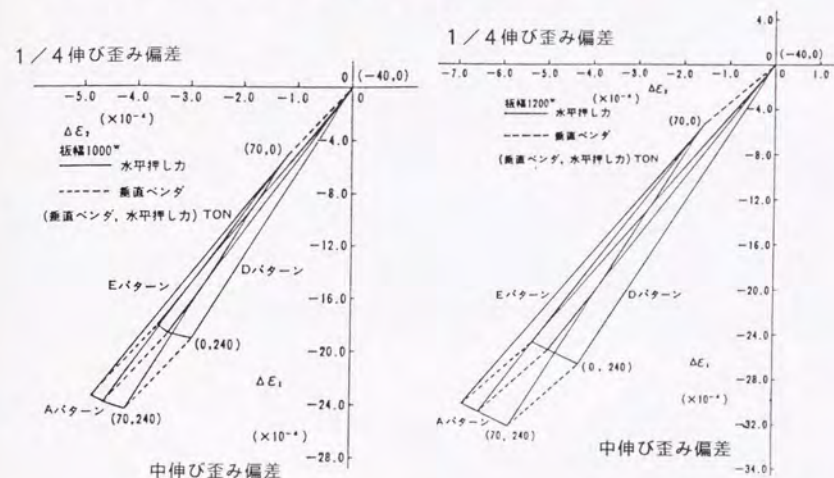


図 7.11 水平曲げと垂直ベンドの組み合わせによる形状制御範囲 (板幅1000mm)      図 7.12 水平曲げと垂直ベンドの組み合わせによる形状制御範囲 (板幅1200mm)

図 7.13 に小径作業ロールの径の影響の解析結果を示す。小径の場合には水平押し力の効果が大きくなるが、垂直ベンドの効果はこの変化には影響されない。これは、垂直ベンド力が大径作業ロールと、中間ロールに適用されている

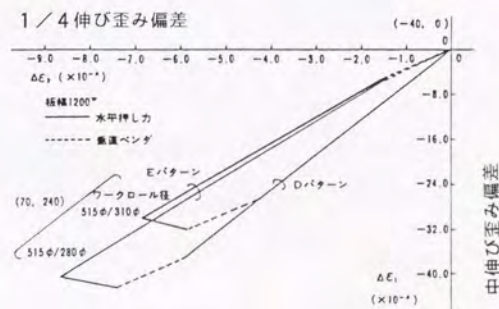


図 7.13 水平曲げと垂直ベンドの組み合わせによる形状制御範囲 (作業ロール径の影響)

ため、ベンダ力が直接作用しない小径作業ロール径の影響は小さくなると考えられる。

図 7.14 に作業ロールと中間ロールの間のオフセットの影響の解析結果を示す。小径作業ロールの影響と同ような影響が認められ、この圧延機寸法においてはこのオフセットは 30mm 程度であれば形状制御効果はあまり大きくは変化しないことが解る。

図 7.15 に圧延荷重が変化するときの形状制御特性を示すが、水平押し力、垂直ベンダ共に圧延荷重が大きくなると形状制御能力が小さくなり、圧延荷重による小径ロールの水平変位の変化が影響していると考えられる。

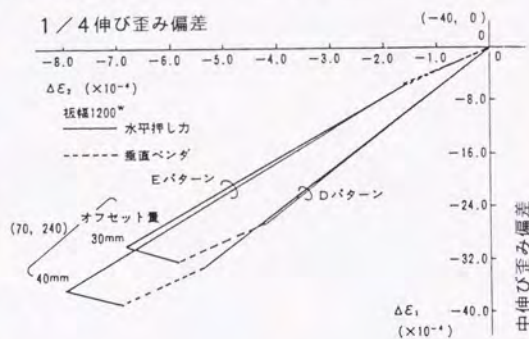


図 7.14 水平曲げと垂直ベンダの組み合わせによる形状制御範囲 (ロールオフセット量の影響)

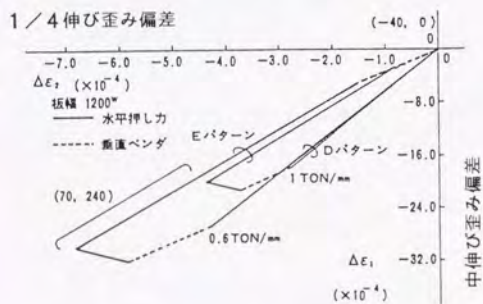


図 7.15 水平曲げと垂直ベンダの組み合わせによる形状制御範囲 (圧延荷重の影響)

これらの解析によって、以下の結果が得られた。

- ①ここで対象とした圧延機寸法では、中伸び、耳波形状制御能力が大き

い。

- ②水平曲げパターンによって複合形状の制御成分が得られる。
- ③板幅の狭い場合には複合形状の制御は難しい。(油圧シリンダの配置が板幅内に入る数による)
- ④水平押し力と垂直ベンダの組み合わせによって、比較的広い形状制御が可能である。

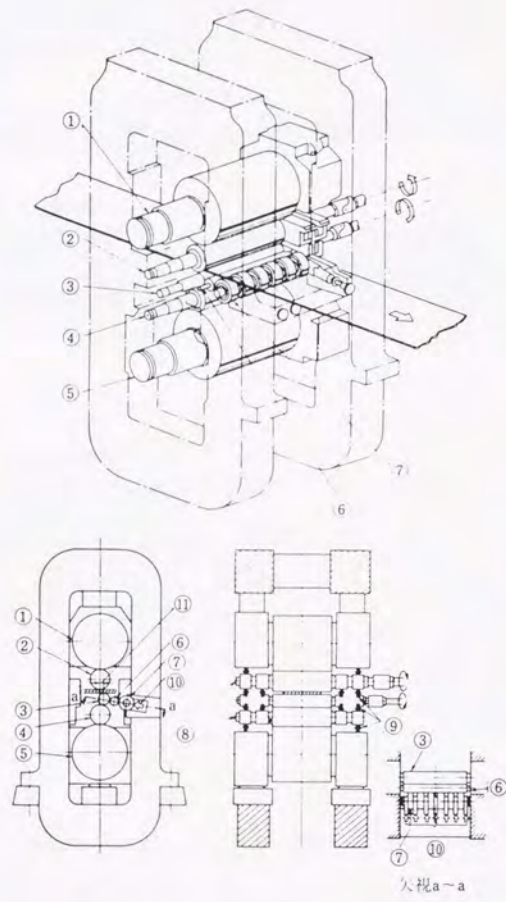
これらの結果から、本方式による圧延機は、水平曲げを制御しない方式の同様な圧延機 (MKWミル相当) に比べて大きな形状制御能力を有することが分かった。しかしながら、ロールの弾性変形はさほど大きくはないため、熱間圧延に必要なプロフィール制御には十分とは考えられず、本圧延機は形状制御を対象にするものと考えることができる。

また、ここで用いた解析モデルが、実際の圧延における形状をほぼ定量的に表し得ることから、以上の解析結果をふまえて、既設の圧延機に組み込む水平曲げ機構の仕様 (水平曲げシリンダの数、油圧力、オフセット量など) を定量的に決定することができた。

### 7.3 実機に組み込んだ水平曲げ機構

前節の解析で水平曲げ力を直接作業ロールに与える方法によってロールギャップ分布が制御できること、および、この制御による形状の変化量を定量的に明らかにし、小径の作業ロールを組み込んで、比較的大きな形状制御能力を有する新しい形式の圧延機の実現性を確認した。この結果をうけて、各基本仕様を提示し、具体的な設計に結び付けた。

図 7.16 に解析の結果から決定した実機に組み込む F F C ミルの概略構造を示す。



- ① 上BUR
- ② 大径WR
- ③ 小径WR
- ④ 中間ロール
- ⑤ 下BUR
- ⑥ 水平ベンディングロール
- ⑦ 分割ロール
- ⑧ ダブルショックベンディング
- ⑨ 垂直ベンディング力
- ⑩ 水平押力
- ⑪ オフセット

図 7.16 FFCミルの概略構造

写真7.1 に正面から見たFFCミルを示す。図7.17 に実圧延機に組み込んだ水平曲げ機構を示す。作業ロールの後方に軸方向に分割した支持ロールを配置し、この支持ロール軸に油圧シリンダによって水平曲げ力を与える。分割支持ロールの偏荷重による作業ロール表面への影響を緩和するため、水平曲げ作業ロールと、分割支持ロールとの間にさらに小径のロールを配した。

また、水平曲げ作業ロールと接するロール径を小さくするため、5段構造として、水平曲げを与える作業ロールは小径のロールとした。このことにより、上下で作業ロール径は異径となるが、平均ロール径は従来の4段圧延機に比べて相当小さくなる。ここでの改造では、片側の作業ロールにのみ本機構を適用したが、これは圧延機の高さ制限のため、そうでない場合には、上下の作業ロールとも同様の構造に変更できる。

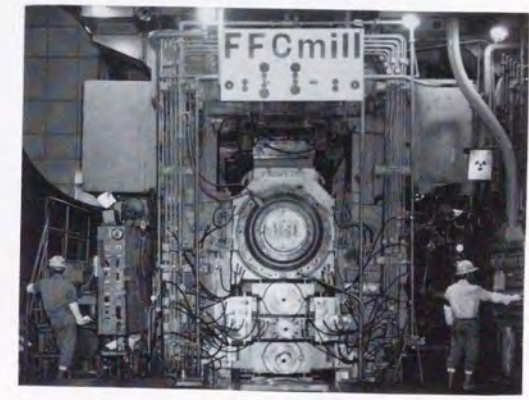


写真 7.1 FFCの実機組み込み状況

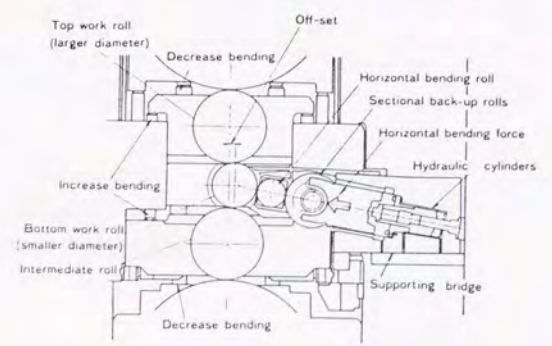


図 7.17 水平曲げ機構の詳細

写真7.2 に圧延機から抜き出した作業ロール、中間ロールを示す。

さらに、より形状制御能力を大きくするため、大径の作業ロールと中間ロールの間に強力な垂直ベンダ力を付加できるダブルショックベンダを採用した。

表7.2 に実機F F Cミルの主な仕様を示す。

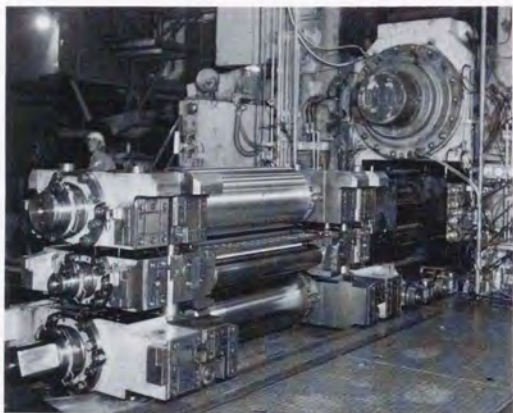


写真 7.2 ロール抜き出し状況

表 7.2 実機 F F Cミルの仕様

大径作業ロール寸法	φ 460~520 mm × ℓ 1425 mm
小径作業ロール寸法	φ 280~329 mm × ℓ 1425 mm
中間ロール寸法	φ 460~520 mm × ℓ 1425 mm
水平ベンディングロール寸法	φ 180~200 mm × ℓ 1425 mm
分割ロール寸法	φ 390~400 mm × ℓ 160mm × 6個
ロール駆動	950KW × 2 ツインドライブ
最高圧延速度	760 mpm

#### 7.4 実機における形状制御特性

実機における形状制御特性を調べるため、同一寸法の材料を用いた圧延実験を行った。水平曲げ力の組み合わせは非常に多く考えられるが、特に単純形状、複合形状の制御能力を調べるため、図7.6のA、D、Eの3つのパターンを選んだ。また、形状の測定は圧延機の出側に配置した電磁相関型の形状検出機によって行った。

表7.3に実機実験条件を示す。対象圧延材料はアルミキルド鋼板で、板幅による形状制御機能の違いを明らかにするため、3種類の材料について実験した。

表 7.3 実験条件

材料寸法	(1.2→0.96) × 1224 mm (0.58→0.46) × 1012 mm (0.5→0.4) × 729 mm
圧延油	牛脂系圧延油
圧延速度	約 200 mpm
水平押し力合計	約 30~160 TON
垂直ベンダ力	約 -10~70 TON

図7.18にマイクロコンピュータを用いたデータ収集システムで収集した実機形状データを後処理した結果を示す。

図の上から水平押し力のパターン、水平押しシリンダの位置、形状検出機の出力を伸び率偏差で表した値の順で表している。左の図はクォータバックルを、右の図は中伸び・耳波共存波となっていることが解る。図7.19にD、Eパターンの水平押し力と垂直ベンダを変化させたときの形状変化を、 $\epsilon q - \epsilon e$  平面上に示す。

この結果により、以下の事が言える。

- ① 垂直ベンダによる形状変化は水平押し力、パターンによって変化しない。
- ② 水平押し力による形状変化の特性は、垂直ベンダの特性と異なる。
- ③ 水平押し力による形状変化は水平押しパターンによって異なる。

これらから、水平押し力と垂直ベンダの組み合わせによって、複合波の形状制御が可能であり、自由度の大きい制御システムが組み立てられることが期待できる。

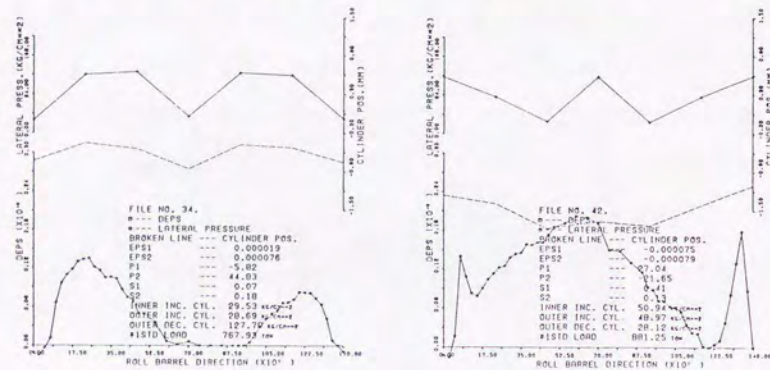


図 7.18 形状計測結果例 (コンピュータ処理後)

上実線：水平ベンダ圧力、破線：水平ベンダシリンダ位置

下実線：形状計出力

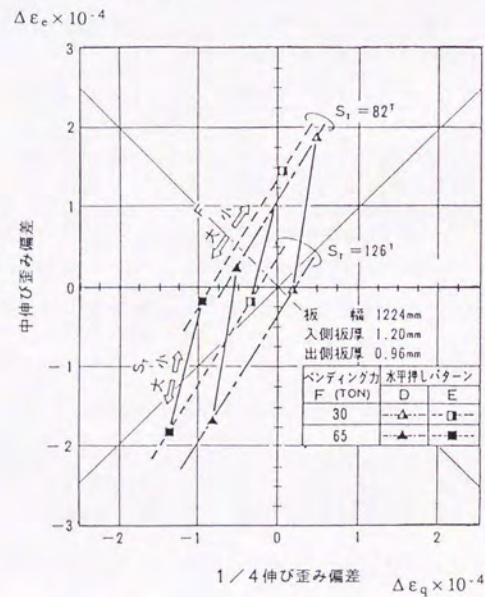


図 7.19 実機における FFC 形状制御能力実験結果

図 7.20~22 に各材料における形状変化の特性を示す。図中に同一水平押し力・パターンで垂直ベンダを変化させた点を直線回帰した線を記入した。水平押し力、垂直ベンダによる形状変化の傾きは材料寸法によって異なり、形状制御範囲にも差のあることが解る。これは前節における事前の解析の結果と定性的に一致しており、事前検討の正しさを示すものである。

