

プロセッシングラインにおける高精度形状制御技術

Advanced Shape Control Technology Applied to the Processing Line

近年、精整設備の製品は多様化・高品質化しており、その形状に対する要求もますます厳しくなっている。

日立製作所では、これらのニーズにこたえるためインラインミルとして作業及び中間ロールに各々ベンダ機構を備え、これらの組合せによって、多くの形状修正機能を発揮させることができる6 MB-MILLを開発した。また、連続亜鉛めっき設備などの製品の最終形状向上のため、板幅方向に形状可変機能を持った新形式のテンションレベラを開発した。その結果、精整設備の製品形状の飛躍的な向上に寄与することができた。

貝原利一* *Toshikazu Kaihara*
井田幸夫* *Yukio Ida*
高倉芳生** *Yoshio Takakura*
益田豊次** *Toyaji Masuda*
可児保宣** *Yasunobu Kani*
松岡照明*** *Teruaki Matsuoka*

1 緒 言

精整設備の最終工程では、製品ストリップに適切な機械的性質の付与、及び平坦度向上のため、連続焼鈍設備ではスキパスミルが、また連続亜鉛めっき設備などではテンションレベラが設置されている。特にこれらのコイルは、エンドユーザーへ出荷される最終製品である場合が多く、その平坦度に対する要求には限界がなく、デッドフラットを目指した開発が続けられてきた。

日立製作所では、高精度形状制御圧延機のHC-MILLの開発¹⁾以来、その性能を拡大すべく各種圧延機の開発を進めてきたが、今回インラインスキパスミルに要求されるニーズを検討し、最も適切なミルとしてHC-MILLの原理を応用し、優れた形状制御性を持つ6 MB-MILL(6 High-Mill with Effective Bender)を開発し、川崎製鉄株式会社千葉製鉄所のNo. 3連続焼鈍設備に初めて適用した。現在、本機は所期の性能を発揮して好調に稼動中である。

また、テンションレベラでも、板幅方向に形状を可変に修正できる新形式のテンションレベラを開発し²⁾、連続亜鉛めっき設備、連続塗装設備などに適用し、その製品の平坦度を大幅に向上させることができた。

なお、6 MB-MILLとテンションレベラは別々に設置されるのが普通であり、組み合わせられて使用されることはない。6 MB-MILLは機能的に4 H-MILL+テンションレベラの代替として、使用され得るものである。

本報告では、以上に述べた6 MB-MILLと新形式テンションレベラの形状制御の原理、及びその効果について紹介する。

2 6 MB-MILL

2.1 インラインスキパスミルの必要機能

インラインスキパスミルの主な機能は次のものである。

(1) 作業ロール表面粗度を変えて、製品表面の光沢、粗度を調整する。

(2) 焼鈍後の板材のストレッチャストレーンを防ぎ、用途に適した機械的性質を与えるため数パーセントの伸び率を与える。
(3) 形状を改善し、平坦度の良好な製品を得ること。

このインラインスキパスミルによる圧延には次のような特長があり、この特長に性能的にも、経済的にも最も適合する特性を持つミルを開発する必要がある。

- (1) 圧下量は少なく(伸び率で数パーセント以下)したがって、圧延荷重は通常1～5 kN/mm {0.1～0.5 tf/mm}と小さく、サーマルクラウンの発生も少ない。
- (2) 板幅方向に一樣な伸率を与え、板端部の未圧延部を少なくするため、冷間圧延された原板の板クラウンにならったロール間げき(隙)制御が必要である。
- (3) 調質圧延の特性上、作業ロールの小径化に限度があり、通常380 mm以上の比較的大径のものが使用される。
- (4) ただし、一般にウェット圧延が採用され、サーマルクラウンなどの高次の外乱はない。

上記特性から、インラインスキパスミルとして調質圧延のみで所定の形状が得られるHC-MILLが数多く使用され、所期の成果を挙げてきた。

今回のインラインスキパスミルではドライ圧延も行われるので、サーマルクラウンの影響も予想され、かつ急しゅん度0.3%というデッドフラットに近い厳しい平坦度が要求され、形状修正能力の高いHC-MILLを上回る、広範囲な複合形状制御能力を持つ圧延機が必要となった。

この目的には既に冷間圧延で実績のあるUCM-MILLがあるが、低荷重のスキパスミルとしては高機能すぎ、設備コストも高く、不適切と判断し、最適のミルとして表1に示すHC-MILLファミリーの6 MB-MILLを採用した。このミルは補強ロールの有効胴長を短くし、作業ロール及び中間ロールのベンダ効果を拡大させたものである。

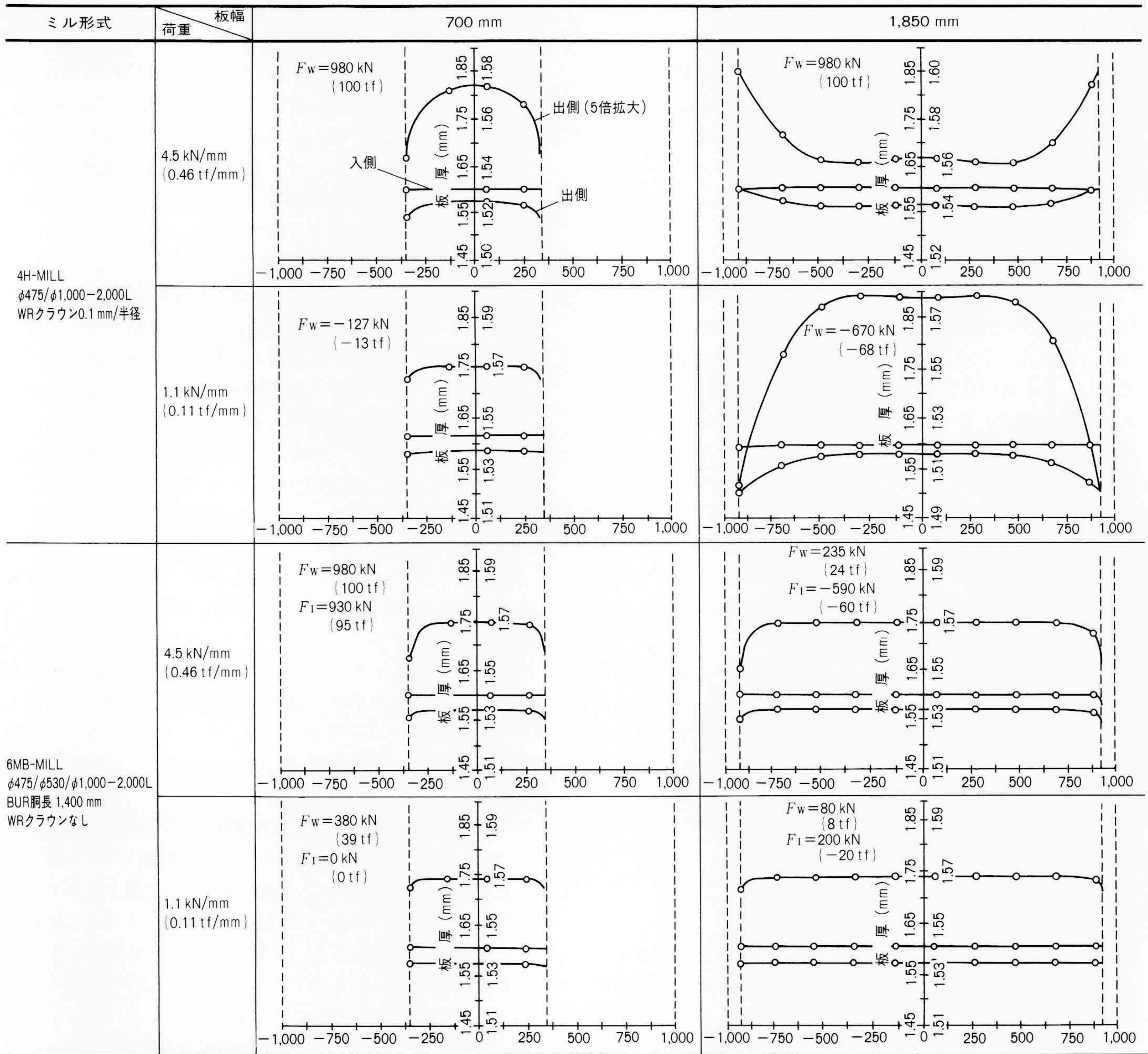
以下に形状制御性を主体に、各形式のミルとの比較も含め

* 川崎製鉄株式会社千葉製鉄所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所機電事業本部

表1 HC-MILLの形式 HC-MILLファミリーとして下記のミルが開発されており、これ以外にもロール摩耗及びサーマルクラウン分散，エッジドロップ改善に効果の大きい，作業ロールシフト方式のミルも開発されている。

