

# 熱間圧延における高精度板厚・ クラウン制御技術の開発

/////////  
技術報告  
/////////

辻 勇一\*・島津 智\*・平石 勇一\*  
福島 賢也\*・加藤 勝弘\*・平世 和雄\*<sup>2</sup>

## Development of High-accuracy Thickness and Crown Control in Hot Strip Mill

Yuichi TSUJI, Satoshi SHIMAZU, Yuichi HIRAIISHI,  
Kenya FUKUSHIMA, Katsuhiko KATO and Kazuo HIRASE

### Synopsis:

The construction of the new hot strip mill of 1840 mm in width was started to replace the old one in June, 1982 and was completed on its commercial operation on August 1, 1984, in Nippon Steel's Hirohata Works. The computer control systems of the mill have enabled us to achieve high-accuracy quality controls.

First, we have developed absolute mode AGC system which gives the high accuracy of strip thickness for full strip length. The system is composed of four main functions as described below.

- (1) Quick-response AGC with hydraulic screw down system
- (2) Compensating control for mass flow balance
- (3) Decoupling control of bender and screw down systems for gauge, crown and shape of strip
- (4) Set up function for control parameters

Secondly, we have developed crown and shape control system which has high capability by adopting "pair cross roll system" for the first time in the world and work roll bender system of servo-valve drive type. The main functions are described below.

- (1) Pre-set function of roll cross angles corresponding to crown schedule for each strip
- (2) Feedback crown and shape control of work roll bender system within each strip

**Key words:** rolling; quality control; absolute mode AGC; thickness control; crown and shape control; pair cross roll.

## 1. 緒 言

新日本製鉄広畑製鉄所の新ホットストリップミルは、1982年6月にその建設に着手し、1984年8月1日に営業運転を開始した。その間、需要家からの厳しい品質精度要求水準に応えるために、各種の高精度品質制御機能を開発し、今日に至っている。

板厚制御 (AGC) についてみれば、高応答油圧圧下の威力を十分に発揮させるために、圧延材頭部より目標板厚に向けての制御を行う絶対値 AGC の開発・実用化に取り組んだ。その結果、1985年2月下旬にはすべての品種およびサイズにわたる実用化を完了するとともに、続いて、圧延材噛込み時のスタンド間張力の過大な変動を吸収するためのマスフロー先端補償機能の開発

や、AGC ゲージメーター学習機能の向上等をはかることにより、絶対値 AGC のいつそうの高精度化にも成功し、頭部を含む板厚精度を飛躍的に向上させることができた<sup>1)2)</sup>。

一方、クラウン制御についてみれば、世界で初めてのペアクロスミル (ワークロール軸とバックアップロール軸を互いに平行に保持したまま、上下のロール群をクロスさせる方式) によるクラウン制御技術を開発し、ロールクロス角の操作により、クラウン制御能力を飛躍的に向上させた。またそれと同時に、ワークロールベンダーを操作端とするダイナミック制御技術も確立し、コイル内の圧延荷重変動補償、クラウン計・形状計を用いたフィードバック補償等を実施し、板厚とクラウン、あるいはクラウンと板形状との非干渉化を実現することによ

昭和 61 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 12 月 29 日受付 (Received Dec. 29, 1986)

\* 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

\*2 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 (現:新日本製鉄(株)電磁鋼板技術部) 工博 (Hirohata Works, Now Electrical Steel Technical Division, Nippon Steel Corp.)

つて、コイル内全長にわたり、高精度にクラウンを制御することができるようになった。

## 2. 絶対値 AGC の開発

### 2.1 制御システム概要

絶対値 AGC システムを構成する核となる機能は、Fig. 1 に示すように、下記の 4 機能があげられる。

#### (1) AGC 機能

全スタンド油圧圧下を操作端とするゲージメーター AGC を基本とし、各種補償機能とともに、絶対値ロクオン方式による絶対値 AGC を実現している。

ゲージメーター AGC を行う上での基本となるゲージメーター板厚  $h_{GM}$  は(1)式により算出される。

$$h_{GM} = S + \alpha \cdot M_e - \Delta S_{OF} - \Delta S_{RT} - \Delta S_{RE} + \Delta S_{GC} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $S$  はロールの読込開度、 $\alpha$  はスケールファクター、 $M_e$  はミルストレッチ (圧延荷重・ロールベンディング力によりミルが伸びる量)、 $\Delta S_{OF}$  は油膜補償量、 $\Delta S_{RT}$  はロール熱膨張補償量、 $\Delta S_{RE}$  はロール偏心補償量、 $\Delta S_{GC}$  はゲージメーター定数 (ロールの熱膨張初期値・摩耗等) を表す。

