

UC-MILLによる形状制御技術

Universal Crown Control Mill (UC-Mill) for Higher Shape Control Technology

エレクトロニクスを主体とする先端産業指向の産業界の発展に伴い、薄板材圧延製品の分野では高品質化が強く要望され、平坦度、光沢、板厚精度及び強度の向上と薄厚化が指向されている。これに対応する圧延機として、日立製作所はHC-MILLを開発した。その後、更に形状制御機能を向上させたUC-MILLを開発し、鉄鋼、非鉄を問わず圧延業界の顧客から好評を得てきた。

引き続き広幅・硬質・薄物材の複合形状修正と光沢性向上のため、作業ロールの径小化に努め、センジマミル並みの作業ロールを備えたUC4-MILLを開発した。これにより、多岐にわたる顧客ニーズに対応可能とするUC-MILLのラインアップが完成された。

小林一雄*
小山憲一*
安田健一**
中島正明***

Kazuo Kobayashi
Ken'ichi Koyama
Ken'ichi Yasuda
Masaaki Nakajima

1 緒言

日立製作所は板材圧延分野で、板厚精度の向上のための油圧下装置“HYROP”の開発を行い、更に形状、板クラウンの向上と生産性、省エネルギーなどを目的としてHC-MILL (High Crown Control Mill)を開発し、冷間圧延、熱間圧延の分野で鉄鋼圧延だけでなく非鉄圧延の分野でも賞用され、実績を挙げてきた。

他方、近年の産業界はエレクトロニクス関連の発展が著しい。これに対応して板材の圧延分野でも、軽量化、高品質化、高生産性のため、より幅広く、より薄く、より硬く、表面光沢が良好で、かつ平坦度の良い材料が圧延できる圧延機に対するニーズが一段と強くなってきている。

UC-MILL (Universal Crown Control Mill)は、このようなニーズに対応するために開発されたもので、HC-MILLよりも作業ロール径の小径化を可能とするとともに、形状制御手段を強化して、はん(汎)用性のある形状制御を可能としたものである。すなわち、中間ロールベンダ、中間ロールシフト及び作業ロールベンダの3種の形状制御手段によって、小径の作業ロールを用いながらも高精度の形状制御を可能とするもので、その構造及び特徴は表1に示すとおりである。

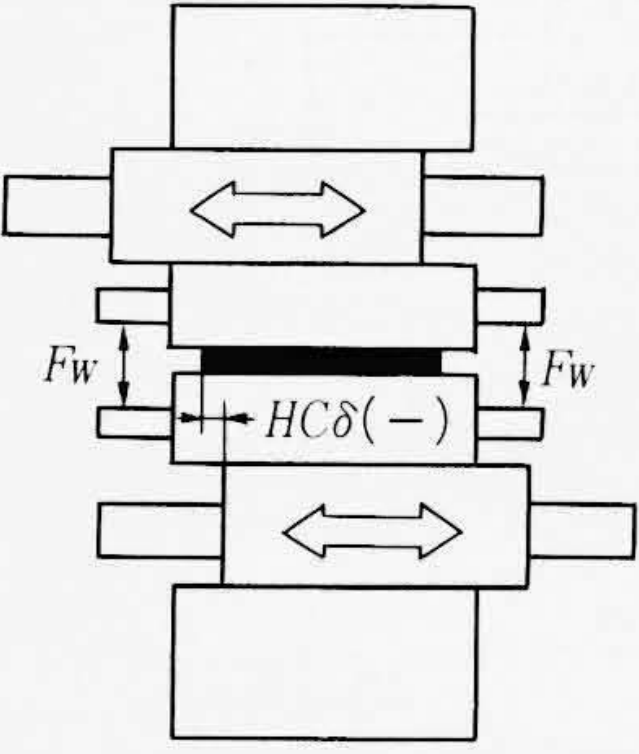
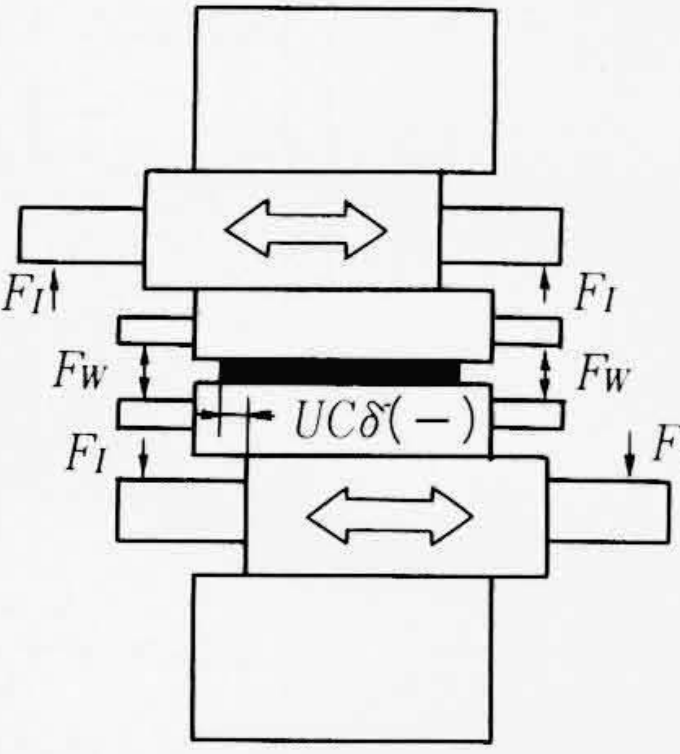
以下、UC-MILL発展の必要性、形状制御能力、実圧延例、実機への適応状況、今後の展開などについて述べる。

2 UC-MILLの発展

2.1 UC-MILL発展の必要性

UC-MILL発展の背景となった応用分野は、大略二つに区分される。一つは普通鋼を主体とする大量生産設備用のもので、他の一つはステンレス鋼、ICリードフレーム材などを主体とする硬質・高級材生産設備用のものである。前者に関しては既に多くの説明がなされている¹⁾ので後者について主に説明を

表1 UC-MILLの構造と特徴 UC-MILLは小径作業ロールを持ち、中間ロールベンダ、中間ロールシフト及び作業ロールベンダの3制御手段で形状制御を行う。

ミル名称	HC-MILL	UC-MILL
ミル形式	6 段 ミ ル	6 段 ミ ル
形状制御手段	(1) 中間ロールシフト $HC\delta$ (2) 作業ロールベンダ F_w	(1) 中間ロールベンダ F_l (2) 中間ロールシフト $UC\delta$ (3) 作業ロールベンダ F_w
構造		

注：略語説明 HC-MILL (High Crown Control Mill)
UC-MILL (Universal Crown Control Mill)
 $HC\delta$ (中間ロールシフト)
 $UC\delta$ (中間ロールシフト)
 F_w (作業ロールベンディング力)
 F_l (中間ロールベンディング力)

する。

ステンレス鋼などの圧延にはいわゆる多段圧延機が用いられており、大きな役割を果たしてきた。しかし近年、形状、表面品質共により高い品質への要望が強まり、多段圧延機ではこの両者を同時に満足することは困難になってきた。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所機械研究所 工学博士 *** 日立製作所大みか工場

