

ファジィ理論による形状制御

Fuzzy Algorithm for the Shape Control of Cold Rolling Process

圧延プロセス、特に冷間圧延では、製品の品質化のため、板厚・形状に代表される寸法品質の制御精度向上が要求されている。これらのニーズにこたえるため、多変数最適制御に代表される現代制御理論を圧延プロセスに適用するケースも増えてきた。ところが、形状制御のように制御対象を正確にモデル化できないプロセスに対しては十分な効果が得られない欠点があった。

今回われわれは、熟練者の制御対象に対する定性的な知識を巧みに活用できるファジィ理論に着目し、制御偏差、制御偏差の時間変化の方向、制御偏差の近傍との空間的な関係を考慮したファジィ制御をアルミニウム圧延機のクーラントによる形状制御に適用した。その結果、形状制御精度の飛躍的向上を達成した。

堺 俊夫* *Toshio Sakai*
 前田英樹* *Hideki Maeda*
 菱川 滋* *Shigeru Hishikawa*
 服部 哲** *Satoshi Hattori*
 中島正明** *Masaaki Nakajima*
 片山恭紀*** *Yasunori Katayama*

1 緒言

最近、アルミニウム圧延製品に対する品質要求は、ますます厳しくなっており、特にアルミ缶用の薄板圧延品の分野では、板厚・形状などの寸法精度の向上が要求されるようになってきた。また、アルミニウム冷間圧延では、被圧延材の形状を良くすることは製品品質の向上ばかりでなく、次工程での生産性の向上に対しても重要である。

古河アルミニウム工業株式会社と日立製作所は、古河アルミニウム工業株式会社福井工場第2冷間圧延機(2FCM)の建設に際し、形状制御^{*1)}の制御精度向上を目的として現代制御理論を含めた各種制御方式の適用を検討した。その結果、熟練者の持つ定性的な知識を巧みに利用できるファジィ制御^{*2)}が最適との結論に達し、クーラントによる形状制御に適用して良好な結果を得た。

ここでは、ファジィ制御導入の背景、ファジィ理論によるクーラント形状制御の概要、シミュレーションによる検討および実機適用結果について述べる。

2 ファジィ制御導入の背景

圧延製品に対する品質化の要求に対応するため、制御精度の向上が望まれているが、古典制御理論に基づく従来の制

御技術では制御精度のいっそうの向上は困難である。そのため、圧延プロセスに新制御技術、特に多変数最適制御、非干渉制御などの現代制御理論を適用することが検討され、実際に適用されたケースも増えてきた。ところが、圧延現象、特に被圧延材の板形状に関するプロセスは、非線形で動作も複雑であり、正確なモデルを作成するのは困難である。このため、制御対象のモデルが完全ならば威力が発揮できる現代制御理論も、形状制御には適用されていないのが実情である。

ところで、動作の複雑な板形状についても、熟練者は適切な制御操作を行って許容される偏差範囲内に板形状を保持することができる。このとき、熟練者は、「もし偏差が大きければ、操作量を大きくする。」のような、数値的に表せない定性的な知識を用いて推論し、制御操作を行っている。このような熟練者の持つ定性的な知識を用いて推論し、制御を行う手段として開発されたのがファジィ制御である。ファジィ制御は、仙台市交通局の地下鉄の制御³⁾などに適用され、効果を上げている。