特にミルストレッチ  $M_e$  は、キスロール測定で得られたミルストレッチ ( $M_{e0}$ ) をもとに、(2)式で示されるように実際の圧延条件に適合するように圧延荷重  $P$ 、ロールベンディング力  $F$  で補正される。補正係数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  は、ロール変形を記述するミルストレッチモデルを圧延条件の近傍で展開することにより与えられ、板幅等の変化に対してコイルごとに最適化される。

$$M_e = M_{e0} + k_1 + k_2 \cdot P + k_3 \cdot F \quad \dots\dots\dots (2)$$

#### (2) ベンダー非干渉制御

スキッドマークや AGC 動作にともなう圧延荷重変動に起因する板の形状・クラウンの変化を、ワークロール

ベンダーを圧下と協調的に制御することにより吸収する。

すなわち、基本的には、(3)、(4)式に示すように、圧延荷重変動  $\Delta P$  によつて生じる均一荷重板クラウン (圧延荷重分布が幅方向に均一であるとした場合のロールギャッププロフィールより決定される板クラウン) の変動  $\Delta C$  を打ち消すためのロールベンディング補償量  $\Delta F_{COMP}$  を求めて出力することになる。

$$\Delta C = C_P \cdot \Delta P + C_F \cdot \Delta F \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta F_{COMP} = -(C_P / C_F) \cdot \Delta P \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $C_P$ 、 $C_F$  はそれぞれ圧延荷重およびロールベンディング力による影響係数を表し、板クラウンモデルによりコイルごとに与えられる。

さらに、制御出力変化時の微細な相互干渉を防止するために、AGC からの圧下補正出力  $\Delta S_{AGC}$  および(4)式のロールベンディング補正出力  $\Delta F_{COMP}$  は非干渉化されて、最終補正出力  $\Delta S_{NIC}$  および  $\Delta F_{NIC}$  は(5)式に基づいて決定される。

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{NIC} \\ \Delta F_{NIC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta S_{NIC, -1} \\ \Delta F_{NIC, -1} \end{bmatrix} + [A] \cdot \begin{bmatrix} \Delta S_{AGC} - \Delta S_{AGC, -1} \\ \Delta F_{COMP} - \Delta F_{COMP, -1} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $A$  は非干渉化のためのマトリクス ( $2 \times 2$  次元) を表しコイルごとに最適化される。また添え字 “-1” は前回サンプリング出力時の値であることを示す。

ベンダー非干渉制御は、特に最終スタンド AGC の有効な活用を可能にするための重要な制御でもある。

#### (3) マスフロー補償制御

隣接するスタンド間の速度アンバランス量を算出し、ミル速度補償を行う機能であり、従来のルーバ制御 (もしくはルーバレス制御) だけでは吸収しきれない急激な外乱を補償することにより、スタンド間張力変動を抑制し、安定した AGC 動作を可能にする。

マスフロー補償制御は、(6)式で表されるように、隣接するスタンド間において、上流側スタンドの出側板速度と下流側の入側板速度を等しくするという基本原理に基づいて行われる。

$$(1 + f_i) \cdot V_{Ri} = (h_{i+1} / H_{i+1}) \cdot (1 + f_{i+1}) \cdot V_{Ri+1} \quad \dots\dots (6)$$

さらに基準圧延状態からの偏差で表すことにより、制御則すなわちミル速度修正量  $\Delta V_{Ri}$  は(7)式で与えられる。

$$\frac{\Delta V_{Ri}}{V_{Ri}} = \frac{\Delta h_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{\Delta H_{i+1}}{H_{i+1}} + \frac{\Delta f_{i+1}}{1 + f_{i+1}} - \frac{\Delta f_i}{1 + f_i} + \frac{\Delta V_{Ri+1}}{V_{Ri+1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

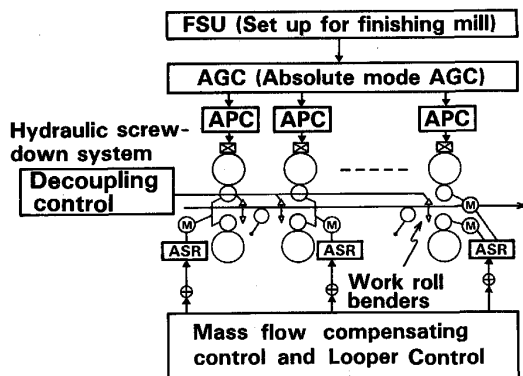


Fig. 1. Schematic diagram of absolute mode AGC system.

