

# “HC-MILL”によるホットストリップの板クラウン・形状制御

## Crown and Shape Control of Hot Strip Steel by “HC-MILL”

ホットストリップミル製品の品質、歩どまりに関係する板クラウンの制御性を改善するため、中間ロール移動方式の“HC-MILL”をホットストリップミルに導入することを目的として、試験ミルを製作し板クラウン制御に関する基本特性について検討を行なった。

この結果、“HC-MILL”は従来の4段ミルと比較して大きな板クラウン制御能力をもち、かつ各種板幅に対し共通する制御範囲をもっていることから、ホットストリップミルでの板クラウン制御を実施する上で、極めて優れた圧延機であることを明らかにした。また、実機仕上タンデムミルに“HC-MILL”を適用する場合、後段側に3~4台以上これを配置すれば板厚・板幅などの圧延条件の変化、ロールのサーマルクラウンなどを補償制御し、所望の板クラウンが得られることを明らかにした。

中島浩衛\* Nakajima Hiroe  
 菊間敏夫\*\* Kikuma Toshio  
 梶原利幸\*\*\* Kajiwara Toshiyuki  
 谷口哲二\*\*\*\* Taniguchi Tetsuji  
 木村智明\*\*\*\*\* Kimura Tomoaki  
 中西恒夫\*\*\*\*\* Nakanishi Tsuneo

### 1 緒言

帯鋼製造用熱間圧延設備(通常ホットストリップミルと呼ばれる。)は設備が巨大であり、また生産量が極めて大きいことから、鉄鋼圧延設備中最も重要な位置を占めるものである。したがって、この設備で製品品質、歩どまりなどの改善、あるいは省エネルギーが可能となれば、その効果は著しいものとなる。

現在、ホットストリップミル製品の品質及び歩どまり向上の点から最重要視されているものは、板横断面プロフィール(板

クラウン)の改善である。すなわち、ホットストリップミルでは次の二つの理由から板クラウンが大幅に変化する。第一の理由は、圧延材が1,000℃前後の高温であるため、ロールの熱膨張による変形(サーマルクラウン)及び摩耗によりこれのプロファイルが経時的に変化してくることによる。第二の理由は、ロール組替サイクル中に各種の板厚・板幅のものが圧延されるが、これによりロールのたわみ変形プロフィールが大幅に変化することによる。以上の理由から現状のホットストリップミル製品では、**図1**に示すように板クラウンは約90 $\mu$ 程度ばらつく。すなわち、板クラウンの目標値が60 $\mu$ の場合に、圧延開始当初の板クラウンは125 $\mu$ と大きく、最終圧延側では35 $\mu$ 程度まで小さくなる。以上のような板クラウンのばらつきは、現状のホットストリップミルでの板クラウン制御機能が十分でないために生ずるものである。したがって、所望の最小板クラウンに制御できる場合に対し、現状の製品には余分の肉が付いており、これによる損失は代表的設備で月間1,000t以上も発生しているものと推定される。以上のような背景から、新日本製鐵株式会社と日立製作所ではこの板クラウンを通常の圧延でのあらゆる条件下でも所望のものに制御できる新しいホットストリップミルを求め研究を行なった。

すなわち、冷間圧延では中間ロール移動方式の“HC-MILL”が実用化され、優れた形状制御性を発揮している。この“HC-MILL”を熱間圧延に導入し、板断面プロフィールに対する所望の制御が可能かどうかを試験ミルを製作し、ハードウェアの問題をも含め検討を行なった。ここでは、上記試験ミルにより得られた特性、及びこの“HC-MILL”を実機に適用した場合に想定される板クラウン制御効果について述べる。

### 2 現状ホットストリップミルでの板クラウン変化

板クラウンとは**図1**注1に示すように板中央と端部での板厚差 $C_H(=H_1-H_2)$ で定義されるものである。この板クラウンは、そのまま製品とされるものでは、歩どまり上ゼロであること