形 式 名 称		HCM-MILL	6MB-MILL	UCM-MILL
機 構	ロール移動	中間ロール	—	中間ロール
	ロールベンダ	作業ロール	作業及び中間ロール	作業及び中間ロール
冷間圧延への適用		レバース，タンデム，スキンパス	スキンパス	レバース，タンデム (特に小径作業ロール)

表2 4 H-MILLと6 MB-MILLの形状制御能力 4 H-MILLは1種類のWRクラウンだけでは全仕様範囲の圧延荷重変化に対応できず良好な形状は得られないが，6 MB-MILLは全範囲で良好な形状が得られる。



注：略語説明 BUR(バックアップロール)，Fw(Work Roll Bending Force)，F1(Intermediate Roll Bending Force)，WR(ワークロール)

て、6 MB-MILLの特性について述べる。

2.2 6 MB-MILLの形状制御能力

インラインスキンプスの形状外乱の主なものは、圧延荷重によるロールのたわみと原板の板クラウンの変化の二つである。これらの外乱を次数表示した場合に、これらは互いに異なった次数を持ち、特に原板の板クラウンは一般に2次と8次以上の高次の次数を持っている。したがって、デットフラットの形状を得るためには、これらの形状外乱に対応する制御次数を持つミルが要求されるが、実際的には複合制御機能、すなわち異なった制御次数を2個以上持たせられれば、デットフラットに近い形状が得られることになる。

表2に4 H-MILLと6 MB-MILLの形状制御能力を示すが、6 MB-MILLでは全圧延荷重範囲で良好な形状が得られる。また、図1に各形式のミルのクラウン制御能力についての計算結果を示す。クラウン制御能力を板幅のほぼ $\frac{1}{4}$ 部のクラウンについて示すと、4 H-MILL：HCM-MILL：6 MB-MILL＝1：2.7：5.5であり6 MB-MILLが最も制御能力が大きい。特に重要なことは、6 MB-MILLは形状制御手段として作業ロールと中間ロールベンダの2種類の機能を持っており、このため広範囲の複合形状の制御が可能になる。したがって、ポケット伸びなども修正でき、より平坦な製品を得ることができる。6 MB-MILLではベンダ効果を拡大するために、補強ロールの有効胴長を最大板幅よりも小さくしてあるが、図2にこの補強ロール有効胴長によるベンダ効果に

ついての計算結果を示す。この有効胴長は短いほうがベンダがよく効くわけであり、有効胴長が1,700 mmから1,300 mmに短くなるとベンダ効果が約1.3倍になる。しかし、この有効胴長が短すぎると最大板幅で板端部がオーバハング荷重状態になり、中伸びの形状になってしまうので、板幅、圧延荷重などの設備仕様から適正に決定しなければならない。図3に最近納入された実機の6 MB-MILLでの良好な形状を得るために必要なベンダ力を示す。この6 MB-MILLでは板幅700～1,850 mmに対し、補強ロール有効胴長は1,400 mmに設定してある。同図から板幅、圧延荷重についての全仕様範囲で十分な形状修正能力を持っていることが分かる。

このように、6 MB-MILLは大径作業ロールで圧延荷重が低い場合、すなわちインラインスキンプスとして適切なミルである。

2.3 インラインスキンプスミルの納入実績

表3にインラインスキンプスミルとして採用されたHCM-MILLの納入実績を示す。従来からHCM-MILLが圧倒的に多数を占めるが、最新のインラインスキンプスに採用された6 MB-MILLは、形状の自動制御も併用して急しゅん度0.3%程度の良好な平坦度の製品を安定して生産している。図4に川崎製鉄株式会社千葉製鉄所に最近設置された6 MB-MILLを示す。今後も形状に対する要求が増すにつれ、6 MB-MILLがますます採用されていくものと期待される。

