

冷間圧延設備における新制御技術

—アルミニウム圧延実適用例—

New Control Techniques for Cold Rolling Mills —An Example of Their Application to Aluminium Rolling—

缶材に代表されるアルミニウム薄板圧延材に対する需要の増大に伴い、圧延メーカーでは製品の高品質化とともに生産性の向上も要求されている。そのため、板厚・形状制御の精度および応答性の向上が必要となる。アルミニウム冷間圧延は、国内ではシングルスタンドの圧延機で行われることが多く、鉄鋼とは異なり材質が軟質材から硬質材まで多種多様なため、制御として特有の技術が必要となる。

今回古河アルミニウム工業株式会社と日立製作所は、アルミニウム圧延機特有の問題点を解決するため、スミス法AGC(Automatic Gauge Control：自動板厚制御)、アナログロール偏心制御、クーラントを用いた形状制御、圧下・張力非干渉制御などの新制御技術を開発した。これらの技術を適用した結果、板厚・形状制御精度および生産効率が飛躍的に向上した。

- 菱川 滋* Shigeru Hishikawa
- 前田英樹** Hideki Maeda
- 長倉 弘** Hiroshi Nagakura
- 斉藤 裕*** Yutaka Saitō
- 服部 哲*** Satoshi Hattori
- 万中哲夫*** Tetsuo Manchū
- 諸岡泰男**** Yasuo Morooka

1 緒 言

アルミニウム板材でも、その圧延技術は図1に示すように、製品ニーズの満足と操業での生産性追求の双方の要求を基に発展してきた。最近の製品ニーズの傾向として、板厚の薄肉化と合金の高強度化が進行しており、同時に板厚精度、平坦度などの寸法精度の向上が要求されている。

これらの要求品質と同時に、圧延工程および次工程での生産性向上のため、高速化、工程カット、スケジュールフリーなどが操業ニーズとして要求されている。この二つの要求は、それぞれ独立したものではなく、製品品質、例えば形状精度が向上すれば圧延速度の高速化が図れるなど相互に関連しており、その解決のために板厚制御、形状制御、蛇行制御などといった圧延技術の発達が促され、新技術が開発されつつある。

圧延各社および圧延機メーカーでは、最近の要求の高度化に対応するため、圧延機およびその制御装置の性能向上に特に力を入れており、より高性能の設備と制御方式の開発導入を進めている。

ところで、板厚制御、形状制御などの圧延プロセスに関する制御は、圧延現象が複雑なため、モデル化が難しい、制御

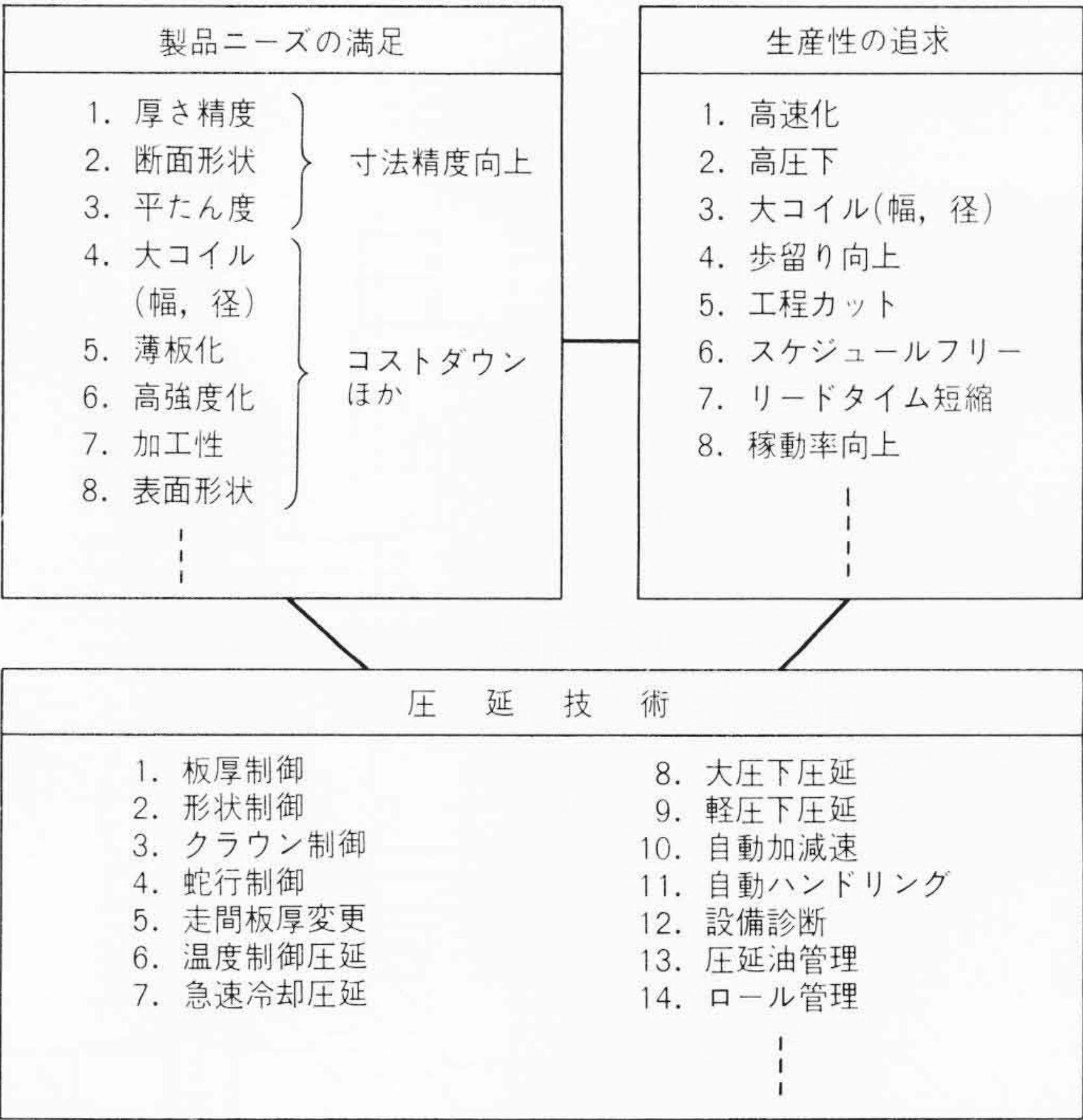


図1 アルミニウム板材の圧延技術 寸法精度向上などの製品ニーズと高速化スケジュールフリーなどの生産性の追求により、板厚制御精度、形状制御精度向上などの圧延技術への要求が高まっている。

* 古河アルミニウム工業株式会社 福井工場 ** 古河アルミニウム工業株式会社 福井研究所 *** 日立製作所 大みか工場
**** 日立製作所 日立研究所

系どうしが干渉するなどの問題があった。

古河アルミニウム工業株式会社と日立製作所では、古河アルミニウム工業株式会社福井工場第二冷間圧延機(以下、2FCMと略す。)の建設に際し、高精度の品質(板厚、形状)および高生産性を目的として、上記の問題点を解決するため各種新制御技術を適用して好結果を得た。

ここでは、各新制御方式の概要および実機での適用結果について述べる。

2 設備概要

2FCMの設備概要を図2に、その主仕様を表1に示す。アンコイラから巻き出された被圧延材は、6 Hiのシングルスタンド圧延機で圧延され出側のテンションリールで巻き取られる。上流の粗パスから薄板の仕上圧延までを満足する機械仕様であり、特に高速応答性および形状修正能力に配慮した構成とした。圧延中の2FCM設備全景を図3に示す。

2FCMの制御システム構成を図4に示す。生産管理コンピュータからの圧延明細を基に、セットアップ用コンピュータが初期設定値、制御目標値、各種影響係数を演算しDDC (Direct Digital Controller)に指令して実際の圧延制御はDDCが行う3段階の機能構成としている。自動制御の入・切や手介操作などはオペレータが運転室で適宜行う。2FCMの運転室

表1 2FCMの主仕様 中間ロールシフト、油圧圧下、クーラントスプレーヘッド(34ゾーン)を備えた最新鋭の圧延機によって、板厚0.08~4.0 mmの製品を生産する。

No.	項 目	仕 様
1	圧延機形式	非可逆シングルスタンド 6 Hi油圧圧下ミル
2	製 品 入 厚 出 庫 板 幅 コイルiD コイルoD コイル質量	0.15~6.0 mm 0.08~4.0 mm 750~1,700 mm φ610 mm φ2,500 mm Max. 22 t Max.
3	ロールサイズ WR IMR BUR	φ470×1,760 mm φ510×1,760 mm φ1,300×1,760 mm
4	圧延速度	1,800 m/m Max.
5	圧延荷重	1,600 t Max.
6	ワークロールベンダ	60 t/chock
7	中間ロールシフト	500 mm Max.
8	クーラントスプレーヘッド	34ゾーン
9	クーラント温度	30℃(通常), 15℃(スポット)

注：略語説明 WR(作業ロール), IMR(中間ロール), BUR(補強ロール)