すなわち、光沢の向上や硬質材圧延のために必要な最適な小径の作業ロールを備えていながら、形状制御能力の優れた圧延機に対するニーズが大きく、それに対する日立製作所の対応策をまとめると図1のように整理される。

2.2 UC-MILLの機能

HC-MILLが導入されて、その形状制御能力だけでなく高压下圧延による高生産性、小径作業ロールによる省エネルギー、エッジドロップの低減などが実機で実証されるにつれて、更に作業ロール径を小さくすることの効果が期待された。

そこで開発されたのがUC-MILLである(最近は構造、ロール径により数字を付けて区分しているが、UC-MILLの原理を用いるものを総称してUC-MILLとする)。これは作業ロールのいっそうの小径化を行うとともに、中間ロールベンダ機能の導入によって形状制御機能を増強させたものである。すなわち、径の大きい中間ロールベンダは全体的な中伸び又は耳伸びを修正する機能を持ち、径の小さい作業ロールベンダは板端部に効果を及ぼし、クォータバックル(W形板厚分布)や中伸び・耳伸び両立状態(M形板厚分布)の防止に機能する。なお、中間ロールシフトは、その制御量の拡大だけでなく板端近傍での板厚の急激な減少、すなわちエッジドロップの改善に効果を発揮する。これらの一例を解析プログラムによって求めたものを図2によって示す。これはICリードフレーム材の仕上圧延を想定して行われたもので、ハッチングによって示すHC-MILLの制御範囲に比べてはるかに制御範囲が広