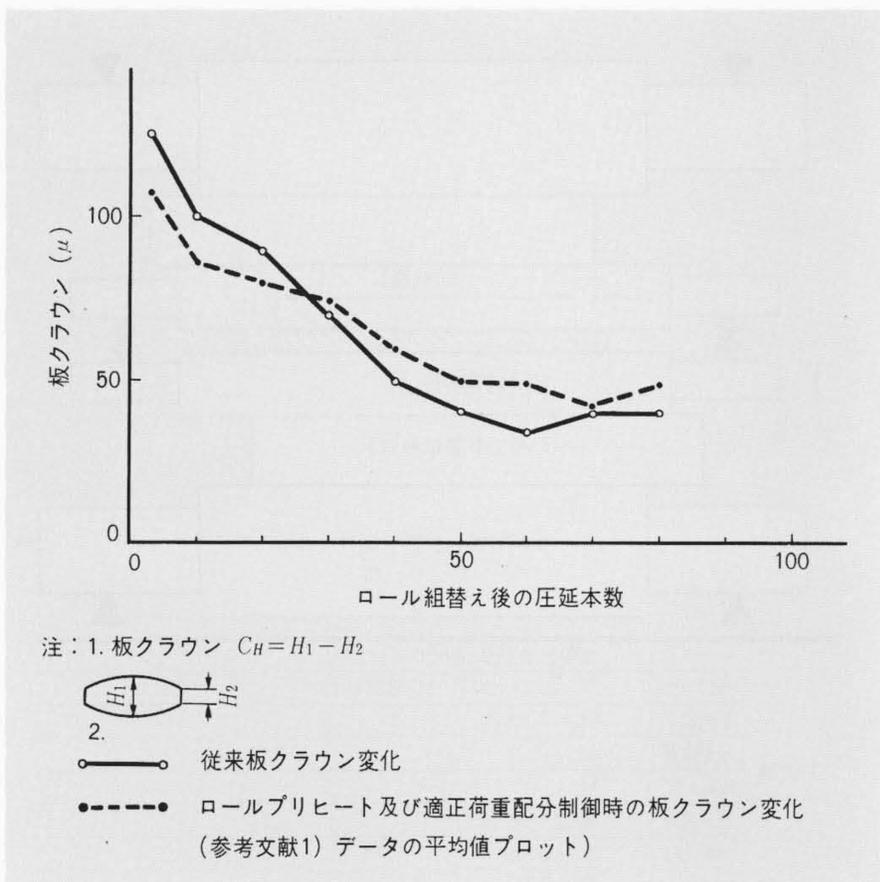


図1 ロール組替サイクル内における板クラウン変化状況  
 ロール組替え当初では板クラウンが大きく、圧延処理したロット本数が大きくなると板クラウンは小さくなっていく。

\* 新日本製鐵株式会社生産技術研究所塑性加工研究室 工学博士    \*\* 新日本製鐵株式会社八幡製鐵所薄板部    \*\*\* 日立製作所日立工場 工学博士  
 \*\*\*\* 日立製作所機電事業本部    \*\*\*\*\* 日立製作所日立工場