ここで、 $V_R$  はミル速度、 $H$  は入側板厚、 $h$  は出側板厚、 $f$  は先進率、 $\Delta$  は基準圧延状態からの偏差、および添え字“ $i, i+1$ ” はスタンド番号を表す。

しかし、このままではスタンド間張力の影響により、正帰還ループが形成され、制御系が不安定となる可能性があるため、張力による悪影響を除去するための工夫も施している<sup>3)</sup>。

(4) セットアップ機能

高精度ミルストレッチモデルやクラウンモデルを有し、圧下系や速度系等のセットアップを行うほかに、AGC・ベンダー非干渉制御等の制御機能や上記モデルに対して、コイルごとに制御目標値や制御パラメーター((2)式の  $k_1, k_2, k_3$  や(3)式の  $C_P, C_F$  etc.) を与える。

2.2 絶対値 AGC の適用結果

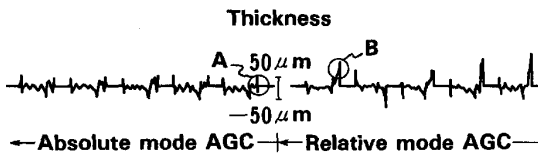
絶対値 AGC の効果を確認するために、昭和 60 年 2 月に第 1 回目のオンラインテストを実施した。要領は下記のとおりである。

条件

- ・絶対値 AGC 適用スタンド…F1～F6 全スタンド
- ・テスト対象材…特殊鋼 (2.3 mm 厚×1600 mm 幅) および冷延材 (2.3～2.5 mm 厚×900 mm 幅)

結果

① 頭部板厚精度に対する改善効果は大きく、Fig. 2 に示すように、絶対値 AGC の適用を開始したと同時に



A: Strip thickness at leading end by absolute mode AGC  
B: Strip thickness at leading end by relative mode AGC

Fig. 2. Effect of absolute mode AGC.

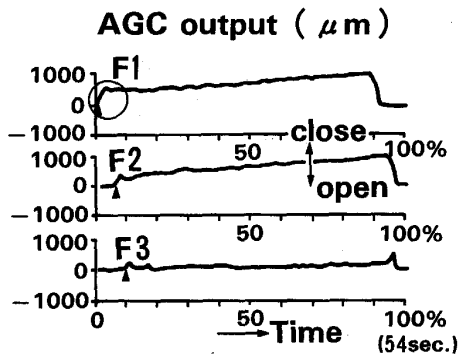


Fig. 3. Example of absolute mode AGC performance.

ほとんどが頭部板厚精度  $\pm 50 \mu\text{m}$  以内におさまった。

② 仕上設定計算の学習も、絶対値 AGC 安定後の目標板厚近傍状態で行われるので、安定する傾向にあり相乗効果が期待できる。

なお、絶対値 AGC の動作例として、F1～F3 スタンド油圧圧下の油柱の動きを Fig. 3 に示すが、それぞれ頭部噛込み直後に急激に動作している様子が認められる。

その後、さらに対象量および材料を拡大してテストを行い、絶対値 AGC の顕著な効果を確認することができた。その様子を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 は 1.2～9 mm にわたる各種板厚により構成される熱延材の圧延単位を対象に、頭部板厚精度を絶対値 AGC (図中の II) と従来 (図中の I) の場合とで比較して示している。絶対値 AGC 適用の場合、頭部板厚偏差のばらつきが極端に減少し、精度向上の効果がうかがえる。

2.3 絶対値 AGC の高精度化

2.3.1 ゲージメーター学習機能の向上

従来のゲージメーター学習は、仕上設定計算機能により圧延材の頭部について行っていたが、特に頭部での学習はルーパ制御過渡時や過大張力発生時のマスフローバランス的に不安定なデータに左右される場合があり、精度向上阻害要因の一つとなっていた。

これに対し、ゲージメーター学習精度を向上させるために、圧延材全長にわたってゲージメーターエラー学習を行い、その中からロールの熱膨張等のコイル内変動分

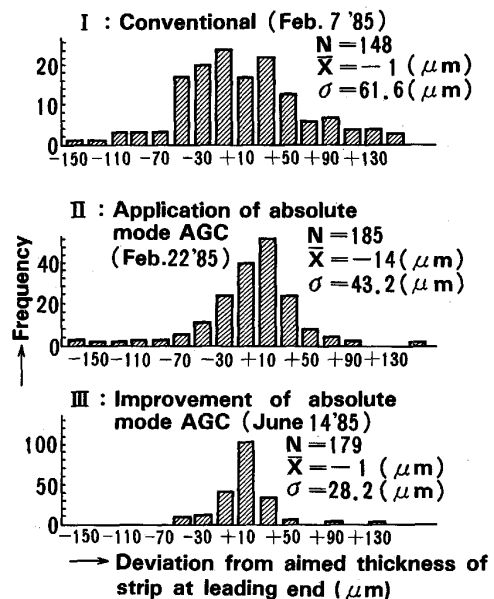


Fig. 4. Comparison of thickness accuracy ( $1.2 \leq t \leq 9.0$ ).