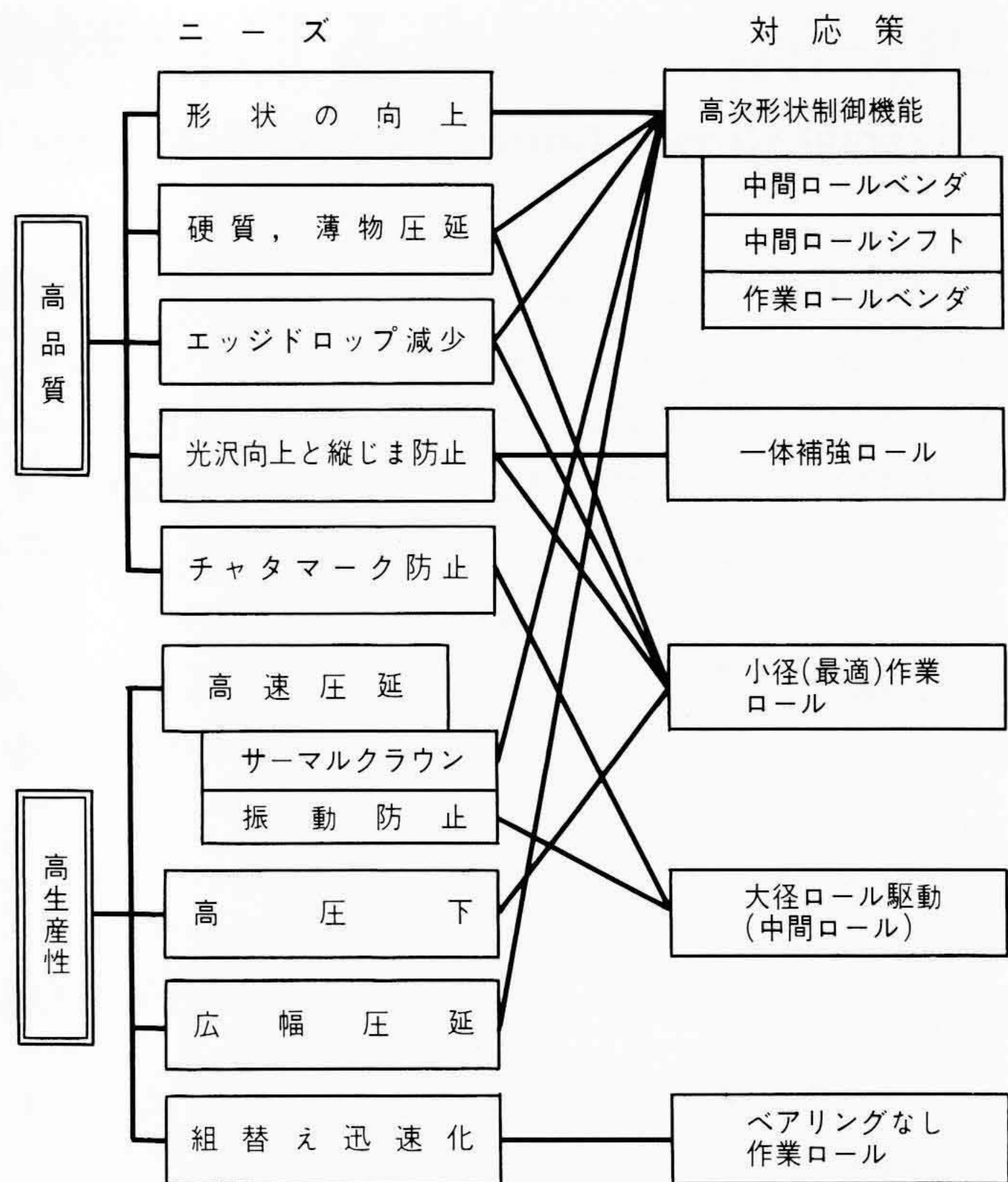


図1 硬質材用冷間圧延機のニーズ 形状、光沢などの品質を向上しながら高生産性を確保するためには、小径作業ロールのUC-MILLがニーズに正に適合している。

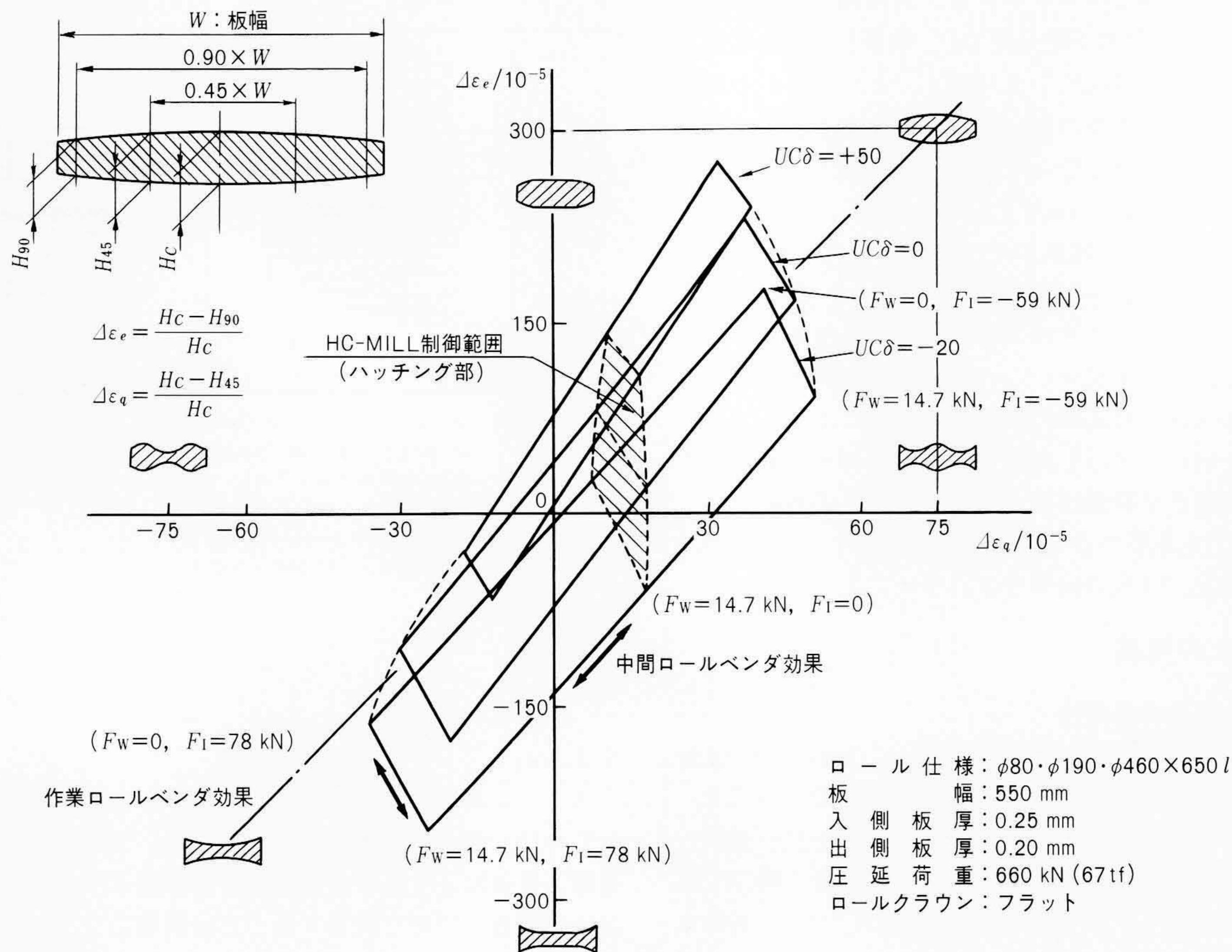


図2 UC-MILLの形状制御平面 UC-MILLの形状制御平面を板幅端 $\Delta\epsilon_e$ 、クォーター部 $\Delta\epsilon_q$ の形状制御平面で評価すると、HC-MILLに比べてはるかに広い面積を持つだけでなく原点をも通り、平たんな圧延が可能であることを示している。なお、45°のこう配は放物線状の変化を意味する。

がっていることと、中間ロールベンダによる凸から凹への二次曲線的な制御機能、作業ロールベンダによる板端部形状修正機能を示すとともに、縦軸と横軸の交点、すなわち $\Delta\epsilon_c=0$, $\Delta\epsilon_q=0$ のデッドフラット圧延が可能なことを示唆している。

また、社内の実験機による実圧延結果を図3、4に示す。図3から前述のUC-MILLによる形状制御能力範囲の広いことが分るとともに、図4によって正にデッドフラット圧延が実現できることを実証している。

3 UC-MILLの形状制御システム

3.1 システム構成

UC-MILLは前述のように3種類の形状修正機構(作業ロールベンダ、中間ロールベンダ及び中間ロールシフト)を持っており、形状制御の自由度が高い。一方、操作すべき機構が増えたことは、手動による操作が複雑になるという側面もあり、自動形状制御システムの重要性もまた大きい。このため新たに自動形状制御システムを開発し、社内実験機に設置した。図5に示すように、圧延機の出側に設置された形状検出器によって、圧延材の幅方向張力分布が測定される。形状認識装置は得られた張力分布のパターンを、時間軸に沿って3次元的に表示するもので、形状の時間的変化を容易に観察できる。次にメインの計算機では、この張力分布パターンを定められた定義に従って定量化し、数式モデルを用いて各制御量を決定する。

決定された制御量は形状操作盤に出力され、作業ロールベンディング力 F_w 、中間ロールベンディング力 F_l 、中間ロール位置 δ の各制御が行われる。これはいわゆるフィードバックループであるが、本計算機は当然のことながら、圧延開始前のプリセット値を計算するためのセットアップ機能も持っている。