3 形状制御

3.1 形状制御の概要²⁾

形状制御は、圧延時、ロールの機械的、熱的な変形によって発生する被圧延材の板幅方向の伸びの不均一を除去する目的で行われる。

形状制御の方法を図1に示す。圧延は複数のロールから構成される圧延機の上下ワークロール間に被圧延材を通すことによって行われる。このとき被圧延材は、ワークロールにか

*1) 形状制御：圧延時、板幅方向の被圧延材の伸びの分布を一定にする制御で、機械的または熱的にロールを変形させて行う。

*2) ファジィ制御：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。

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

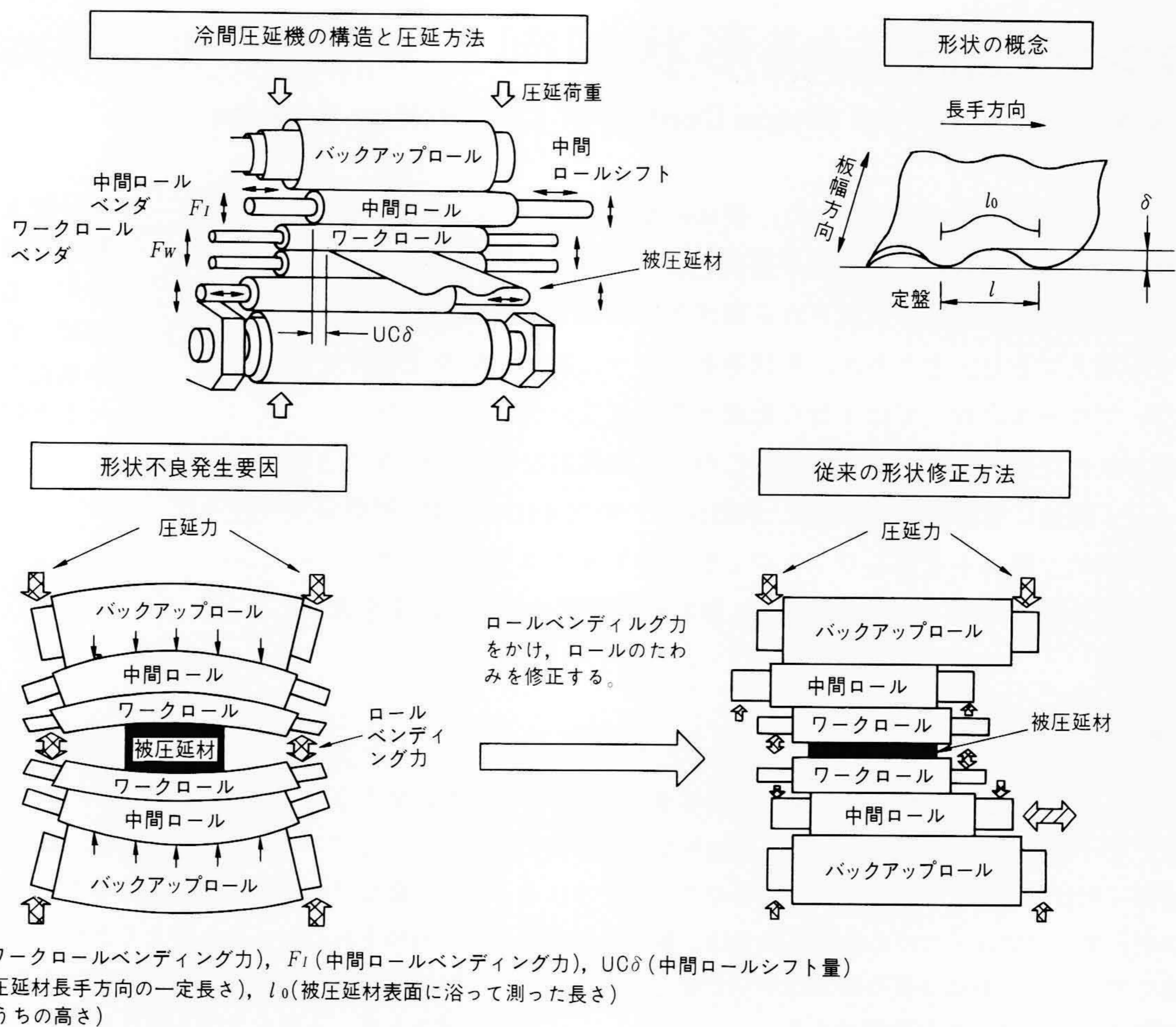


図1 形状の概念および形状制御方法 形状は被圧延材の波うちの度合いである。形状はロール表面の凹凸が被圧延材に転写することによって発生するので、ロール表面の凹凸をなくすことで形状制御は行われる。

けられた圧延力につぶされて伸びるが、ワークロールの表面に凹凸があると被圧延材にかかる圧延力が異なるため、板幅方向で一様な伸びにならない。そのため、板幅方向で被圧延材の伸びの大きさに不均一な分布が発生して波うちが発生するが、これを被圧延材の形状と言う。被圧延材の長手方向一定区間 l の板幅方向のある位置での板表面に沿った長さを l_0 とすると、形状は伸び差率 ϵ として(1)式のように表される。

$$\epsilon = (l_0 - l) / l \dots \dots \dots (1)$$

冷間圧延機では、圧延機の入側および出側で被圧延材に高い張力がかかるため、伸びの分布が潜在化するので一般に被圧延材の形状は、張力分布として検出される。形状を測定するための検出器を形状検出器と呼ぶが、形状検出器によって測定された張力分布と目標とする張力分布との偏差は、一般に伸び差率偏差と呼ばれる値に変換され、形状偏差として用いられる。伸び差率偏差の単位としては、I-unit ($= 10^{-5}$) が使われている。

図1に示すように、圧延に必要な圧延力はバックアップロールの両端にかけられるので、被圧延材がかみ込むことによってロールがたわみ変形する。そのため、被圧延材にかかる圧延力の板幅方向に対する分布が不均一となり、形状不良が

発生する。これを修正するためワークロールベンダ、中間ロールベンダ、中間ロールシフトを用いることが考えられ、UC-MILL (Universal Crown Control-Mill), HC-MILL (High Crown Control-Mill) などの圧延機が開発され、数式モデル、山登り探索法などを用いた形状制御が行われている。

3.2 クーラントによる形状制御

形状不良の原因としては、ロールのたわみによるもののほか、各ロールの表面状態および被圧延材の板幅方向の不均一性によるものがあり、これによって発生する局所的な形状不良は、前記の方法を用いては除去できない。そこで、板幅方向に複数の噴射ノズルを設けたクーラント装置が利用されている。クーラントを用いた形状制御の原理を図2に示す。圧延機のワークロールは、圧延時に発生する摩擦熱および塑性加工熱によって加熱され、サーマルクラウンと呼ばれる熱膨脹が発生する。この熱膨脹をクーラントを用いて冷却して抑制し、ワークロールの表面の凹凸を変化させる。被圧延材の形状は、ワークロールの表面の凹凸が転写されることによって発生するから、これによって被圧延材の形状を制御することができる。形状偏差として伸び差率偏差を用いた場合、伸び差率偏差が正とは、被圧延材が伸ばされすぎたためであり、