を図5に示す。

またDDCレベルでは、機能別に構成された各コントローラにより、自動加減速、自動ハンドリング、板厚制御、形状制御などを実施している。このたび適用した新制御技術には下記がある。

- (1) スミス法AGC(Automatic Gauge Control：自動板厚制御)
- (2) アナログ式ロール偏心制御
- (3) ファジィ制御によるクーラントを用いた形状制御

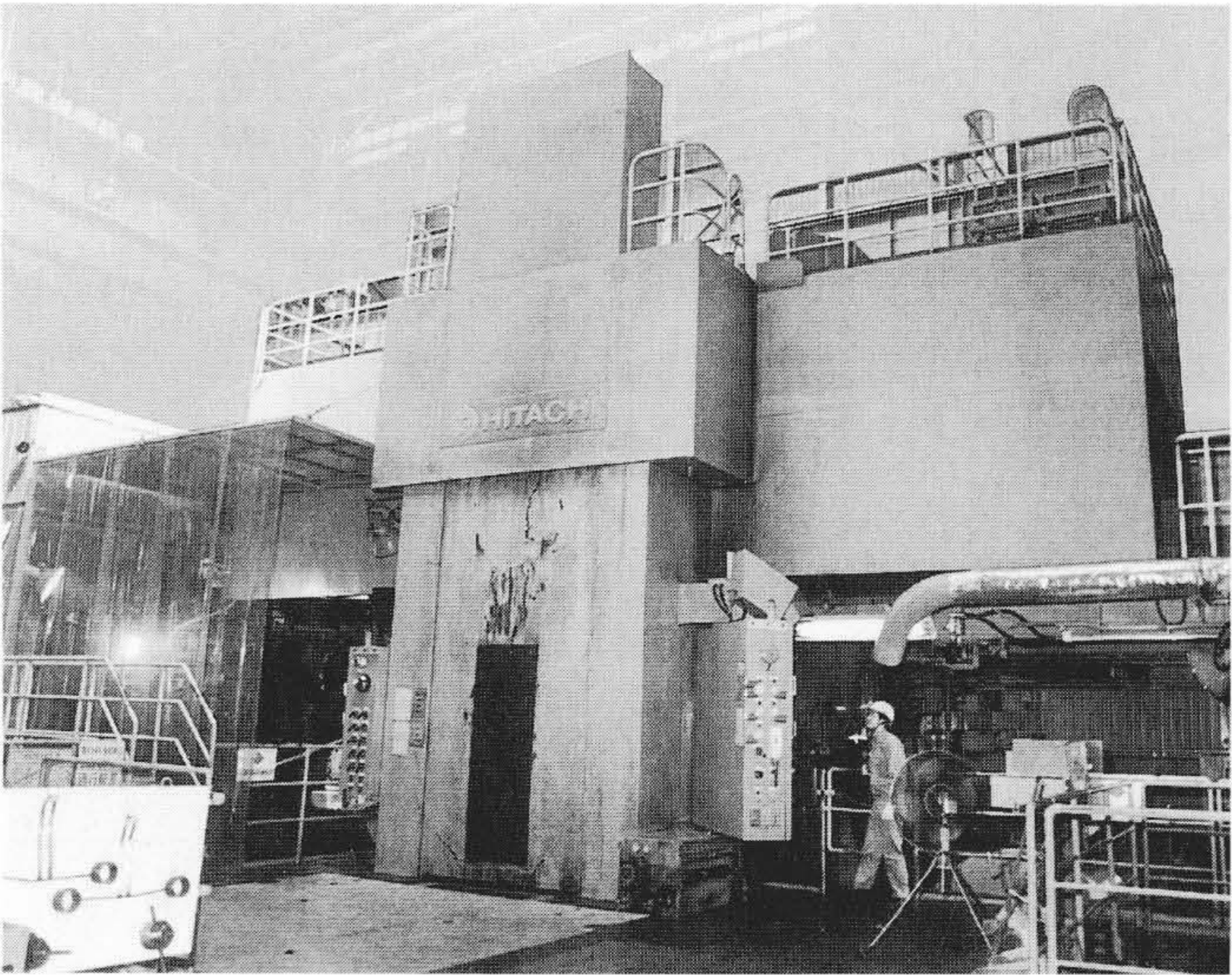


図3 2FCMの設備全景 圧延中の2FCMの設備を示す。写真右側がアンコイラ、中央部が圧延機本体、左側がテンションリールおよび運転室である。

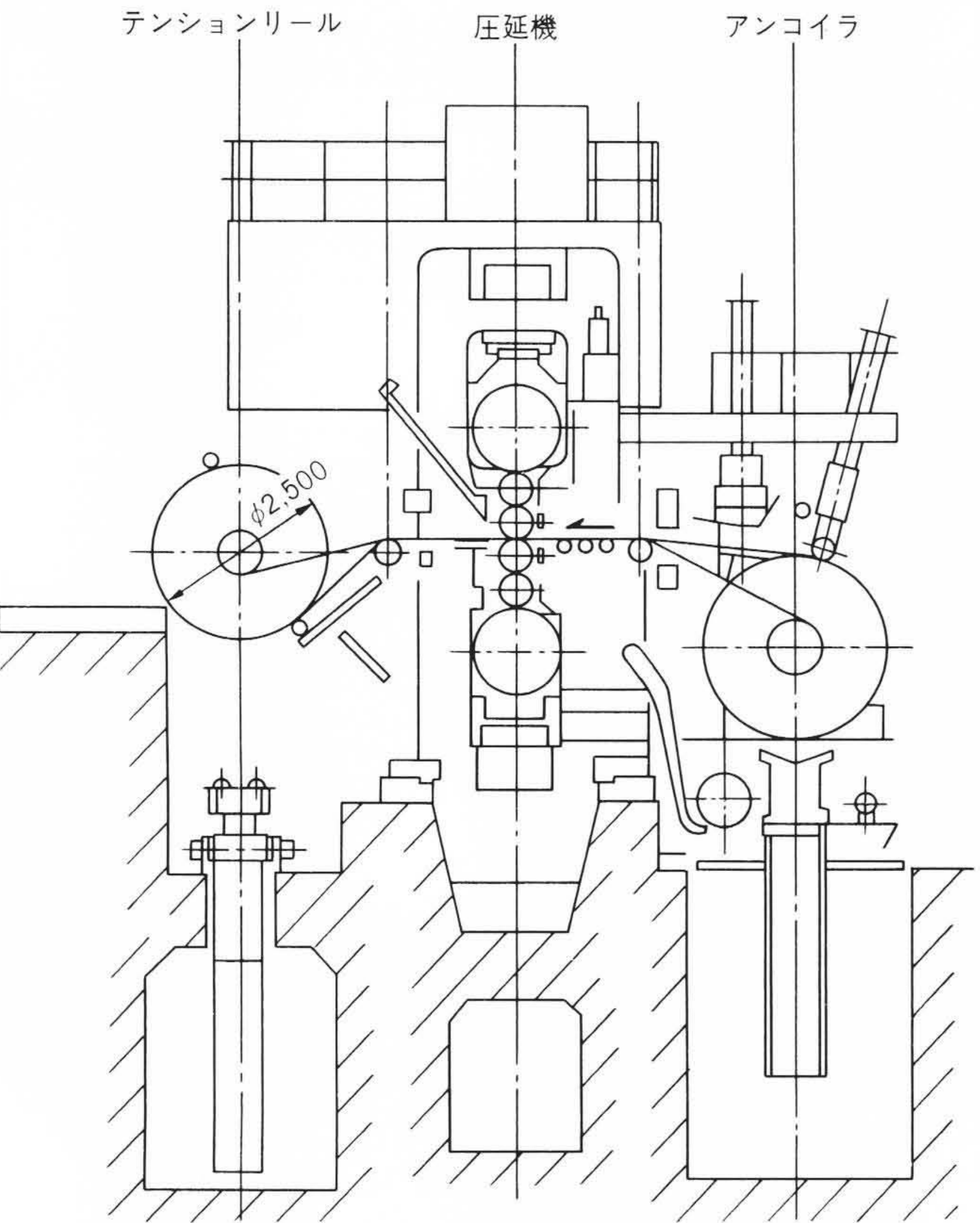


図2 2FCM設備概要 テンションリール、アンコイラ、6 Hiシングルスタンド圧延機を備えた冷間圧延設備である。

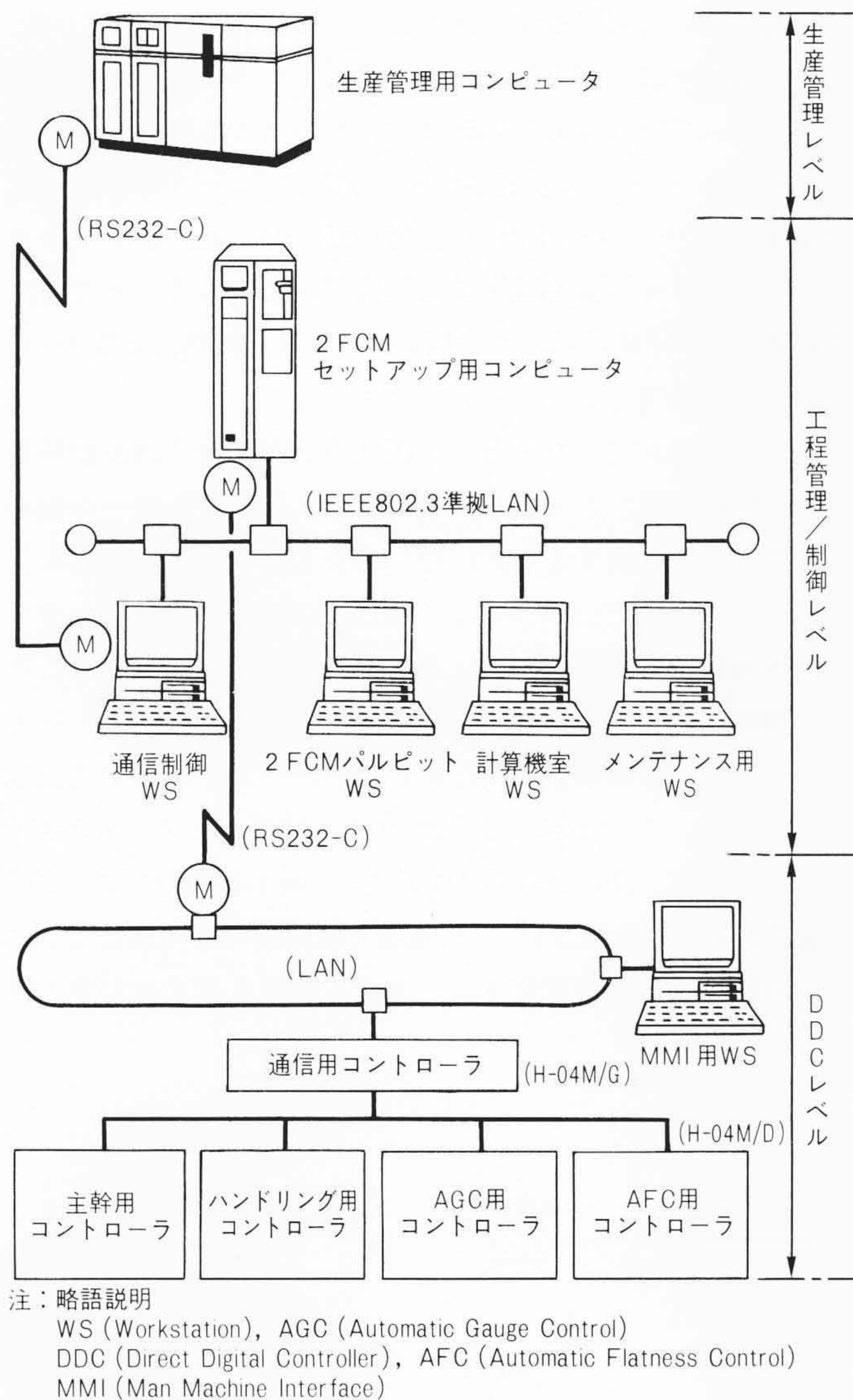


図4 2号冷間圧延機システム構成図 圧延情報は、生産管理用コンピュータからセットアップコンピュータに送られ、セットアップ計算の後、プリセットデータとして下位DDC(主幹、ハンドリング、AGC、AFC)コントローラに送られる。



図5 2FCMの運転室 運転室には、オペレータが自動制御を入・切したり手介操作を行うための操作デスク、セットアップデータや板形状を操作するためのCRTなどが設置されている。

(4) 圧下・張力非干渉制御

これらは、板厚制御、形状制御で従来問題とされてきた事項を解決するための技術であり、それぞれ別個に適用しても効果が得られる。