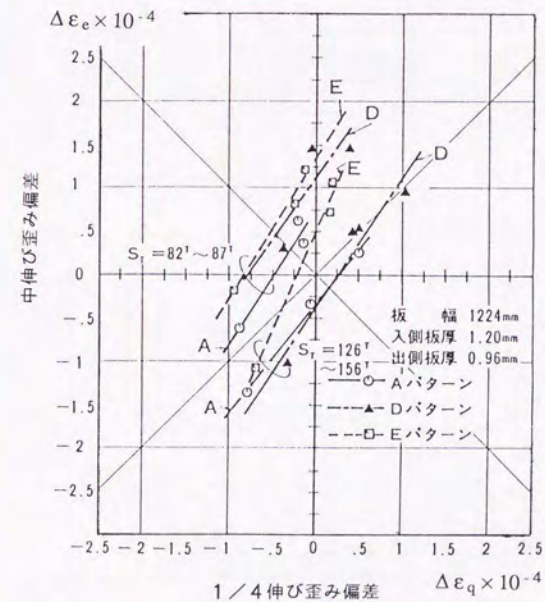


図 7.20 板幅 1,224mm の材料の形状制御能力

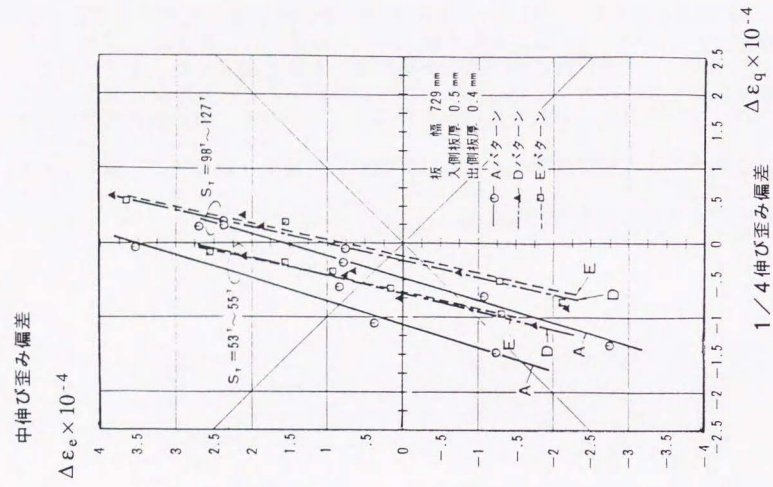


図 7.21 板幅 1,012mm の材料の形状制御能力

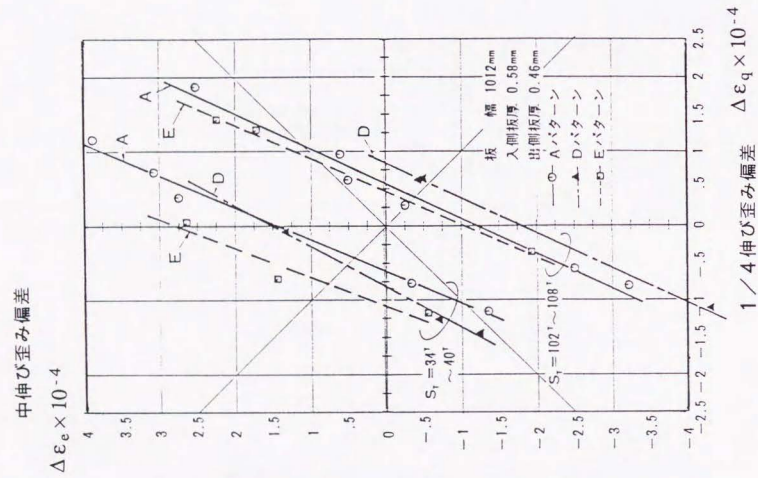


図 7.22 板幅 729mm の材料の形状制御能力

図 7.23 にこれらの実験結果をまとめて F F C ミルの形状制御特性を表した。これから解るように、水平曲げ力パターンによって形状制御特性は異なるが、その違いは小さく、むしろ垂直ベンド力との違いが大きく、垂直ベンドとの組み合わせによって、任意性のある制御が可能になると考えられる。

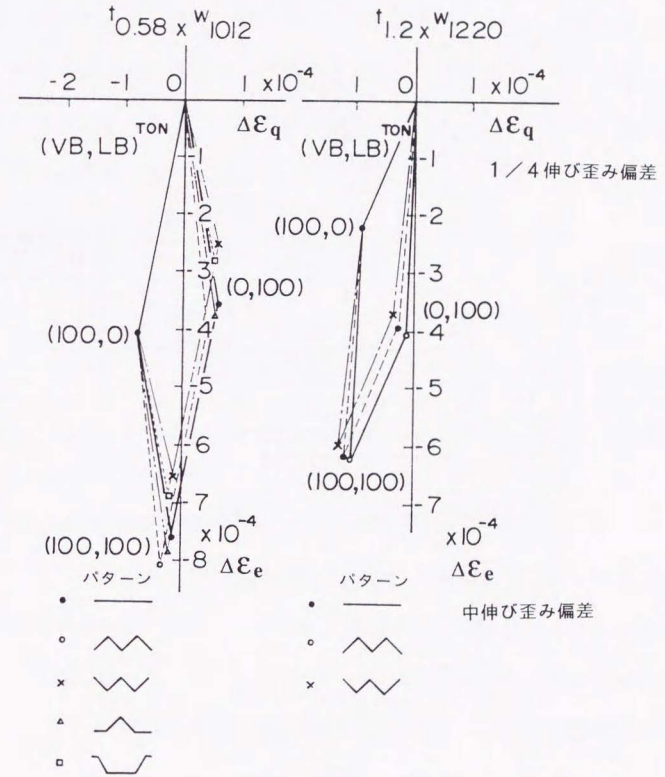


図 7.23 実機 F F C ミルの形状制御能力まとめ

これらの実験結果を元に、形状計をセンサとするフィードバック制御システムを開発した。システムの概要を 図 7.24 に示す。制御に用いたロジックは 第 9 章で詳述する。

実操業における制御の効果を、図 7.25 に示すが、FFCミルの採用によって、急峻度 0.3% 程度以内に制御されていることがわかる。

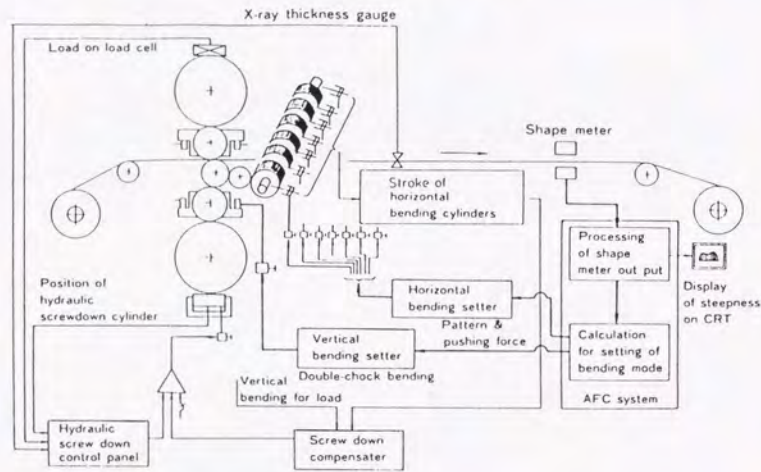


図 7.24 自動形状制御システムの系統図

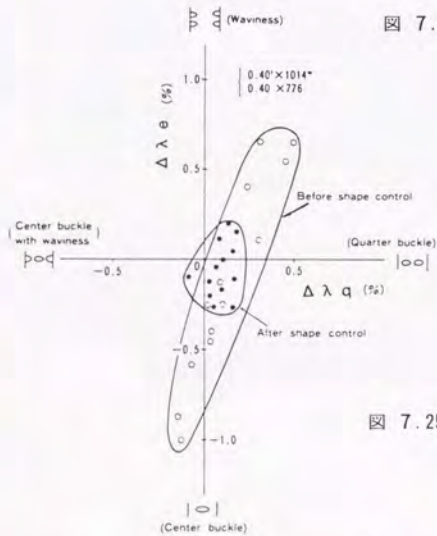


図 7.25 FFCミルによる形状制御効果

## 7.5 ロール径小化によるエッジドロップ減少効果

このミルは本来、形状制御を目的にして開発されたが、小径の作業ロールを採用できることから、ロール偏平の軽減、圧延荷重の軽減の両方の効果によって冷間圧延にも発生するエッジドロップ（圧延によって板端部で急に板厚が薄くなっている現象）の軽減が期待できる。また、作業ロール駆動系を上下ロールで独立にしてあるため、上下ロールの周速を変化させる異周速圧延が可能であり、この圧延によって更にこれらの効果が大きくなることが期待できる。表 7.4 に多パスでの圧延特性を明らかにする実験の条件を示す。

表 7.4 多パス圧延条件

素材寸法	'2.0t×919 (酸洗済熱延コイル)						
パススケジュール	パスNo.	1	2	3	4	5	6
	板厚 mm	1.4	1.06	0.75	0.53	0.38	0.30
	圧下率 %	30	24	29	29	28	21
	後方張力 kg/mm <sup>2</sup>	3.2	3.8	4.7	6.1	8.1	8.6
	前方張力 kg/mm <sup>2</sup>	4.2	4.9	6.2	7.6	9.9	10.5
作業ロール径	mm	4Hiミル : φ520, FFCミル : φ515/φ312					

異周速圧延によって、圧延荷重の減少が得られるが、この結果を図 7.26 に従来の 4 段形式、FFC形式の同周速、FFC形式の異周速の各圧延による圧延荷重の実績の比較で示す。これから、ロール径が小さくなったことによって、約 20% の異周速によって 4~10% の圧延荷重減少効果が得られた。これらの効果は既に筆者等の研究によって明らかにされている<sup>53)</sup> 効果と同様のものである。

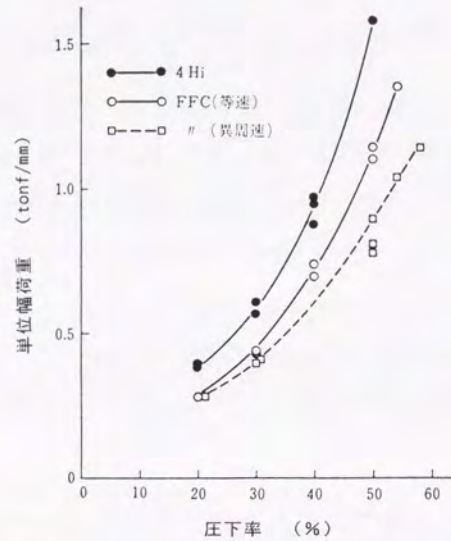


図 7.26 各圧延機形式による圧延荷重の比較

また、このときの板エッジドロップの累積圧下率による変化を4段圧延機の場合と比較するために、エッジドロップの増加比率  $\gamma$  を以下のように定義した。

$$e_r = \frac{h_{75} - h_{15}}{h_c}$$

$$\gamma = \frac{e_r - e_0}{(e_{90} - e_0)4Hi}$$

ここに、 $e_r$  : 累積圧下率  $r$  に於けるエッジドロップ。

$h_{75}$  : 板端から75mm内側の板厚。

$h_{15}$  : 板端から15mm内側の板厚。

$h_c$  : 幅中央の板厚。

多パスで累積圧下率 90% まで圧下した場合の、エッジドロップ増加率を 図 7.27 に示す。

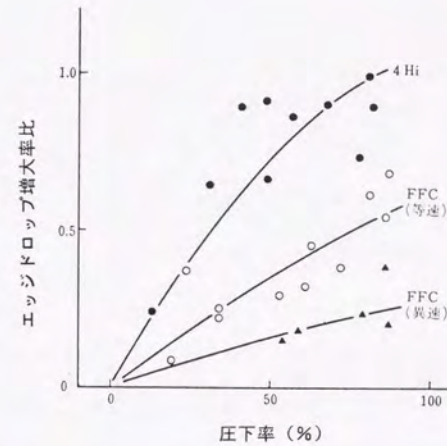


図 7.27 各圧延機形式によるエッジドロップ増大率の比較

ロール径が小さくなったことによって、冷間圧延でのエッジドロップの増加を半分、また異周速によって更に半減できることがわかる。

圧延荷重の軽減効果はせいぜい 30% 程度であるが、エッジドロップの変化はその変化より大きく、荷重の変化による効果だけではないと考えられる。

荷重以外の効果として、ロール径が小さくなったことによるロール表面偏平の変化と、異周速による応力状態の変化による効果が考えられる。前者による効果は直径の変化と、接触弧長の変化によるものとして理解できる。しかしながら、後者については剪断応力による材料のメタルフローの変化によるという報告もあるが<sup>54)</sup>、現在のところ明らかではない。



## 7.6 考察

作業ロールを積極的に水平方向に曲げて、ロールギャップの幅方向分布を制御することによって形状制御を行う形式の本圧延機の特性は、作業ロール径によって左右される。作業ロール径が大きい場合には、ロールの曲がり変形はほぼ2次曲線的になってしまい、通常のロールベンダの特性と大差ないものになってしまう。作業ロール径が小さい場合には、水平方向から与えた曲げ力に比較的応じた多次曲線的な変形をし、複合形状の制御に対応できる特性を示すようになる。しかしながら一方、小径ロールの場合には圧延荷重による曲がりも複雑になり易く、形状を安定させるためには、幅方向に急峻な制御が必要になってしまう。この制御性と安定性は互いに合い反するものであり、両者を程々に満足できる、圧延荷重、ロール胴長に応じた適切なロール径があると考えられる。この選択は、この章で開発したモデルによる解析で行い得るものである。

また、小径にすることによって、圧延荷重、ロール表面偏平の減少が達成され、より薄い材料や、より硬質な材料の圧延が可能となる。しかしながら、この章で論じた圧延機は片側の作業ロールのみを小径にしてあり、もう一方は従来の圧延機と同様の径であり、平均ロール径としての効果のみが得られることになる。圧延機ハウジングの高さの余裕があれば、更にもう一方も小径化するこ

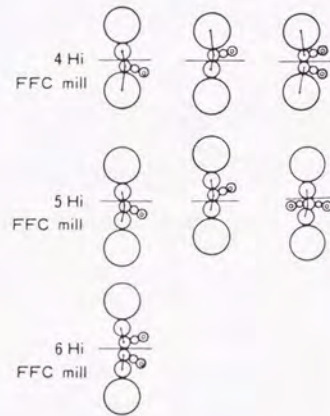


図 7.28 FFCミルの各種形式の例

とができ、圧延特性、形状制御特性もより大きくなることが期待できる。

また、サイドサポートを水平方向の反対側にも設ける（Z-hiミルと同じような配置とする）ことによって、より形状制御の任意性が増すものと考えられる。

以上のように、本圧延機FFC形式には4段、5段、6段の図7.28のような各形式が考えられ、圧延の目的に合わせた広い選択が可能であり、通常の4段圧延機を小径の圧延機に改造する方法として、一つの方向を示したものと言える。