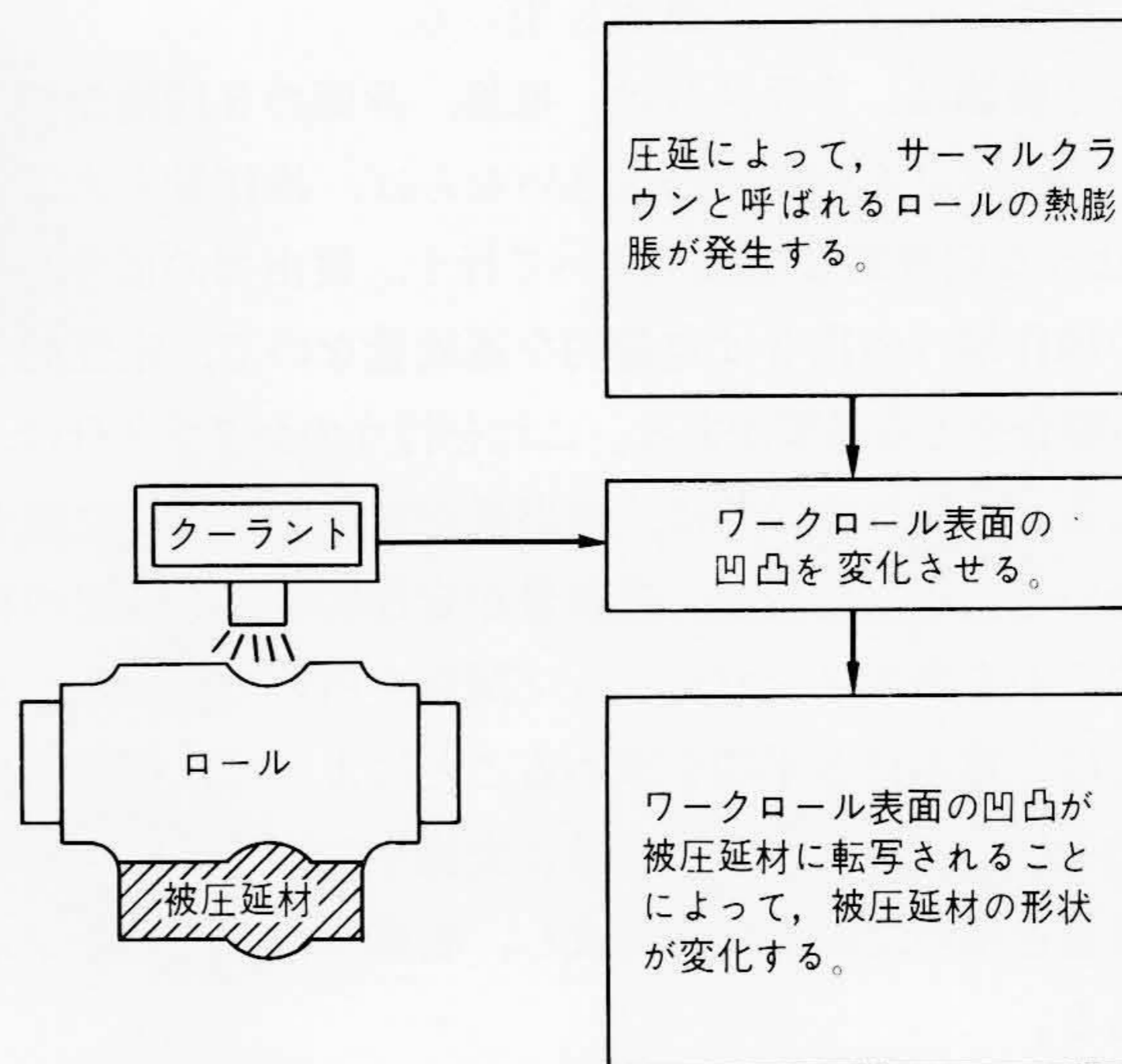
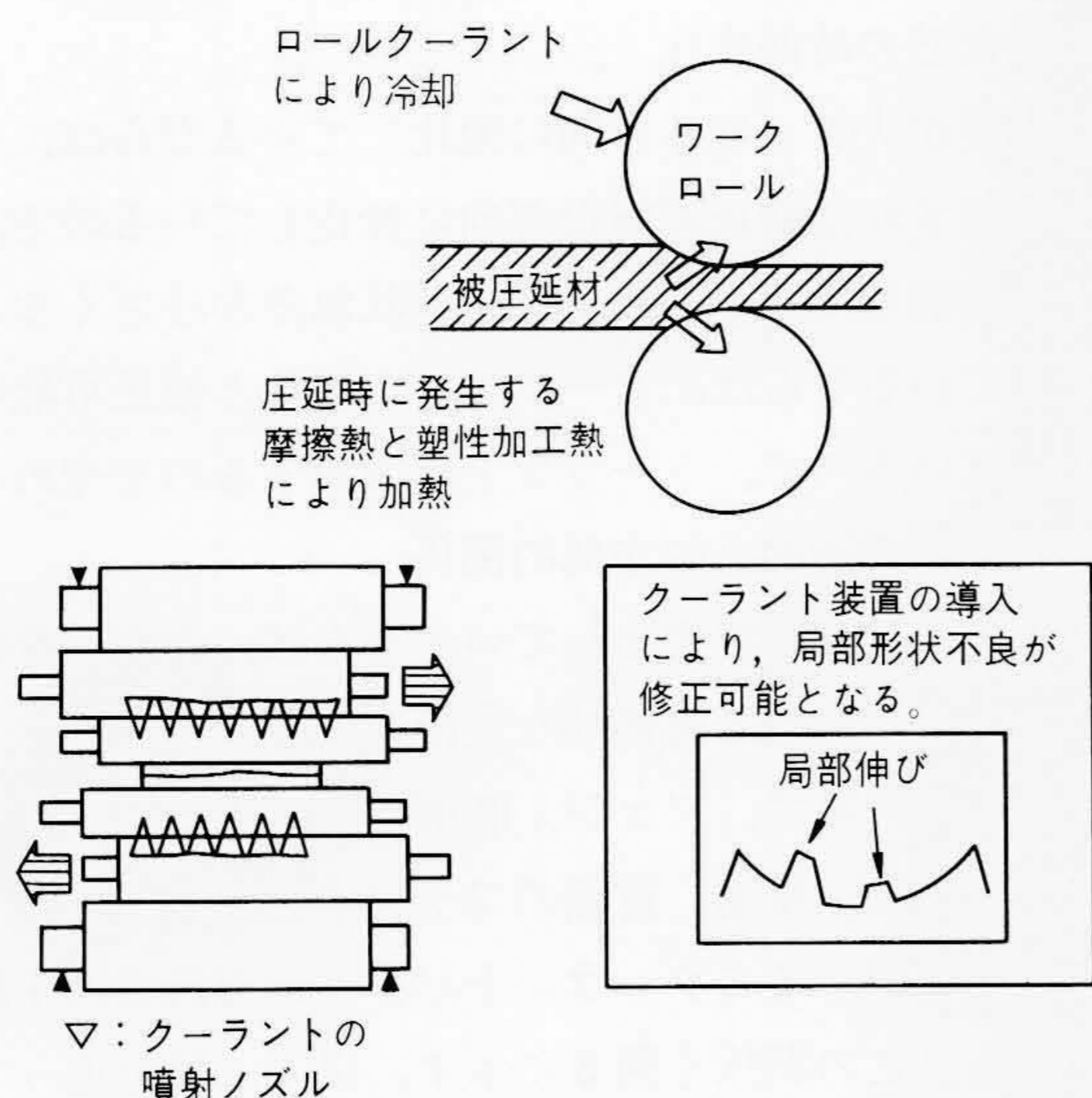


図2 クーラントを用いた形状制御 クーラントによって、ロールの熱膨脹を制御することで被圧延材の形状を制御できる。

ワークロールの表面が凸になっていると考えることができる。したがって、クーラントを噴射してワークロールを冷却し表面を平坦な状態にすればよい(以下、本論文では形状偏差として伸び差率偏差を考える)。クーラントの噴射ノズルは、目標とする局所的な形状不良の除去に十分な個数が設置される(通常20~40個)。