を分離することにより、圧延材頭部におけるゲージメーターエラーの安定した同定をはかるという方法を確立した。

すなわち、ゲージメーターエラー  $\epsilon_{GM}$  は (8) 式によつて計算される。

$$\epsilon_{GM} = h'_{GM} - h_{MF} \dots\dots\dots (8)$$

ここでゲージメーター板厚  $h'_{GM}$  は、(1) 式で  $\alpha=1$ ,  $\Delta S_{RT}=0$ ,  $\Delta S_{GC}=0$  とおくことによつて得られる (9) 式で与えられる。またマスフロー板厚  $h_{MF}$  は、X線厚み計による測定板厚  $h_{X-ray}$  を基に (10) 式で与えられる。

$$h'_{GM} = S + M_e - \Delta S_{OF} - \Delta S_{RE} \dots\dots\dots (9)$$

$$h_{MF} = h_{X-ray} \cdot (1 + f_N) \cdot V_{RN} / ((1 + f) \cdot V_R) \dots (10)$$

ここで添え字  $N$  は最終スタンド番号を意味するが、他の記号については前述のとおりである。

このようにして得られたコイル内全長にわたるゲージメーターエラー  $\epsilon_{GM}$  には、主として定数項 (ゲージメーター定数  $\Delta S_{GC}$ ) と変動項 (ロール熱膨張量  $\Delta S_{RT}$ ) が含まれるので、それぞれを統計的に分離して学習を行う。

Fig. 4 の III は、新しいゲージメーター学習方法の結果を示しているが、従来学習方法の場合 (図中の II) に比べて、同じ絶対値 AGC でも頭部板厚精度の向上効果があらわれている。

2.3.2 マスフロー先端補償機能の開発

絶対値 AGC の実用化以降、板厚精度は大きく向上したが、特に圧延材嚙込み時に過大張力が発生したような場合には、この張力が板厚・板幅に大きな悪影響を及ぼし、さらには AGC 系と張力制御系とが相互干渉することにより、絶対値 AGC の効果阻害要因となつていた。

この嚙込み時の過大張力に対しては、ルーパーはまだ立上りの過渡状態であり、ルーパー制御に期待することができないので、従来のマスフロー補償制御の機能を拡張し、“圧延材頭部での過大張力を速やかに認識し、嚙込み時のマスフローアンバランスを吸収する” ための、いわゆる先端補償機能を開発した。

すなわち、Fig. 5 に示すように、圧延材嚙込み時の圧延荷重等の予測値からのずれによつて生じる隣接スタンド間のマスフローアンバランスに対して、ミル速度のいわゆる適応修正を行う機能の他に、嚙込み時の過大張力発生傾向を認識して修正する機能も有する。

特に嚙込み直後はルーパー立上げ過渡状態であるので、ルーパー張力計の信号は利用できない。そこで、張力発生傾向の認識のために、各スタンド出側板厚の変化傾向を監視するという方法をとつている。

すなわち、もしスタンド間に速度アンバランスがあるとすると、ある張力発生時定数で張力が発生し、それにともなつて板厚が変化していくことが予想される。しかし、(11) 式で表されるように、頭部における板厚変化  $\Delta h_{TOP}$  には、AGC 動作にともなう板厚変化  $\Delta h_{AGC}$  (絶対値 AGC であるので嚙込み直後から動作する)、および温度等の外乱による板厚変化  $\Delta h_d$  も含まれるので、これらより張力による板厚変化分  $\Delta h_{TENS}$  を張力発生時定数以内に分離推定することがポイントとなる。

$$\Delta h_{TOP} = \Delta h_{TENS} + \Delta h_{AGC} + \Delta h_d \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 6 にマスフロー先端補償機能の結果を示すが、その効果は顕著で、過大張力による頭部板厚・板幅の不安定挙動が著しく改善されている様子が認められる。

また Fig. 7 にマスフロー補償制御出力およびスタン

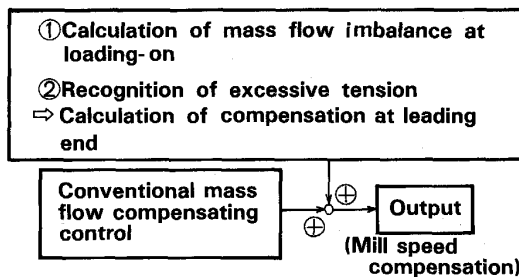


Fig. 5. Mass flow compensating control with strip head compensating function.