3 各制御方法の特徴

2FCMに適用した各制御系について、従来の問題点と今回の制御の目的、原理を説明する。

3.1 スミス法AGC

圧延機出側の板厚は、出側板厚計で検出した板厚偏差をフィードバックして用いるモニタ制御によって一定に保たれる。しかし、圧延機のロール直下から出側板厚計までは、機械構成上数メートルの距離があるため、むだ時間(板厚偏差の発生から検出までの時間差)が存在し、特に低速圧延時、制御ゲインを大きくすることができず、制御の応答性が低下するという問題があった。これは、通板時のオフゲージ長さを増大させる原因となるため、低速圧延時でも制御ゲインを低下させない制御方法が要求されていた。スミス法AGCは、この要求にこたえて開発した制御方法である。

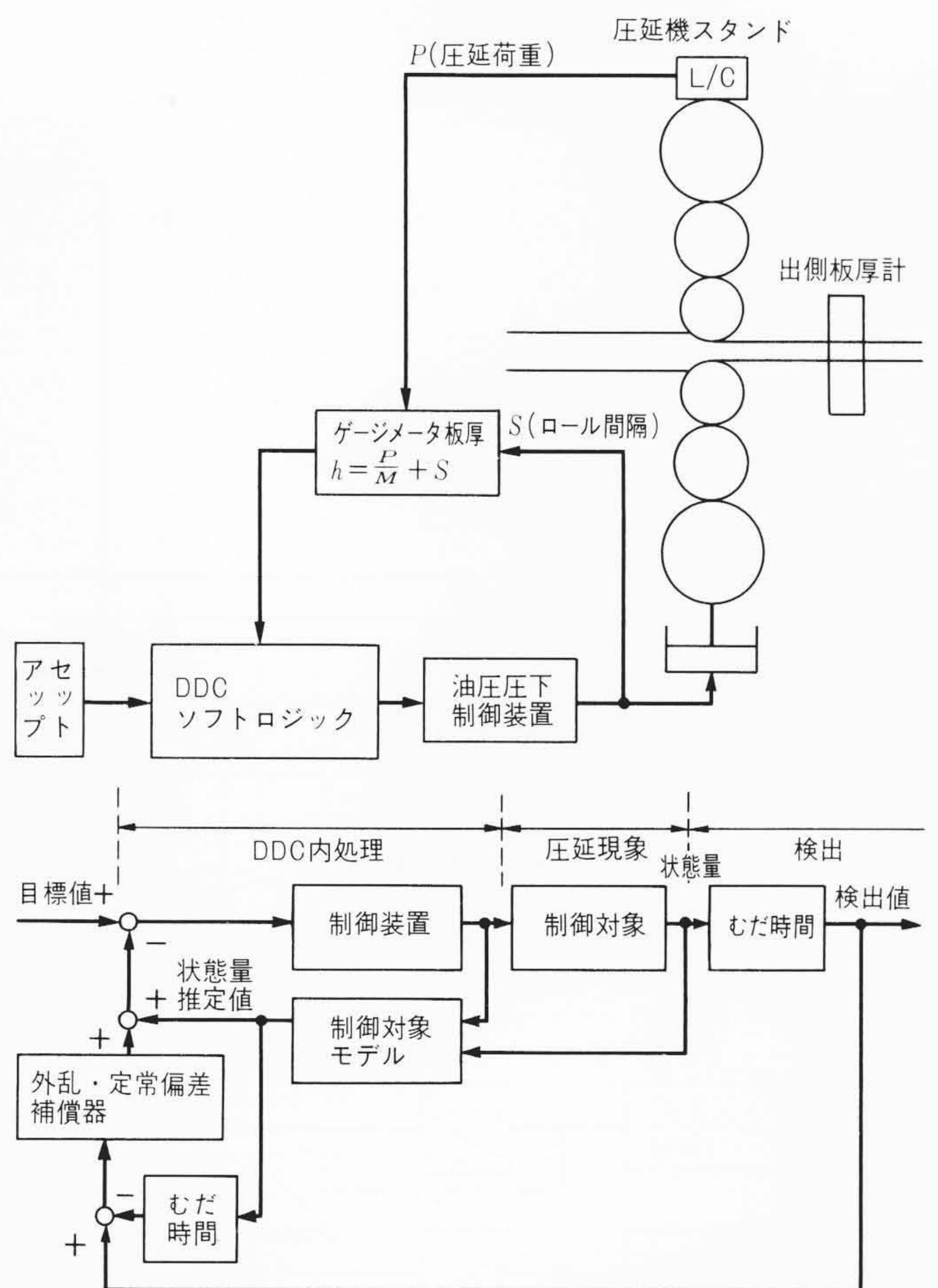


図6 スミス法の考え方 実績値を用いて求めた状態推定値によって閉ループ制御を行いながら、むだ時間後に検出した真値によって外乱定常偏差の補償を行う。

スミス法の考え方を図6に示す。検出までにむだ時間の存在する制御対象に対して、制御対象のモデルを用いて状態量の推定値を求め、制御を行う。実際の制御対象と制御対象モデルの間には、モデルの近似精度による定常偏差、外乱による実状態量の変動がある。そのため、実状態量と状態推定値の間には偏差が存在する。外乱・定常偏差補償器は、この偏差を補償する。このような構成にすると、むだ時間要素の存在による制御系の不安定性が防止でき、制御ゲインを十分大きくとることができる。