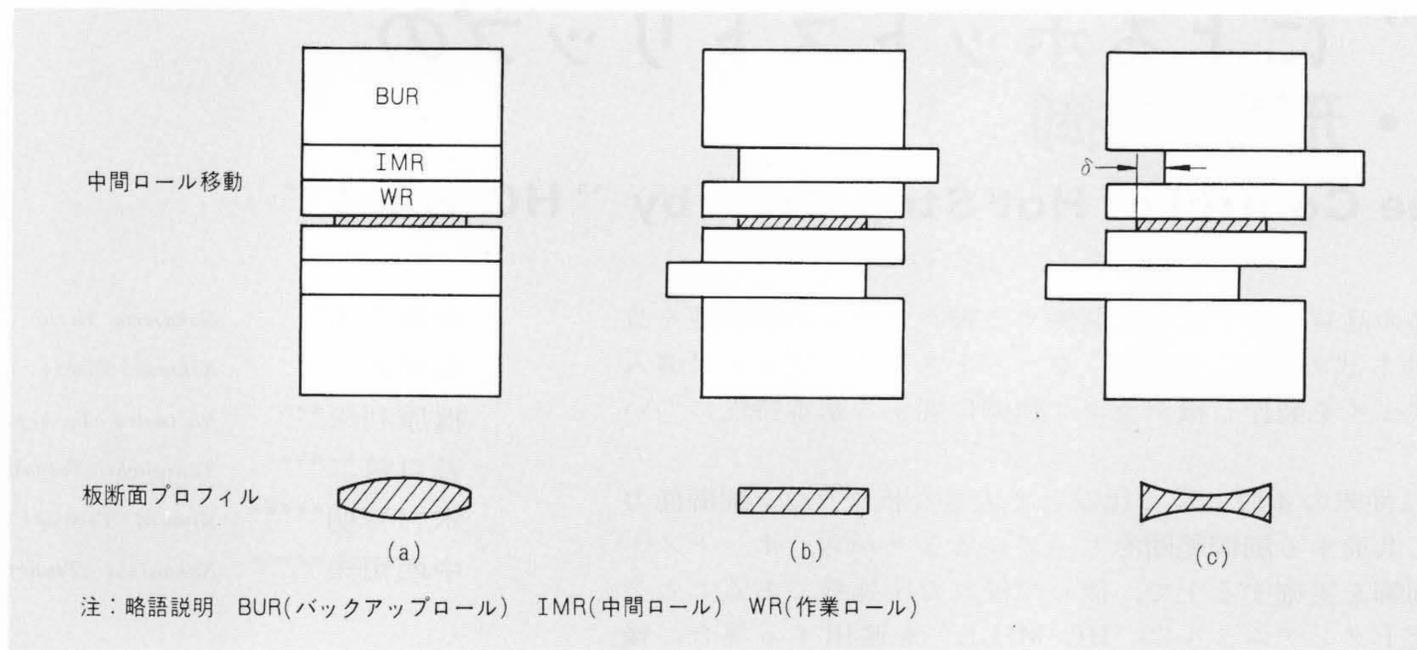


図2 “HC-MILL” の中間ロール移動と板断面プロフィールの変化 中間ロールを移動することにより、凸状から平坦、凹状までの広範囲な板クラウン制御が可能である。

が望ましい。また、冷間圧延に回されるものでは同図に示す例のようにプラスの板クラウンをもっていることが望まれる場合が多い。いずれの場合にも所望の板クラウンに制御できれば問題はないが、現状の4段ミルで構成されるホットストリップミルでは、その制御能力が不足しており、同図に示すようにロール組替サイクル中に約90 $\mu$ 程度の変化を生じさせる。この板クラウン変化を少なくするために、タンデムミルの各スタンドへの荷重配分適正化、あるいは圧延前にあらかじめロールを予熱するなどの改善法<sup>1)</sup>が取られているが、これによる効果は同図中の点線で示すように極めて小さく、抜本的な改善策が望まれている。

### 3 新ホットストリップミルの板クラウン制御機能

ロール組替サイクル内で、あらゆる場合に所望の板クラウンを得るホットストリップミルの機能としては、板クラウン変化を生じさせる次の二つの要因を十分克服できることが必要である。

- (1) ロール組替サイクル内で発生するサーマルクラウン及び摩耗によるロールプロフィール変化を補償できること。
- (2) 圧延条件、特に板幅変化によるロールたわみ変形の影響を補償できること。

以上の要求にこたえるため、ホットストリップミルに中間ロール移動方式の“HC-MILL”を導入するものである。この“HC-MILL”は、図2に示すように中間ロールの移動により、作業ロールのたわみ変形を一般に凸状から凹状まで変化させることができる。このため、圧延後の板断面プロフィールもこれに相当する断面となり、広範囲の板クラウン制御が可能である。これに対し、従来のホットストリップミルを構成する4段ミルは、同図(a)の中間ロール移動がない場合に相当し、このままでは制御能力をもたない。したがって、サーマルクラウン、板幅変動により板クラウンが大幅に変動する。4段ミルに板クラウン制御機能をもたせる手段として作業ロールベンダが用いられるが、その能力は小さく制御効果はあまり期待できない<sup>1)</sup>。これに対し“HC-MILL”は、中間ロールの移動により、例えば同図(b)、(c)に示すようにベンダによる作業ロールの曲げ作用が4段ミルのように補強ロールに拘束されないから、その曲げ効果は板幅方向に深く浸透し、優れた板クラウン制御性を発揮する。

以上述べたように、“HC-MILL”は中間ロール移動自体の効果と拡大された作業ロールベンダの曲げ効果の二つの機

能により、従来4段ミルに比較し極めて大きな板クラウン制御能力をもっていることが予想される。また、中間ロールの端部を板幅端位置にほぼ一致させた場合は、同図(b)に示すように板クラウンはゼロに近いものが得られる。この特性は、通常圧延される各種板幅に対しほぼ一様に得られる。すなわち、中間ロール移動によりすべての板幅に対しゼロ基準が存在することになり、板クラウン制御が極めて容易となる。以上述べたように、“HC-MILL”は新ホットストリップミルに要求される前述の二つの条件を十分満足できるものと考えられるので、実圧延によって確認するため、試験ミルを製作し、板クラウン制御に関する基本特性について検討を行な