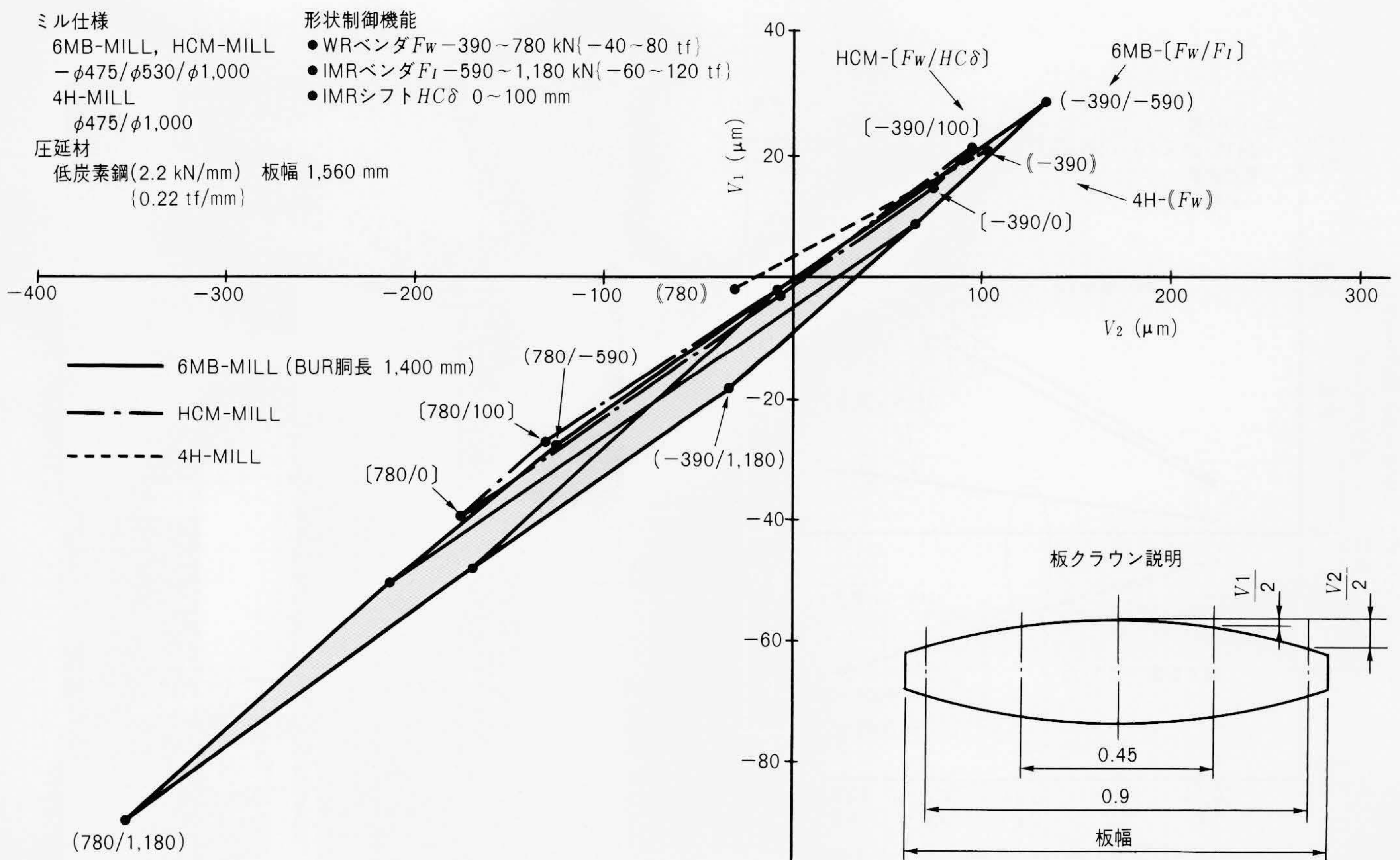


図1 各形式ミルのクラウン制御能力 6 MB-MILLは面積を持ち、複合制御能力を持つ。HCM-MILLは線に近く、複合制御能力に劣る。4 H-MILLは線であり、かつクラウン制御能力も小さい。