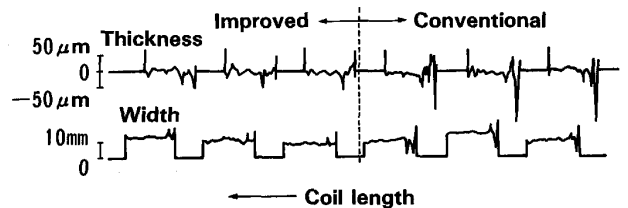
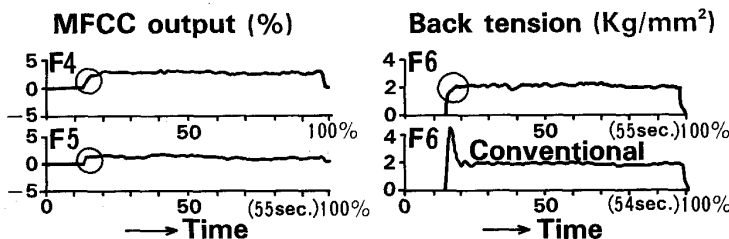
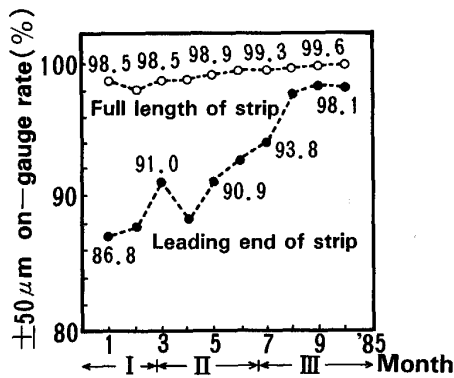


Fig. 6. Effect of improved mass flow compensating control at leading end.



MFCC: Mass flow compensating control  
Fig. 7. Effect of improved mass flow compensating control at leading end.



Step I: Conventional  
 Step II: Application of absolute mode AGC  
 Step III: Improvement of absolute mode AGC  
 (TS ≤ 41 kg/mm<sup>2</sup> 2.0 ≤ t < 4.0 mm 900 ≤ W < 1300 mm)  
 Fig. 8. Example of thickness accuracy.

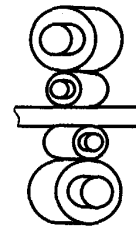


Fig. 9. Pair-crossed roll system.

### 3. ペアクロスミルによるクラウン制御技術の開発

#### 3.1 ペアクロスミルによるクラウン制御の特徴

ペアクロス方式は Fig. 9 に示すように、ワークロール (WR) 軸とバックアップロール (BUR) 軸を互いに平行に保持したまま、上下のロール群をクロスさせる方式である。

ペアクロス方式によるクラウン制御の原理<sup>4)</sup>は、上下 WR 軸をクロスさせた時に生ずる両ロール間の最小間隙が幅方向で放物線形状で変化し、WR に凸方向の放物線形状のロールクラウンを付与したのと等価になることを利用するものである。クラウン制御は、このロール軸のクロス角を調整することにより可能となる。クロス角を  $\theta$  としたとき、得られる等価ロールクラウン量  $C_R$  は、(12) 式で与えられる。

$$C_R \doteq \frac{b^2 \tan^2 \theta}{2(D_W + S)} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $b$  は板幅、 $\theta$  : クロス角 ( $1/2 \times$  上下軸交さ角)、 $D_W$  : WR 直径、 $S$  : ロール中央部のロール間隙である。

#### 3.2 クラウン形状制御技術

##### 3.2.1 クラウン形状制御システムの概要

ペアクロスおよびロールベンダーを制御端とするクラウン形状制御システムの全体構成を Fig. 10 に示す。本システムは、圧延に先立つてあらかじめロールクロス角、ロールベンダー力を設定する初期設定機能と、圧延中にロールベンダーのみを操作する 2.1 で述べたダイナミック制御機能により構成される。初期設定機能の内容は以下のとおりである。

##### 3.2.2 初期設定機能

本機能は、あらかじめ求めている各スタンドの出側板厚、予測圧延荷重等の圧延条件の下で、目標クラウンおよび目標形状を達成する各スタンドのロールクロス角およびロールベンダー力の初期設定値を求める機能であり、以下の手順で計算を行う。

(i) 前コイルの板クラウンの実績値と計算値の差を分析し、その差をすべてロールプロファイルの推定誤差とみ

ド間張力例を示すが、圧延材噛み込み時のマスフローアンバランスを吸収するために先端速度補償量が出力され、その結果頭部での過大張力が従来に比べて大きく緩和されている様子が見える。

#### 2.4 本章のまとめ

前述のように 1985 年 2 月に開始した絶対値 AGC オンラインテストにおいて、顕著な効果を確認できたので、2 月下旬にはすべての品種およびサイズにわたる実用化を完了した。

その後も引き続き、ゲージメーターエラー学習機能のレベルアップや、特に板噛み込み時の速度アンバランスを吸収するためのマスフロー先端補償機能の開発等の精度向上に向けての取組みを行い、高精度化を実現するに至っている。Fig. 8 に頭部および全長の板厚精度履歴を普通鋼の代表サイズについて示す。図から明らかのように絶対値 AGC の完全適用を完了した 2 月末以降、高精度化への取組みのステップを経て、精度は着実に向上している。