3.2 数式モデル

数式モデルは、圧延荷重、板幅、ベンディング力などの圧

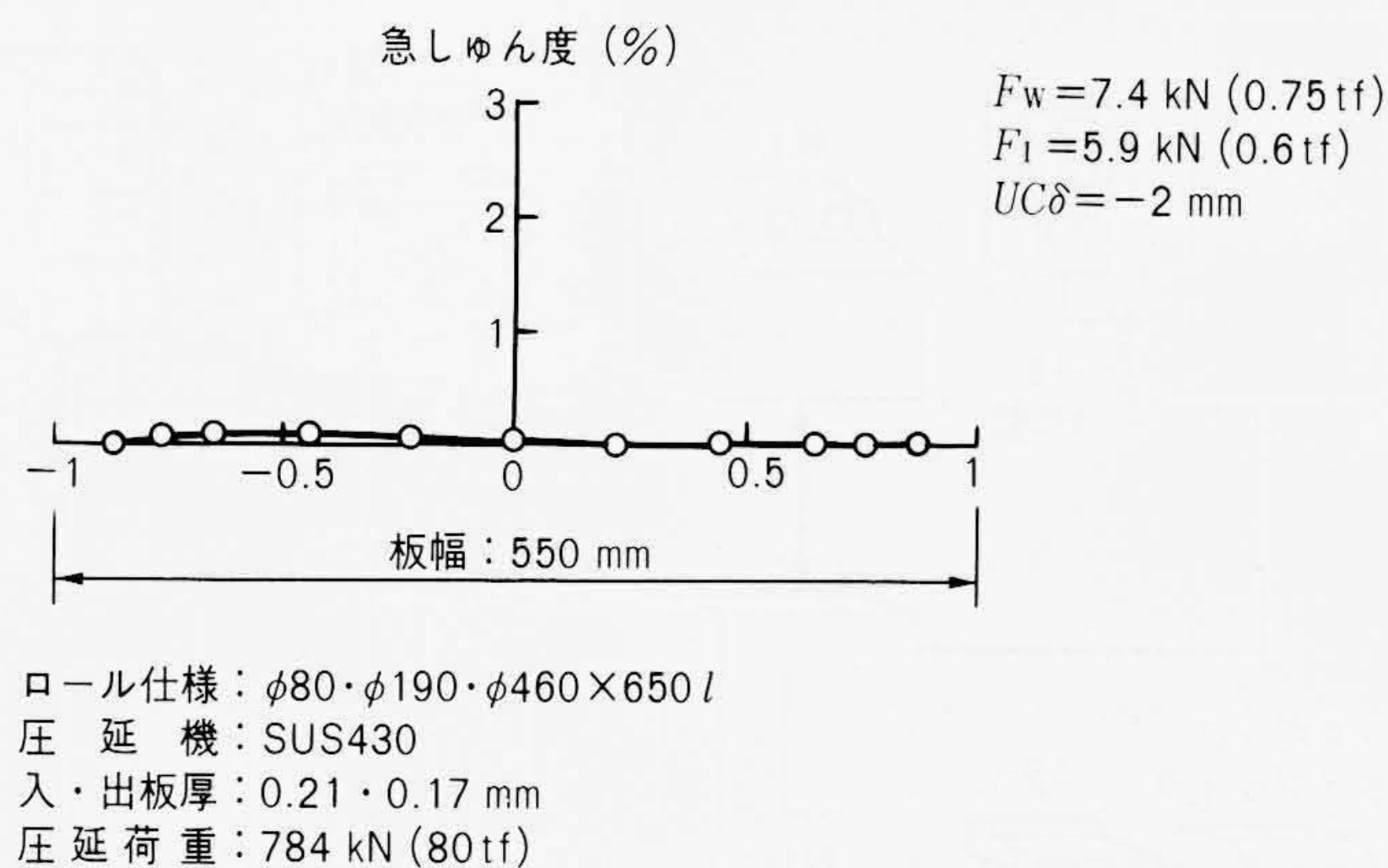
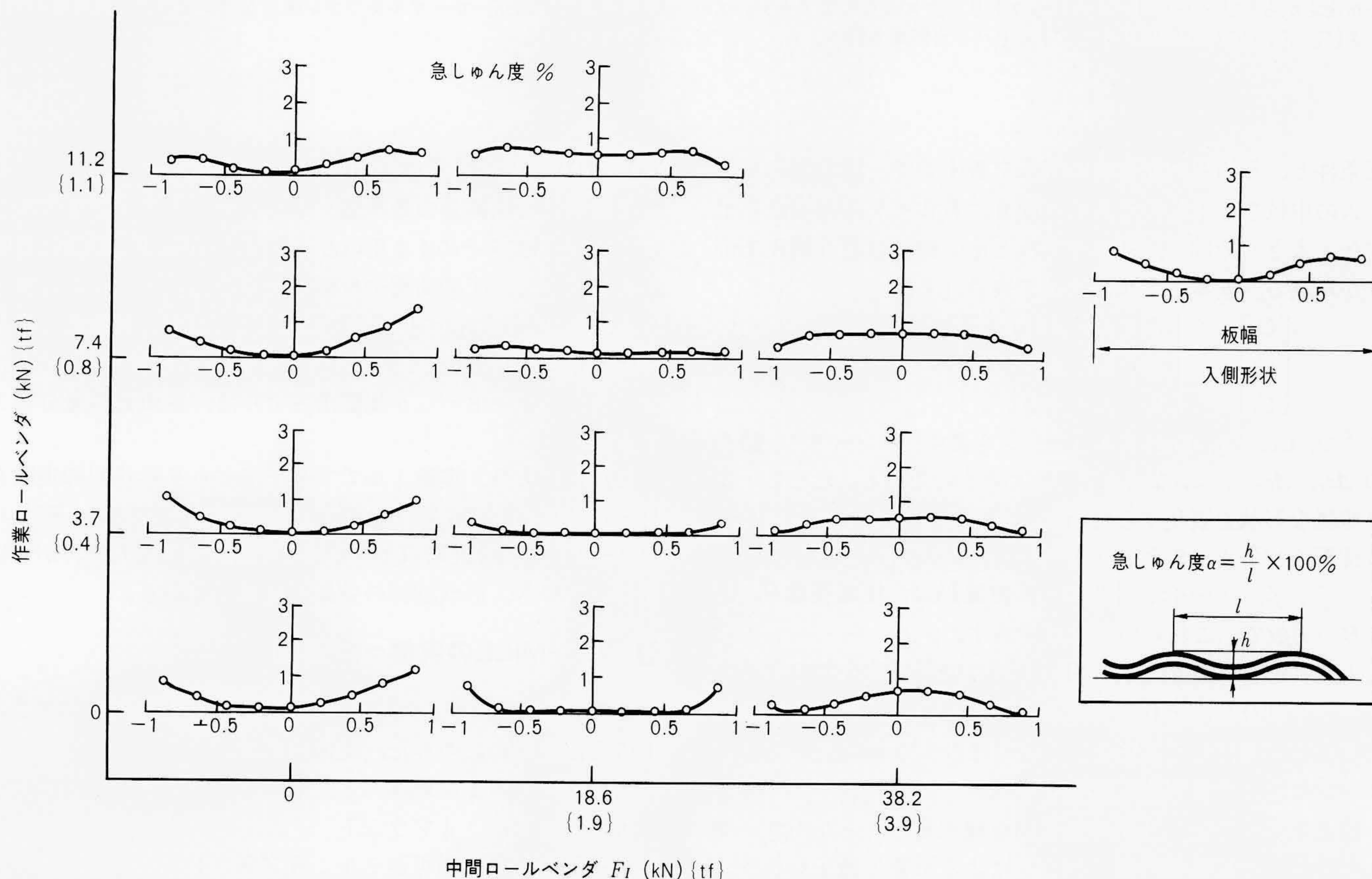
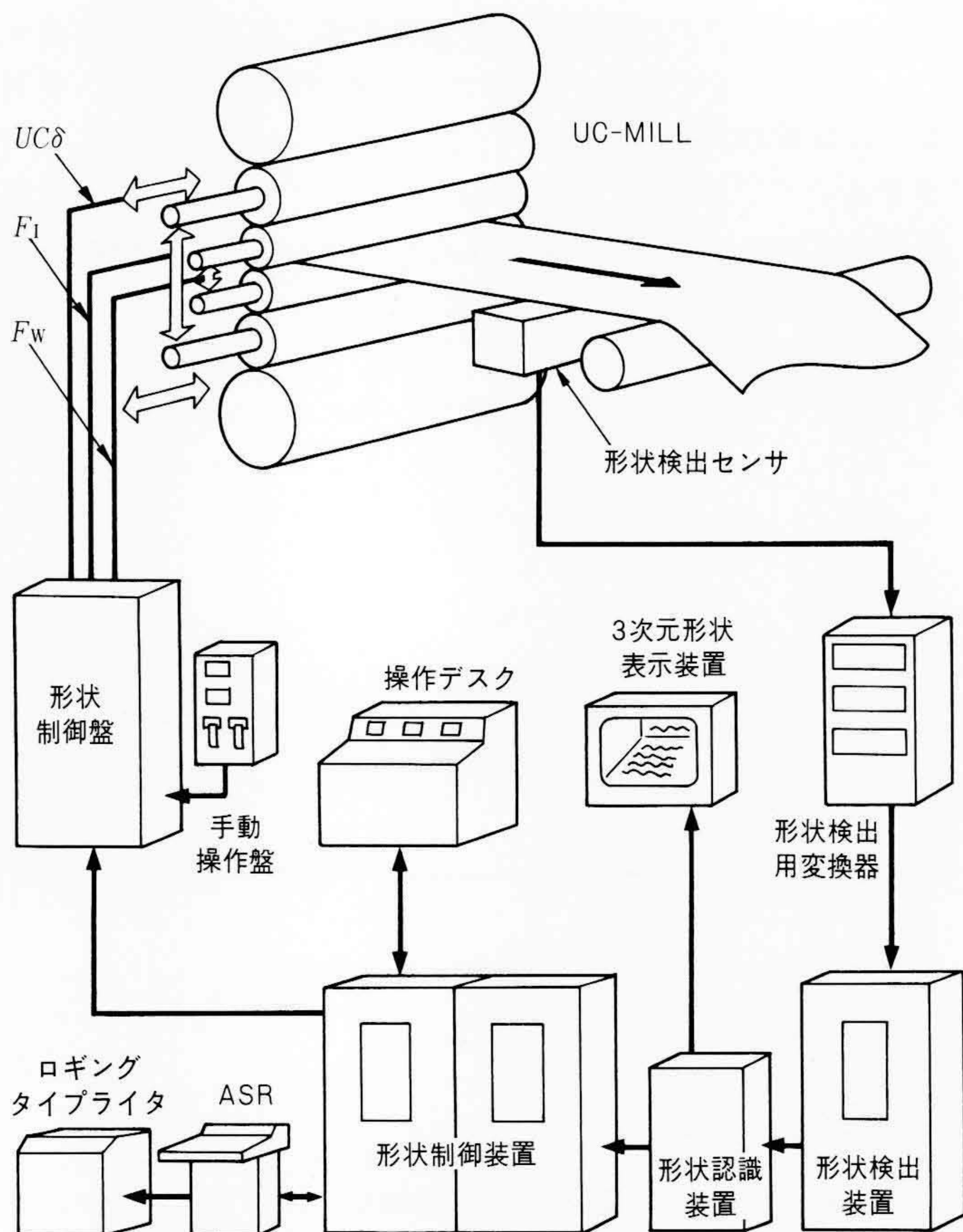