3.3 クーラントによる形状制御の問題点

クーラントを用いた場合、ワークロールの表面の凹凸は、圧延による加熱とクーラントによる冷却の熱収支によって決定される。これを数式で表すには、加熱と冷却による熱収支を考慮した偏微分方程式(熱伝導方程式)を解き、時間的、空間的变化を追跡する必要がある。熱伝導方程式を簡易化した制御用モデルもいくつか提案されているが、実験によって決定すべき未知のパラメータが多く、正確なモデルを作成するのは困難である。そこで従来は、単純に形状偏差を用いてクーラントの出力を決めるデッドバンド制御が行われてきた。しかし、この方式では形状偏差の時間的、空間的变化が考慮されておらず、制御精度の向上にはおのずから限界がある。そこで、クーラントによる形状制御の精度を向上させ、局所的な形状不良を除去するための新制御方式の開発を行うことにした。

新制御方式を決定するに当たって従来制御方式であるデッドバンド制御のほかに、多変数最適制御、ファジィ制御を比較した。その結果を表1に示す。多変数最適制御は、制御精度は大であるが正確なモデルを必要とし、クーラントによる形状制御には適さない。熟練者は熱伝導方程式をいちいち解かなくても、「形状偏差が局所的に大きければ、その部分にクーラントをかけてロールを冷却し、形状偏差を小さくする。」ような経験的な知識を用いて、クーラントと被圧延材の形状との関係について定性的に判断している。この場合、形状偏

表1 クーラントによる形状制御での制御方法の比較 モデルが不完全であるクーラントによる形状制御の場合、ファジィ制御を適用するほうがよい。

項目	従来制御	多変数最適制御	ファジィ制御
制御モデル	不要(制御偏差だけに着目したデッドバンド制御のため)	正確なモデルが必要である。	定性的なモデルが構成できればよい。
制御精度	△	○~◎ ただし、モデルが正確であることが前提	○(時間的、空間的变化も考慮しているため)
処理時間	○(制御偏差だけを用いているため)	×(板幅方向について考える必要があるため、状態方程式の次数が膨大になる。)	○(制御偏差だけでなく、時間的、空間的变化も用いているため)

差ばかりでなくその時間的变化、空間的關係も考慮している。そこで、定性的な表現を用いて制御でき、制御精度も向上できるファジィ制御の適用を考えた。ファジィ制御は、状態方程式の次数が膨大となる多変数最適制御に比べ、処理時間も短くて済み、実時間(0.1~0.5秒周期)で制御することが可能である。

4 ファジィ制御を適用したクーラントによる形状制御

4.1 ファジィ制御

ファジィ制御とは、対象となるプラントに対して、人間の持つ定性的な知識を用いて制御を実行するものである。その

ための手段としてファジィ推論を用いる。

ファジィ推論は、クラス分け、推論、評価の3段階から構成され、推論は「もし偏差が大きければ、操作量を大きくする。」ような定性的な知識を用いて行う。検出器の信号および制御の操作端への指令は定量的な連続量なので、定性的な知識との整合をとる必要がある。これを行うのがクラス分け、評価である。クラス分けでは、検出量が定性的な知識に適合する度合いを表す確信度を、連続量が定性的な概念にどの程度適合するかを表すメンバーシップ関数を用いて求める。また評価では、重み付き平均を求めることによって、推論結果の定性的な知識を定量的な連続量に変換する。この結果得られた連続量を用いて制御系を構成し、制御するのがファジィ制御である。

4.2 ファジィ制御を適用したクーラント形状制御の方法

熟練者はクーラントによる形状制御を行うとき、形状偏差の大きさだけでなく、形状偏差の時間変化率、形状偏差の近傍との空間的關係をみて、総合的に判断している。そのため知識を整理すると次の3点になる。

(1) 形状偏差の大きさ

形状偏差が正ならば、クーラントを噴射してロールを冷却し膨脹を抑え、形状偏差を減少させる。また、負ならばクーラントを噴射するのをやめ、ロールが圧延によって加熱され膨脹し、形状偏差を減少させるのを待つ。

(2) 形状偏差の時間変化

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れば修正可能な方向に変化しているので、クーラントを噴射して変化を抑える。形状偏差が小さくなる方向に変化しているならば、クーラントを絞ると修正可能な方向に変化しているので、クーラントを噴射するのをやめる。

(3) 形状偏差の近傍との空間的關係

形状偏差が局部的に突出しているならば、その部分には、クーラントを噴射して局部的な突出を抑える。

以上をもとにして、ファジィ制御を構成する。ファジィ制御はクラス分け、推論、評価のファジィ推論およびファジィ推論の結果を用いてのクーラントパターンの決定の4段階で構成される。この關係を図3に示す。以下、順を追って説明する。

クラス分けでは、上記(1)~(3)の知識を用いて推論するため、制御情報を定性的な知識に変換する。制御情報としては、上記の知識(1)~(3)に対応して $A_i \sim C_i$ とし、形状検出器から形状偏差信号(伸び差率偏差) $\Delta \epsilon$ を用いて次の $A_i \sim C_i$ を演算し、用いる。

$$A_i = \Delta \epsilon_i(k) \dots\dots\dots(2)$$

$$B_i = (\Delta \epsilon_i(k) - \Delta \epsilon_i(k-1)) / T_s \dots\dots\dots(3)$$

$$C_i = \Delta \epsilon_{i+1}(k) + \Delta \epsilon_{i-1}(k) - 2 \cdot \Delta \epsilon_i(k) \dots\dots(4)$$

($B_i = \partial A_i / \partial t$, $C_i = \partial^2 A_i / \partial x^2$, t は時間, x は板幅方向の空