2FCMでは、圧延荷重およびロール間隔から演算したゲージメータ板厚と出側板厚計での出側板厚検出値を用いてスミス法AGCを構成した。通板時から制御することにより、オフゲージ長の減少を実現した。

3.2 アナログロール偏心制御

圧延機の出側板厚変動要因の一つにロール偏心がある。これは、ロールの機械的軸中心と回転中心が異なるために生ずる周期的なロール間隔の変動で、周期がロール回転速度に依存する。従来は、バックアップロール偏心が注目されていたが、最近の板厚精度の高精度化に伴い、ワークロール偏心による板

厚変動についても軽減すべきであるとの要求がでてきている。
アルミニウム冷間圧延は、国内ではシングルスタンドの圧延機によって行われることが多く、粗パスでも圧延速度が速いため、ロール偏心周波数はバックアップロール偏心周波数で5 Hz、ワークロール偏心周波数で10 Hzを超え、ソフトウェアによるロール偏心制御では追従できなくなる。そこで、2FCMでは、圧延荷重変動を用いたアナログ回路によるロール偏心制御を適用した。

偏心周波数が高くなると、油圧压下制御装置の周波数特性から、位相の遅れが大きな問題となる。そこで、ロール偏心周波数成分を抽出するために用いているバンドパスフィルタの周波数-位相特性を利用し、位相進み回路を付加する。ロール偏心周波数より低めにフィルタ中心周波数を設定することで、位相進みが実現できる。例えば、位相を50度進めたい場合、ロール偏心周波数より低めにバンドパスフィルタ周波数を設定する。このとき、周波数-ゲイン特性からフィルタゲインは低下する。2FCMのアナログロール偏心制御のブロック図を図7に示す。DDC内ソフト処理で位相進みを考慮したフィルタの中心周波数を設定する。また、位相を進ませた分、フ

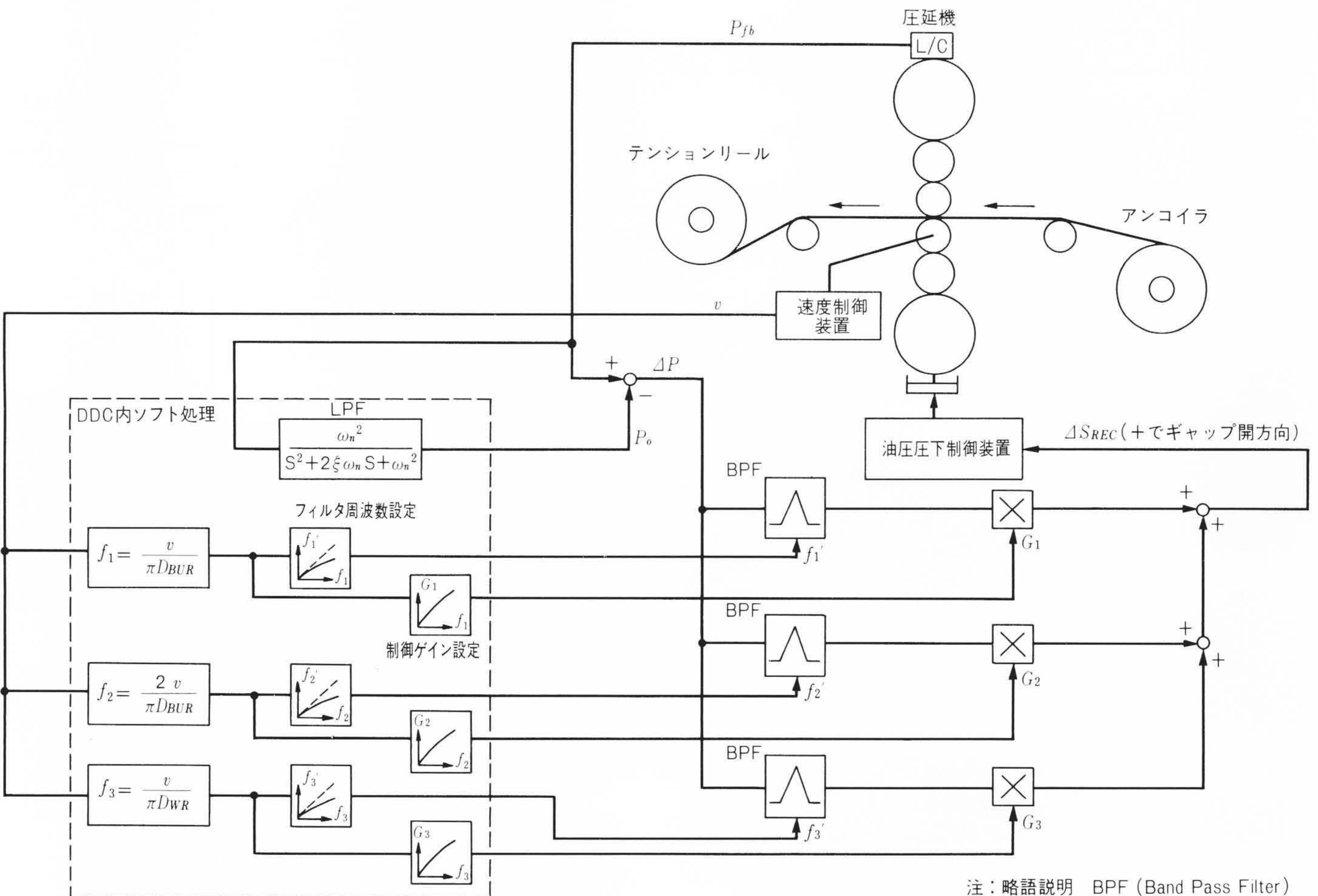


図7 ロール偏心制御システム構成図 デジタル回路とアナログ回路のハイブリッド構成により、圧延荷重を求めてロール偏心制御を行う。

フィルタのゲインが低下すること、および周波数が高くなると油圧圧下制御装置のゲインが低下することから、圧延速度が高いとき(ロール偏心周波数が高いとき)は制御ゲインも高く設定している。

3.3 形状制御(クーラント制御)

アルミニウム薄板が、アルミ缶用として用いられる場合、プレス機によってプレス成形されるため、圧延製品の板形状が非常に重要となる。板形状の不良はアルミ缶の強度不良の原因となるだけでなく、プレス機の間をスムーズに通らないなどで操業効率低下の原因ともなる。また、圧延中の板形状不良は、板破断事故の原因となるため、冷間圧延設備の操業効率向上の観点からも板形状の高精度化が要求される。2FCMでは、複合形状不良、局部形状不良の除去を目的として、新しいクーラントによる形状制御方式を開発した。

従来行われているクーラントによる形状制御は、形状偏差だけに着目したデッドバンド制御なので、形状制御精度の大幅な向上は期待できないと判断し、熟練オペレータの知識を巧みに活用できるファジィ制御を適用した。ファジィ制御とは、人間の持つ制御対象に対する定性的な知識を用いて制御を行うための手段である。今回、クーラントによる形状制御に適用するに当たり、熟練オペレータの知識を

(1) 形状偏差が大きければ、クーラントを噴射する(偏差の絶対値)。

(2) 形状偏差が大きくなる方向に変化しているならば、クーラントを噴射する(偏差の時間変化)。

(3) 形状偏差が凸ならば、クーラントを噴射する(偏差の近傍との空間的關係)。

の3項目に整理した。ファジィ推論の方法を図8に示す。これらの知識からファジィ推論を用いて、「クーラントによって修正可能な方向に形状の悪い度合い」 α を算出し、 α の大きいほうからクーラントを噴射する。この方法を用いると、形状の局所的な凹凸をも評価できるため、形状制御精度の大幅な向上が期待できる。

3.4 圧下・張力非干渉制御

シングルスタンドの圧延機では、圧下制御装置によってワークロール間隔を操作し、板厚を制御しようとしても張力が変動するため板厚制御の効果が半減してしまう現象がある。この一例として、板厚計で測定した入側板厚偏差をロール直下までトラッキングして圧下によって板厚を制御する入側圧下フィードフォワードAGCについて考えてみる。入側板厚が厚くなると、AGCは圧下を閉じてロール間隔を小さくするが、圧下を閉することによって圧延機入側の張力が減少する。入側張力が減少すると、圧延機出側の板厚は厚くなるのでAGC効果は半減してしまう。