図4 デッドフラット圧延例 板幅端をトリミング除去すると、急しゅん度0.1%以下の極めて平たんな板が実験機によっても実現可能なことを示している。



注：ロール仕様 (φ86・φ190・φ460)、板幅 (550 mm)、板厚 [素材0.5 mm (軟鋼)] 入側0.20 mm 出側0.16 mm, UCδ(-10 mm)

図3 UC-MILLによる形状制御 UC-MILLによる実圧延の結果、平たん形状、単純な中伸び、端伸びだけでなく、W形及びM形の複合形状を発生させ得る。



注：略語説明 ASR(Automatic Send and Receiver)

図5 形状制御システム構成 形状制御システムは板幅方向の張力分布測定から形状分布を得、それらをマトリックス演算してアクチュエータ(F_w , F_l , $UC\delta$)を作動させてフィードバック制御を行う。

延条件と、その際の板形状の関係を表す式で、形状制御システムの中核をなすものである。図6に数式モデルの構成を示すが、大きく分けて、基本モデルとその補正を行う補正モデルから成る。基本モデルは次式で表される。

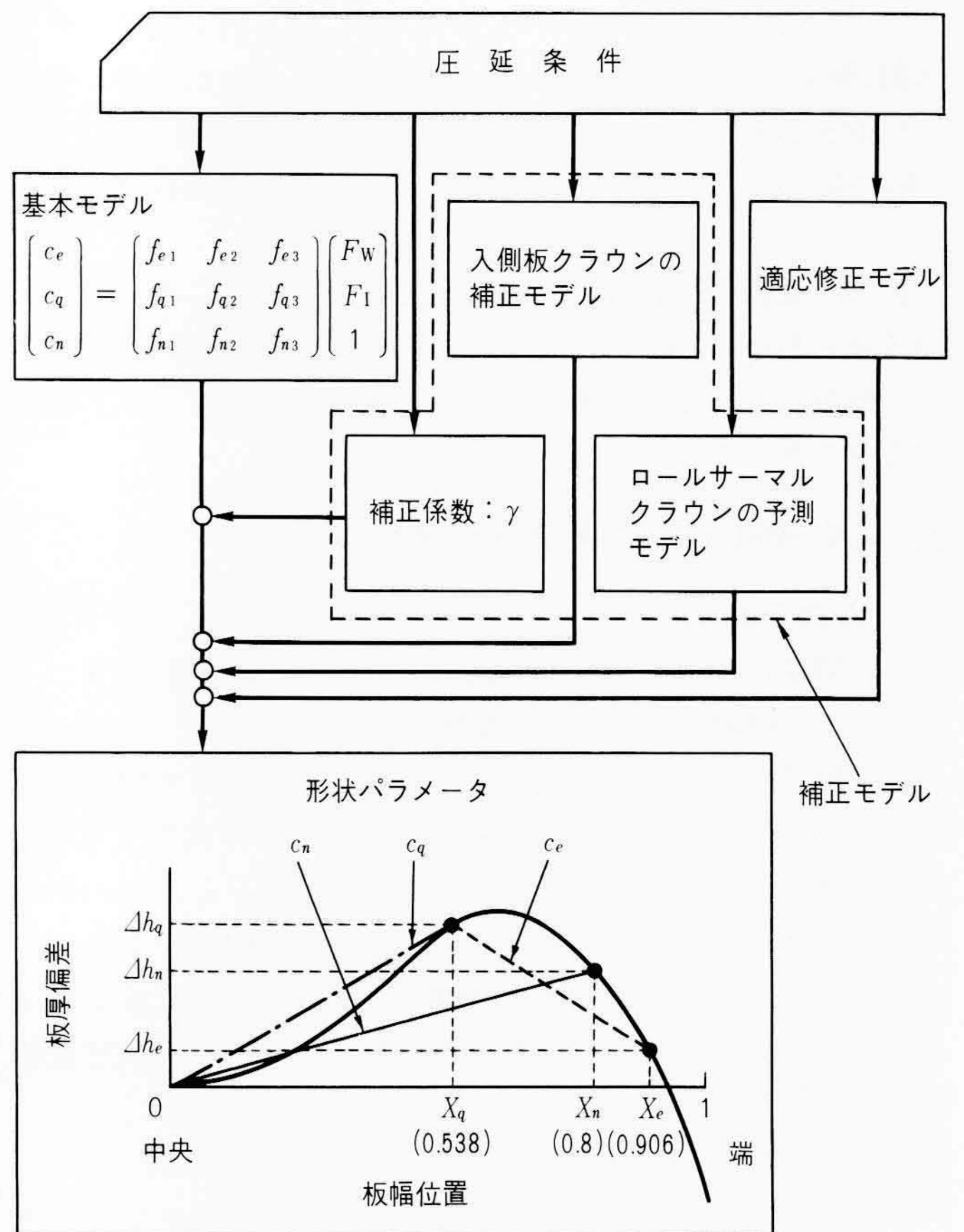
$$\begin{bmatrix} C_e \\ C_q \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{e1} & f_{e2} & f_{e3} \\ f_{q1} & f_{q2} & f_{q3} \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_w \\ F_l \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 C_e , C_q , C_n は形状パターンを表すパラメータで、図2の $\Delta\epsilon_e$, $\Delta\epsilon_q$ と同様な考え方で定めたものである。ただし、より複雑な形状を表現するために、代表点をもう1点追加し、3種類のパラメータで一つのパターンを表現するようにした。次に f_{e1} , f_{e2} ……は、中間ロール位置 $UC\delta$, 圧延荷重 P , 板幅 B の関数で、これらの二次式で表す。

上式は解析プログラムを用いて種々の圧延条件での形状パターンを計算し、それから定まる形状パラメータと圧延条件の関係を回帰化して求める。これにより、各制御量の形状パターンに及ぼす定性的な特性を得る。

補正モデルでは、上式の定量的な補正及びロールのサーマルクラウンや圧延前の板クラウンによる影響の補正を行う。これらの補正によって、実用上十分なモデル精度を達成する。