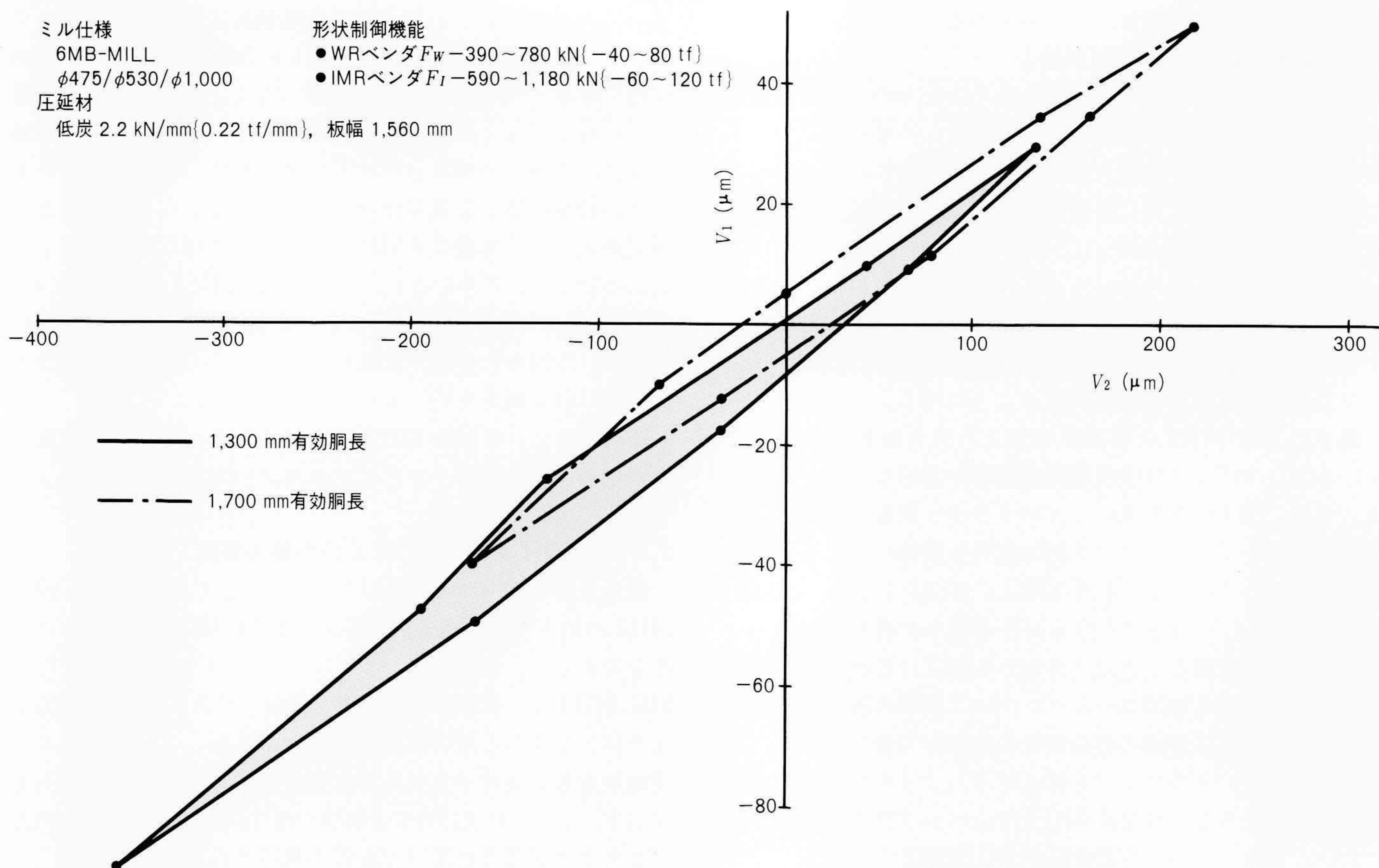


図2 BUR有効胴長によるクラウン制御能力 有効胴長が短くなるにつれ、ベンダによるクラウン制御能力は増す。

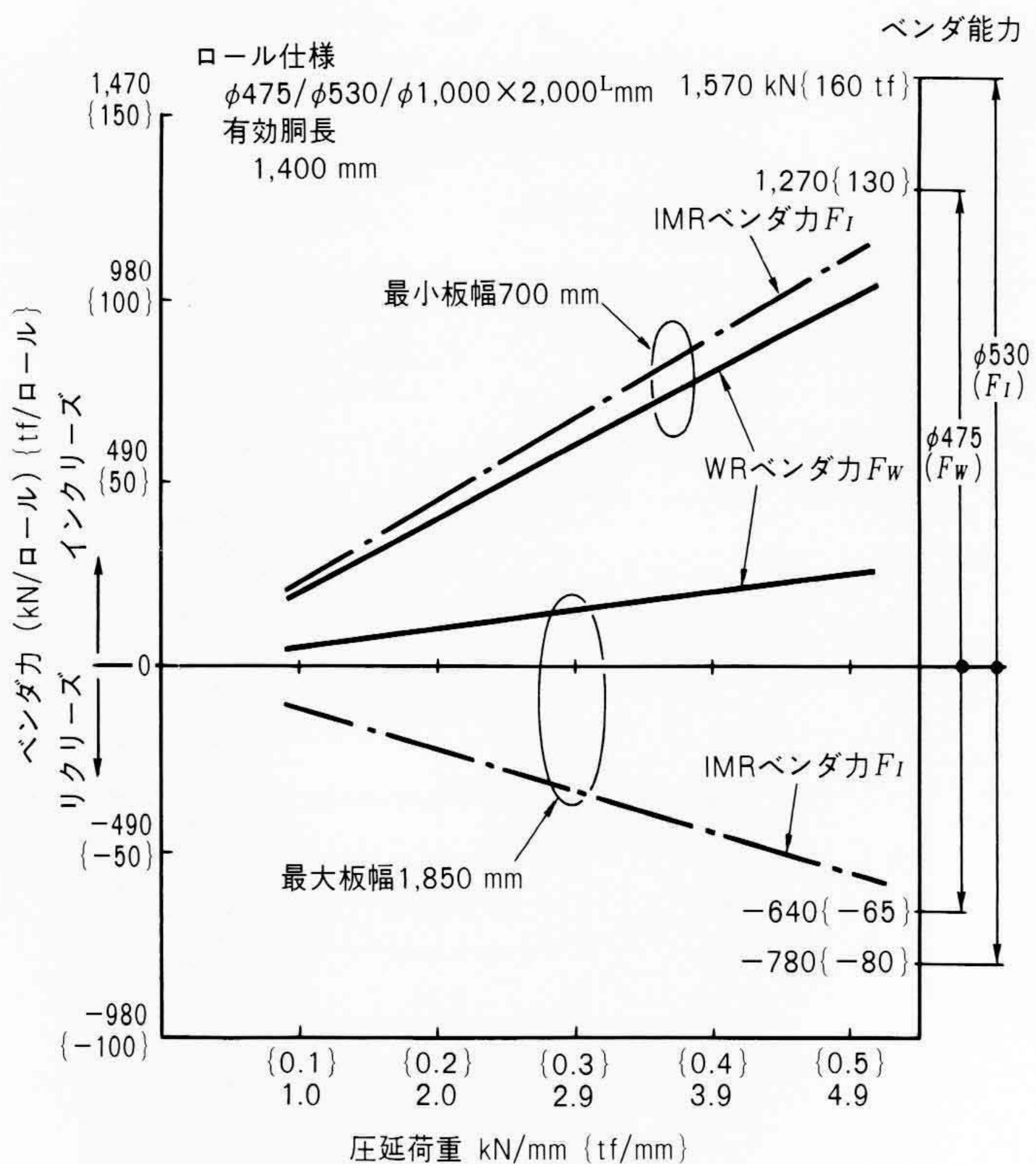


図3 6MB-MILLの操業条件(良好な形状を得るベンダ力)
6MB-MILLは、全板幅、圧延荷重範囲内で良好な形状が得られる。



図4 6MB-MILL 川崎製鉄株式会社千葉製鉄所に納入された6MB-MILLの1号機を示す。

表3 CAPL(CAL)用インラインスキnpasミル納入実績
 主としてHCM-MILLが採用されているが、最新の設備で6 MB-MILLが採用された。

No.	納入先	稼動開始	適用	ミル形式	取扱板幅 (mm)	圧延速度 (m/min)
1	新日本製鐵株式会社 八幡製鐵所	1978		HCM	600～1,300	Max. 400
2	新日本製鐵株式会社 八幡製鐵所	1981		HCM	500～1,067	Max. 1,020
3	新日本製鐵株式会社 名古屋製鐵所	1982		HCM	700～1,600	Max. 440
4	新日本製鐵株式会社 広畑製鐵所	1982		HCM	600～1,650	Max. 750
5	川崎製鐵株式会社 水島製鐵所	1983		HCM	600～1,600	Max. 560
6	日新製鋼株式会社 堺工場	1986		HCM	600～1,610	Max. 280
7	I-Pro (新日本製鐵株式会社)	1987		HCM	600～1,600	Max. 240
8	川崎製鐵株式会社 千葉製鐵所	1988		6MB	700～1,850	Max. 600
9	Nuova Italsider (Italy)	1989		HCM	600～1,650	Max. 750
10	I-Company	1989		HCM	710～1,652	Max. 750

3 新形式テンションレベラ

3.1 テンションレベラの必要機能

テンションレベラに求められる機能は次のとおりである。

- (1) 機械的性質の改善，特にストレッチャストレーンを防止するため，2％以下の伸びを与える。
- (2) 形状を改善し，平たん度の良好な製品を得ること。

テンションレベラは高張力下のストリップに繰返し曲げを加えることによって，容易に伸びが与えられること，及び形状不良材は自然に張力が形状修正されるように分布するため，平たん度の優れた製品が得られやすいことにより，精整設備の最終工程に多用されている。このテンションレベラの矯正メカニズムによって，形状修正の精度はストリップの機械的性質の変動，板クラウン及びテンションレベラの機械精度などに直接左右されることになる。日立製作所では，テンションレベラの機械精度をアップし，その精度を長期にわたり保持できる構造の採用，及びフレームの剛性をアップすることによって，機械精度に起因する形状不良を極小としてきた。更に，デットフラットの形状を得るためにストリップの板幅

方向の機械的性質の変動(これは主に降伏点の変動である。)にも対応できる機構の研究を進め，表4に示す新形式のテンションレベラの開発に成功した。

3.2 新形式テンションレベラの形状制御能力

3.2.1 テンションレベラの形状修正のプロセス

テンションレベラの主機能は形状不良材の局部伸びを修正して，平たんな板を得ることであるが，これは通常，伸長ローラと呼ばれる表4のローラ②，③での伸びで修正される。この入側の形状不良の修正には0.3～0.5％の伸びで十分である。伸長ローラ部で強く曲げられたストリップは，次の反り修正ローラ部⑥，⑦，⑧で反りを矯正され，平たんな板となる。板幅方向に機械的にも，幾何学的にも均一なコイルなら，このプロセスでいわゆるデットフラットの製品が得られるが，実際は均一なコイルはなく，形状不良が完全には修正されない。

この最終的に残る形状不良，すなわち最終形状について検討すると，伸びεは次式で表される。

$$\epsilon \doteq \frac{hot}{2\rho\sigma s} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 h は板厚、 σt は張力、 ρ は曲げ半径、 σ_s は降伏応力である。したがって、上記パラメータに不均一さがあると(これを Δ を付けて表示する。)次式で示す形状不良が残る。

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma t}{E} \cdot \frac{\Delta \xi}{\xi}, \quad \alpha_F = 6.37 \sqrt{\Delta \varepsilon} = 6.37 \sqrt{\frac{\sigma t}{E} \cdot \frac{\Delta \xi}{\xi}} \dots (2)$$

ここで、 α_F は最終の形状急しゅん度、 $\Delta \xi / \xi$ は形状外乱であり、 $\Delta \sigma_s / \sigma_s - \Delta h / h$ で表示される。図5に形状外乱に対する最