上記の現象を防止するため、今回、AGC圧下出力による張力変動の補正を行った。フィードフォワードAGCによってロ

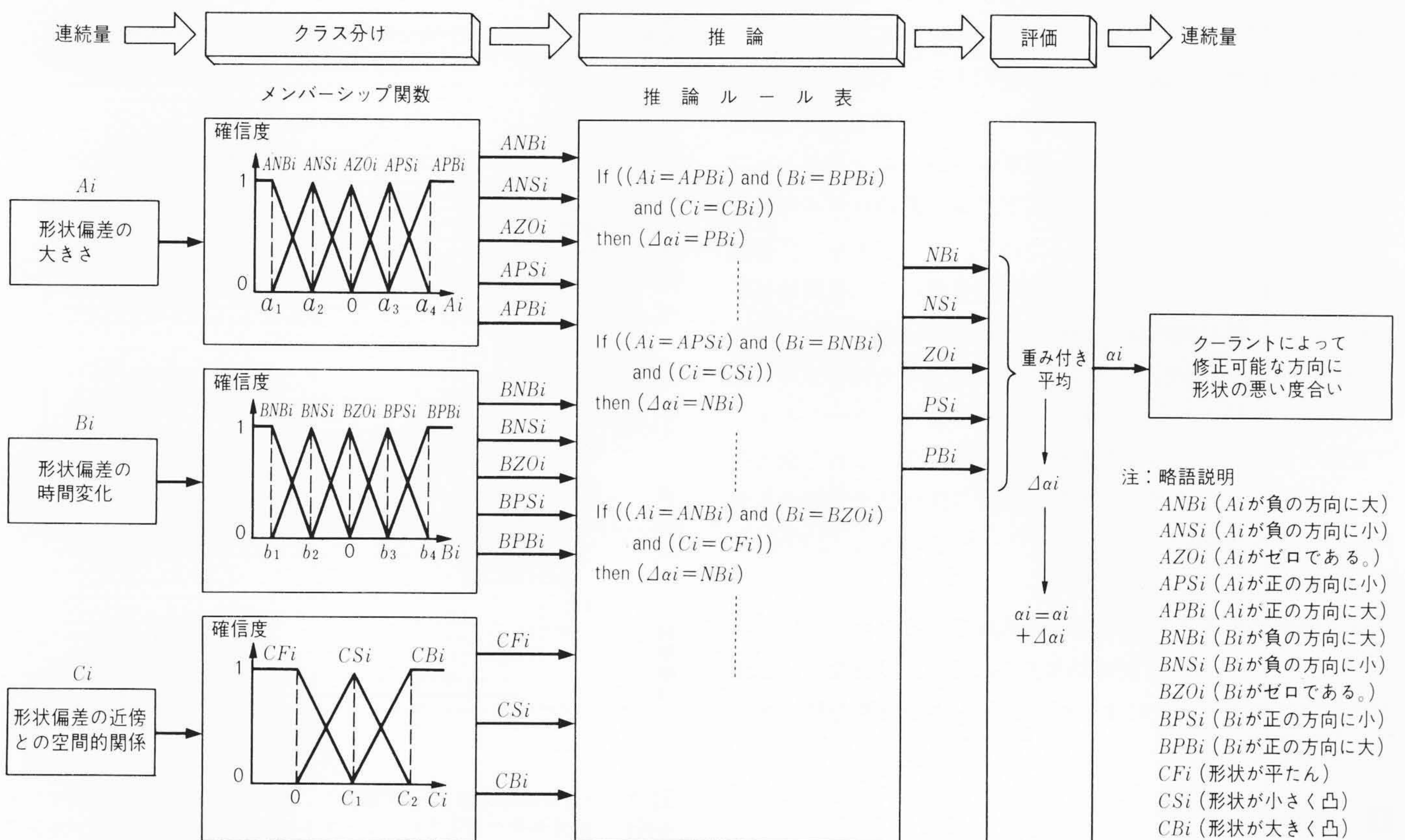


図8 クーラント形状制御でのファジィ推論 クーラント形状制御に用いたファジィ推論のメンバーシップ関数、推論ルールを示す。

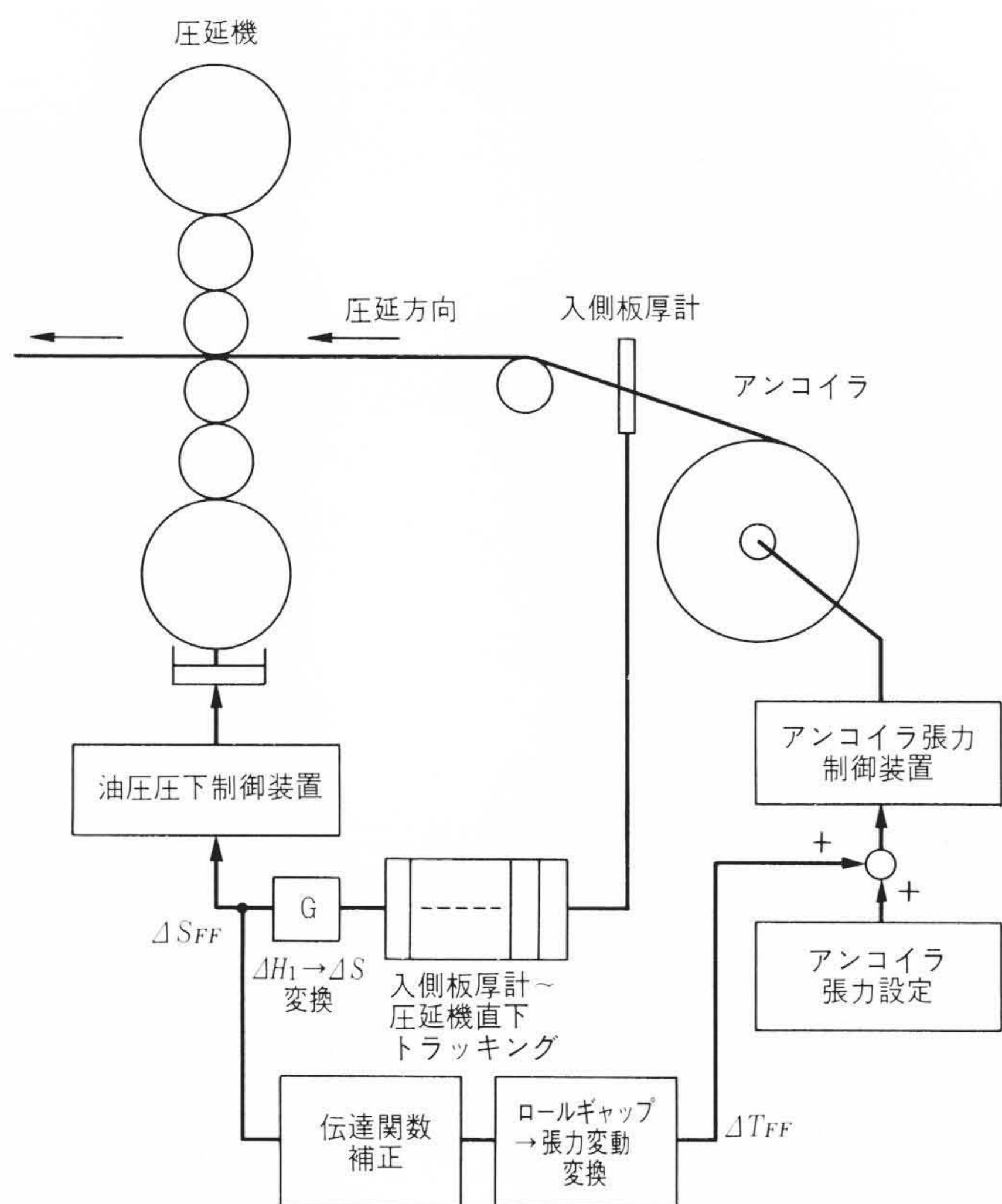


図 9 圧下張力非干渉制御の概要 FF(フィードフォワード)圧下位置指令値を用い、アンコイラの応答を伝達関数補正にて補償し、圧下による張力変動を低減する。

ール間隔が変動するが、ロール間隔変動量から張力変動量を予測して、アンコイルに対する電流指令を演算し出力する。

張力補正の概念を図9によって説明する。入側圧下フィードフォワードAGCは、入側板厚計からの板厚偏差信号 ΔH をミル直下までトラッキングし、板厚偏差からロールギャップへの単位変換を行った後、油圧圧下制御装置のロールギャップ指令を出力する。この指令について、ロールギャップ変動から張力変動までの伝達関数の逆関数を用いて伝達関数補正を行った後、張力変動量に変換すると、張力変動補正值 ΔT_{FF} が得られる。 ΔT_{FF} を、アンコイラ張力設定から減算することによって張力補正を行う。張力変動補正值は、ロールギャップ変動から予想される張力変動の微分であり、これを張力指令から減算すると、アンコイラへの張力指令は予想される張力変動とは逆方向にフィードフォワード的に動く。このため、張力変動を低減することができる。

圧下操作に起因する張力変動を低減できるため、圧下フィードフォワードAGCの制御効果を高めるばかりでなく、低張力圧延時の張力急減少による板の蛇行および破断を防止することができる。

4 実績データ

前章で紹介した各制御系は、2FCMに実際に適用したもので

ある。2FCMでの実機適用結果を次に述べる。

4.1 スミス法AGC

スミス法AGCの効果を実証するため、圧延中に圧下位置の手介入修正を行って、スタンド出側板厚を変化させ、モニタAGCおよびスミス法AGCのステップ応答を調べた。その結果を図10、11に示す。通常のモニタ制御を用いた場合が図10で、スミス法を用いた場合が図11である。スミス法を用いた場合のほうが板厚偏差を短時間で修正しており、明らかに応答が速いことがわかる。