更に、適応修正モデルは実績データによる学習機能を持ち、モデルのいっそうの高精度化に貢献する。



注：γ(定量的補正のための係数)

図6 数式モデルの構成 数式モデルは基本式とそれを補助する入側板クラウン補正、サーマルクラウン補正などから成り、実用性の向上を図っている。

3.3 形状制御システムの効果

圧延前に各制御量の最適値を求めるセットアップモデルとしては、左の式をそのまま用いる。左の式の F_w , F_l , $UC\delta$ に目標形状を代入し、圧延荷重や板幅は圧延スケジュールから別途与え、 F_w , F_l , $UC\delta$ について解けばよい。ただし、代数的に解くのは困難なため、山登り探索法などの数値的解法が採られる。

一方、フィードバック制御用モデルは、左の式の微分形とする。

これらにより、実験ミルでフィードバック形状制御実験を行った結果の一例を図7に示す。制御開始と同時に、形状パラメータ(ここでは C_e , C_q の2種だけ制御対象とした。)が0に近づいてゆき、形状制御の効果を発揮している。

4 UC-MILLの実機への適用

このようなメリットが評価され、UC-MILLは既に26プラントの受注を得るに至った。その内訳は、

大形タンデムミル最終スタンド：9プラント

大形可逆ミル：4プラント

電子部品材用小形可逆ミル：6プラント

銅、銅合金用小形可逆ミル：4プラント

ステンレス鋼用小形可逆ミル：3プラント

(注：ここでは最大板幅が1,200 mm以上のものを大形ミル

とし、1,200 mm未満のものを小形ミルとした。)

既に19基は稼動中であり、その高度な形状制御能力を発揮している。

形状制御システムに関しては、HC-MILL, UC-MILL合わせてこれまでに10プラントが稼動中で、このうち4プラントがUC-MILLを対象としたものである。更に、現在3プラントのシステムを鋭意製作中である。

実機冷間タンデムミルでの形状制御システムの採用効果を図8に示す。これはやや中伸びの圧延を目指したものであるが、システムの採用によって急しゅん度の測定点が0点側へ移動していることがよく分かる。

5 UC-MILLの展開

5.1 作業ロール径の小径化への展開

日立冷間圧延機の開発は、ある意味では小径化への展開である。時系列的な作業ロール小径化への展開は図9に示すように従来の4H MILLの世界からHC-MILL, UC-MILLへと発展した²⁾。なお、UC2~4-MILLでは、小径の作業ロールを用いるので中間ロール駆動が採用され、駆動接線力による作業ロールのパス方向曲がり防止のためのサポート装置を設けることによって小径化を可能とした。

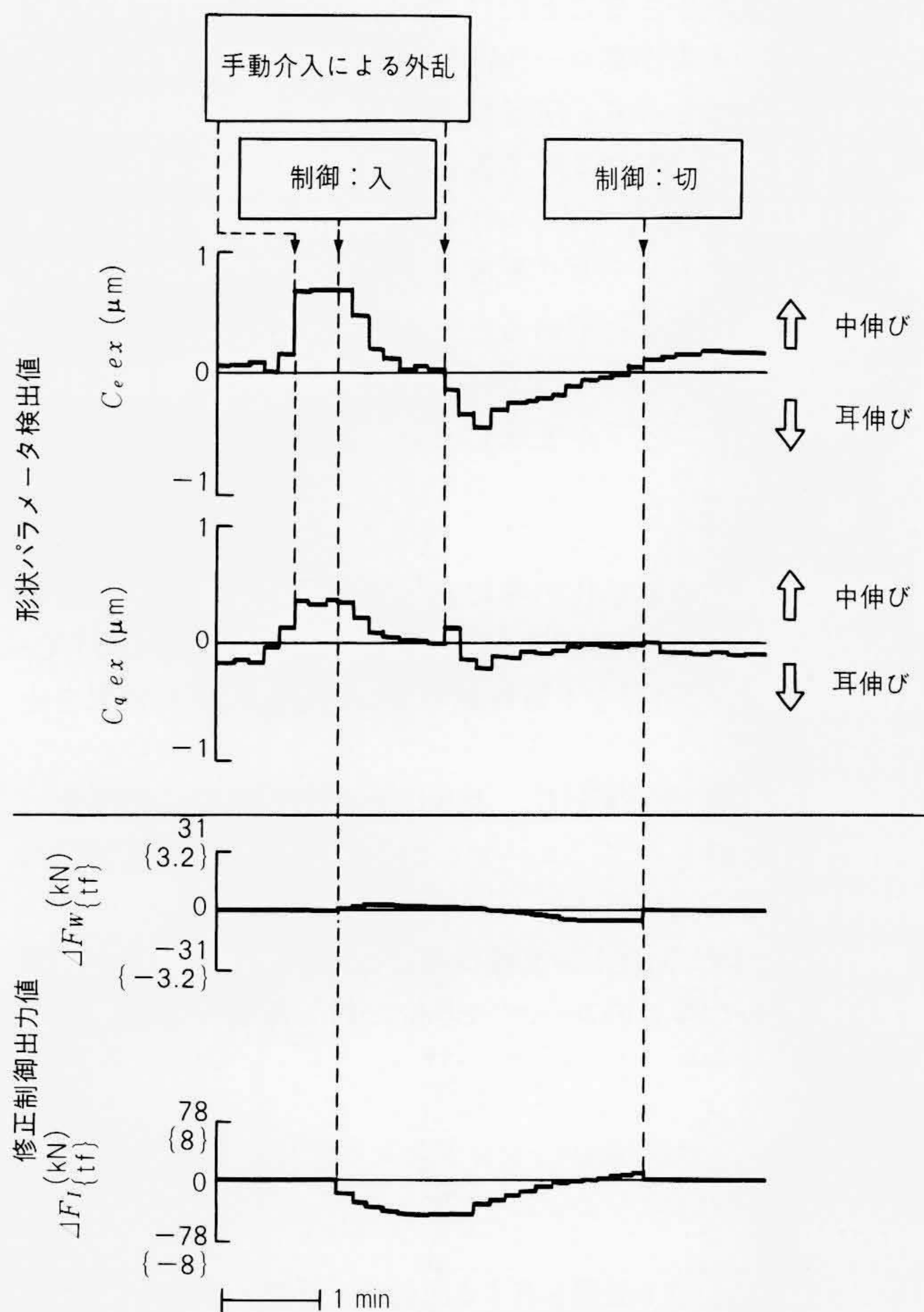


図7 フィードバック形状制御実験結果 圧延材: 550 mm幅, 0.8 mm厚軟鋼板, 圧延速度14 m/minの例で、形状制御ONで急速に形状が改善されていることが分かる。