## 7.7 この章のまとめ

より小径の作業ロールを組み込み、形状制御範囲の広い圧延機として、作業ロールの水平曲げを利用した新しい形状制御圧延機を開発した。

この特性を第2章で開発した形状推定モデルでの評価、実圧延機での試験圧延によって以下の項目が明らかとなった。

- (1) これらの結果を用いて、実圧延機に組み込む水平曲げ機構、適切なロール径の組み合わせなどの仕様を決定した。
- (2) この機構を実機DR (Double Reduction) ミルに組み込み、形状制御機能を確認した。水平曲げによる形状制御の任意性はさほど大きくはないが、中間ロールベンダー、作業ロールベンダーとの組み合わせによって、比較的大きな形状制御範囲が得られた。これらの結果は事前に解析によって検討した結果とほぼ一致しており、形状制御形式の開発に対する解析モデルの有効性が明らかとなった。
- (3) 小径の作業ロールの採用によって、圧延荷重の減少、これにともなって、冷間圧延で発生するエッジドロップ発生を少なくする効果があることを確認した。

(4) 実操業に当たって、制御デバイスの最適な組み合わせの選択の可能性は非常に多く、この圧延機のように、制御機構が多い圧延機の制御には、より普遍的な制御ロジックが必要であることが指摘できる。

この種の新形式の圧延機はその特性を定量的に評価することが重要であり、ここでの実機実験の事前に解析モデルによる評価ができれば、その開発、導入に対しての適切な判断が可能となり、第2章で述べたモデルの工業的な価値は大きいことがこの章でも実証された。

## 第8章

### 冷間圧延における プロフィール制御方法の開発

## 第 8 章

### 冷間圧延における プロフィール制御方法の開発

#### 【概要】

従来不可能と言われていた冷間圧延におけるプロフィール制御の可能性を、作業ロールシフトを実験圧延機に適用することによって確認し、同方法の実機圧延への採用を成功させた。この方法によれば、板端部の板厚の急減（エッジドロップ）を減少させ、ほぼ平坦なプロフィールの製品を製造可能である。また、この方法の重要な要因である、板端部近傍の3次元変形特性についての考察を加えた。

#### 8.1 まえがき

冷間圧延においては、材料の断面プロフィールは、ほぼ熱間圧延で決定されてしまい、断面プロフィールの板厚比は熱延板のそれと同一にしかならないと言われて来た。一方、板端部を切り取って矩形断面に近い状態にした場合でも、板端部の板厚が急激に薄くなる状況（エッジドロップ）は、冷間圧延で形成される。即ち、冷間圧延においても、板端部付近では断面プロフィールが変化していることとなる。これは、板端部付近での材料の変形特性が板幅中央部付近とは異なること、および、作業ロールの表面偏平変形が板端部で小さくなることに起因していることは、第2章での解析から分かる。これらの事実をふまえて、ロールのプロフィールを板端部で急峻に変化させ、材料の変形特性に合わせて、板端部付近の作業ロールの偏平変形によるロールギャップ分布の変化を相殺できれば、板端部付近のプロフィールの制御が可能であると推定した。

板端部での材料の3次元的な変形は第2章で述べたように、簡略化したモデルでは推定できなく、変形特性を規定する各係数について、実験的または解析的な確認が必要である。ここでは、板端部付近のプロフィール制御の可能性を検討するため、実験機による実験と、この実験結果によって仮定した板端部の塑性変形特性を用いた解析による事前検討、この結果をふまえた実機へのロールシフト機構の組み込み、および、実機での制御特性を述べる。

## 8.2 実験圧延機による板端部プロフィール制御の可能性の実験

冷間圧延でのエッジドロップの発生と、第2章での板端部付近でのロールおよび材料の変形の仕方の議論によって、冷間圧延においてもある程度のプロフィール制御が可能なのが推定される。これを確認するため、実験圧延機に作業ロールを軸方向にシフトさせる装置を組み込み、実験をおこなった。

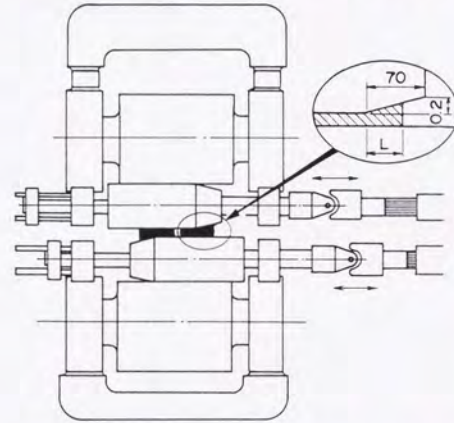


図 8.1 作業ロールシフト装置とロールプロフィール

実験に用いた圧延機の概要を表8.1に示す。作業ロールプロフィールの寸法を図8.1に示す。また、材料寸法、圧延条件を表8.2に示す。

圧延前の板のプロフィールの影響を除くため、板端部を幅広くスリットした材料を用いて実験を行った。プロフィールの測定は圧延前後の同じ位置で行うことが望ましいため、サンプル取りせずに材料を圧延機においたまま測定する装置を作成し、測定位置にマークを付けておき、圧延前後に材料を止めて同一位置を測定した。同装

表 8.1 実験圧延機の概略仕様

ロール寸法 :	$\phi 200 / \phi 500 \times \ell 500 \text{ mm}$
圧延荷重 :	最大 250 ton
圧延速度 :	最大 30 m/分
張力 :	最大 8 ton
圧延動力 :	75 Kw DC × 2

表 8.2 実験条件

パス数	圧下率 (%)	張力 (Kg/mm <sup>2</sup> )		シフト量 (L) (mm)
		後方	前方	
1	15~65	5	18	0~40
2		18	20	
3		20	15	
圧延材料	S P H C 酸洗鋼板 t2.3 × w250, t3.2 × w250 mm			
圧延油	5%牛脂エマルジョン			
圧延速度	10 m/分			

置の概略を図8.2に示す。測定端にはマグネスケールを2台用いて材料の上下から板厚を接触測定し、幅方向位置の測定にも同様の測定器を用いた。出力デジタル信はマイクロコンピュータに入力して演算、図形処理した。

板端部付近のプロフィールの状況を定量化するために、次の量を定義した。

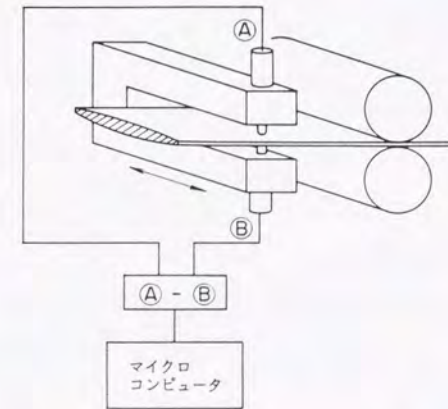
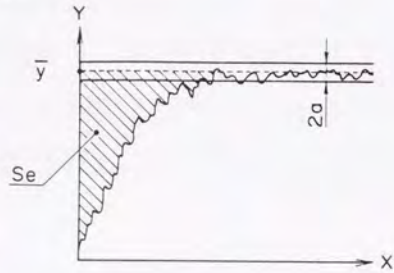


図 8.2 実験機に組み込んだプロフィール測定器

エッジドロップ評価値

$$S_e = \int_0^a (h(z) - h_c) \cdot m(z) dz$$

ここに  $h(z)$  は板幅方向位置  $z$  における板厚、 $h_c$  は基準位置の板厚、 $m(z)$  は  $z$  の位置の重み関数で、ここでは  $\sqrt{z}$  を採用した。  $a$  は評価計算の閾値で、平均板厚  $h_c$  の範囲を表す。



評価値  $S_e$  が負の値であると、エッジドロップ、正の値となるとエッジアップのプロファイルとなっていることが表される。

### 8.2.1 ロールシフト量の効果

ロールシフトの効果を見るため、圧下率をほぼ一定にしてロールシフト量を各パスで 0~40mm 変化させたときのプロフィール変化を測定した。

図 8.3 にプロフィールの測定結果の例を示す。

各パスでの  $S_e$  のロールシフト量による変化を図 8.4 に示す。

各パス圧延後の板幅の変化を図 8.5 に示す。

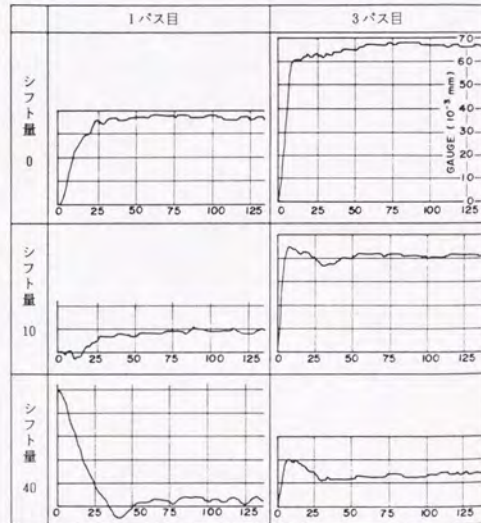


図 8.3 プロフィール測定結果 (シフトの効果)

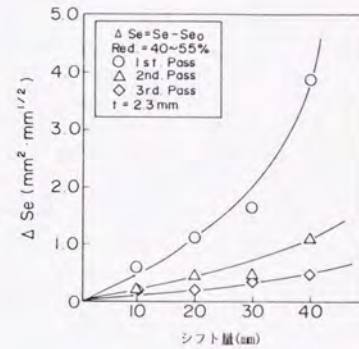


図 8.4 シフト量によるエッジドロップの変化

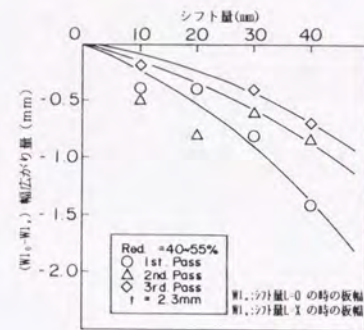


図 8.5 シフトによる板幅の変化

これらの結果から、板端部のプロフィール制御は可能であるが、材料特性、圧延条件によって制御の量が異なることが解った。ロールシフト量によって板幅が縮む現象が現れるが、これは板端部の板厚を厚くすることによって、板端部付近に生ずる圧延方向の引張応力が大きくなるためであると考えられる。また、ここでの実験を通して、安定したプロフィール制御を達成するためには、シフト量と材料の幅方向位置の関係を  $\pm 5\text{mm}$  以内程度に制御することが必要であることが解った。

### 8.2.2 圧下率によるプロフィール変化の影響

ロールシフトによるプロフィール変化が圧延条件によって異なると予想されるため、シフト量を 30mm に一定にして、各パスでの圧下率を 20~60% 変化させてプロフィールの変化を測定した。図 8.6 にプロフィール測定結果を示す。通常圧延では、圧下率が大きくなるに連れてエッジドロップが大きくなっているが、ロールシフトを行った圧延では低圧下率ではエッジアップし、圧下率が大きくなるに連れて平坦に近くなっている。この変化を  $S_e$  で図 8.7 に示す。通常圧延ではパスが進むに連れてエッジドロップが蓄積されるが、圧下率による変化は顕著で

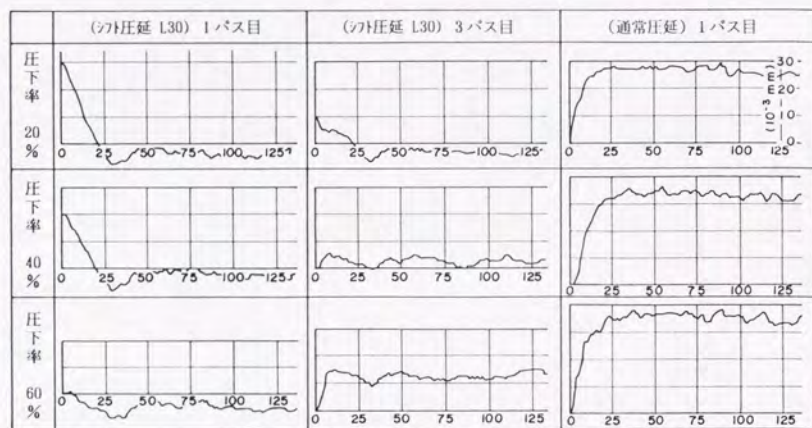


図 8.6 プロフィール測定結果 (圧下率によるプロフィール変化への影響)

はない。これに対して、ロールシフトによるプロフィール変化は圧下率に大きく依存し、低圧下率では通常圧延からの変化が大きい、高圧下率になるとその変化が小さくなっていく。また、プロフィール変化は前パスのほうが大きいことも示されている。

図 8.8、8.9 に幅広がり量の圧下率による変化を示す。通常圧延でも 2、3 パス目の低圧下率では幅縮小が生じているが、図 8.7 圧下率によるエッジドロップの変化これは 1 パス目で発生したエッジドロップ部分の 2、3 パス目での圧下率が板幅中央部付近に比べて小さくなり、圧延方向張力が大きくなる影響であると推定される。ロールシフト圧延時にはこの傾向がさらに大きくなっている。

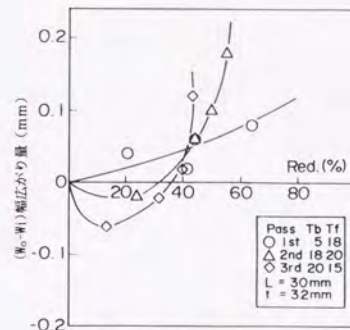
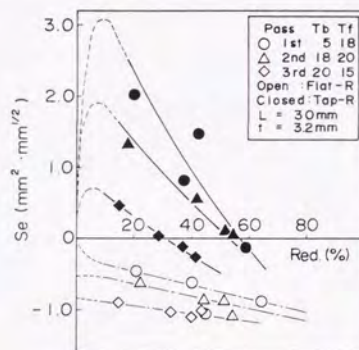


図 8.8 通常圧延における幅広がり

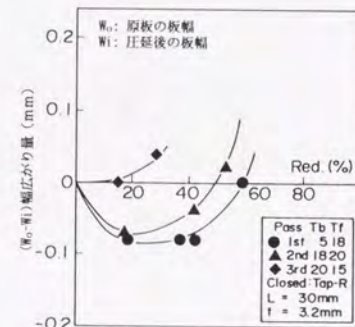


図 8.9 シフト圧延における幅広がり

### 8.2.3 多パスにロールシフトを適用したときのプロフィール変化

多パスにおけるロールシフトの効果を調べるため表 8.3 のような条件で実験を行った。

表 8.3 多パス効果の確認のための圧延条件

パス No.	1	2	3
圧下率 (%)	40	55	41
張力 (後方/前方) (Kg/mm <sup>2</sup> )	5/18	18/20	20/15
ロールシフト量 (mm)		0, 30	

図 8.10 にプロフィール測定結果を示す。前段パスでのロールシフトによるプロフィール変化が大きく、またこの効果が後段パスにも及んでいることが解る。

これを  $S_e$  で図 8.11 に示す。第 1 パスのみにロールシフトを適用したときには、3 パス共に適用した場合に比べて、第 2 パス以降で効果が半減してしまい、2 パスのみ、3 パスのみの適用と  $S_e$  値では差が無い結果となっている。また 3 パス全部に適用したときと、第 1、第 2 パスまたは第 2、第 3 パスに適用したとき