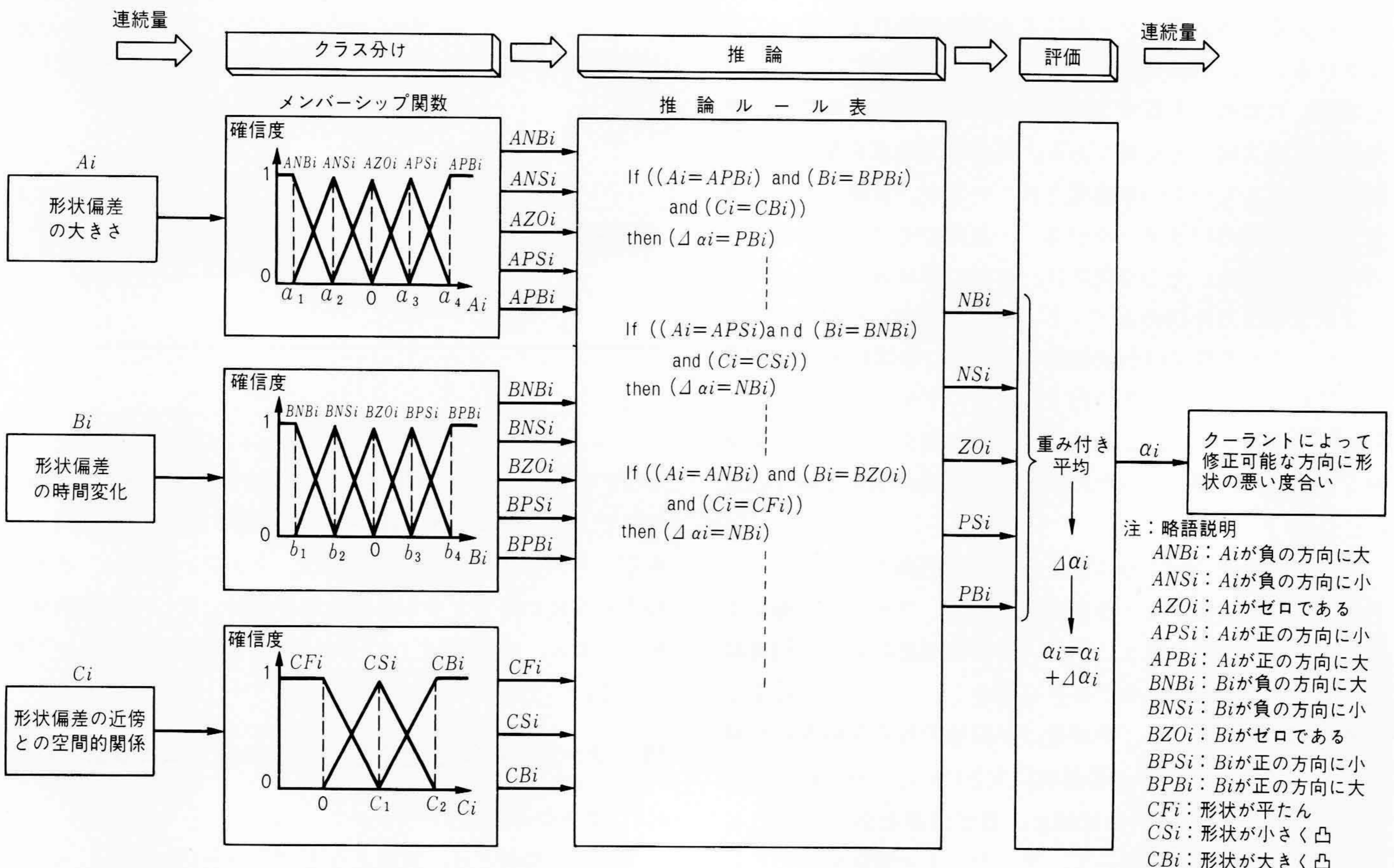


図3 クーラント形状制御でのファジィ推論 クーラント形状制御に用いたファジィ推論のメンバーシップ関数、推論ルールを示す。

間座標を表す。)ここで添字*i*は、クーラントの噴射ノズルに付けられた一連の番号であり、*k*は*k*回目のサンプリングタイム、*T_s*はサンプリング間隔を表す。*A_i*~*C_i*の値と、図3に示すメンバーシップ関数を用いて、知識(1)~(3)に対する確信度を求める。

推論では、「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の変化率」 $\Delta\alpha_i$ が正の方向に大である(*PBi*)、正の方向に小である(*PSi*)、ゼロである(*ZOi*)、負の方向に小である(*NSi*)、負の方向に大である(*NBi*)度合いを求める。推論ルールとしては、知識(1)~(3)をもとに、「もし、[(形状偏差が大)かつ(形状偏差が正の方向に大きく変化している)かつ(形状偏差が突出している)]ならば、($\Delta\alpha_i$ は正の方向に大である)」のように考え、「IF [(*A_i*=*APBi*) and (*B_i*=*BPBi*) and (*C_i*=*CBi*)] then ($\Delta\alpha_i$ =*PBi*)」のように表現する。

評価では、推論で求めた*PBi*, *PSi*, *ZOi*, *NSi*, *NBi*についての重み付け平均をとって、「クーラントにより修正可能な方向に形状の悪い度合いの変化率」 $\Delta\alpha_i$ を演算する。