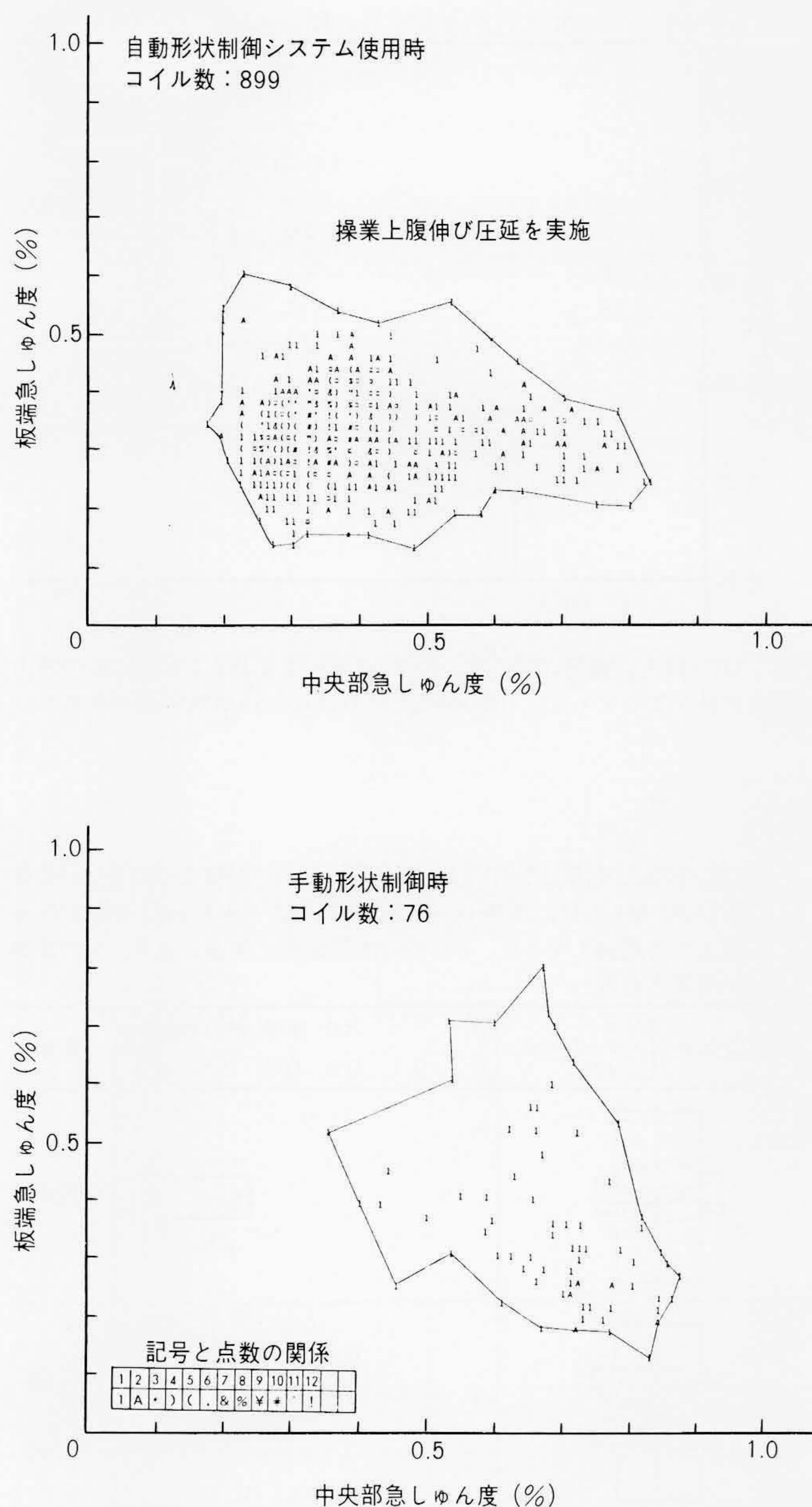


図8 冷間タンデムミルにおける形状制御効果 最終スタンドにUC-MILLを採用した設備での手動制御に対し、自動制御の効果を示している。

作業ロール径の小径化に際しては、日立製作所のセンジマミルでの経験を踏まえて実機化を展開してきた。すなわち、ロールバイト部でのオイルピットに起因する圧延材表面の光沢の低下を防ぐためには小径化が必ず(須)であるが、分割ローラによる荷重支持に起因する圧延材表面のパス方向縦じま模様の防止が重要である。このために次の配慮を行った。

第一は、サポートローラに加わる圧力の大きさである。UC-MILLでは圧延荷重のほとんどは一体の補強ロールへ伝達され、サポートローラへの分力はその10%程度にとどめることとした。

第二は、サポートローラ表面の斉列性で、最外端のサポートローラは分割ローラとするが、それらは十分な剛性を持つビームに装着され、ローラ表面の凹凸が防止され、荷重の均等化を図っている。このようにして、表2に示すようにサポ