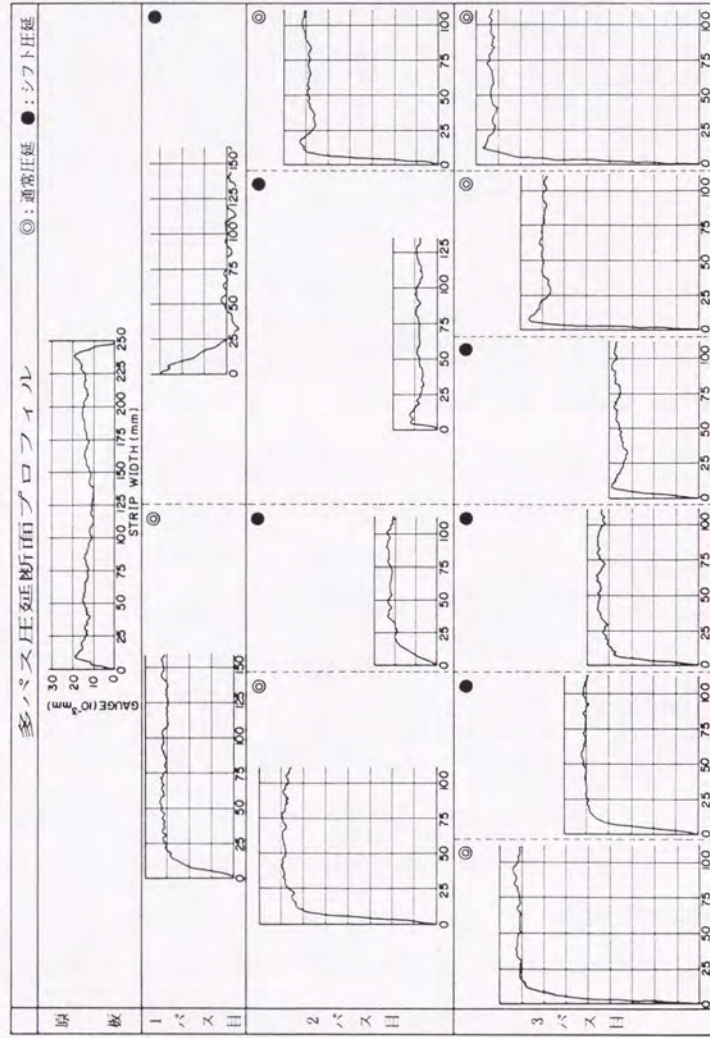


図 8.10 プロフィール測定結果 (多パスにおけるプロフィールの変化)

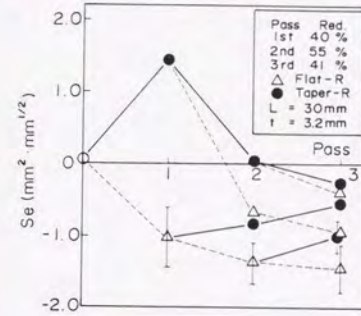


図 8.11 パスによるエッジドロップの変化

とは Se の変化の差は小さいが、

図 8.10 のプロフィールを見ると第 1 パス目への適用効果は他のパスよりも大き

いと判断できる。この違いは、プロフィールが変化する幅方向の深さが適用パスによって異なることによるものと推定される。

図 8.12 にこの実験時の形状の変化を示す。通常圧延ではパスが進むに連れて耳波傾向になっているが、ロールシフトを行った場合は小さな耳波の範囲に収まっている。

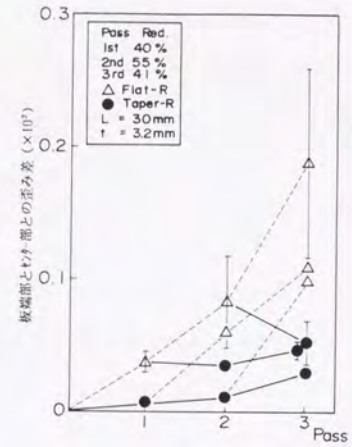


図 8.12 多パス圧延における形状の変化

#### 8.2.4 原板のプロフィールの影響

実機での圧延原板のプロフィールはこれまでの実験でのプロフィールの様には平坦ではなく、エッジドロップを持っているのが普通である。この影響を見るため、熱延酸洗板のエッジ部を残した材料によって実験を行った。実験条件は表 8.3 と同様である。この時のプロフィール変化の測定結果を図 8.13 に示す。原板は約 70mm 程度の深さのエッジドロップを有しており、通常圧延の場合には 3 パス圧延後にもこの影響が残っている。このような原板に対するロールシフトの効果は頭

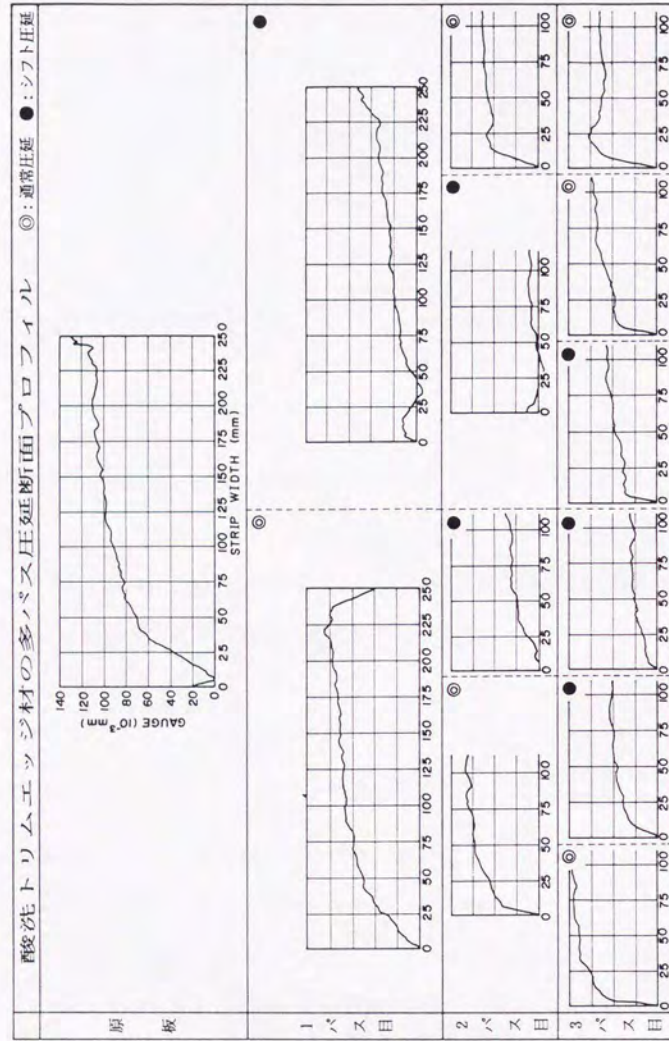


図 8.13 プロフィール測定結果  
(原板にエッジドロップがあるときのシフトの効果)

著で、第1パスでの適用によって、原板のエッジドロップはほぼ無くなってしまっており、引き続いてのパスでの適用によってほぼ矩形のプロフィールが得られることが解る。

### 8.2.5 ロールギャップ転写率

以上の実験によって、テーパ状のプロフィールを持つ作業ロールを軸方向にシフトしてテーパ部分が板端部に重なるような圧延方法が、板端部付近のプロフィールを制御するのに有効であることが実証されたが、この方法による板プロフィールの変化は、材料や圧延条件によって異なることも明らかになった。これが材料の3次元的な変形特性、特に板端部の平面応力状態の影響範囲の大きさによって説明されるであろう事は、第2章、第3章で既に議論されていたことである。ロールシフトによるロールギャップの変化が板プロフィールを変化させるし易さが、この影響範囲に左右されると考えられる。実験結果からこの範囲を推定するために、ロールギャップ転写率  $\eta$  を定義した。

$$\eta = \Delta h / \Delta g$$

ここに、 $\Delta h$  は板厚分布の基準状態からの変化、 $\Delta g$  はロールシフトによるロールギャップ変化である。

図 8.14 に各パスでのロールプロフィール転写率の板幅方向の分布を示す。これからわかるように、転写率は板端部の近くで

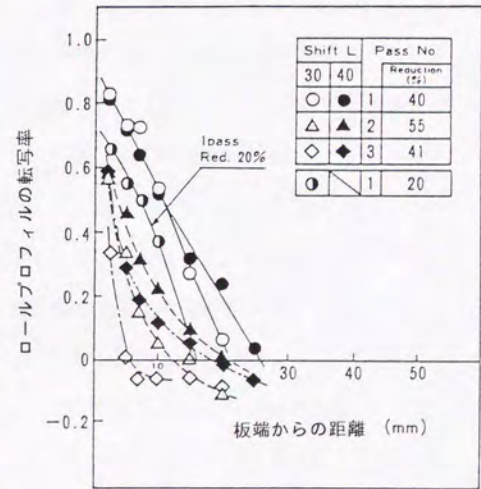


図 8.14 各パスでのロールプロフィール転写率の分布



大きく、板厚が大きい、変形抵抗の小さい前段パスで大きいことが判る。また、第1パスについては、圧下率を20、40%に変えた場合についてプロットしているが、圧下率が大きいほうが転写率が大きいことが解る。これは、3次元的な変形のし易さに影響している板端部の平面応力状態の影響範囲や、プロフィール変化に対する張力フィードバックの大きさを表す形状変化係数が、ロール接触弧長や、材料の変形抵抗に影響されることを示唆している。

### 8.2.6 実験の考察

以上の実験から以下のことが確認された。

- (1) 冷間圧延にても特に板端部付近では形状を大きくは乱さずにプロフィールの制御が可能である。これはエッジドロップの量が比較的小さく、これに匹敵する程度のプロフィール制御量は、エッジドロップ発生の原因の一つと考えられる冷間圧延における小さな3次元変形で吸収できることを表すものである。
- (2) プロフィール変化可能な板端部からの領域は、板厚が大きく、変形抵抗の小さい前パスで広い。これは、材料の3次元変形が、幅方向の変形のし易さに影響するロール接触弧長に左右されることを示唆していると考えられる。即ち、第2章で議論したように、板端部は平面応力状態(幅方向の垂直応力が0)であるが、ロールギャップ内での材料の幅広がりによって幅方向の剪断応力が発生し、これが幅方向の垂直圧縮応力を増加させるため、幅方向の中央部になるにつれて平面応力状態は次第に平面歪み状態に移行する。この遷移領域内で板プロフィールの変化が容易であると考えられる。この状況は、幅広がりし易さを示しているといつてよく、遷移領域の広さはロール接触弧長、板厚、

圧下率、変形抵抗などに依存する。

- (3) 本実験でのロールギャップ変化範囲では板端部に大きな破断などは発生しなかった。これは材料が比較的柔らかい前パスで板端部の張力が大きくなるようなプロフィール制御を行い、材料が堅くなる後のパスではこのプロフィールを維持するような制御を行ったことによって、板端部の張力が緩和されるためであると考えられる。実機においても同ような制御を行うことによって、板端部の割れの発生し易い後段パスで板端の引張応力を緩和することができる。
- (4) 多パスでのプロフィール制御は重ね合わせの効果を示し、前段で板端から広い幅での大きな量の制御、後段で板端部近傍の制御と、通常の圧延でのエッジドロップの発生を防止するような制御が可能である。また、プロフィールを制御したことによる形状の変化は、実用的な制御の範囲では大きくなく、タンデムミルでの適用には問題ない範囲であると判断できる。

以上から冷間圧延でも十分プロフィール制御が可能なが確認された。

また、実機ではロール径が大きいため、エッジドロップの発生範囲、および量は実験機に比べて大きくなるが、本方式によればこの範囲程度の比較的広い領域でプロフィールに変化を与えることができると推定できる。

### 8.3 形状・プロフィール推定モデルによる事前検討

第2章で検討したように、板端部近傍では板端面の平面応力状態の影響があって、圧延圧力の分布および、幅方向の材料の変形の状況が板幅中央部付近（平面歪み状態に近い）とは異なる。平面応力状態の影響の範囲は、材料の幅広がりによって生ずるロールとの間の摩擦力の幅方向分力と、変形前後の材料との間の剪断応力によって決まると考えられる。特に材料間の剪断応力は、材料の幅方向変位とロールと材料の接触弧長の比に比例する剪断歪みに依存すると考えられ、この剪断応力が板端部から板幅中央に向かって重積し、板幅方向の垂直応力が増加して行くと推定できる。これは、平圧延における幅広がりについての Siebel の式の考察と類似である。

この平面応力状態の影響を解析で定量的に求めるためには3次元の圧延変形解析を行う必要があり、現状では簡易的なモデルにその解析を導入するのは難しい状況である。そこで、ここでは前節での実験結果を参照して、板端部の平面応力の影響を表す  $g(z)$  の各バスでの組み合わせを設定し、それぞれの場合で作業ロールをシフトすることによってロールギャッププロフィールを変化させた時の板プロフィールの変化を解析し、実機での効果を推定した。平面応力状態の影響範囲はここでの考察から、実機においては実験機においてよりも広いと予想される。

平面歪み状態の影響の仕方を2次曲線的であると仮定し、その影響範囲を  $l_g$  とすると、 $z$  を板端部からの距離として  $g(z)$  は

$$g(z) = \frac{z^2}{l_g^2} - \frac{2 \cdot z}{l_g} + 1.0 \quad : 0 \leq z \leq l_g$$

$$g(z) = 0 \quad : l_g < z$$

で表される。

表8.4 に解析条件を、表8.5 に  $l_g$  の各スタンドでの組み合わせを示す。

表8.4 解析条件

バスNo.	1	2	3	4	
作業ロール径	750 mm				
控えロール径	1500 mm				
ロール胴長	2000 mm				
板幅	900 mm				
板厚 mm	3.125	2.483	1.833	1.395	1.232
張力 kg/mm <sup>2</sup>	4.6	16.6	17.6	18.2	6.
圧延荷重 Ton	787	869	887	800	
作業ロールシフト量 mm					
条件 No.	A	0.0	0.0	0.0	0.0
	B	100.0	0.0	0.0	0.0
	C	0.0	100.0	0.0	0.0
	D	0.0	0.0	100.0	0.0
	E	100.0	100.0	50.0	0.0

表8.5 平面歪み影響範囲の組み合わせ

バスNo.	1	2	3	4	
$\alpha$	0.9				
$l_g$ mm					
ケース	①	60.0	40.0	30.0	20.0
	②	40.0	30.0	20.0	10.0
	③	0.0	0.0	0.0	0.0

図8.15, 8.16, 8.17 に各ケースでの最終スタンドでの板端部付近の板プロフィールを示す。ロールシフトを行わない場合（条件A）の板端部付近の板プロフィールは、 $l_g$  に大きく依存していることが分かる。また、ロールシフトを行った場合でも、 $l_g$  によってプロフィールの変化の仕方が異なり、特に平面応力状態の影響がないと仮定したケース③の場合には、ロールシフトの適用の仕方による板プロフィールの