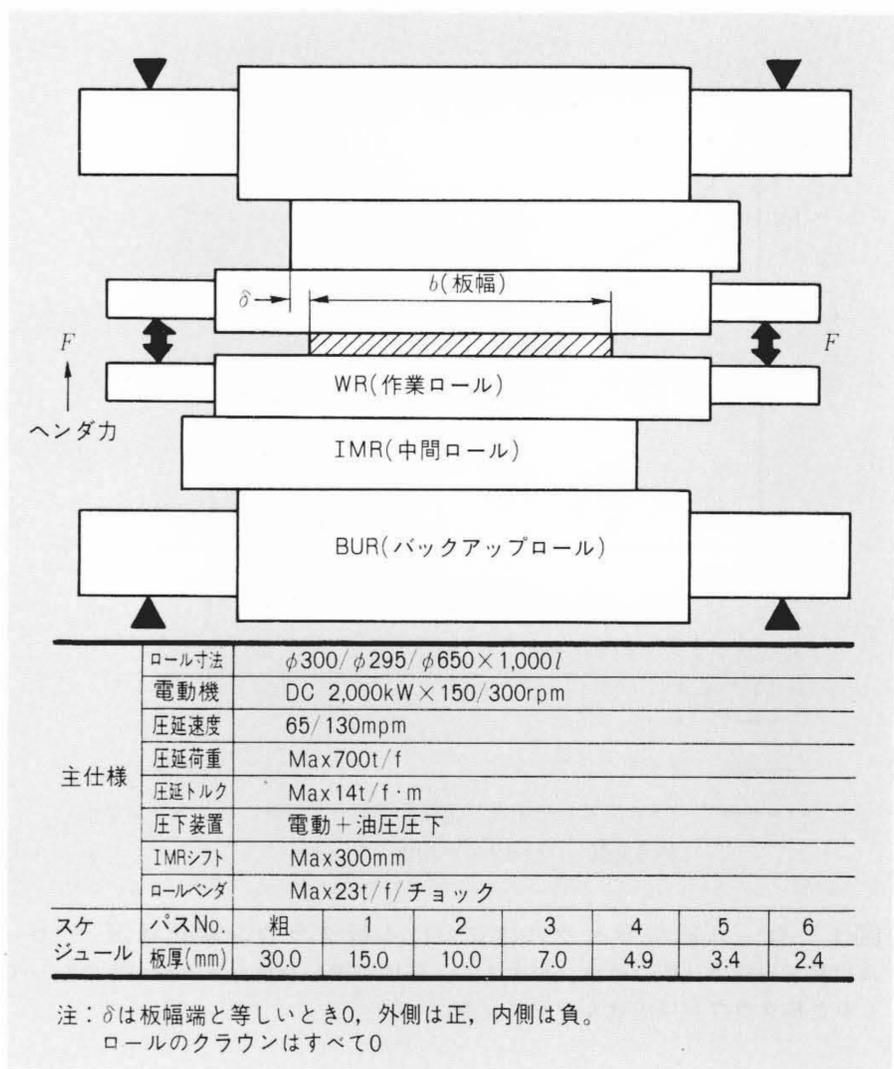


図3 試験ミルの基本構造及び主仕様 試験ミルは、実機ホットストリップで最も多く扱われる900mm板幅までの圧延が可能である。また、圧延パススケジュールは実機と同じである。