得られた $\Delta\alpha_i$ から、

$$\alpha_i(k) = \alpha_i(k-1) + \Delta\alpha_i(k) \dots\dots\dots(5)$$

を用いて α_i を求め、「クーラントにより修正可能な方向に形状の悪い度合い」とする。

クーラントパターンの決定では、評価で求めた α_i を用いてクーラントバルブのON/OFFパターンを決める。

4.3 ファジィ推論のシミュレーション結果

実機適用前に、ファジィ推論の効果を確認するため、形状のテストパターンを入力し、シミュレーションを行った。そ

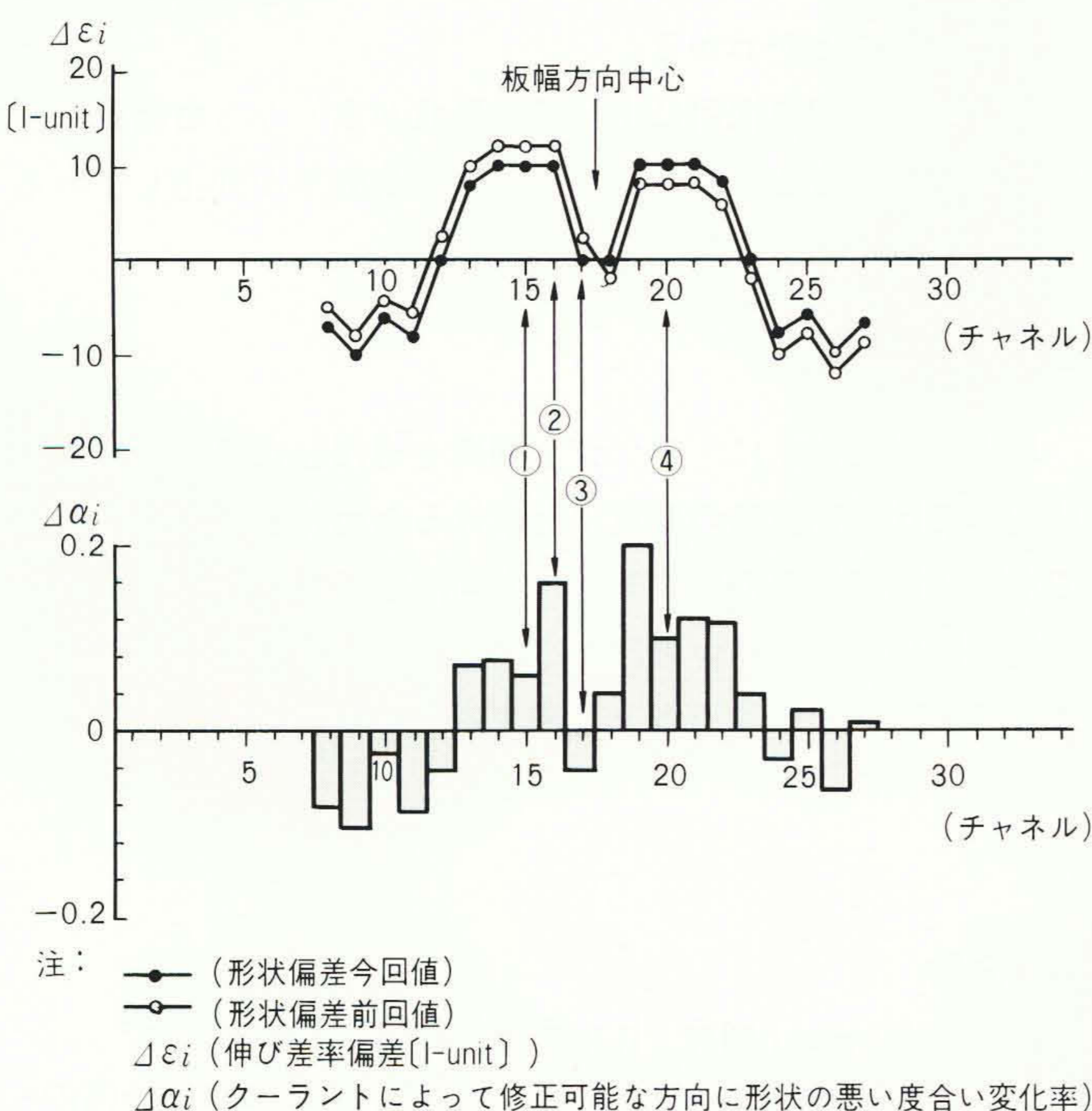


図4 ファジィ推論のシミュレーション結果 ファジィ推論により形状の悪い度合い $\Delta\alpha_i$ を求める。 $\Delta\alpha_i$ は形状の悪さをよく表現していることがわかる。

の結果を図4に示す。同図の横軸は、被圧延材の板幅方向の位置である。

知識(1)は、形状偏差の大きさをみているが、②の位置のほうが形状偏差 $\Delta\epsilon_i$ が③よりも大きく、 $\Delta\alpha_i$ も大きくなっている。

知識(2)は、形状偏差の時間変化の方向をみているが、①の位置では、形状偏差が小さくなる方向に変化しているのに対し、④の位置では大きくなる方向に変化している。そのため、形状偏差の大きさおよび形状偏差の近傍との空間的關係は同じであるにもかかわらず、 $\Delta\alpha_i$ は④のほうが大きくなっている。

知識(3)は、形状偏差の近傍との空間的關係をみているが、②の位置は③の位置の形状偏差が小さいため、局部的に突出していると判断される。そのため、①の位置と形状偏差の大きさおよび形状偏差の時間変化は同じであるにもかかわらず、 $\Delta\alpha_i$ は大きくなっている。