変化の違いは余り大きくない事が分かる。このような解析結果と、実測の板プロフィールとの比較によって平面応力状態の影響範囲の仮定の是非が判定できると考えられる。

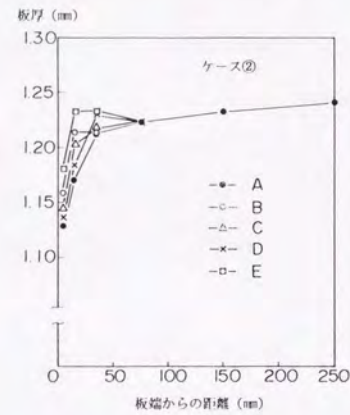
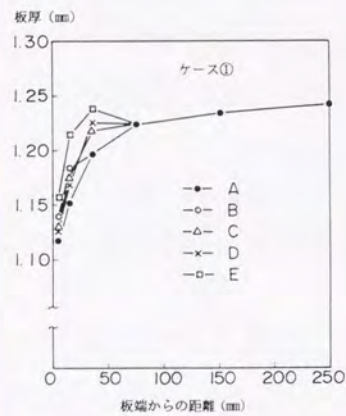


図 8.15 エッジドロップ解析結果 (ケース①) 図 8.16 エッジドロップ解析結果 (ケース②)

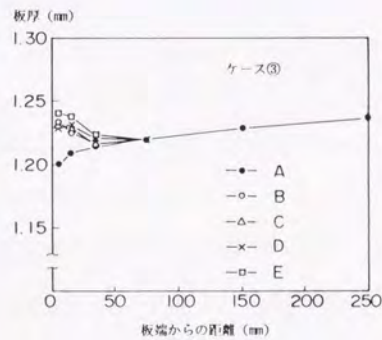


図 8.17 エッジドロップ解析結果 (ケース③)

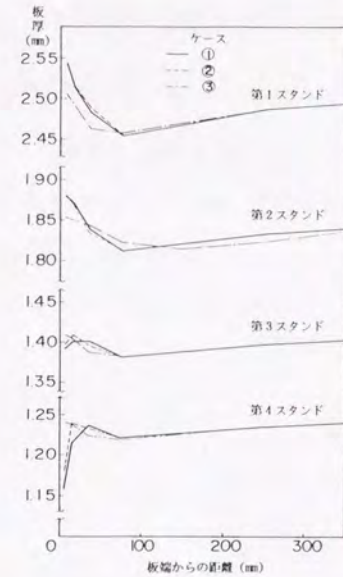
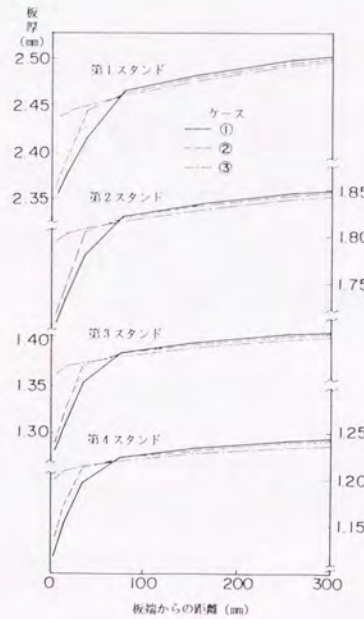


図 8.18 4スタンドでのエッジドロップ変化 (条件A: 通常圧延) 図 8.19 4スタンドでのエッジドロップ変化 (条件E: シフト圧延)

図 8.18, 8.19 に A, E 条件の各スタンドでのプロフィールの解析結果を示す。これらの結果から、効果の大きさはケースによって異なるが、どの場合でも板端部付近でのプロフィールは変更可能であること、多パスにロールシフトを適用することによって、プロフィール制御効果が大きくなる事が分かる。また、この解析と、前節の実験結果によって、板端部の平面応力状態の影響範囲  $l_g$  によってエッジドロップの挙動が左右されることが予測でき、多パスでの適用では、 $l_g$  の大きい前段のパスで比較的大きなプロフィールの変化を与えることが最終製品のプロフィールを平坦に制御するのに有効であることが推定できる。これらの検討をもとに実機に作業ロールシフト機構を組み込んだ。

## 8.4 実機における特性

### 8.4.1 実機に組み込んだ作業ロールシフト装置

実験圧延機による実験、および、この結果を参照にした解析によって冷間圧延機での板プロフィールの制御の可能性を確認したので、NKK福山製鉄所の新タンデム冷間圧延機に作業ロールシフトを組み込んだ。

この圧延機の概略仕様を表8.5に示す。

表8.5 タンデム冷間圧延機の仕様

スタンドNo.	1	2	3	4
圧延機形式	4段圧延機			6段圧延機
ロール寸法	φ550/φ1420×1750 mm			φ490/φ550/φ1420×1750 mm
制御機構	作業ロールシフト			作業、中間ロールシフト
	作業ロールベンダ			作業、中間ロールベンダ
圧延速度	最高 1320 m/min			
潤滑油	牛脂系エマルジョン			

4スタンド構成のタンデム圧延機で、第1～3スタンドに作業ロールシフトを組み込んだ4段圧延機が、第4スタンドに作業ロール、中間ロールシフトを行う6段圧延機が採用されている。

板プロフィール制御には、第1～第3スタンドの胴端部にテーパを付けた作業ロールのシフトを用い、第4スタンドの作業ロールシフトは、板幅の異なる材料の圧延の際のロール表面の粗さの幅方向の変化を分散させるために用いる。最終スタンドの形状制御は、中間ロールシフト、中間ロールベンダ、作業ロールベンダによって行う。また、圧延機入り側には酸洗ラインが直結された完全な連続圧延機である。

### 8.4.2 実機圧延機におけるプロフィール制御効果

この圧延機における、プロフィール変化特性を明らかにし、作業ロールの適切なプロフィールの選択、作業ロールシフトのセットアップ方法を明らかにするため、2種類の材料を用いて実機実験を行った。図8.20に対象材料の変形抵抗を示す。また、実験における圧延荷重の測定結果を図8.21に示す。

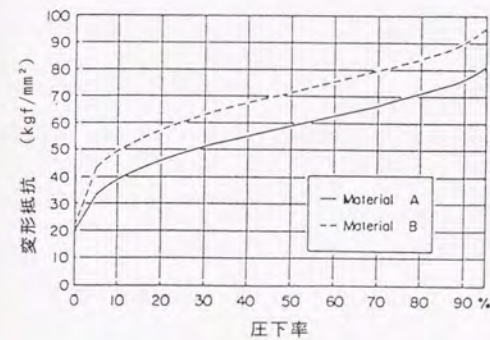


図8.20 実機実験に用いた材料の変形抵抗

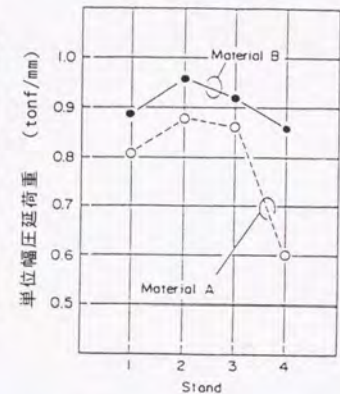


図8.21 2つの材料の圧延荷重実績

#### (1) 各スタンドでの作業ロールシフト効果

実圧延機では、オンラインのプロフィール測定器は第2スタンド出口にしか設置されていないため、各スタンドでの板プロフィールの変化を知るためには圧延機を圧延中に止めて、各スタンド出口でプロフィール測定用のサンプリングを行う必要がある。実タンデム圧延機でのプロフィール制御特性を知るためにはこのような基礎的な実験が必要であり、この目的で、比較的硬質の材料(B)を用い、2種類のテーパの作業ロールを組み込んだ実験を行った。表8.6にシフト条件を示す。シフト量は、テーパの始まる部分が板幅内に入る量で表した。

表 8.6 各スタンドでのロールシフト条件

ケース	作業ロール テーバ	シフト量 (mm)		
		第1スタンド	第2スタンド	第3スタンド
A		0	0	0
B	0.5/450	100	100	50
C	1.0/450	100	100	50

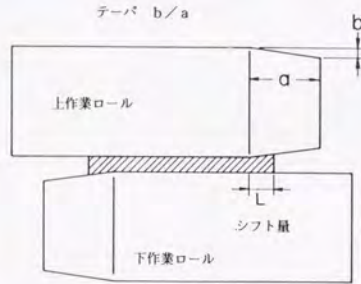


図 8.22 に中止めして、各スタンドでのプロフィールを測定して、板厚比率で表した結果を示す。最終スタンドはシフトをしていないため、第3スタンドまでのロールギャッププロフィールの変化による板厚プロフィール変化のみが得られる。

図 8.23 にそれぞれのテーバ量のロールを用いたときの第1スタンドでのロールプロフィール転写率の分布を示す。テーバが小さいときは、転写率も小さくなり、板プロフィールの変化は相乗的に小さくなってしまふ。すなわち、有効なプロフィール制御を行うためには、ある量以上のロールギャップ分布の変化が必要であることが推定される。また、実験機実験に比べて、板端部からの広い範囲でプロフィール変化が得られていることも解った。

この実験では、各スタンド単独でのロールシフト操作は行っていないので、各スタンド出側のプロフィール変化は前のスタンドまでのプロフィール変化の影響が含まれているため、各スタンドでの入側の板プロフィールの出側プロフィールへの影響を

シフトなし

テーバ : 0.5/450

テーバ : 1.0/450

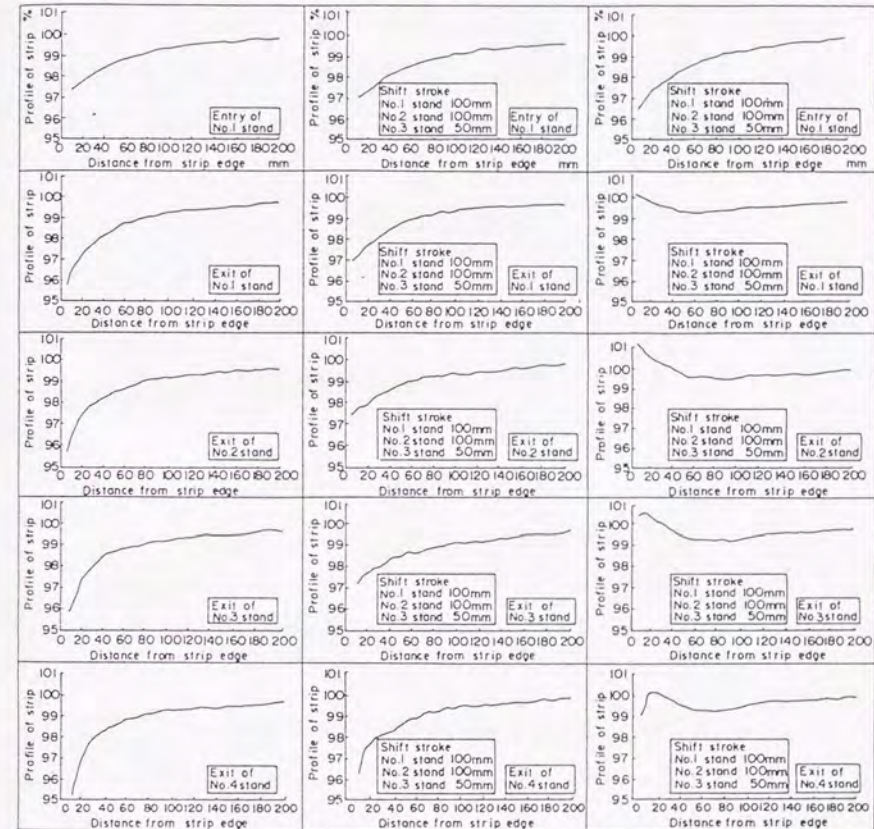


図 8.22 プロフィール測定結果

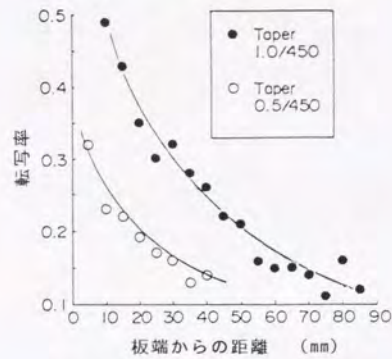


図 8.24 ロールプロフィール転写率 (圧延スタンドの影響)

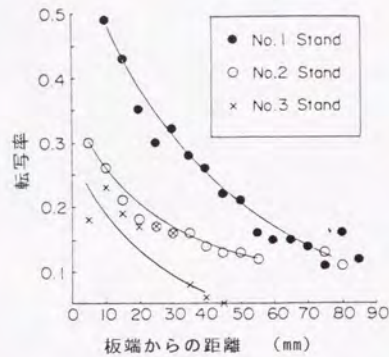


図 8.23 ロールプロフィール転写率 (テーパによる影響)

推定し、これを除くことによって転写率を推定した。

入り側板プロフィール比率の変化影響係数  $\xi$  で定義した。

$$\xi = \frac{(\Delta c_r)_n - (\Delta c_r)_{n-1}}{(\Delta c_r)_{n-1} - (\Delta c_r)_{n-2}}$$

ここに、 $(\Delta C_r)_i$  はプロフィールを変化させたときの  $i$  スタンドでの比率クラウン。

$(\Delta C_r)_i$  は基準状態での  $i$  スタンドでの比率クラウン。

最終スタンド (第4スタンド) での  $\xi$  は3スタンドまでにロールシフトを適用した場合としない場合のプロフィールの変化によって推定でき、これによれば影響係数  $\xi$  は、板端部付近では幅方向の位置によらずほぼ一定で、0.7 であることが推定された。第3章での解析結果から、この値は板厚又は変形抵抗に依存すると考えられるので、各スタンドで [0.4, 0.5, 0.6, 0.7] と仮定した。

図 8.24 にこの入り側板プロフィール比率の変化影響係数を用いて、各スタンドでのプロフィール転写率を推定した結果を示す。これから解るように、スタンドによって

転写率が異なり、実験機での傾向と同様に、前段スタンドでのプロフィール変化が大きい。また、転写率の傾向は、プロフィール推定モデルの解析で仮定した、平面応力状態の影響範囲と一致しており、板端部での転写率は、材料の3次元的な変形の特徴性に左右されていることが確認された。また、これらの結果から、平面応力状態の影響範囲は、冷間圧延の場合ほぼ板厚の 10 倍程度であると推定できる。

(2) 各スタンドでの作業ロールシフト量の適正化

軟質材における、最終スタンド出口でのプロフィール変化に及ぼす第1～第3スタンドのロールシフトの効果を明らかにするため、表 8.7 に示すロールシフトの組み合わせで実験を行った。テーパは 0.5mm/450mm を適用した。

表 8.7 作業ロールシフト条件

ケース	シフト量 (mm)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
第1スタンド	0	0	50	50	50	50	100	100	100	100	100	100
第2スタンド	0	0	0	0	50	50	50	50	50	100	100	100
第3スタンド	0	50	0	50	0	50	0	50	100	0	50	100

圧延後のプロフィールはサンプル用に切断した後、人手によってマイクロメータを用いて測定した。測定例を 図 8.25 に示す。

この結果から、第1、2スタンドのシフト量 100mm (ケースJ) で殆ど平坦なプロフィールが得られており、シフトを適用しない場合 (ケースA) との違いは顕著である。この材料 (A) の場合はB材料の場合よりも、小さなテーパで十分なプロフィール制御効果が得られている。これは、圧延荷重の違いによるロール偏平量の違い、圧下量 (接触弧長) の違いや、変形抵抗の違いによる横流れ特性の違いなどが考えられる。この違いについては、3次元的な圧延変形解析などで明らかにすべき