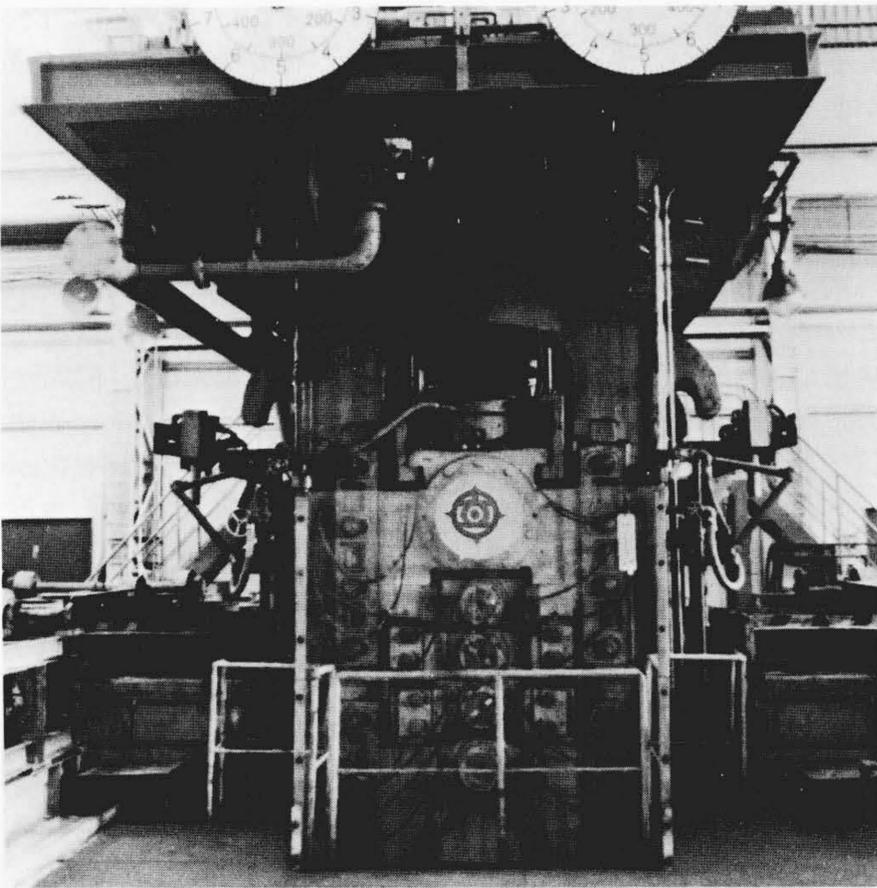


図4 試験ミルの全景 圧延機の前後にローラテーブルがあり、右側にある加熱炉から素材を搬送してくる。

の全景を図4に示す。この試験ミルは可逆圧延が可能で、図3の圧下スケジュールに従い、実際の操業に近い状態となるように圧延を行なった。圧延素材は加熱炉で1,200°Cに加熱し、圧延は板厚に応じ1,100~800°Cで行なった。板幅は400mm, 600mm, 800mmの3水準とした。この試験圧延により得られた板クラウン制御実験結果の一例を図5に示す。 $\delta$ は図3に示すように板幅端を基準とする中間ロールの位置で、前述図2の中間ロール位置(a), (b), (c)に対応させ圧延を行なったものである。 $\delta = +150$ は中間ロールを補強ロール端に一致させた場合で、従来4段ミルに近い状態での圧延である。この場合は凸状板クラウンとなり、ペンダ力( $F$ )を5 t/fから23 t/fまで変化させてもそれによる制御効果は少ない。中間ロールを移動させた場合は $\delta = 0$ でほぼ平坦に近い板クラウンが、 $\delta = -100$ の場合は凹状の板クラウンが、前述図2で予想したとおりの結果が得られた。

図6にこの試験ミルにより板厚及び板幅を変えた場合に得られた板クラウン制御特性を示す。横軸 $\delta$ の正側での最大の位置が、従来4段ミルに相当する。同図中にはこの研究で著者らが開発した理論解析法<sup>2)</sup>により得られた結果も比較のため点線で示した。この理論解析法については説明を省くが、実験との対比ではほぼ一致した結果が得られた。板クラウンがゼロとなる $\delta$ の位置は幾分負側に存在しているが、この実験の範囲では、すべての条件に対し板クラウンをゼロにする圧延機側の設定条件が存在することが分かる。同図から板クラウン制御範囲を整理し求めた結果を図7に示す。同図から“HC-MILL”は従来4段ミルに対し格段に広い制御範囲をもっていること、また板幅・板厚が変わっても、共通する板クラウン制御範囲をもっていることから、板クラウン制御用圧延機とし極めて優れていることが分かる。