以上、絶対値 AGC の実用化・高精度化について述べてきたが、最後に絶対値 AGC の技術的ポイントを整理すると、下記の点があげられる。

- (1) 全スタンド油圧圧下による高速 AGC
- (2) ゲージメーター板厚演算精度の向上……高精度ミルストレッチモデルの採用および高精度ゲージメーターエラー学習
- (3) マスフロー補償制御との協調……頭部通板性の安定 (先端補償機能の開発)
- (4) ベンダー非干渉制御の併用……板クラウン・形状に及ぼす外乱の除去

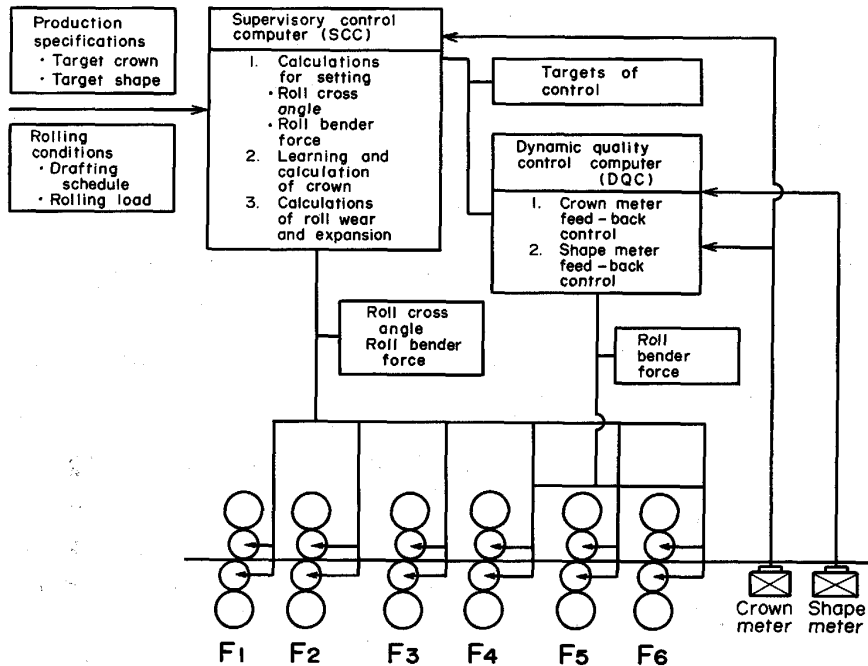


Fig. 10. Schematic diagram of crown control system.

なし、ロールプロファイルの補正量として求める。(コイル間のクラウン学習)

(ii) ロールの膨張プロファイル、摩耗プロファイルを推定し、ロールプロファイルの補正量として求める。

(iii) 各スタンド間の板形状を良好に保ちながら、最終スタンド出側での目標クラウン、目標形状を満足する各スタンド出側板クラウン(クラウンスケジュールと呼ぶ)を求める。

(iv) (iii) で求めたクラウンスケジュールを実現する各スタンドのロールクロス角、ロールベンダー力を(i), (ii) で求めたロールプロファイルの補正量を加味して決定する。

基本的な機能について、以下に簡単に説明する。

(1) 均一荷重板クラウン<sup>5)</sup>モデル

均一荷重板クラウンとは、WR と材料間の荷重分布が幅方向に均一である場合の、圧延機の設定条件および圧延条件から決定される圧延中のロールギャッププロファイルを板クラウンに換算したものである。

ベアクロスミルの均一荷重板クラウン  $C$  は、次式で表される。

$$C = C_P \cdot P + C_F \cdot F - C_C \cdot C_i - C_R \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 $P$ : 圧延荷重、 $F$ : ロールベンダー力、 $C_i$ : ロールクラウン (補正量を含む)、 $C_R$ : (12)式で与えられる等価ロールクラウン量、 $C_P$ 、 $C_F$ 、 $C_C$ : 各影響係数

(2) 最適ロールクロス角の決定ロジック

最適ロールクロス角の決定ロジック全体を構成している基本式<sup>6)</sup>は次の3式である。

(i) 入側クラウンの評価式

Table 1. Draft schedule used for crown schedule simulation.