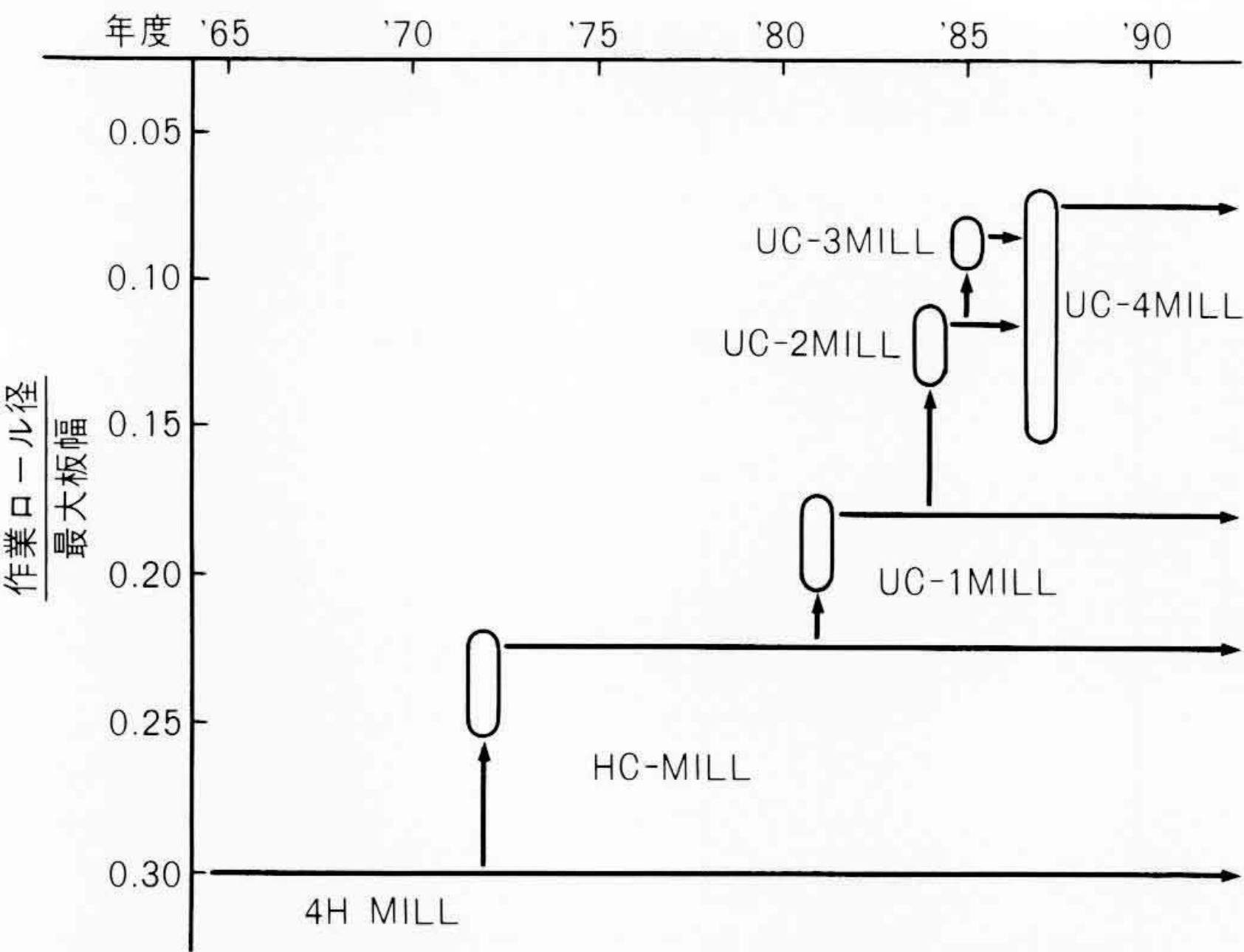


図9 UC-MILL開発の歴史 作業ロール径を小さくするための努力の経過が分るとともに、UC-4MILLでは汎(汎)用性が実現された。

表2 HC-MILLからUC-MILLへの展開 HC-MILLに新しい機能を付加したUC-MILLは、作業ロールの小径化とともにUC1-MILLからUC4-MILLへと展開してきた。そして対象圧延材と用途により、その最適な形式が選定される。

圧延機形式	D_w ($B=1,250$) D_w/B	0	250	375	500	625mm	mm	用途
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
4H MILL								普通鋼
HC- MILL								普通鋼 中硬 度材
UC1- MILL								普通鋼 中・高 硬度材
UC2- MILL								中・高 硬度材
UC3- MILL								中・高 硬度材 光沢 必要材
								高硬 度材 極薄材 光輝材

注：略語説明 D_w (作業ロール径), B (圧延材最大板幅)

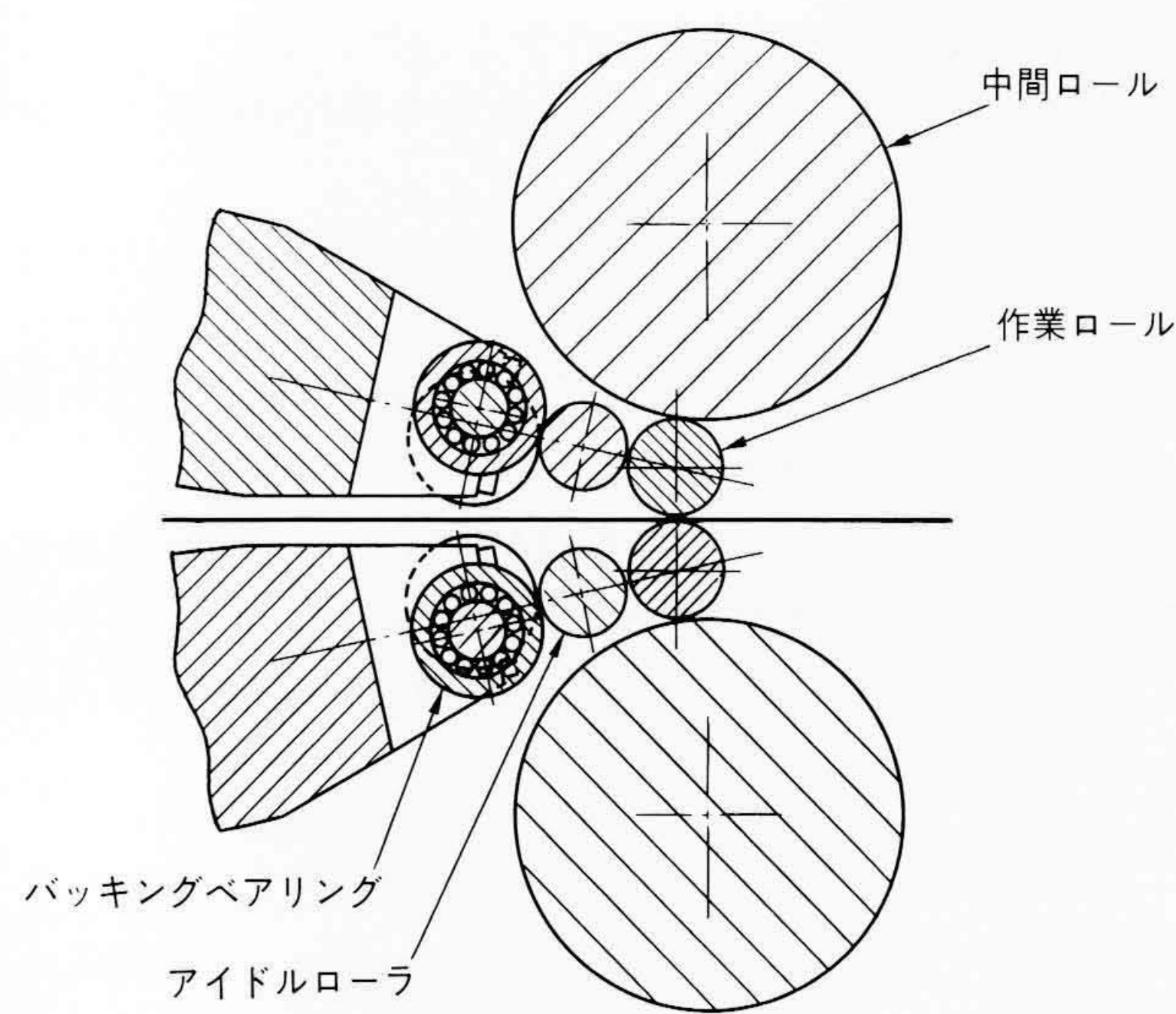


図10 UC4-MILLの構造 バックリングベアリングのジグザグ配置によって、作業ロールの小径化を実現した。

ートローラ付きのUC-MILLとしてUC2, 3-MILL, 更にUC 4-MILLへと展開してきた。

5.2 UC4-MILLの開発

UC4-MILLは D_w (作業ロール径)/ B (圧延材最大板幅)を 0.07まで可能としたものであるが、その適用上のメリットは単にロール径が小さなことだけでなく、そのロール径使用範囲の広さで、その作業ロール径の使用範囲は約2倍に及ぶ点である。これによって、圧延材ごとに要望される最適なロール径が1台の圧延機によって容易に実現可能となった。

UC4-MILLの構造のポイントは、図10に示すようにバックリングベアリングのジグザグ配置によってアイドルローラの安定支持を確保したことである。

これによって、すべての圧延条件に対応して、最適な形式のミルのラインアップが完成した。

6 結 言

薄板圧延成品の高級化の中にあって、平たん度、光沢などを高めながら広幅、高硬度材指向が強いニーズの中でUC-MILLは普通鋼だけでなく特殊鋼の分野にも適用され効果を上げてきた。

日立製作所は、今後とも、より以上の高硬度化、薄厚化、広幅化をはじめとして、ユーザーの要望にこたえ、圧延機の開発に努める考えである。

終わりに、UC-MILLの実機採用に際し、始終、適切な御指導をいただいた多くのユーザー各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- 1) 西：ロールシフト装置を有する圧延機，第92・93回西山記念技術講座，p.89～125(1983-8)
- 2) 秦，外：高精度形状制御圧延機“UC-MILL”，日立評論，67，4，287～292(昭60-4)