4.2 アナログロール偏心制御

アナログロール偏心制御の適用結果を図12に示す。圧延中にロール偏心制御を入，切し，ロール偏心による板厚変動が減少するかを調べた。ロール偏心制御を入れることにより，スタンド出側板厚偏差が約 $\frac{1}{2}$ に低減されていることがわかる。

4.3 形状制御(クーラント制御)

ファジィ制御を適用したクーラントによる形状制御の結果を図13、14に示す。図13が従来方式のデッドバンド制御を適用した場合であり、図14がファジィ制御を適用した場合である。ファジィ制御では、形状の局所的な凹凸も評価しているため、従来方式の場合に比べ局所的な凹凸がほとんどなくなっているのがわかる。

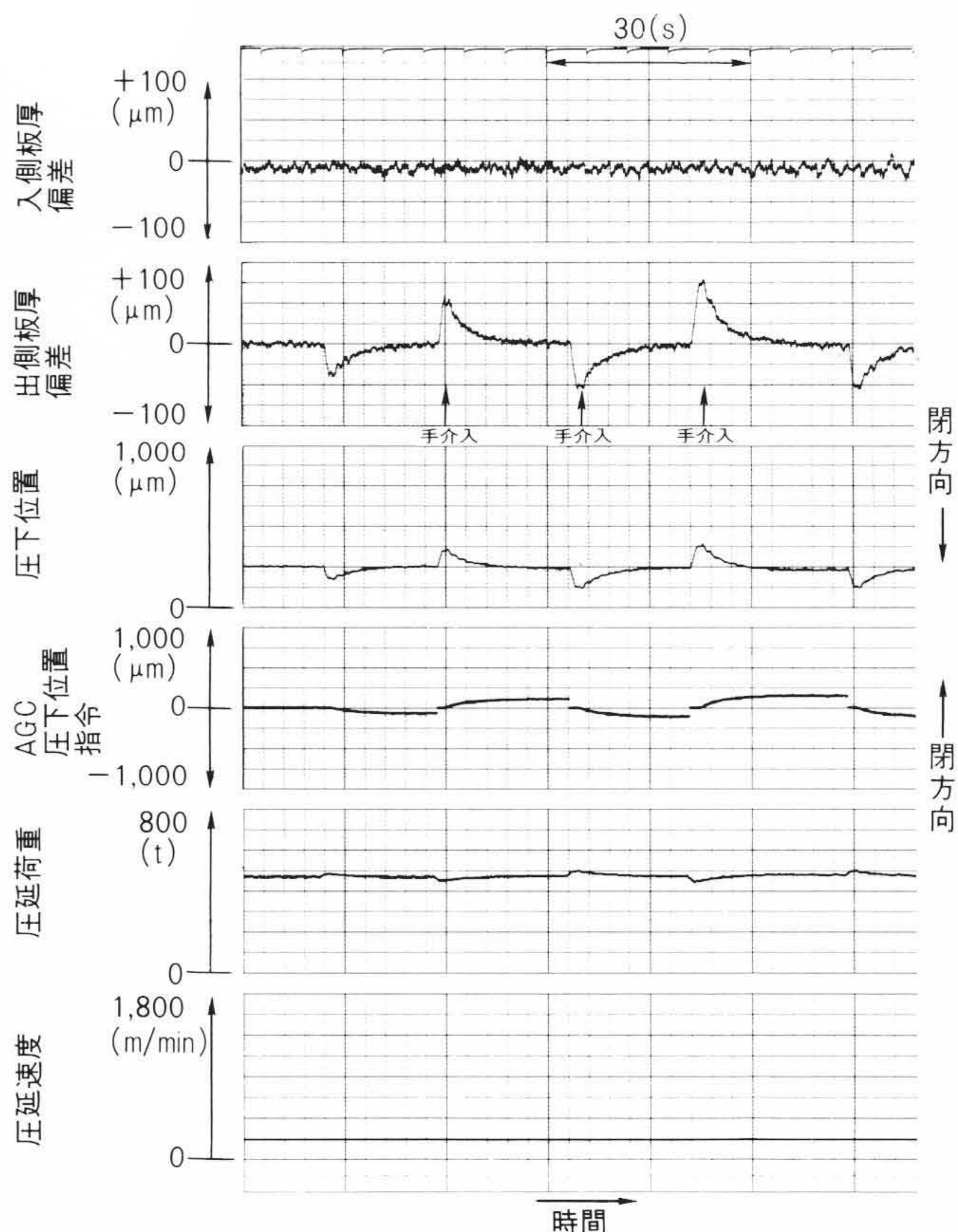


図10 モニタAGCのステップ応答 矢印の位置で圧下位置の手介入を行い、板厚偏差が修正されるようすを調べた。板厚偏差0まで修正するのに約10秒かかっている(入側板厚2.23 mm, 出側板厚1.2 mm, 板幅1,699 mm, 鋼種1100)。

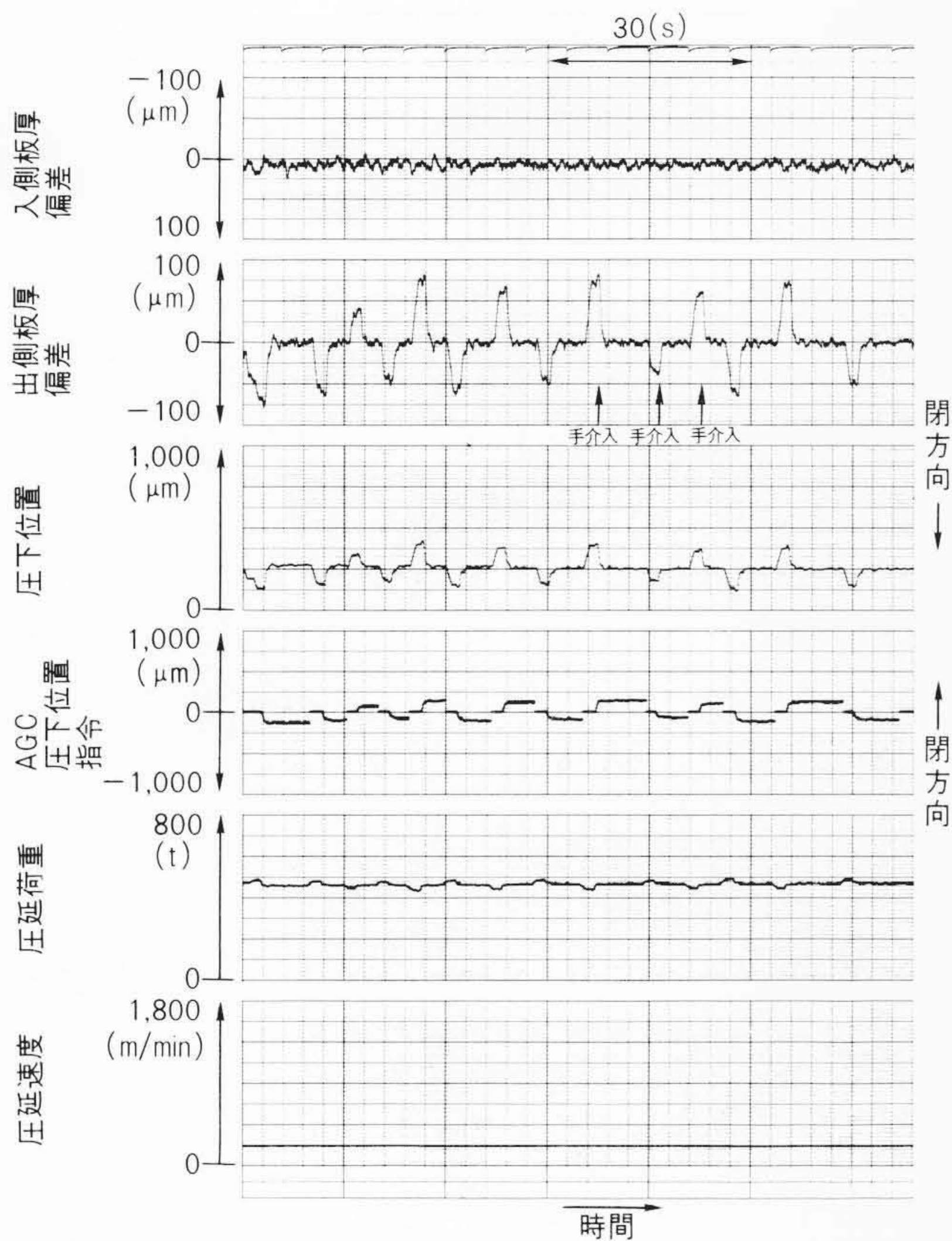
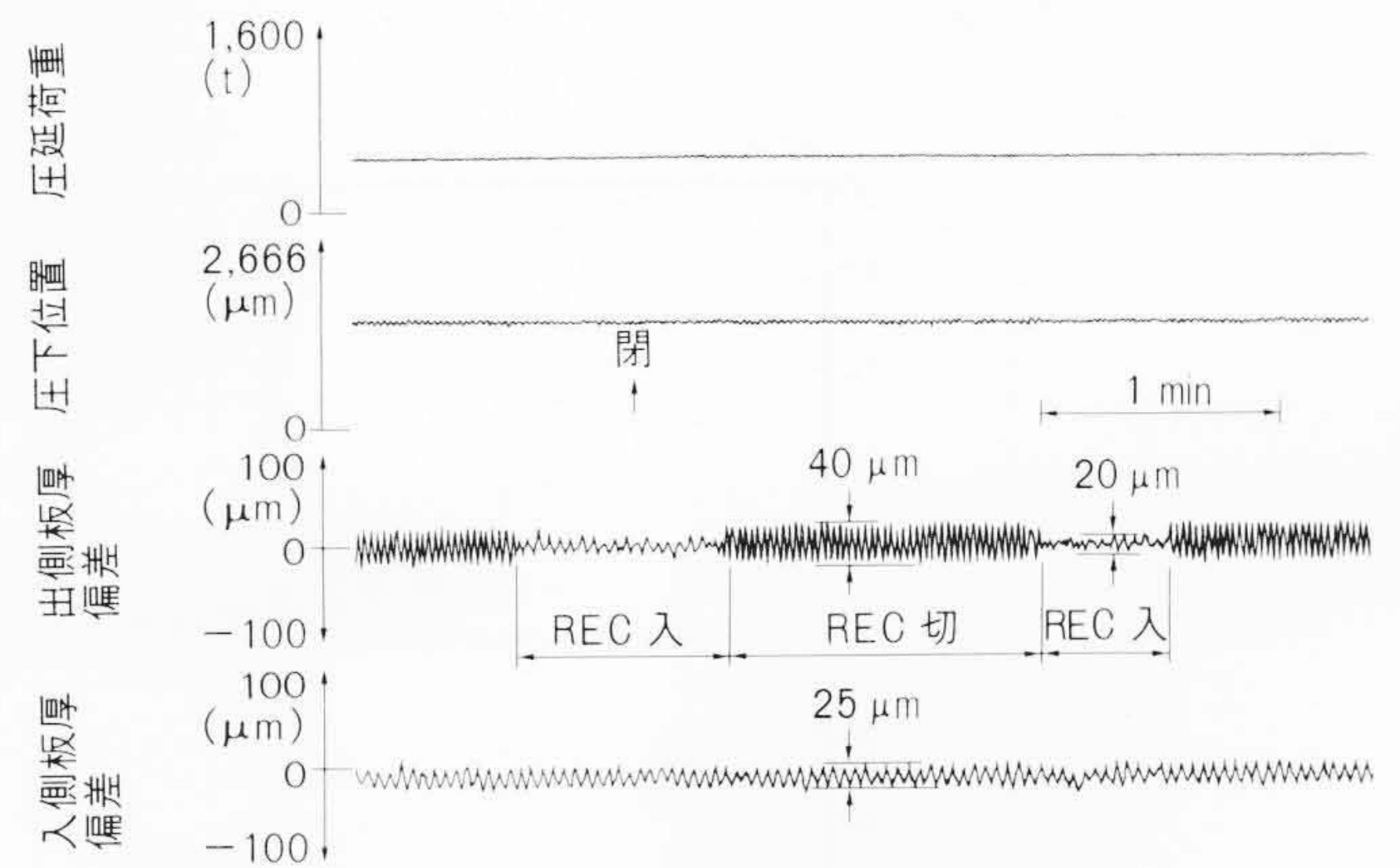