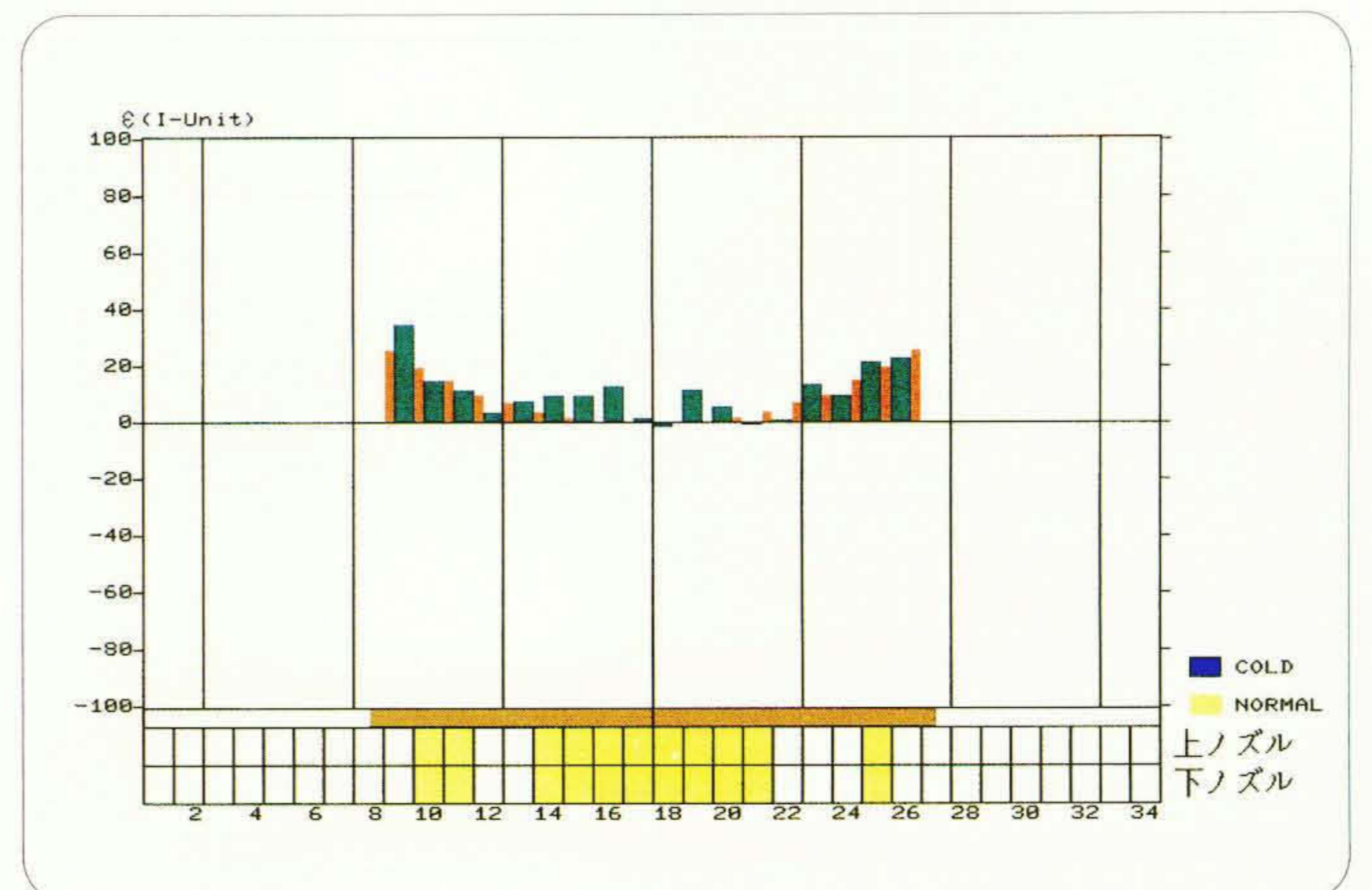


図5 2FCMでのクーラント形状制御結果(従来制御) 中央部の棒グラフが形状の指令(赤色)および実形状(緑色)を示す。下段は、クーラントの出力パターンを示す。9~26チャンネルまでが被圧延材がかんでいる有効チャンネルである(鋼種5182, 入側板厚0.52 mm, 出側板厚0.33 mm, 板幅952 mm)。

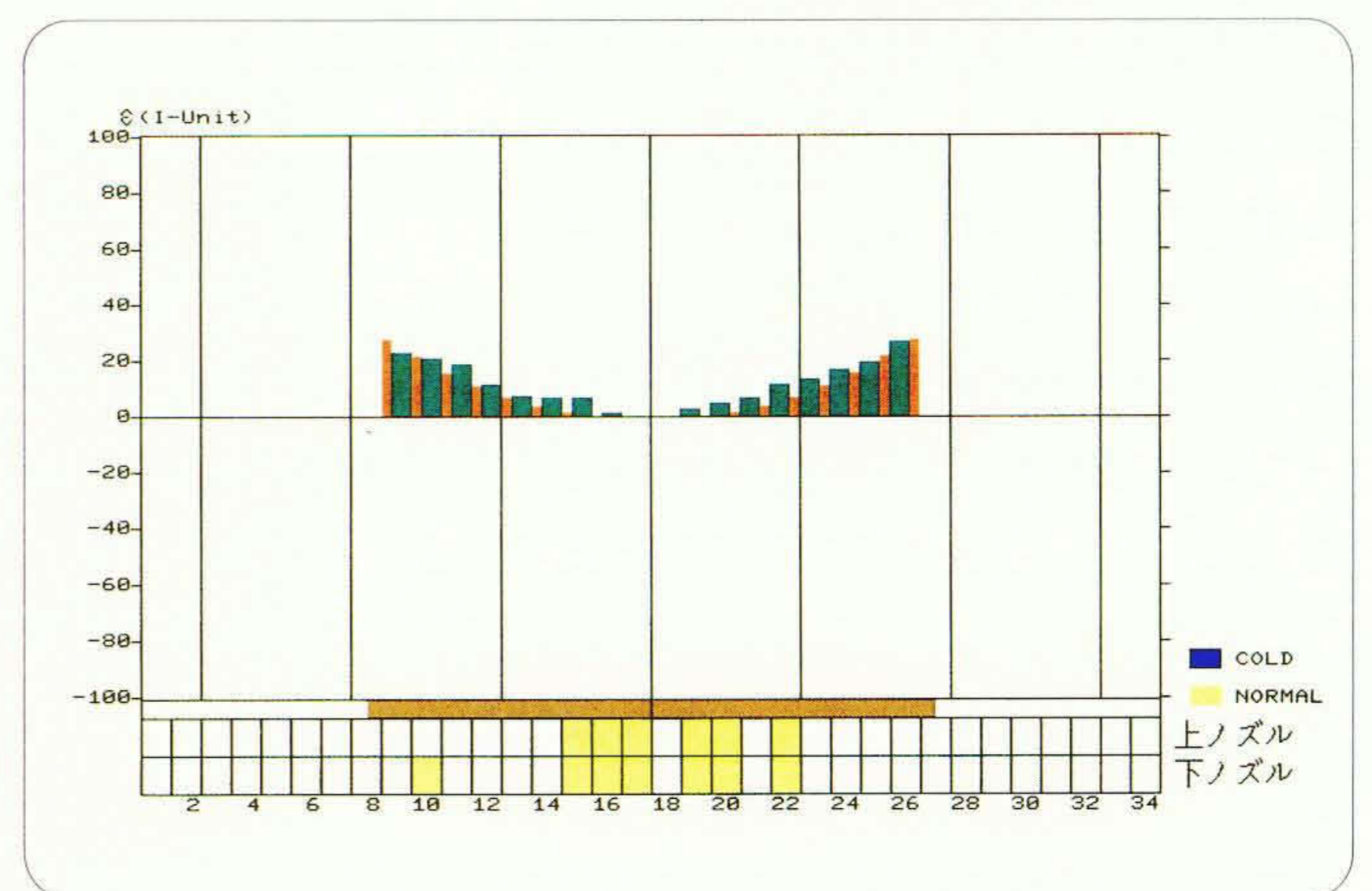
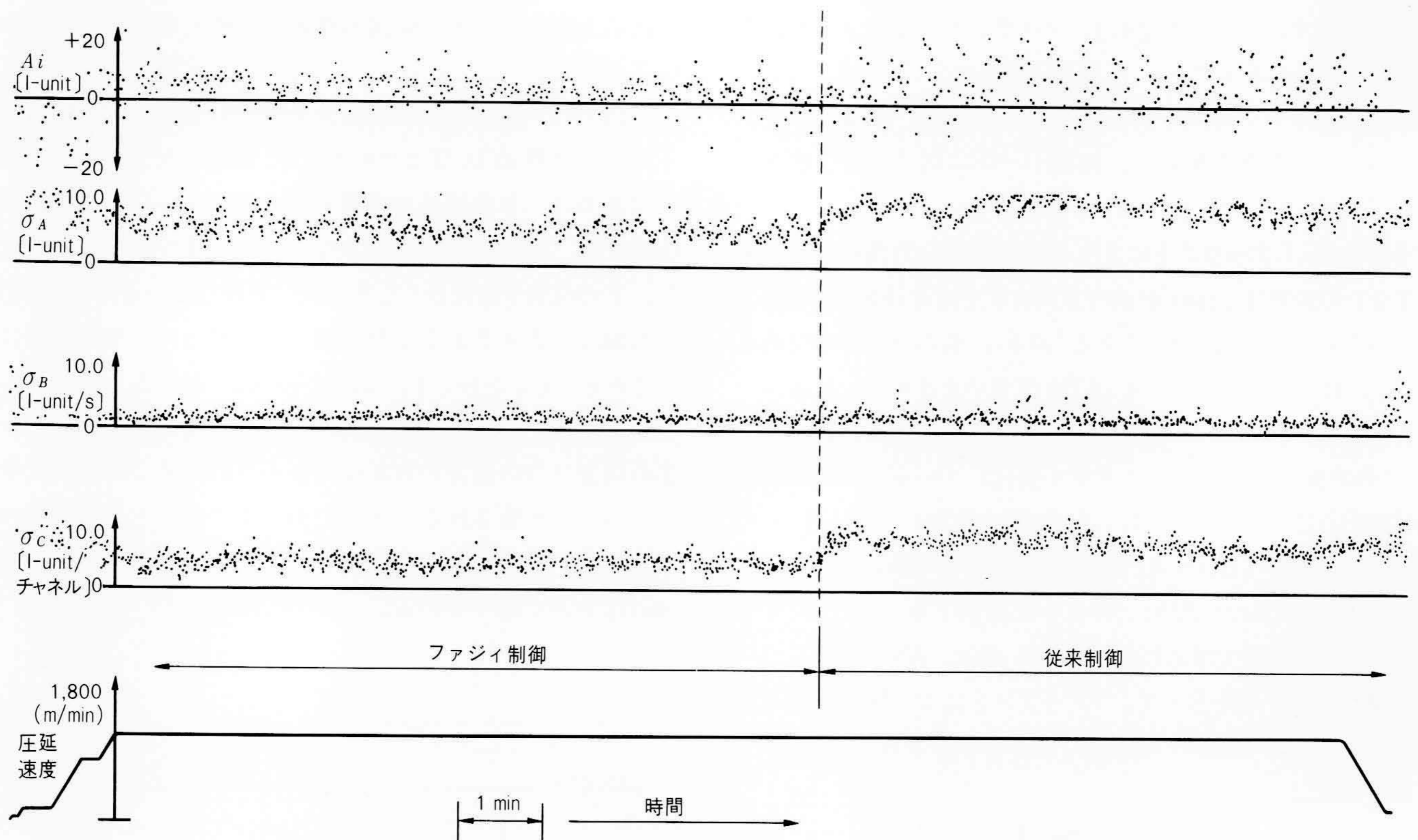