であろう。

板プロフィールの実機での管理方法で、ロールシフトのプロフィール変化への効果を表した。実機でのプロフィールの管理方法は、板端部から 75mm の板厚 ( $h_{75}$ ) と 15mm の板厚 ( $h_{15}$ ) の差をエッジドロップ、 $h_{75}$  と板幅中央の板厚 ( $h_c$ ) の差をセンタクラウンとするものである。

$$\text{エッジドロップ比率} = (h_{75} - h_{15}) / h_c \times 100 \%$$

$$\text{センタクラウン比率} = (h_c - h_{75}) / h_c \times 100 \%$$

図 8.26 に各ケースの両値を示す。

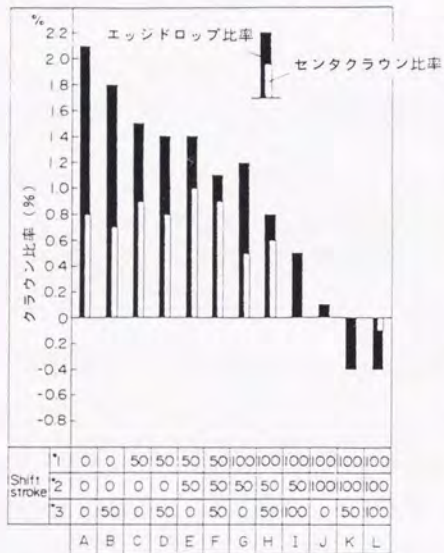


図 8.26 各ケースにおけるエッジドロップとセンタクラウンの比較

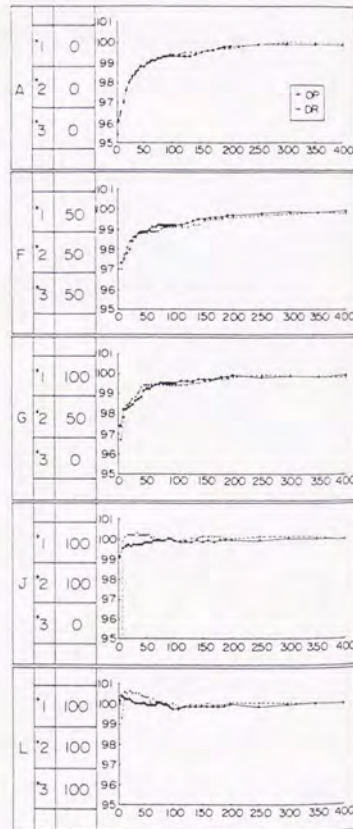


図 8.25 プロフィール測定結果

特にエッジドロップの減少効果は大きく第 1、第 2 スタンドでのシフト量を大きく与えることによってほぼ 0 にできる。また、センタクラウンは第 1 スタンドのシフトを 100mm としたときに大きく減少しており、板厚の厚い時には、板端から比較的内側に入ったところまでプロフィールの制御が可能で、センタクラウンといえども、せいぜい板端から 100mm 程度のプロフィール制御を行うことで十分に減少できることがこの結果からわかる。

各材料に対して最適なロールギャップ分布の与え方があると考えられるが、現在は、軟質材、硬質材でロールテーパを変えて、作業ロールのシフトの仕方を一定にしたセットアップのしかたで対応している。なお、ロールシフトによって発生する形状の変化は、この章での実験程度のロールプロフィール、シフト量では、大きくなく、ロールベンダ、最終スタンドでの形状制御手段で十分制御可能である。

## 8.5 考察

冷間圧延のように、3次元的な塑性変形の少ない圧延条件においても、板端部近傍でのプロフィール制御は可能であることが実験圧延機、実機での実験で確認された。これは、エッジドロップの発生からも予想されることであるが、冷間圧延においても、板端部付近では、幅方向の変形は比較的容易であるためであると考えられている。この特性は第 2 章で議論した様に板端部の平面応力状態の影響の範囲によって説明できる。即ち、ロールギャップ内の応力状態を考察すると、板端部では幅方向の拘束がなく、自由面であることから幅方向垂直応力は 0 である（平面応力状態）が、板端部から幅中央部にくるに連れて、ロールギャップ内のロール面からの拘束、前後の材料との特に幅方向の変形の違いによる拘束によって幅方向の垂直応力が増加し、平面歪み状態に近付いてゆく。この応力・歪み状態の変化の仕方は、変形抵抗などの材料特性、材料寸法、圧延条件によって左右されることが考えられる。

平面応力状態では、幅方向の変形は拘束されず、比較的容易に3次元的な変形が起こり、板厚方向の歪み変化が生ずるような状況が発生しても、幅方向の歪みで相殺され易く、圧延方向の歪み偏差が生じにくく、張力フィードバックの効果が小さくなるが、平面歪み状態ではこの変形が拘束され、横流れが発生しにくいような状況になり、張力フィードバックが大きく、板プロフィールの変化が小さくなると考えられる。

板端部でのこのような変形の特性を利用して、プロフィールを制御するためには、この特性に応じて、板端部付近に急峻なロールプロフィールの変化を与える必要があり、従来のロールの弾性変形を通した変化では達成不可能であった。ここでは、作業ロールの胴端部にテーパ状のプロフィール変化を研削によって与えておき、ロールを軸方向にシフトすることによって、直接ロールギャップ形状を変化させる方法を適用し、この制御に成功した。

この章では、実験的に3次元的な変形のしやすさを確認し、実機への適用に成功した経緯を論じたが、これを確認する簡易的な解析モデルでは板端部での変形状態の変化の仕方として平面応力状態の影響領域  $l_g$  を仮定している。理論的なモデルとしてはこのような仮定を設けずにプロフィールの変化が推定できることが望ましいが、そのためには現状では3次元的な塑性変形を解く必要があり、簡易的なモデルに組み込むことは難しい。

また、ここでの実験機実験、実機実験の結果と、事前解析結果とを比較することによっても  $l_g$  を推定することができ、その結果、ほぼロール接触弧長  $l_d$  に比例し、材料の変形抵抗  $k_m$  に反比例するような関数で表されると考えられる結果が得られている。

$$l_g \propto l_d \cdot k_m^{-1}$$

今後実機でのデータの解析等を通して、板端部での変形特性、特に  $l_g$  へ影響する要因の定量的な確性、理論的な材料変形モデルの確性、モデルの簡易化などを行ってゆく予定である。

## 8.6 この章のまとめ

胴端部にテーパ状のプロフィールを与えた作業ロールを軸方向にシフトさせて、このテーパ部を圧延板端部に重ねてロールギャップ分布を変化させることによって板プロフィールを制御する方法を検討し、以下の項目を明らかにした。

- (1) 実験機での実験で、板厚の厚いときに板端部の比較的広い範囲でプロフィールの制御が可能なこと、前のパスでのプロフィールの変化が後のパスでのプロフィールへまで影響すること、多パスでの適用によって重ね合わせ的な効果が得られることが明らかとなった。
- (2) この実験機での実験結果を元に実機への本方式の適用を行い、適切なロールプロフィール、シフト条件の選択によって、板端部付近の板厚が薄くなっている熱延原板のプロフィールから、殆ど平坦なプロフィールの製品の圧延が可能であることを確認した。
- (3) 板端部でのプロフィール変化は、第2章で議論した平面応力の影響範囲によって説明でき、この範囲が既知であれば、簡略的なモデルによっても作業ロールシフトの効果を推定できる。  
また、実験結果の考察により、この範囲はロール接触弧長と材料の変形抵抗の関数であることが推定された。
- (4) 現在、実機において、板幅に応じたロールシフト量をプリセットすることによって特別な制御を行わずに安定したプロフィール平坦化



の効果が得られている。今後はプロフィールメータの出力を利用した積極的な制御を導入して行く予定である。

なお、材料の3次元的な変形は、板圧延のみでなく、形鋼、パイプ圧延などのカリバをもったロールによる圧延ではより重要な問題であり、近年、種々の研究機関で行われている圧延における3次元的な変形の解析方法の開発によって、この種の問題が容易に解決できるようになることを期待したい。

## 第9章

### 多変数制御の考え方を導入した汎用形状制御システムの開発

## 第9章

# 多変数制御の考え方を導入した汎用形状制御システムの開発

### 【概要】

この章では、従来、形状または板断面プロファイルが板幅方向に分布する変数で表されるため、統一した制御の考え方が構築されていなかったことを考察し、新たに、形状またはプロファイルを1つの評価関数で表し、これを最小にするような制御デバイスの制御量の組み合わせを多変数制御の考え方から求める方法を提案した。この方法によれば、制御デバイスの数が多くても対応することができ、汎用的な制御システムを構築できる。

### 9.1 まえがき

従来より、形状の自動制御システムは幾つか開発されているが、これらは、どれも、形状制御デバイスの数が1~2の比較的単純な制御システムに属するものであった。これらのシステムでは、板幅中央部、ほぼ板幅の1/4、および板端部での伸び歪みを利用して、 $\epsilon q$ 、 $\epsilon e$  または、 $\lambda q$ 、 $\lambda e$  で形状を定量化し、これらの値を最小化するような操作量を演算している。しかしながら、このようなシステムでは、定量化する評価関数の数と制御デバイスの数が一致する必要があり、2つ以上の制御デバイス、とくに第7章のFFCのような形状制御手段や、ロール冷却水のパターン等のように数多くの制御デバイスを加える場合などには、さらに全く異なるロジックを付け加えなければならず、両方のロジックの干渉などの配慮も払わなければならない。

著者は、従来方式のこれらの欠点を解決し、板幅方向に分布する形状を一つの評

値で表し、制御デバイスの数が増えても1つのロジックで対応できる新しい考えによる形状制御システムを開発した。このロジックは板幅方向に分布する形状の特殊性を一般化し、一般的な制御の考え方を適用できるものに変えることのできるものであり、形状・プロフィールに関する汎用的な制御ロジックといえるものである。以下に、形状制御を例にして説明する。

## 9.2 形状評価関数

従来より形状不良を定量化する試みが行われて来たが<sup>55)56)</sup>、これらは第1章で述べた中伸び-耳波 ( $\lambda e$ )、クォーターバックル-複合波 ( $\lambda q$ ) を表すことを目的とし、目視で観察される比較的単純に認識できるパターンとその大きさを表すものであった。更に、従来の自動制御システムはこれらを用いて制御デバイスの操作量を最適化するシステムであったため、パターンに合致しない形状は検知されず制御の対象にならないなど、いくつかの制約条件があり、汎用的なシステムとは考えられなかった。

制御システム中で取り扱う評価関数としては、そのようなパターンにとらわれる必要は無く、形状の不良度合が表されれば良いため、幅方向の各位置  $z$  で検出された形状を  $F(z)$  で表したとき、次式に示す量を形状の評価関数とすることで、より一般的な評価が可能となると考えられる。(図9.1を参照)

$$\Phi = \int_0^w (F(z) - F^T(z))^2 dz \quad (9.1)$$

ここに  $F^T(z)$  は目標とする形状の検出器出力で、平坦な形状のときは  $F^T(z) = \text{一定}$  とする。

このような1つの評価関数を用いれば、制御の問題はこの評価関数を最小にするような各制御デバイスの操作量を求める問題となり、非常に取り扱いやすくなる。

また、 $F(z)$  を多次式近似することによって、形状計出力のスムージングが行われ、形状変化の特質を取り扱い易くなる。

さらに、必要であれば従来の  $(\lambda e - \lambda q)$  はその制御の結果を表す指標とすれば、目視形状との対応は容易に付けられる。

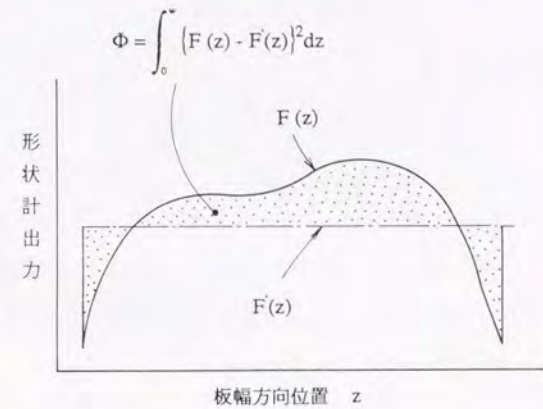


図 9.1 形状評価関数の定義

## 9.3 形状制御デバイスの操作量の演算システム

### (1) 最小二乗法の適用

第  $j$  番目の形状制御デバイスの操作量  $\Delta J_j$  による形状の変化を  $\Delta F_j(z)$  とすると、 $n$  個の制御デバイス进行操作した後の形状評価関数は、

$$\Phi = \int_0^w \left( F(z) - \sum_{j=1}^n \Delta F_j(z) - F^T(z) \right)^2 dz \quad (9.2)$$

で表される。形状の変化を形状制御デバイスの操作量に対して線形であると仮定(微小操作量では十分成立する)すると、

$$\Delta F_j(z) = \left( \frac{\partial F}{\partial J_j} \right) \cdot \Delta J_j \quad (9.3)$$

と表してよい。よって(9.2)式は

$$\Phi = \int_0^w \left( F(z) - \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial J_j} \right) \cdot \Delta J_j - F^T(z) \right)^2 dz \quad (9.4)$$

となる。よって  $\Phi$  は形状制御デバイスの操作量  $\Delta J_k$  の2次の関数となり、 $\Phi$  の最小値は

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta J_k} = 0 \quad ; k=1 \sim n \quad (9.5)$$

を解いて得られる  $\Delta J_k$  で与えられる。  $F(z)$  ,  $F^T(z)$  ,  $(\partial F / \partial J)_j$  が  $\Delta J_k$  の関数でなければ (9.5) 式は  $n$  元1次連立方程式となり、あらかじめ  $(\partial F / \partial J)_j$  を得ておけば、この連立方程式を解くことによって、目標形状に最も近い形状を与える各制御デバイスの制御量の組が得られる。

(2) 連立方程式の導出

形状検出器の検出値を関数化し、評価関数への変換をするためには直交関数を用いると、式の展開、関数近似の際の係数の独立性などの点で都合がよい。ここでは正規直交関数として次式で示されるルジャンドルの多項式を採用する。(図9.2参照)<sup>57)</sup>

以下に6次までの冪関数表示、および Rodrigues の公式による表示を示す。

$$\begin{aligned} P_0(x) &= 1 & P_4(x) &= \frac{1}{8} (35x^4 - 30x^2 + 3) \\ P_1(x) &= x & P_5(x) &= \frac{1}{8} (63x^5 - 70x^3 + 15x) \\ P_2(x) &= \frac{1}{2} (3x^2 - 1) & P_6(x) &= \frac{1}{16} (231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5) \\ P_3(x) &= \frac{1}{2} (5x^3 - 3x) & P_n(x) &= \frac{1}{2^n \cdot n!} \cdot \frac{d}{dx^n} (x^2 - 1)^n \end{aligned}$$