Coil size : 1.96 mm × 1 240 mm

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
WR dia. (mm)	800		630			
BUR dia. (mm)	1 600			1 480		
WR curve (μm)	-300					
Thickness (mm)	13.17	7.44	4.65	3.10	2.38	1.96
Load (t)	2 783	2 236	2 209	1 875	1 484	1 435
Allowable flatness range:						
Edge wave (%)	1.0	1.8	3.0	3.0	2.0	0.0
Center buckle (%)	2.0	2.0	2.0	1.0	0.5	0.0
Cross angle (°)	0~1.0					

WR: Work Roll BUR: Back Up Roll

$$C_{(i-1)}^{Flat} = C_{(i-1)} - h_{(i-1)} \cdot \Delta \epsilon_{(i-1)} \dots \dots \dots (14)$$

(ii) 出側クラウンの計算式

$$C_i = (1 - \bar{\eta}_i) C_i + \bar{\eta}_i (1 - r_i) C_{(i-1)}^{Flat} \dots \dots \dots (15)$$

(iii) 板形状とクラウン比率の変化の関係式

$$\Delta \epsilon_i = \xi_i \left( \frac{C_i}{h_i} - \frac{C_{(i-1)}^{Flat}}{h_{(i-1)}} \right) \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 $C$  は板クラウン、 $\Delta \epsilon$  は伸び歪み差に換算した板形状、 $\bar{\eta}$  はクラウン比率遺伝係数<sup>5)7)</sup>、 $\xi$  は形状変化係数<sup>7)</sup>、 $C$  は均一荷重板クラウン、 $r$  は圧下率、 $h$  は板厚であり、添え字はスタンド No. である。

ここで求める解は、「目標とするクラウンおよび形状を達成できる各スタンドの均一荷重板クラウン  $C_i$  である。 $C_i$  が求めれば、均一荷重板クラウンモデルよりロールクロス角が求まることになる。 $C_i$  は次のような方法により求める。

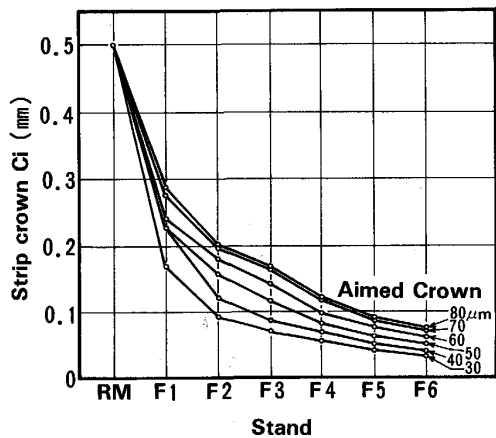


Fig. 11. Crown schedule for each aimed crown.

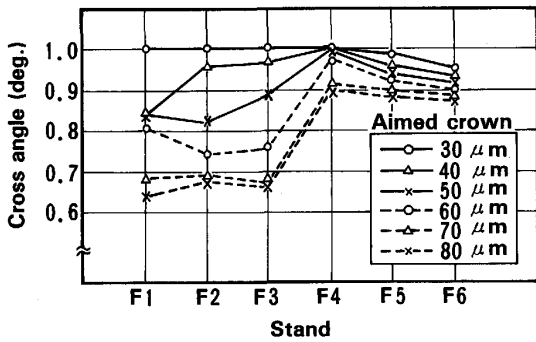


Fig. 12. Cross angle for each aimed crown.

まず、仕上入側の板クラウンから目標板クラウンに至るクラウンスケジュールのうち、仕上後段スタンドになるほど板形状が最も端伸びとなる極限のスケジュールを求め、次にその逆すなわち後段になるほど最も中伸びとなる極限のスケジュールを求める。これらの両極限のスケジュールから求まる  $C_i$  の最大値および最小値の中間値を求めるべき  $C_i$  として採用する。なお、各スタンドのロールベンダー力は、ダイナミック制御に余裕を残すため、動作可能範囲の中点に近いロールバランス力とする。

Table 1 に示す圧延条件で、最終目標形状はフラットとし、目標クラウンを  $30 \mu\text{m}$  から  $80 \mu\text{m}$  まで  $10 \mu\text{m}$  ずつ変えた場合のクラウンスケジュールの計算結果を Fig. 11 に示す。ロールクロス角の計算結果を Fig. 12 に示す。

(3) ロール膨張プロフィール予測モデル

仕上ワークロールは、材料による加熱、ロール冷却水による冷却により、膨張・収縮を繰り返すが、このロールプロフィールの時々刻々の変化をオンラインで精度良く予測し、クラウン形状設定に反映するシステムを開発した。本システムは、ロール胴長方向を 40 分割した有限要素モデル<sup>8)</sup>を採用し、10 s ごとにロールプロフィールを

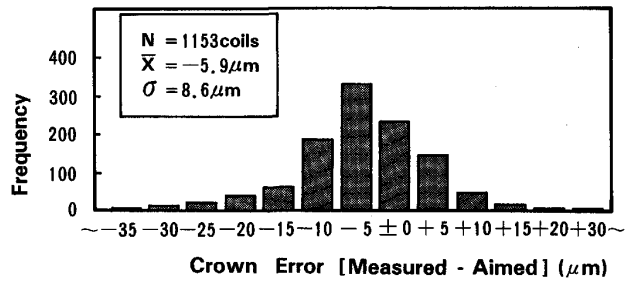


Fig. 13. Histogram of crown error.