った。

#### 4 試験ミルによる板クラウンの制御特性

板クラウン制御特性を確認するために製作した“HC-MILL”の基本構造、及び仕様と標準圧延スケジュールを図3に、そ

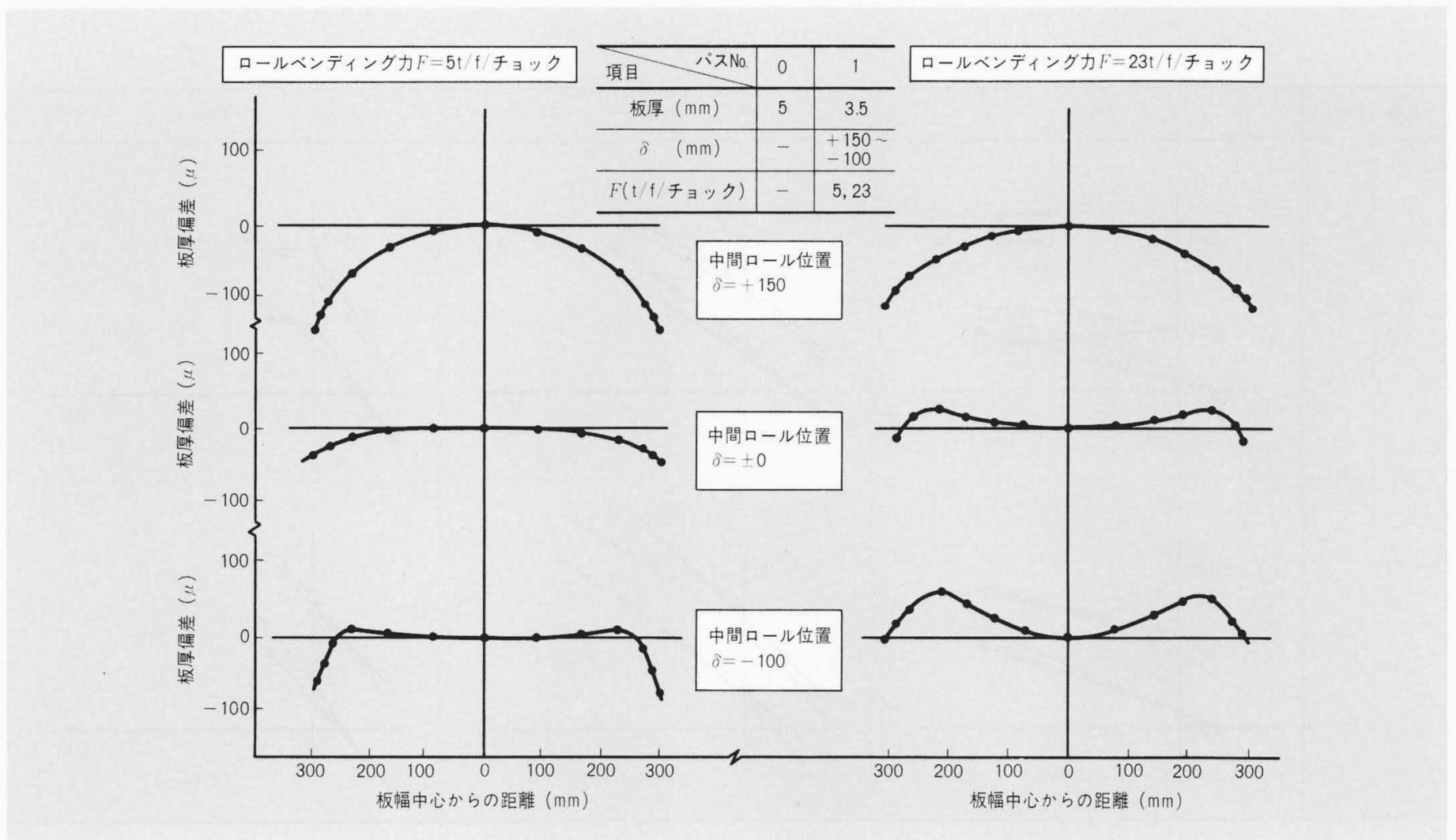


図5 “HC-MILL”の中間ロール移動と板断面プロフィール(板幅600mm) 中間ロール移動量( $\delta$ )、ロールペンダ力( $F$ )の効果により、“HC-MILL”では凸状から凹状までの板断面プロフィールが得られる。