図11 スミス法AGCのステップ応答 図10と同一条件でスミス法のステップ応答を調べた。板厚偏差0まで修正するのに2～3秒程度しかかからない(入側板厚2.23 mm, 出側板厚1.2 mm, 板幅1,699 mm, 鋼種1100)。



注：略語説明 REC (ロール偏心制御)

図12 アナログロール偏心制御適用結果 ロール偏心制御によって出側板厚偏差が $\frac{1}{2}$ 程度に減少している(入側板厚1.45 mm, 出側板厚0.82 mm, 板幅850 mm, 鋼種5182)。

4.4 压下・張力非干渉制御

压下・張力非干渉制御の目的は压下を操作したことによる張力変動を低減し、スタンド出側板厚偏差を減少させることにある。圧延中の板厚の張力変動の一例を図15に示す。圧延中、压下位置の変動にもかかわらず、張力はほぼ一定に保たれているのがわかる。

また、スミス法によって通板中から板厚偏差は10 μm 以内に抑えられており、オフゲージ長の減少が達成されている。圧延中の板厚精度も、 $\pm 2.5 \mu\text{m}_{p-p}$ と従来に比べて向上している。

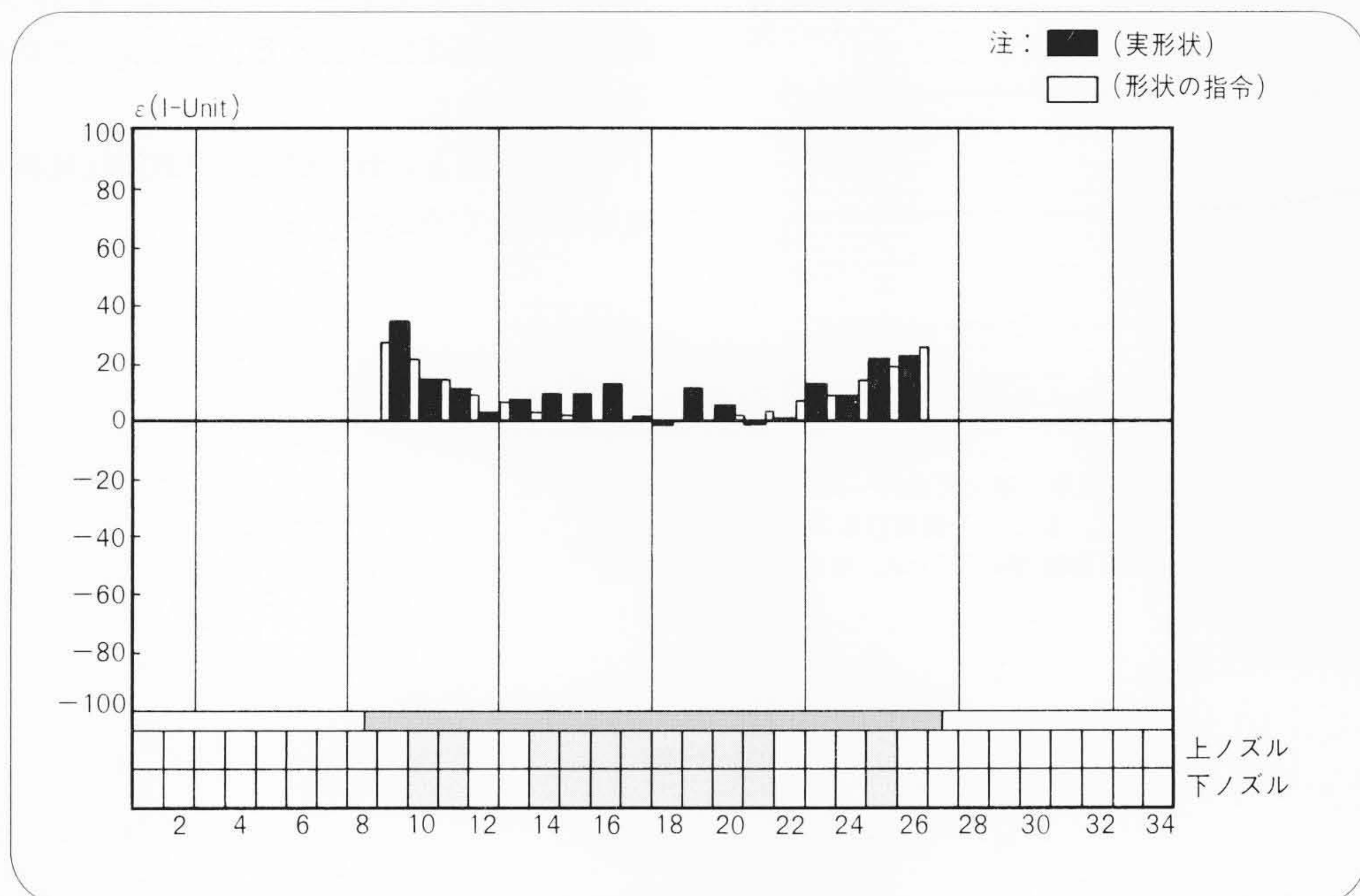


図13 2FCMでのクーラント形状制御結果(従来制御) 中央部の棒グラフが形状の指令および実形状を示す。下段は、クーラントの出力パターンを示す。9～26チャンネルまでが被圧延材がかんでいる有効チャンネルである(鋼種5182, 入側板厚0.52 mm, 出側板厚0.33 mm, 板幅952 mm)。