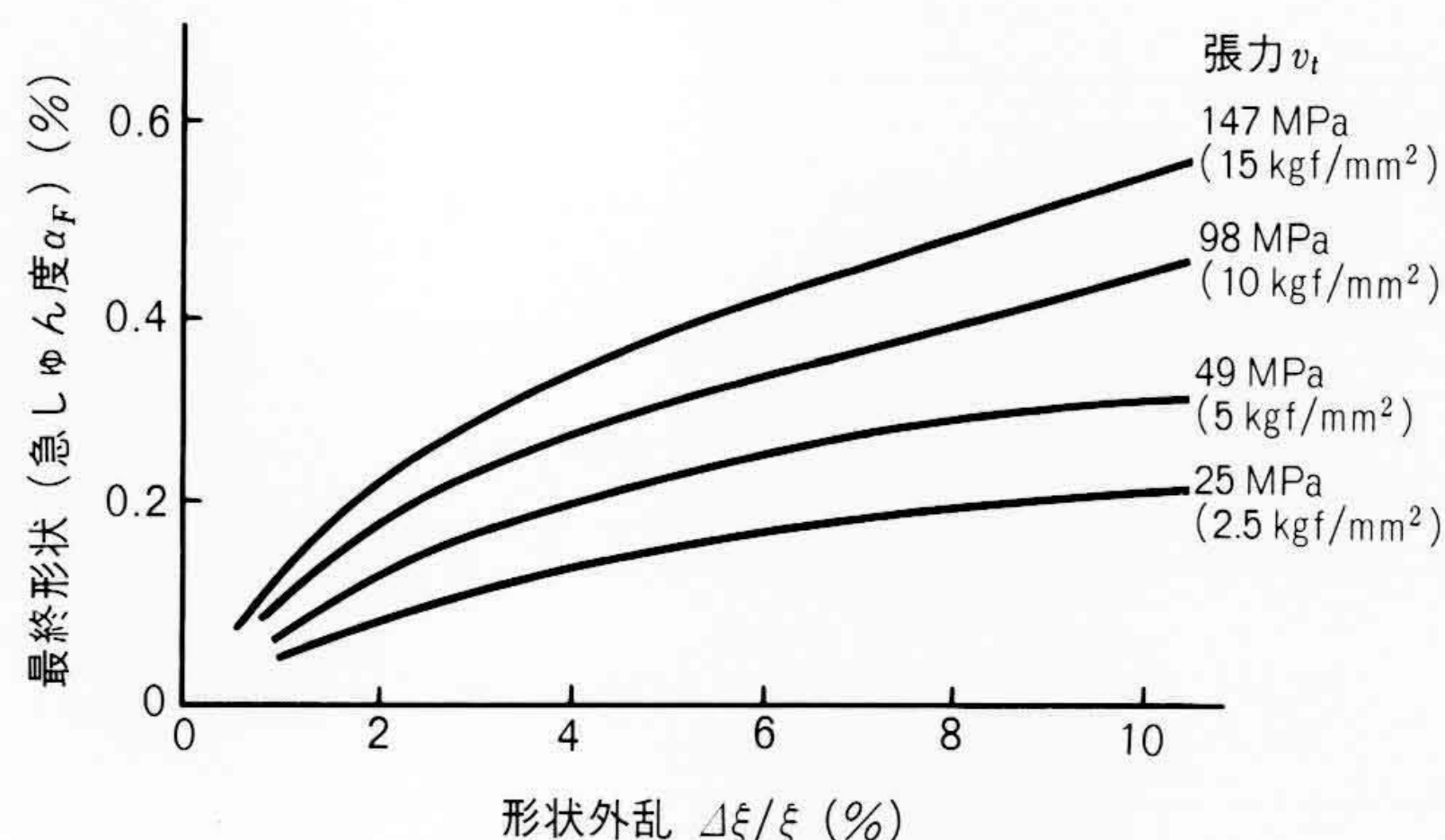
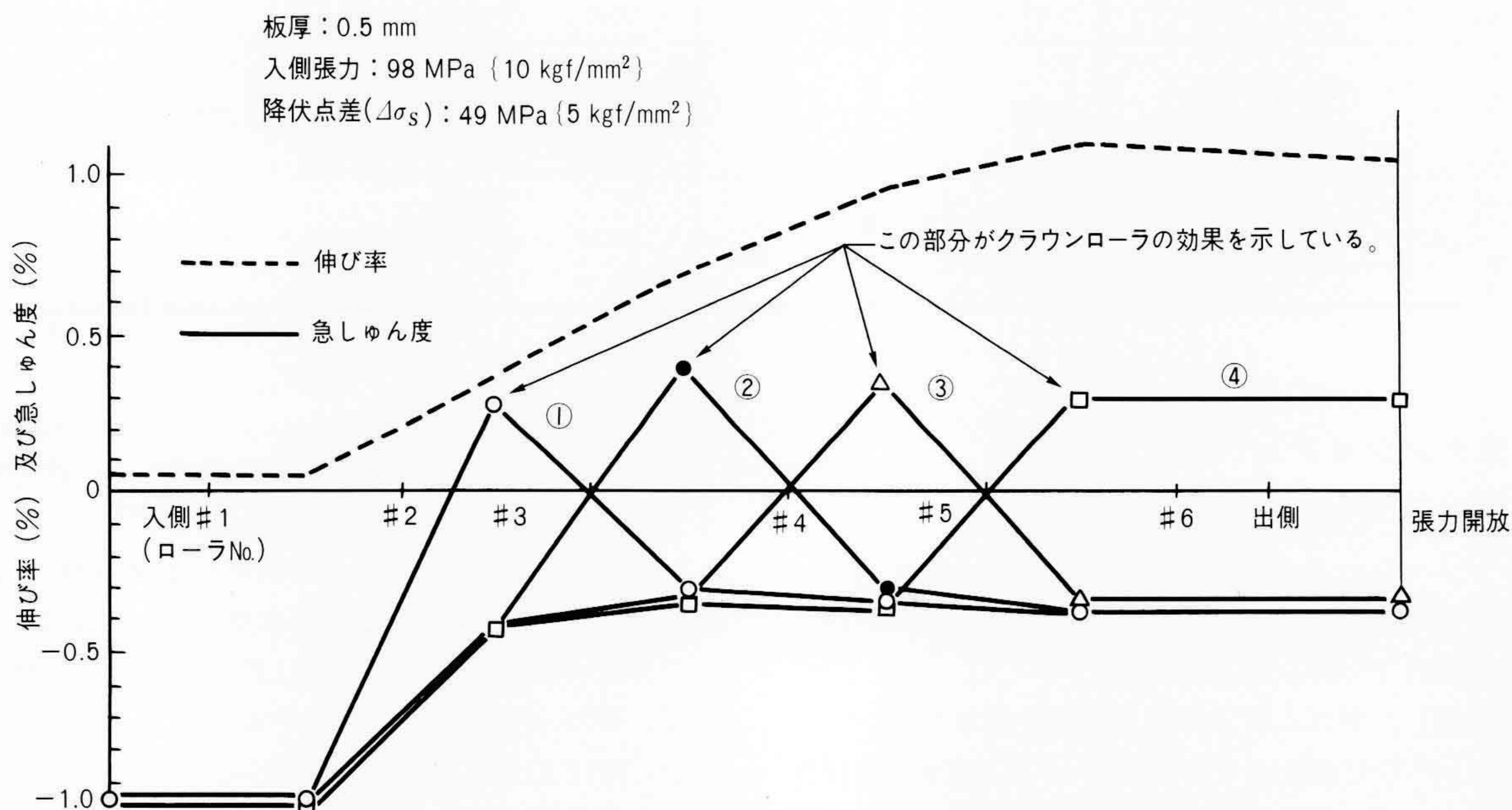


図5 テンションレベラの最終形状 形状外乱があると従来のテンションレベラでは、この最終形状より平たんな製品は得られない。

終形状の計算結果を示す。通常、テンションレベラは98 MPa {10 kgf/mm²} 程度の張力で運転されるため、10%の形状外乱があると0.4%以上の急しゅん度の形状不良が残ることになる。したがって、デットフラットの形状を得るためには、この不均一さに対するなんらかの修正手段が必要となる。

3.2.2 新形式テンションレベラの形状制御機構

板幅方向の不均一さを修正するものとしては、(1)式から張力と曲げ半径を板幅方向に可変にすることが考えられるが、曲げ半径を変えることは容易ではないので、張力を変える方法が採用されている。板幅方向の不均一さを調査すると次の2種類があることが判明した。一つは板幅端での急激な降伏点の減少と、他の一つは全板幅にわたって2次曲線的な緩やかな変動である。前者に対してはテーパローラのシフトで、後者に対してはロールベンドで対処することが可能である。次に問題となるのは、これらの手段をテンションレベラのどの部分に配置するかであり、最適な位置を見つけるべく、理論的、実験的に検討を加えた結果、これらの制御手段はテンションレベラの最出側が良いことが見いだされた。図6にクラウンローラの適正位置についての実験結果を示す。ケース①、②、③ではクラウンローラの効果はすぐ後方のローラによって打ち消されてしまうことを示しており、ケース④だけが#6ローラの効果が大径の#7ローラに打ち消されずに残り、