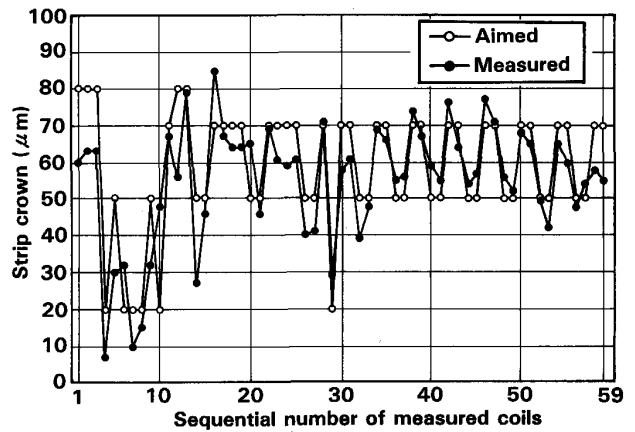


Fig. 14. Comparison of aimed (O) and measured (●) strip crown.

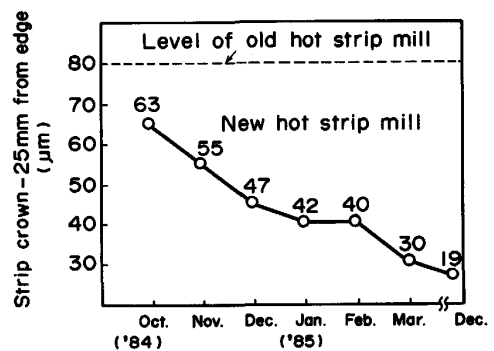


Fig. 15. Change of strip crown (low-temperature extracted silicon steel).

計算している。

3.2.3 クラウン制御実績

前項 3.2.2 で示した基本式による板クラウンの精度を評価するため、Fig. 13 に目標クラウンと実績クラウンの差のヒストグラムを示す。両者の差はほぼ  $\pm 20 \mu\text{m}$  の範囲に入り、理論モデルが高精度で板クラウンを予測できることがわかる。また、Fig. 14 に目標クラウンと実績クラウンの推移を示す。目標クラウンの変化に対して実績クラウンが精度良く追従しており、クラウン自在制御が実現していることがわかる。Fig. 15 は板厚精度厳格化に伴う低クラウン要求材のクラウン実績の推移を

示す。クラウン精度の向上と共に、低クラウン化は順調に進行している。

### 3.3 本章のまとめ

以上を要約すると、クラウン制御技術の開発においては、

- クラウン形状制御理論モデルの実用化
- コイル間のクラウン学習の実施
- ロールプロファイル予測システムの開発

を行った。この結果、

- 高精度のクラウン・形状予測
- 広範囲にわたるクラウン自在制御

を実現している。

## 4. 結 言

絶対値 AGC, クラウン自在制御は、過去より圧延技術者が理想として求めていた機能であるが、いずれも新ミルの稼動当初より積極果敢なテスト調整を繰り返し、完全実用化を達成した。市場に高精度のストリップを供給し始めて2年を経過し、好評を得て、今や板厚厳格材の製造対応のために絶対値 AGC, クラウン制御共に必要不可欠の機能となつている。

また、クラウンを自在に制御できることから、各スタンドの圧下率はメタラジー上の条件から最適な選択がで

きることになり、絶対値 AGC による板厚精度向上と相まつていわゆるスケジュールフリー化が進み、現在では、

• CC-DR 操業対応を容易とする自由度の大きい熱延操業技術の確立

• 極低温圧延、大圧下圧延等のメタラジー上の要求による新たな圧延方法への対応

等、日々熱延プロセスの機能の拡大を続けている。

## 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会共同研究会: 新日本製鉄株式会社 (私信) 1985 年 11 月
- 2) 辻 勇一, 福島賢也: 鉄と鋼, 72 (1986), S331
- 3) 小菅 宏, 辻 勇一, 田中克昌, 関口邦男, 森田進一, 伊藤見治: 第 36 回塑性加工連合講演会論文集 (1985), p. 145
- 4) 大森舜二, 塚本頼彦, 日野裕之, 中島浩衛, 森本磨瑛雄, 中沢 吉: 第 33 回塑性加工連合講演会論文集 (1982), p. 419
- 5) 小川 茂, 松本絃美, 浜渦修一, 菊間敏夫: 塑性と加工, 25 (1984), p. 1034
- 6) 田中 晃, 小川 茂, 浜渦修一, 田中正二, 米田 年, 菊間敏夫: 昭和 59 年度塑性加工春季講演会論文集 (1984), p. 33
- 7) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本絃美, 栗津原博, 木村智明, 志田 茂, 梶原利幸: 塑性と加工, 23 (1982), p. 1172
- 8) 浜渦修一, 松本絃美: 昭和 58 年度塑性加工春季講演会論文集 (1983), p. 301