図6 2FCMでのクーラント形状制御結果(ファジィ制御) 従来制御では実形状に局部的な凹凸が存在していたが、ファジィ制御の場合、ほとんどなくなっているのがわかる(鋼種5182, 入側板厚0.52 mm, 出側板厚0.33 mm, 板幅952 mm)。



注：略語説明 A_i [形状偏差(ある時点の板幅方向の偏差を時系列的に出力)]
 $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$ (A_i, B_i, C_i の板幅方向についての標準偏差), 圧延速度(圧延中のロール周速度)

図7 ファジィ制御と従来制御の比較 2 FCMでの実圧延結果。圧延途中でファジィ制御から従来制御に切り換えた(鋼種5182, 入側板厚0.34 mm, 出側板厚0.25 mm, 板幅910 mm)。

このようにシミュレーション結果から、ファジィ推論は「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」を非常によくとらえていることがわかる。

4.4 実機適用結果

次に、実際に古河アルミニウム工業株式会社福井工場の2 FCMに適用した結果について説明する。2 FCMはシングルスタンドのアルミニウム冷間圧延機である。図5, 6は、2 FCMの形状制御CRT画面のハードコピーである。図5は、従来制御方式であるデッドバンド制御を用いたクーラント形状制御を行っている場合である。また図6は、今回開発したファジィ制御を適用したクーラント形状制御を行っている場合である。従来制御を用いた場合、局所的な凹凸が修正されずに残っていたものが、ファジィ制御を適用した場合ほとんど修正されており、目標形状に対する凹凸の少ない、きれいな形状になっている。これは、ファジィ制御では知識(3)によって形状の局所的な凹凸を評価し、適切な制御を行っているためである。

ファジィ制御の効果を定量化するため、形状の評価指数として $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$ (前述のA, B, Cについて板幅方向について標準偏差をとったもので、それぞれがどの程度ばらついているかを表す。)を設けた。実測結果を図7に示す。 σ_A, σ_C につ

いては、ファジィ制御が従来制御に比べて明らかに良くなっており、 σ_A については $\frac{2}{3}$ 程度、 σ_C については $\frac{1}{2}$ 程度まで改善されていることがわかる。

ファジィ制御の採用によって、形状が良くなった結果、圧延速度を上げることが可能となり、操業効率が向上していることも特筆に値する。

5 結 言

以上述べたように、ファジィ制御を適用したクーラント形状制御では、熟練者の感覚に近づけるため、制御偏差ばかりでなく、制御偏差の時間変化の方向、制御偏差の近傍との空間的な関係をも考慮が可能となった。そのため、従来方式に比べて局所的な形状不良を半減することができた。

参考文献

- 1) 菅野：ファジィ制御，日刊工業新聞社(1988-5)
- 2) 日本鉄鋼協会編：板圧延の理論と実際，日本鉄鋼協会(昭59-9)
- 3) 安信，外：Fuzzy制御の列車自動運転システムへの応用，電気学会誌，Vol.104, 867~874(昭59-10)