ケース	クラウンローラNo.	符号
①	#2	○
②	#3	●
③	#4	△
④	#5	□

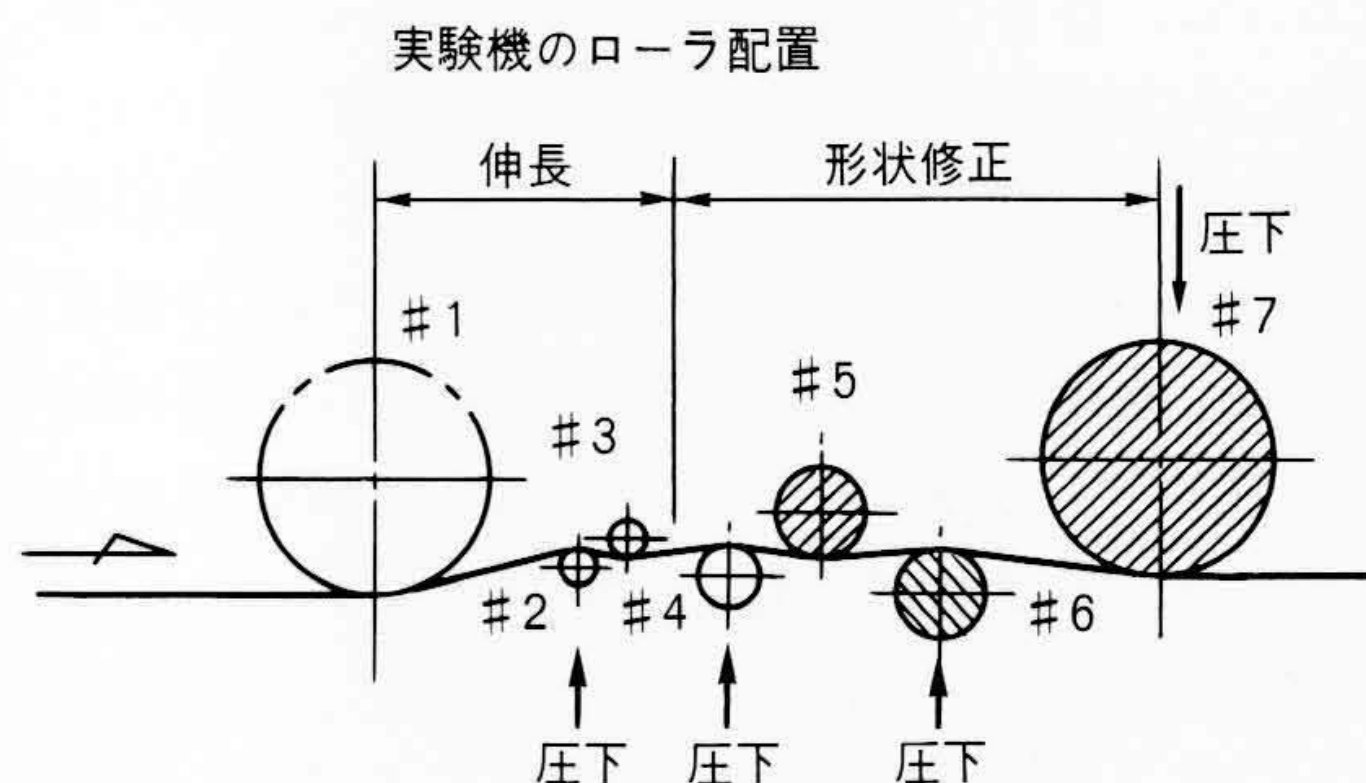
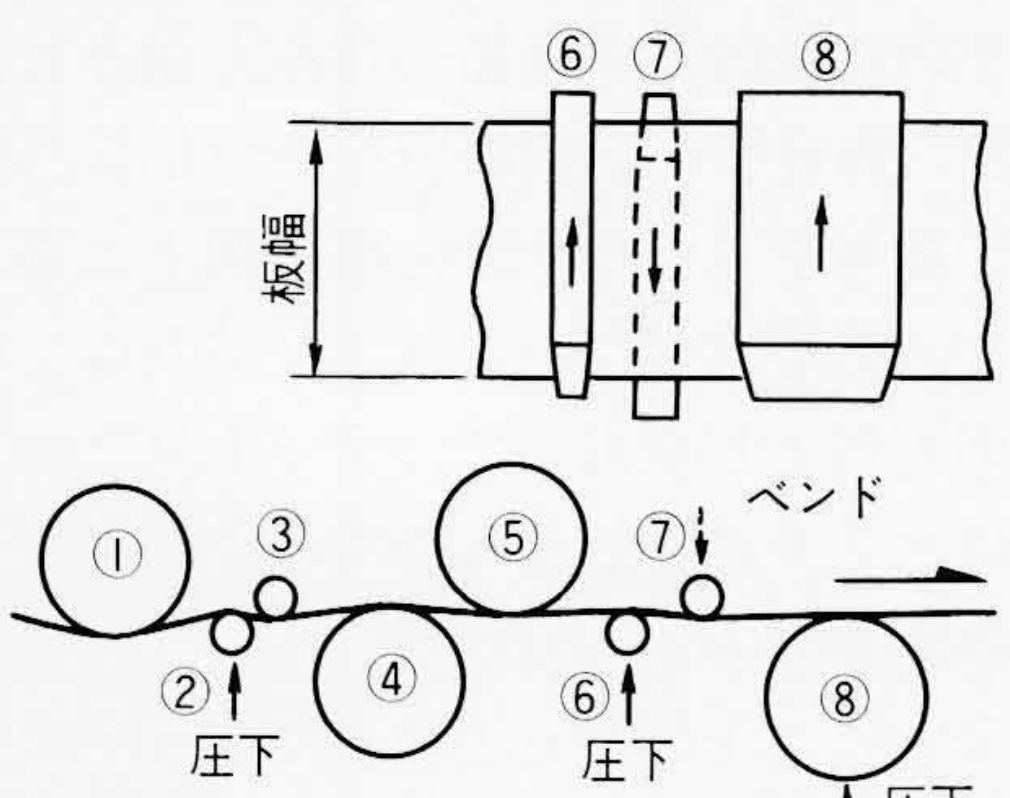


図6 クラウンローラの適正位置 クラウンローラの位置は#6ローラが最適であり、それより前方では、その効果がその後方ローラによって消去されてしまう。

表4 新形式テンションレベラによる形状修正 板幅方向の形状可変能力により、形状が大幅に向上した。

ローラ配置	形状修正項目	修正方法	修正ローラ
	不良伸び	全体伸び不良	曲げ張力伸張
		端伸び不良	板幅端にテーパローラシフト
		中伸び不良	小径ローラベンド
	反り	幅方向反り	圧下調整
		長手方向反り	圧下調整