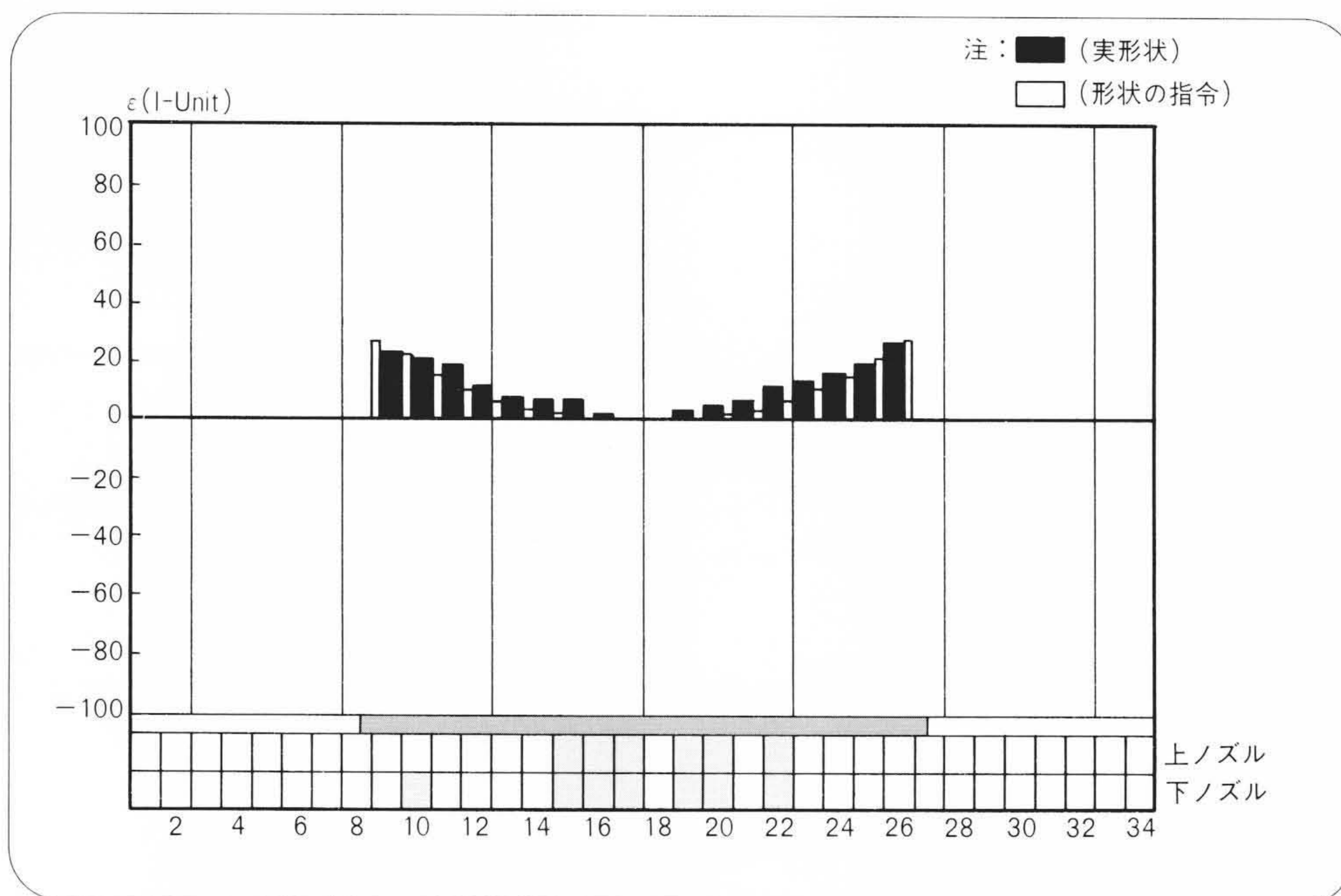


図14 2FCMでのクーラント形状制御結果(ファジィ制御) 従来制御では実形状に局部的な凹凸が存在していたが、ファジィ制御の場合、ほとんどなくなっているのがわかる(鋼種5182, 入側板厚0.52 mm, 出側板厚0.33 mm, 板幅952 mm)。

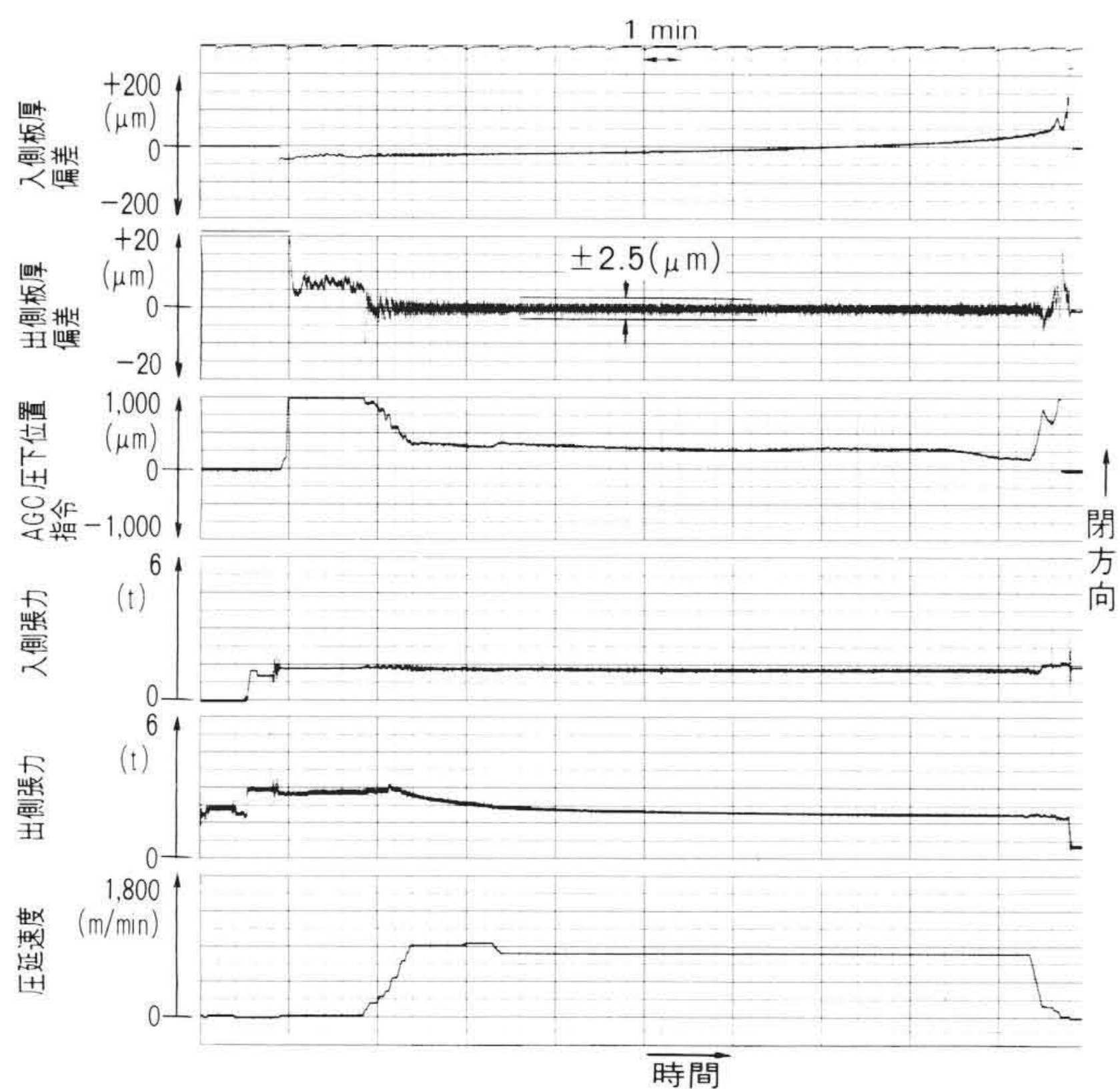


図15 実圧延データの一例 圧延中の板厚、張力変動の一例を示す。圧延開始直後からオンゲージとなっている。また、入側張力もほぼ一定値に保たれている(入側板厚0.51 mm, 出側板厚0.322 mm, 板幅1,202 mm, 鋼種5182)。

5 結 言

以上述べたように、アルミニウム圧延での従来の問題点を解決し、板厚・形状制御精度を向上させるために導入したスミス法AGC、アナログ式ロール偏心制御、ファジィ制御によるクーラントを用いた形状制御、圧下・張力非干渉制御の新制御技術は、いずれも当初の目的に合致して順調に動作している。板厚・形状制御精度の向上により、板破断が減少し、圧延速度の高速化が図れるようになったため、生産効率の向上も達成できた。

今後は、以上の新制御技術を鉄鋼圧延機も含め、多方面に適用していく予定である。