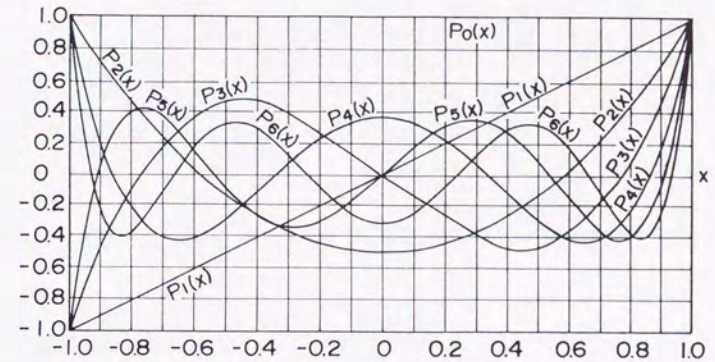


図 9.2 ルジャンドルの正規直交関数

この関数近似によって、  $F(z)$  ,  $F^T(z)$  ,  $(\partial F / \partial J)_j$  は  $m$  次までの近似をしたとして次のように表される。

$$F(z) \approx \sum_{i=1}^m a_i P_i(z) \quad (9.6)$$

$$F^T(z) \approx \sum_{i=1}^m b_i P_i(z) \quad (9.7)$$

$$\left( \frac{\partial F}{\partial J_j} \right) \approx \sum_{i=1}^m c_{ij} P_i(z) \quad (9.8)$$

よって、関数の直交性を考慮して (9.4) 式は、

$$\Phi = \sum_{i=1}^m \left( a_i - b_i - \sum_{j=1}^n c_{ij} \Delta J_j \right)^2 \quad (9.9)$$

となる。これから (9.5) 式は、

$$\sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^m (c_{ij} \cdot c_{ik}) \cdot \Delta J_j \right\} = \sum_{i=1}^m (a_i - b_i) c_{ik} - \sum_{i=1}^m \left( c_{ik} \cdot \sum_{j=1}^n c_{ij} \right) \quad (9.10)$$

: k = 1 ~ n

となって、形状制御デバイスの操作量  $\Delta J_k$  を未知数とする  $n$  元連立方程式が得られる。

直交関数の性質を用いることで、形状計の出力  $F(z)$  または、目標形状  $F^T(z)$  を近似する各次数の関数の係数は次の積分で得られる。実際には、形状計の出力は板幅方向に連続的ではなく、数値積分による計算を行う。

$$a_i = \int_0^{\pi} F(z) \cdot P_i(z) dz \quad (9.11)$$

$$b_i = \int_0^{\pi} F^T(z) \cdot P_i(z) dz \quad (9.12)$$

これらの各係数は他の係数に影響されないため、次数の選択に左右されず、独立に決まるものであり、通常の多次関数を用いた場合とこの点で異なる。

$c_{ij}$  は各デバイスの操作量  $\Delta J_j$  による  $a_i$  の変化  $\Delta a_i$  を第2章で展開したモデルなどを用いた形状の解析、または実測によって得れば、次式によって解析できる。

$$c_{ij} = \frac{\Delta a_i}{\Delta J_j} \quad (9.13)$$

この方法は、形状を関数で近似する次数や形状の評価値の数を、制御デバイスの数とは独立に設定することができ、板幅方向のすべての形状計出力を有効に評価す

ることも可能であるため、従来の方法に比べてより一般的なシステムと言えるものである。

図9.3 に形状計出力を6次関数近似した例を示す。

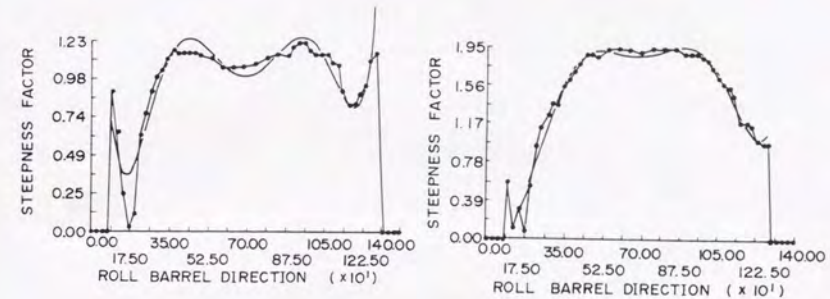


図 9.3 形状の6次曲線近似の例

急峻な多次関数的形状分布の部分は近似精度が悪いが、比較的滑らかな分布は、よく近似できており、実用的には6次で十分であることが分かる。

## 9.4 実圧延機への適用

本システムを第7章の FFCミルに適用した例を以下に示す。

図9.4 にこのシステムの概略のフローを示す。ここでは、形状の関数近似の精度を考えて6次のルジャンドル関数を適用した。さらに、制御を Coarse (粗) と Fine (詳細) に分けて行い、制御係数  $c_{ij}$  を学習機能によって修正している。また、(9.10) 式によって得られる操作量をそのまま用いると、制御係数  $c_{ij}$  の精度によって形状制御の結果が安定しない場合があるため、演算された操作量に適切なゲインを掛けて用いる。

形状を正交変換関数で近似式 (9.11)

$$\Delta a_i = a_i - b_i$$

$\epsilon_{max}$

形状評価・制御方式の選定 ( $\epsilon_{max}$ の大小による)

Course 制御用数式モデル  
(対称成分)

$$\begin{bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_4 \\ \Delta a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{01} & c_{02} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{41} & c_{42} \\ c_{61} & c_{62} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta S_T \\ \Delta F_T \end{bmatrix}$$

(非対称成分)

形状影響係数  $c_{11}$  の同定  
最小二乗法またはカルマンフィルタによる学習

$$\begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_3 \\ \Delta a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{13} \\ c_{33} \\ c_{53} \end{bmatrix} \cdot \Delta S_L$$

Fine 制御用数式モデル

$$\begin{bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{04} & c_{05} & \dots & c_{010} \\ c_{14} & c_{15} & \dots & c_{110} \\ c_{24} & c_{25} & \dots & c_{210} \\ c_{64} & c_{65} & \dots & c_{610} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \\ \Delta S_7 \end{bmatrix}$$

制御量の演算

Course 制御

$$\begin{bmatrix} \Sigma (\Sigma (c_{11}c_{11})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{11}c_{12})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{11}c_{13})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{12}c_{11})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{12}c_{12})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{12}c_{13})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{13}c_{11})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{13}c_{12})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{13}c_{13})) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_T \\ \Delta F_T \\ \Delta S_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma \Delta a_i c_{i1} \\ \Sigma \Delta a_i c_{i2} \\ \Sigma \Delta a_i c_{i3} \end{bmatrix}$$

Fine 制御

$$\begin{bmatrix} \Sigma (\Sigma (c_{14}c_{14})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{14}c_{15})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{14}c_{16})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{15}c_{14})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{15}c_{15})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{15}c_{16})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{16}c_{14})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{16}c_{15})) \\ \Sigma (\Sigma (c_{16}c_{16})) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma \Delta a_i c_{i4} \\ \Sigma \Delta a_i c_{i5} \\ \Sigma \Delta a_i c_{i6} \end{bmatrix}$$

ダブルショックベクタ  $\Delta F_T$       水平ベクタ合計  $\Delta S_T$       水平ベクタパターン  $\Delta S_i$       圧下位置レベルリング  $\Delta S_L$

図 9.4 形状制御システムの概略フロー

図 9.5 に本システムを適用した時の形状の経時変化を示す。この結果から制御の各ステップ毎に形状が平坦になって行く様子が解る。

図 9.6 に種々の形態の形状不良に対する制御効果の例を示す。粗制御では各パターンに対して顕著な制御効果が得られ、殆どの形状がほぼ平坦になっていることが解る。しかしながら、詳細制御（水平ベクタパターン）の効果は余り大きくは現れなかった。これは、第 7 章の FFCミルの制御特性からも予想される、制御装置の能力の限界や、制御を行うための評価関数の限界値の設定の仕方などによるものであり、このシステムの本質的な問題ではない。

同様の考え方は、プロフィール制御にも適用できるものである。

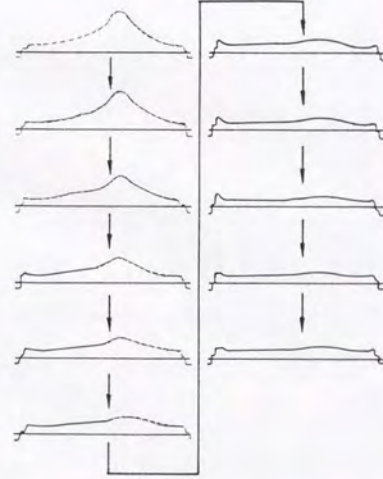


図 9.5 形状制御システムによる板形状の時系列変化

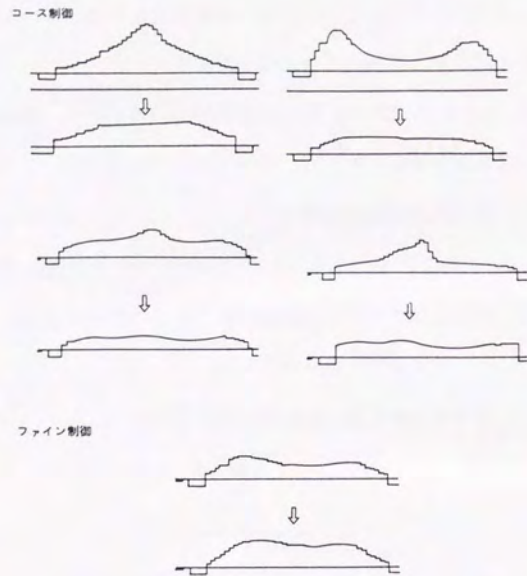


図 9.6 形状制御システムの効果の例

### 9.5 この章のまとめ

板圧延における形状・プロフィールの特性に対応して、板幅方向すべての形状検出機またはプロフィール検出器の出力を有効に反映する評価関数を提案し、多数の制御デバイスを有する圧延機の自動制御システムを開発した。このシステムを FFCミルの形状制御に適用し、有効に機能することを確認した。

なお、このシステムは制御デバイスの数の多少によらずに適用でき、作業ロールベンダのみを有する圧延機から、複数のエキセントリック制御を有するクラスタタイプのミルにまで有効に適用できる汎用化されたシステムである。

今後、このシステムの種々のタイプの圧延機、形状制御装置への適用を図っていく予定である。

## 第10章

## 総括

## 第10章

### 総括

薄板圧延における、重要な要因のひとつである、プロフィール・形状に関する研究を行い、以下の項目を明らかにした。

(1) 材料の変形特性を、張力のフィードバック効果、板端部での3次元的な変形特性を含めて、簡略化した形で導入した線形な式で表すことによって、プロフィール・形状の実機での変化をロール系の変形との連成問題として効率良く、定量的に推定するモデルを提案した。

(2) 上記のモデルを用いて、薄板圧延に拘わる要因の、プロフィール・形状への影響を解析した。これによって

- ① 特に材料の要因として、張力分布が生じたときに発生する幅方向材料流れや、板端部での応力、変形状態を表す3次元塑性変形特性の影響が大きいこと、
- ② 圧延弾性系の要因として、作業ロールの寸法、作業ロールのプロファイルの影響が大きいことを定量的に示した。
- ③ これらの解析によって、既存の形状・プロフィール制御機器では、近年の製品ニーズに対応することが難しくなって来ていることが理解できる。

(3) 圧延によって生じた圧延方向の歪みの板幅方向分布が、次の圧延の変形特性に影響しないこと、圧延によって生ずるこの歪み分布は、その圧延にお



けるロールギャップ入り口近傍に同様の分布形の応力分布を生じさせると  
いう仮定を設けることによって、タンDEM圧延におけるプロフィール・形状  
の変化を、定量的に推定できる。このモデルによれば、

- ① 熱間タンDEM圧延でのプロフィールは、前段のスタンドでの圧延条件に  
は影響されないが、スタンド間の形状を考慮した制御を行うには、比較  
的前段からプロフィール制御を適用する必要があること、
- ② 冷間タンDEM圧延では、前段でのプロフィール変化が後段のプロフィール  
に影響するが、その量は小さいことなどが示された。
- ③ また、この解析結果から、熱間タンDEM圧延では制御効果の大きいプロ  
フィール制御方法が、冷間タンDEM圧延機では幅方向の任意性を備えた  
形状制御方法が必要なことが推定できる。
- ④ このモデルは今後、タンDEM圧延における、形状・プロフィール制御の  
ロジックを確認するのにも用いられる予定である。

(4) 板幅方向の任意性を持たせた形状制御方法の一つとして、板幅方向の張力  
分布を制御する方法(TDC)を研究した。この研究によって、以下の項  
目が明らかとなった。

- ① 板面に垂直な方向の変位を板幅方向の局所に与えることによって、張  
力分布を付与することができる。
- ② 張力分布の圧延機出口の形状変化への効果は、圧延機出側へ付与した  
場合のみ認められ、入側の張力分布による形状への影響がないことが実  
証された。
- ③ 板幅中央付近に大きな張力分布を与えることは不安定で、形状制御の  
幅方向任意性はあまり期待できない。

- ④ この方式は中伸びを制御するのに有効で、耳波を制御するロールベン  
ダとの組み合わせによって、広い範囲の形状制御が可能となる。

(5) 作業ロールの水平方向の曲がり変形を制御する冷間圧延機(FFCミル)  
を解析的、実験的に検討し、以下の項目が明らかとなった。

- ① 形状制御の幅方向任意性を、解析的、実験的に検証した。これによれ  
ば、量は小さいが比較的任意性を持った制御が可能である。
- ② 垂直方向の曲がり変形の制御を組み合わせると、大きな範囲の形状制  
御特性が得られる。
- ③ この形式の圧延機は、比較的小径の作業ロールを適用できること、上  
下作業ロールの周速を異ならせることができることから、エッジドロ  
ップの減少効果、小径による極薄圧延の範囲拡大などの効果が得られた。
- ④ このような特性を示す本圧延機形式の開発は、小径ロールを従来方式  
の圧延機に導入する方法として、一つの方向を示したものと言える。

(6) 作業ロールを軸方向に移動させることによる、冷間圧延でのプロフィール制  
御の方法を実験、解析によって検討し、以下の項目が明らかとなった。

- ① 冷間圧延では、圧延中の材料の幅方向塑性流動は小さく、プロフィール  
制御は難しいと言われていたが、板端部付近に大きなロールギャップ変  
化を加えてやれば、板厚に応じた板幅方向の範囲でプロフィールの制御が  
可能なことを明らかにした。
- ② この制御可能な範囲は、板端部での平面応力状態の影響の及ぶ範囲と  
考えられ、冷間圧延におけるエッジドロップ形成と拘わるものである。  
実験結果と解析の比較でこの影響の範囲を、ロール接触弧長と材料の変

形抵抗の関数で表されるものであることを推定した。

③ この範囲をプロフィール・形状推定モデルにおける材料の塑性変形特性の一つとして取り入れることによってエッジドロップの特性、および板端部付近のプロフィール制御特性が解析可能となり、実機における効果を推定し、この方式の制御方法を確立した。

④ 本方式は既に幾つかの実機の冷間圧延機に採用され、その効果を発揮している。

(7) 板幅方向の任意性を持ったプロフィール・形状制御のためには、制御ロジックも任意性を持たせる必要がある。板幅方向のプロフィール・形状の偏差の自乗を幅方向に積分する方法によって評価関数を作る方法を提案し、多変数制御理論を応用した、プロフィール・形状制御に適した制御方法を開発した。この開発によって、先に開発した種々の制御方法の有用な使用が可能となった。また、更に制御デバイスの数の多い圧延機への適用も可能であり、今後順次、適用を図って行く予定である。

以上の研究によって、従来の圧延機のプロフィール・形状特性が明らかになるとともに、幾つかの新しい形式の形状制御方法・圧延機が開発された。これらの開発には、プロフィール・形状の事前推定が重要な役割を果たしており、本研究で開発されたモデルが有効に使用された。さらに、モデル中で仮定された材料の塑性変形特性が、実験機実験、実機実験によって確認され、圧延中の材料の3次元変形の特性の一端が明らかにされた。これによってモデルの信頼性がより高くなったと考えられる。本研究で開発したモデルは、材料の3次元塑性変形を理論的に解くモデルと対をなすもので、実験結果と平行して理論的な研究の成果を順次取り入れていく必要