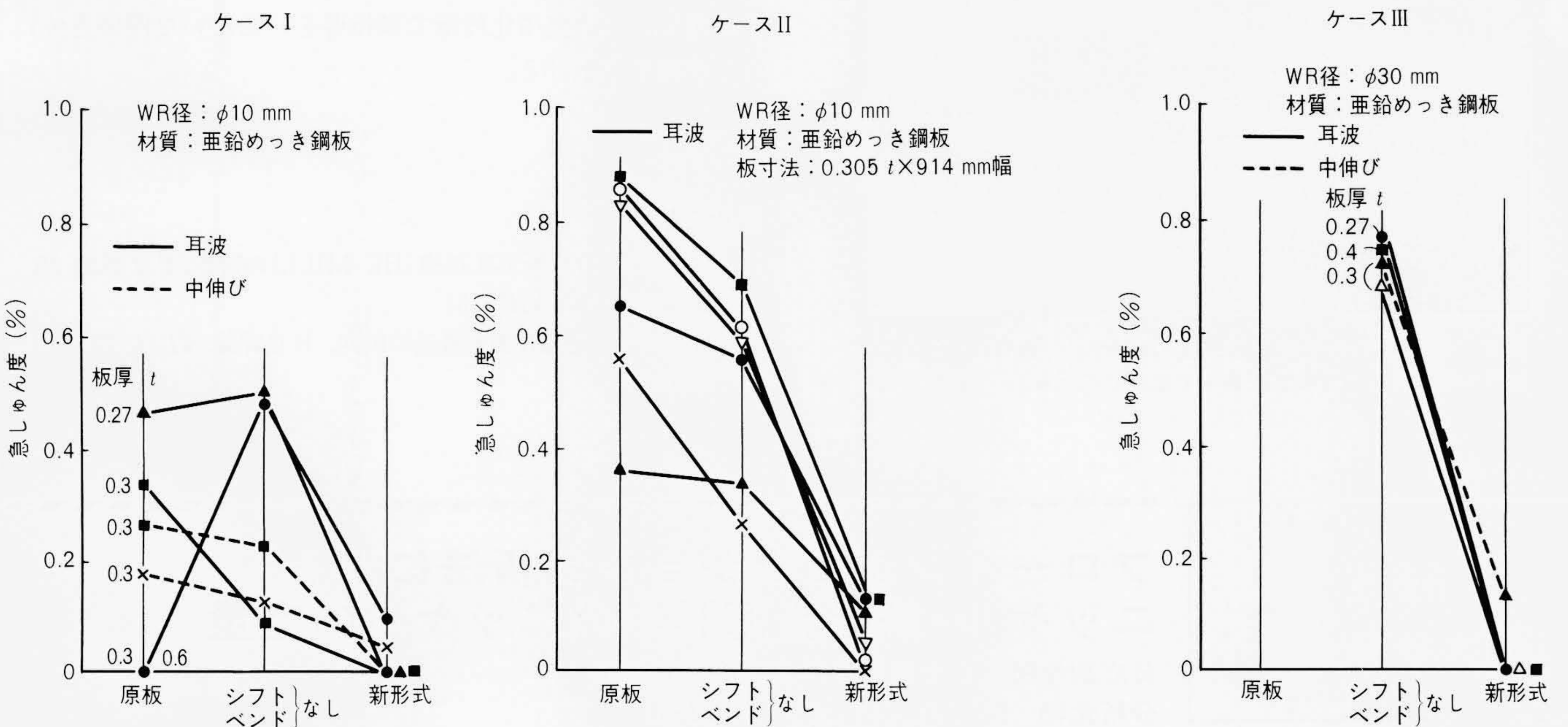


図7 テンションレベラによる形状修正 テーパローラのシフトとロールベンドを備えた新形式のテンションレベラにより、優れた平坦度の製品が得られる。

出側形状を変化させている。#5ローラの効果を残すためには#7ローラもテーパローラとして#5ローラと同時にシフトさせ、#6ローラ部の悪影響を取る必要がある。また、ロールベンドを与えるローラは、上記考察から最も効果のある#6ローラとした。以上の検討から実機のローラ配置は表4に示すように決定された。図7に新形式テンションレベラによる形状修正の実測値を示す。実操業で急しゅん度0.2%以下の平坦な製品が得られている。

なお、テーパローラの形状を変えることによって、板幅端部近辺の急激な硬度上昇を持つコイルに対しても対応可能であり、新形式のテンションレベラは幅広い形状修正能力を持っている。

3.2.3 新形式テンションレベラの納入実績

図8に示すように、亜鉛めっき設備を中心に精整設備の出側に設置され、製品形状の向上に大きく寄与している。図9に現地稼動中の実機を示す。

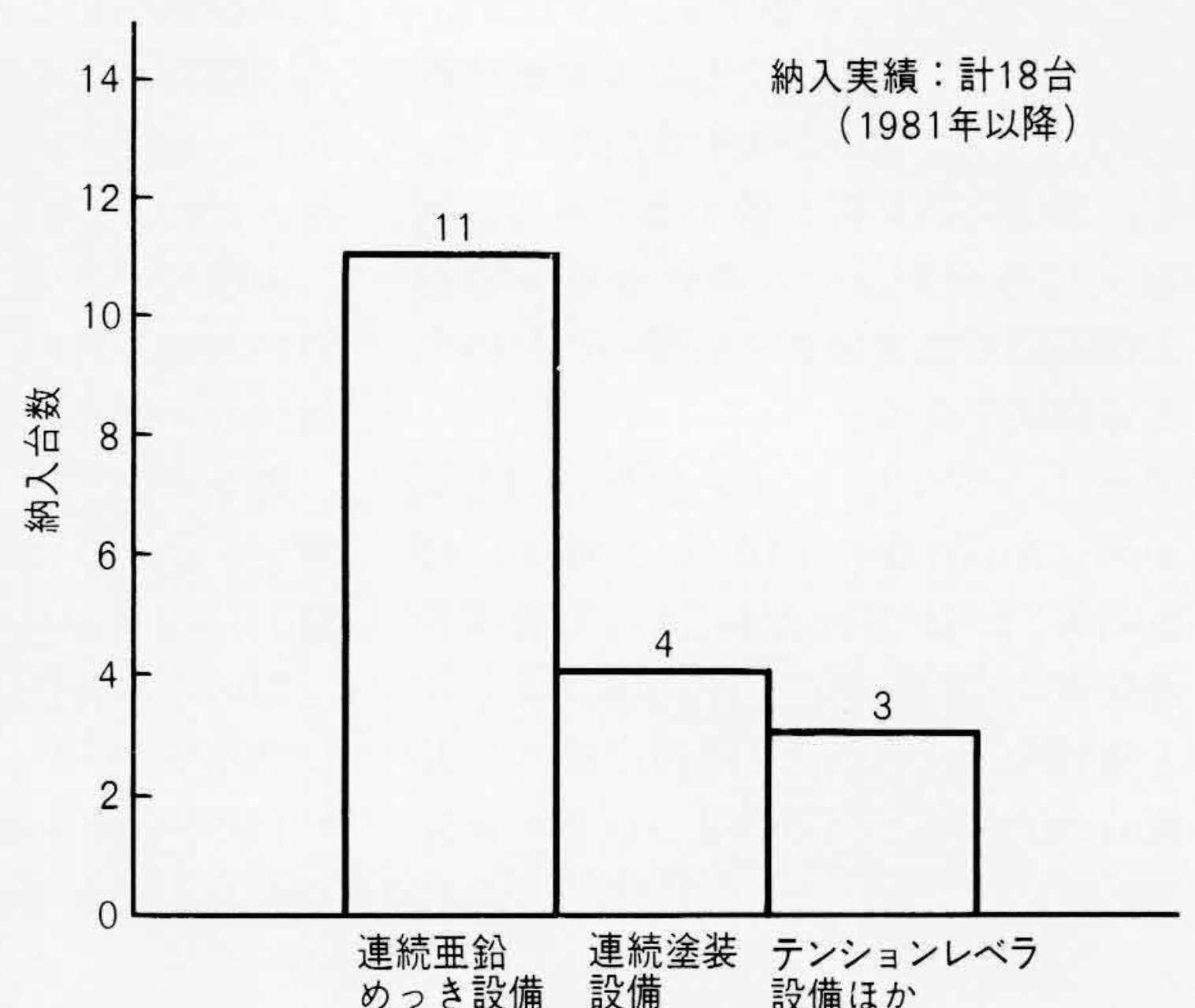


図8 新形式テンションレベラの納入実績 めっき設備を主に、精整ラインの最終製品の形状向上に寄与している。

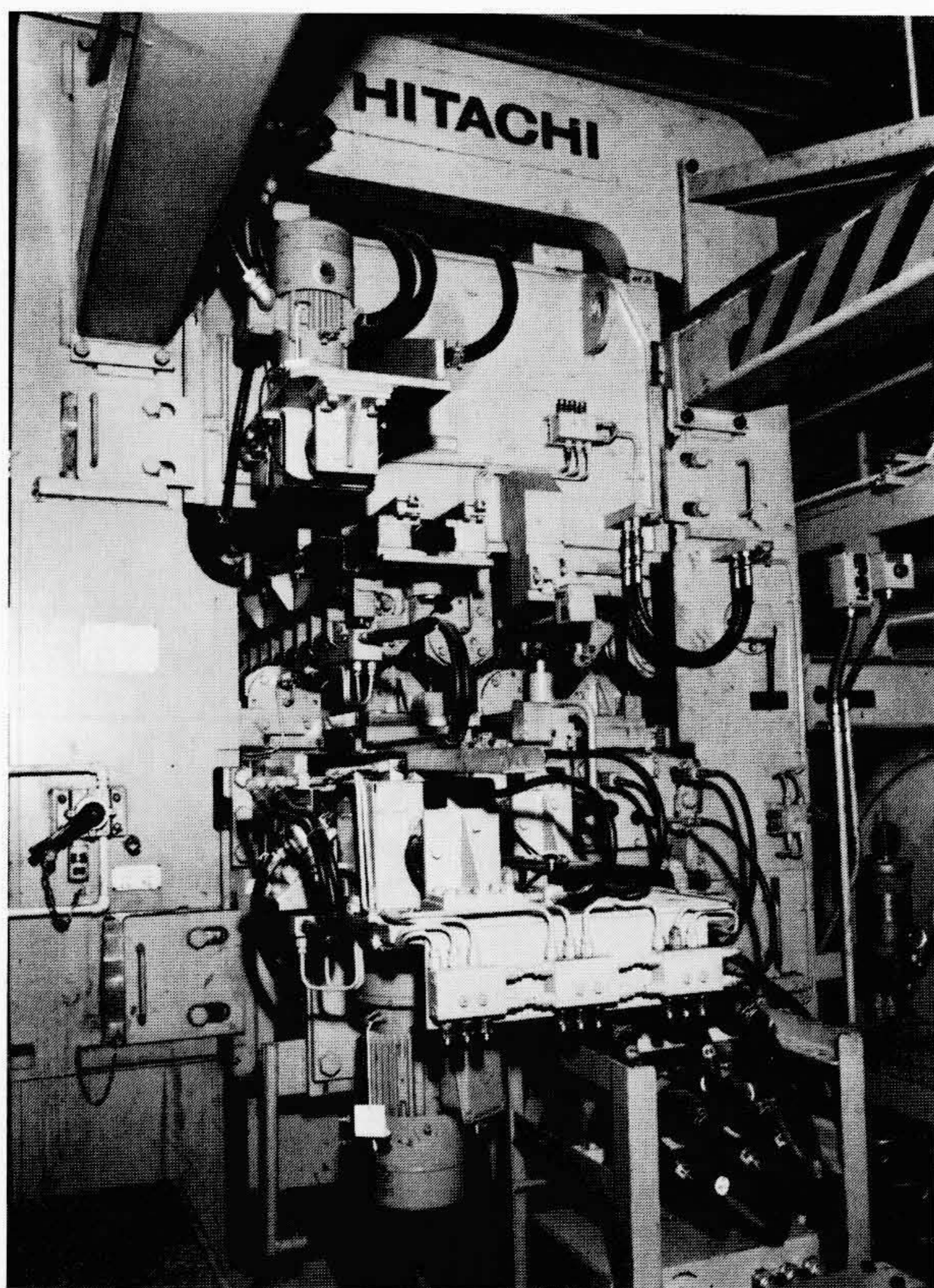


図9 稼動中の新形式テンションレベラ 急しゅん度0.2%以下の平坦なコイルを安定して生産している。

4 結 言

精整設備の最終製品形状を決めるインラインスキンプスミルとテンションレベラの形状制御の最新の技術を紹介した。6 MB-MILLは広範囲の複合形状制御能力を持つものであり、インラインミルとして採用され製品平坦度の向上に寄与することができた。また、新形式のテンションレベラは、板幅方向の形状外乱に対応可能としたもので、デットフラットという形状の最終目標に大きく前進したものである。

今後は形状の自動制御とのより緊密な併用によって、優れた平坦度の製品を安定して生産するというユーザーの要望にこたえるため、更に研究開発を進めてゆく考えである。ユーザー各位の御指導を切望する次第である。

終わりに、6 MB-MILLをインラインスキンプスミルとして採用し、その実用化段階で御指導をいただいた関係各位に対し深謝申し上げる。

参考文献

- 1) 梶原, 外: 日立新形圧延機(HC-MILL)の特性, 日立評論, 56, 10, 919~924(昭49-10)
- 2) 梶原, 外: 圧延技術の最近の動向, 日立評論, 67, 4, 269~273(昭60-4)

論文抄録

フローインジェクション分析法による ニッケル-鉄合金薄膜中のニッケルの定量

日立製作所 白土房男・岡島義昭・他2名
分析化学 36-4, 233~237 (昭62-4)

磁気ディスク用記録/再生ヘッドの磁性材料であるNi-Fe合金(約80/20)薄膜では、 $10^{-1}\%$ オーダの組成変動が磁気特性、すなわち記録/再生機能に影響する。このため、 $10^{-1}\%$ オーダの高精度で、しかも自動分析可能な品質管理手法の開発が急がれていた。しかし、磁性薄膜試料が微量であり、従来の湿式化学分析法では操作手順が煩雑で、上記精度で組成変動を定量的に評価することは困難である。

フローインジェクション分析法(Flow Injection Analysis: FIA法と略す。)はJ. RůžickaとE. H. Hansenによって提唱された連続流れ方式の分析法である。キャリア液を直径0.5 mm程度の細管に流しておき、流れの途中に被検溶液及び試薬を注入し、細管内を流れる間に混合及び反応させ

る。これをフローセルに流通し、吸光度や電極電位などの信号の変化を連続的に測定する。このように、本法は細管中で試薬添加及び反応がなされるので、外部汚染がなく、操作が簡単で自動化に適している。しかし、定量精度は1%程度であり、 $10^{-1}\%$ オーダの精度は得られていない。

本論文では発色剤、マスキング剤などの同時添加、反応条件の最適化及び流路の単純化などにより、上記精度を達成した。

厚さ2 μm 程度のNi-Fe薄膜をたい(堆)積した基板を2~5 mm角に切り出し(試料量0.1~0.3 mg)、酸に溶解してFIAの測定に用いる。発色剤に4-(2-ピリジルアゾ)レゾルシノール、Fe(III)のマスキング剤にピロリン酸ナトリウム、pH緩衝剤にホウ酸ナトリウムを用いた。16方自動バルブを用

いて、これらの試薬類を混合した反応試薬溶液60 μl で試料溶液40 μl の前後を挟み、細管流路に注入する。65 $^{\circ}\text{C}$ の反応コイル内で安定な着色錯体を生成させ、波長520 nmの吸光度を測定して定量する。

5 ppm Ni(II)の15回繰返し測定の再現性は相対標準偏差で0.09%、定量精度は $\pm 0.2\%$ であった。なお、測定時間は1検体当たり2分間である。

以上の検討から定量精度を見ると、FIA構成ハード面の測定値の有効けた数が4けたであるのに対し、3けたの精度で定量できたことは、ソフト技術が最高レベルに達しているものと考えられる。本手法は微量の試料での高精度分析が可能であり、今後薄膜材料の組成管理分析への適用が期待される。