がある。

今後、この研究の成果、およびモデルは他の形式の圧延機、制御方法の評価、圧延中の板の安定性の研究など、今後解決しなければならない種々の薄板圧延における問題に有効に利用されるものと期待できる。

謝 辭

## 謝 辞

本研究を進めるに当たって多くの方たちのご指導、ご協力を戴いた。

特に、第6章で、現NKテックス 有村 透工学博士のご指導、現米国ナショナルスチール(株) 岡戸 克氏、阪口善裕氏のご協力を、第7章において、石川島播磨重工業(株) 塩崎宏行工学博士、木崎皖二氏、佐藤一幸氏、日本鋼管(株) 鎌本紘氏、岩藤秀一氏、出石智也氏、佐々木健人氏、富田省吾氏のご協力を、第8章では、日本鋼管(株) 鎌田正誠工学博士、岩藤秀一氏、佐々木健人氏、尾崎大介氏のご協力を戴いた。ここに謝意を表します。

本研究全体にわたってご指導戴いた、東京大学名誉教授 鈴木 弘工学博士、本論文をまとめるに当たってご指導戴いた、東京大学工学部教授 木原諄二工学博士に深く感謝いたします。

参 考 文 献

## 参 考 文 献

- 1) Malborn, J. : "The Development of the Continuous Rolling of Steel and Tinplate"  
Blast Furnace and Steel Plant (Oct. 1938).
- 2) Eppelsheimer, D. : "The Development of Continuous Strip Mills"  
Journal of Iron and Steel Institute, Vol. 138 (1938).
- 3) Badlam, S. : "The Evolution of the Wide Strip Mill"  
Yearbook of American Iron and Steel Institute (1927).
- 4) 富田, 藤田, 佐々木, 鎌田, 鍛本 : "極薄鋼板の冷間圧延におけるロールプロファイルの検討", 鉄と鋼, '83-S1193, p. 139.
- 5) 有村, 岡戸, 藤田 : "圧延ロールのサーマルクラウンの計算方法"  
塑性と加工, Vol. 16, No. 168, p. 44.
- 6) 山口 : 神戸製鋼所技報, 30-1 (1980), p. 10.
- 7) 中島, 菊間, 梶原, 谷口, 木村, 中西 : 日立評論, 61 (1979), p. 613.
- 8) Guillerault, J. P., B. Robert, M. Eyssette : "Shape Simulation System for Hot Strip Mill with Work Roll Shifting"  
Hot Strip Mill Profile and Shape Seminar (AISE), (Nov. 1988).
- 9) 北浜, 北村, 片岡, 中川, 田中, 杉江, 豊島, 仁藤 : "ワークロールシフトミルによるクラウン制御能力の検討", 第32回塑性加工連合講演会前刷 (1981), p. 119.
- 10) Wolters, H. : "Strip Profile and Flatness Control in Hot Strip Mill with Particular Reference to CVC Technology"  
4th International Steel Rolling Conference (1987), A. 20.
- 11) 益居, 山田, 長井, 西野 : 塑性と加工, 23-263 (1982), p. 1188.

- 12) Stone, M. D., R. Gray: "Theory and Practical Aspect in Crown Control"  
Iron and Steel Engineer (Aug. 1965), p. 73.
- 13) 有村, 藤田: 昭和49年度塑性加工春季講演会前刷 (1974), p. 319.
- 14) 馬, 木原, 会澤: 昭和62年度塑性加工春季講演会前刷 (1987), p. 67.
- 15) 塩崎: "4段圧延機のロールベンディングの解析", 塑性と加工, Vol. 9 No. 88 (1968),  
p. 315.
- 16) Xianlin, C., Z. Jiexiang: "A Specialized Finite Element Model for Investigating  
Controlling Factors Affecting Behavior Rolls and Strip Flatness"  
4th International Steel Rolling Conference (1987), p. E. 4.
- 17) Kihara, J., T. Aizawa, X. P. Ma: "Application of BEM to Calculation of the Roll  
Profile in Flat Rolling",  
4th International Steel Rolling Conference (1987), p. E. 1.
- 18) 水田, 服部, 山口, 辻: "20段圧延機のロール変形の解析"  
塑性と加工, 23-263 (1982), p. 1245.
- 19) 鈴木, 阿高, 杉山: "幅方向圧力分布と材料の塑性流動について"  
第24回塑性加工連合講演会前刷 (1973), p. 21.
- 20) 中島, 菊間, 松本, 上掘, 増田: "板圧延における幅方向のメタルフローの形状に及ぼ  
す影響", 第24回塑性加工連合講演会前刷 (1973), p. 25.
- 21) 石川, 戸澤, 中村: 塑性と加工, 21-237 (1980), p. 902.
- 22) Ishikawa, T., N. Yukawa, Y. Tozawa: "Analytical Approach to Occurrence and  
Suppression of Flatness Defect in Strip Rolling"  
4th International Steel Rolling Conference (1987), p. E. 7.
- 23) 世利, 木原: "圧延材の残留応力測定法におけるBEMの活用"  
昭和55年度塑性加工春季講演会前刷 (1980), p. 243.

- 24) 石川, 戸澤, 中村: 塑性と加工, 22-242 (1981), p. 250.
- 25) Matsumoto, H., Kawanami, T.: 4th international Steel Rolling Conference (1987),  
p. E. 6.
- 26) Shohet, K. N., N. A. Townsend: Journal of The Iron and Steel Institute (Oct. 1971),  
p. 769.
- 27) 升田, 平沢, 市之瀬, 平部, 小川, 鎌田: 鉄と鋼, 67-15 (1981), p. 2433.
- 28) Jiachuang, L., D. Zhenyong, L. Shengjiang: "Study on the Deflection Buckling  
Deformation for Rolled Strip Losing Stability"  
4th International Steel Rolling Conference (1987), p. E. 5.
- 29) 本城, 木崎, 宮坂, 東藤: 石川島播磨技報, 21-5 (1981), p. 1.
- 30) 梶原, 西: "形状制御機能の理論的研究 (新6段圧延機の圧延特性)"  
第25回塑性加工連合講演会前刷 (1974), p. 201.
- 31) 中島, 河原田, 菊間, 松本, 小川, 上掘: 昭和56年度春季塑性加工講演会前刷,  
(1981), p. 55.
- 32) Singer, A. R. E., J. J. O'Brien: "Control of the Shape of Metal Strip on an  
Experimental Variable Vamber Rolling Mill",  
J. of Iron and Steel Institute (Dec. 1962), p. 1003.
- 33) 岡戸, 藤田, 有村, 鍛本, 阪口, 鈴木: "薄板冷間圧延における張力分布型形状制御装  
置-TDC-", 日本鋼管技報, NO. 92 (1982), p. 16.
- 34) Fujita, F., H. Kuwamoto, K. Kizaki, T. Iwanami: "Development of a new type of cold  
rolling mill for sheet products",  
Iron and Steel Engineer (June 1985), p. 41.
- 35) 佐野, 渡部, 山田, 鍛本, 可知, 川畑: 日本鋼管技報, 82 (1979).

- 36) 安藤, 武田: "エアーベアリング式板形状測定器について"  
昭和47年度塑性加工春季講演会前刷(1972), p. 177.
- 37) 藤井: "板材圧延における形状検出機の特徴とその活用状況"  
塑性と加工, Vol. 20, No. 217 (1979), p. 89.
- 38) 水野, 安藤, 武田: "板形状の測定および制御法について", 住友軽金属技報,  
13-2, p. 22.
- 39) 戸澤, 上田: 塑性と加工, 11 (1970), p. 29.
- 40) 中島, 松本: 第24回塑性加工連合講演会前刷(1973), p. 29.
- 41) 河野, 長谷, 西野: 住友金属, 32-3 (1980), p. 93.
- 42) Bernsmann, G.: Iron and Steel Engineer (March 1972), p. 67.
- 43) Siebel, E., W. Lueg: Mitt. K. W. I., Vol. 15 (1933), p. 1.
- 44) 升田, 平沢, 市之瀬, 大西, 権田, 中村: "ホットストリッププロフィル制御",  
第32回塑性加工連合講演会前刷(1981), p. 145.
- 45) 辻, 平野, 小久保, 大池, 木川: 神戸製鋼所技報, 30-1 (1980), p. 20.
- 46) 中島, 菊間, 松本, 栗津原, 志田, 木村, 梶原: 塑性と加工, Vol. 23,  
No. 263 (1982), p. 1172.
- 47) Shohet, K. N.: "Design Limitations of Roll-Bending System of Crown  
Control in a Plate Mill", Journal of The Iron and Steel Institute  
(Jan. 1970), p. 41.
- 48) 戸澤, 石川, 湯川: "多パス圧延板の残留応力に対する解析的アプローチ"  
第35回塑性加工連合講演会前刷(1984), p. 257.

- 49) Goodier: Theory of Elasticity (1951), p. 52.
- 50) 浜田, 鈴木: "冷間圧延における幅方向張力分布について", 昭和47年度塑性加工春季  
講演会前刷(1972), p. 309.
- 51) Espenhahn, M., G. Giermann, W. Bald, H. Römmen: "Modernization of a Cold Rolling  
Mill at Tyssen, Grillo Funke GmbH",  
4th International Steel Rolling Conference (1987), p. E. 15.
- 52) 小松, 小暮, 山本, 中田: "Z-High Mill における板の形状制御",  
塑性と加工, 23-263 (1982-12), p. 1267.
- 53) 有村, 岡戸, 藤田, 塩崎, 新谷, 三上: "冷間圧延の異周速圧延理論(一考察)", 昭和  
53年度塑性加工春季講演会前刷(1978), p. 37.
- 54) 塩崎, 新谷, 三上, 小出: "平板の圧縮せん断試験", 第30回塑性加工連合講演会前刷  
(1979), p. 33.
- 55) 北尾, 広瀬, 斎川, 江端, 浜田, 直井: 塑性と加工, 23-3 (1982), p. 1145.
- 56) 安田, 志田: "HCミルによる複合伸びの制御"  
第30回塑性加工連合講演会前刷(1979), p. 119.
- 57) 森口繁一, 宇田川一久, 一松信: "数学公式III", 岩波全書(1977), p. 82.



公 表 論 文

## 公表論文

- (1) 有村透, 岡戸克, 藤田文夫: "4段圧延機の変形について", 第24回塑性加工連合講演会前刷, p. 61.
- (2) 有村透, 岡戸克, 藤田文夫: "ストリップ形状関数の諸性質", 同上, p. 65.
- (3) 有村透, 岡戸克, 藤田文夫: "ロールのヒートクラウン変化とストリップ形状", 同上, p. 69.
- (4) 有村透, 藤田文夫: "四段圧延機の変形について(第2報)", 昭和49年度塑性加工春季講演会前刷(1974), p. 319.
- (5) 有村透, 岡戸克, 藤田文夫: "圧延ロールのサーマルクラウンの計算方法", 塑性と加工, 16-168(1975), p. 44.
- (6) 有村透, 岡戸克, 藤田文夫: "薄板圧延におけるロール弾性変形の数値解析と弾性理論解析との比較", 鉄と鋼, 1977-A119, p. 49.
- (7) 有村透, 岡戸克, 藤田文夫, 塩崎宏行, 新谷定彦, 三上昌夫: "張力分布制御による形状制御機能特性(薄板圧延の新形状制御法の研究) 第I報", 昭和54年度塑性加工春季講演会前刷(1978), p. 409.
- (8) 鍛本紘, 阪口善裕, 岡戸克, 藤田文夫: "張力分布制御による形状制御装置(T. D. C.)の実機への適用(薄板圧延の新形状制御法の研究) 第II報", 第30回塑性加工連合講演会前刷('79), p. 127.
- (9) 岡戸克, 藤田文夫, 有村透, 鍛本紘, 阪口善裕, 鈴木正史: "薄板冷間圧延における張力分布型形状制御装置-TDC-", 日本鋼管技報, No. 92(1982), p. 16.
- (10) 岡戸克, 藤田文夫, 鍛本紘, 次郎丸昭三: "張力分布型形状制御装置の実機特性", 鉄と鋼, '82-S383, p. 59.

- (11) M.Okado, F.Fujita, Y.Sakaguchi, M.Mikami: "A New Shape Control Technique for Cold Strip Mills", Iron and Steel Engineer (June 1982), p.25.
- (12) 鍛本紘, 塩崎宏行, 藤田文夫, 木崎皖司, 佐藤一幸: "作業ロール水平曲げを主体とした新形式冷間圧延機の開発", 塑性と加工, 23-263 (1982), p.1259.
- (13) 鍛本紘, 藤田文夫, 本城恒, 木崎皖司, 佐藤一幸: "作業ロール水平曲げを主体とした新形式冷間圧延機の開発-第3報 解析モデルの開発-", 昭和57年度塑性加工春季講演会前刷 (1982), p.9.
- (14) 藤田文夫, 富田省吾, 佐々木健人, 鎌田正誠, 鍛本紘, 木崎皖司, 佐藤一幸: "作業ロール水平曲げを主体とした新形式冷間圧延機の開発-第5報 形状制御特性-", 第34回塑性加工連合講演会前刷 ('83), p.137.
- (15) 福山製鉄所: "FFC (Flexible Flatness Control) ミルの開発", 日本鋼管技報, No.100(1983), p.99.
- (16) 鍛本紘, 中西洋一, 出石智也, 藤田文夫, 木崎皖司, 石井肇: "作業ロール水平曲げを主体とした新形式冷間圧延機の開発-第6報 圧延特性-", 第34回塑性加工連合講演会前刷 ('83), p.141.
- (17) 藤田文夫, 鍛本紘, 佐々木健人, 中西洋一, 富田省吾, 清家孝哉: "作業ロール水平曲げを主体とした新形式圧延機の開発-第7報 自動形状制御システム-", 昭和60年度塑性加工春季講演会前刷 (1985), p.13.
- (18) 富田省吾, 藤田文夫, 佐々木健人, 鎌田正誠, 鍛本紘: "極薄鋼板の冷間圧延におけるロールプロフィルの検討", 鉄と鋼, '83-S1193, p.139.
- (19) 藤田文夫, 佐々木健人, 鎌田正誠, 富田省吾: "ロール変形解析における張力フィードバックとロール偏平の形状への影響", 昭和58年度塑性加工春季講演会前刷 (1983), p.293.
- (20) 佐々木健人, 藤田文夫, 鎌田正誠: "冷間ワークロールシフト圧延によるエッジドロップ制御", 鉄と鋼, '85-S355, p.69.

- (21) F.Fujita, H.Kuwamoto, K.Kizaki, T.Iwanami: "Development of a new Type of Cold Rolling Mill for Sheet Products", Iron and Steel Engineer (June 1985), p.41.
- (22) F.Fujita, T.Sasaki, H.Kuwamoto, S.Iwado, S.Jiromaru: "A Flatness and Profile Control System for the Strip Mill", 4th International Steel Rolling Conference, (June 1987), p.E.14.
- (23) D.Ozaki, F.Fujita, S.Iwadoh, T.Sharyoh: "A Technology for Minimizing the Feather Edge in Cold Rolling by Utilization of Work Roll Shifting Mill" 5th International Steel Rolling Conference (1990), p.270.