5 実機への“HC-MILL”適用シミュレーション検討

前章では“HC-MILL”による板クラウン制御特性が優れていることを明らかにしたが、この圧延機を実機ホットストリップ仕上タンデムミルに適用する場合について、シミュレーションにより検討を行なった結果について述べる。タンデムミルのスタンド数は7台、圧延機の仕様及び圧延パススケジュールは代表例として表1に示すものを用いた。なお、7台のスタンド中に従来の4段ミルも配置する場合の仕様は同表中の中間ロール(IMR)がない場合に相当する。

しかし、ホットストリップ仕上タンデムミルで板クラウン制御を実施する場合には、形状変化との関係で次のような問題が生ずる。すなわち、

- (1) 板クラウンを変化させた場合、通常形状変化も派生するが、これはどの程度であろうか。
- (2) 形状変化との関係で、板クラウン制御はタンデムミルのどのスタンドで制御すべきであろうか。また、板クラウン制御用として“HC-MILL”は何台必要であろうか。

以上の問題を明らかにするには、板クラウン変化と形状変化の関係を明確にする必要があり、次にこの関係について述べる。

図8(a)に示す圧延前後での板断面のプロファイルが全く相似に変形する場合、入側形状が平坦であれば出側でも平坦な形状が得られる。一般には板クラウンを変化させる場合、相似変化とはならず形状変化が生ずる。この関係を数式で表わせば次のようになる。

板クラウン比率, 圧延前:  $K_1 = C_H / H_c$ , ( $C_H = H_c - H_e$ )

圧延後:  $K_2 = C_h / h_c$ , ( $C_h = h_c - h_e$ )

板長手方向伸び率差, 圧延前:  $\epsilon_1 = \Delta L / L_c$ , ( $\Delta L = L_e - L_c$ )

圧延後:  $\epsilon_2 = \Delta l / l_c$ , ( $\Delta l = l_e - l_c$ )

とする。圧延前後の板断面プロファイル変形が相似であれば  $K_1 =$

$K_2$ (入側形状が平坦なら  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$ )となる。

相似変形でない場合は  $K_1 \neq K_2$  となり、伸び率差(形状変化)が生ずる。この場合での板クラウン比率変化分を  $\Delta K$ , 伸び率差変化分を  $\Delta \epsilon$  として、これの比を下式のように  $\xi$  とおく。

$\xi = \Delta \epsilon / \Delta K$ , ( $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$ ,  $\Delta K = \Delta K_2 - K_1$ )

$\xi$  は板クラウン比率を変化させた場合に形状として生ずる分の割合を示す量で、これを形状変化係数と呼ぶことにする。この  $\xi$  を実験により求めた結果を図8に示す。横軸には次元解析により得られた幾何学パラメータ  $\gamma$  を用いた<sup>3)</sup>。同図から定性的には  $h/b$  が小さいほど  $\xi$  が大きく形状が変化しやすいこと、また  $h/b$  が大きいほど  $\xi$  は小さいので、形状変化が生じにくいことが分かる。次に、タンデムミルでの板クラウン制御過程の現象を明確にするため、前記  $\xi$  を使っての解析法について述べる。この解析を行なうには、図9に示す座標系を使用するのが便利である。この座標系は、横軸に板クラウン比率  $K$ , 縦軸に形状  $\epsilon$  をとっているのので、同図での  $\epsilon/k$  のこう配は  $\xi$  となる。したがって、 $\xi = 1$  の線は45度の線で表わされ、 $\xi = 0$  は横軸上の線となる。一般に  $\xi$  は図8から  $0 \leq \xi < 1$  の間に存在する。同図で板クラウン比率と形状の関係は、ベクトル線図法により容易に解析することができる。入側の板の状態がA点に示されるように形状  $\epsilon_1$  をもっている場合、板が圧延ロールに近づくと形状は近似的に  $\xi = 1$  の線に沿って平坦に矯正されるものと考えられる。その後この戻された点A'から所期の板クラウン比率変化  $\Delta K$  が生ずるまで圧延されるものとする。したがって、同図の入側の状態A点から  $\xi = 1$  に平行な線を引き、横軸との交点A'を、次いでこの圧延条件に相当する  $\xi$  を図8から求め、前記A'点から  $\xi$  のこう配の線を引き、A点から  $\Delta K$  だけ変化した点Bを求めれば、この点が圧延後の状態を示すものとなる。

タンデムミルの板クラウン制御でも、この方法に従い前方

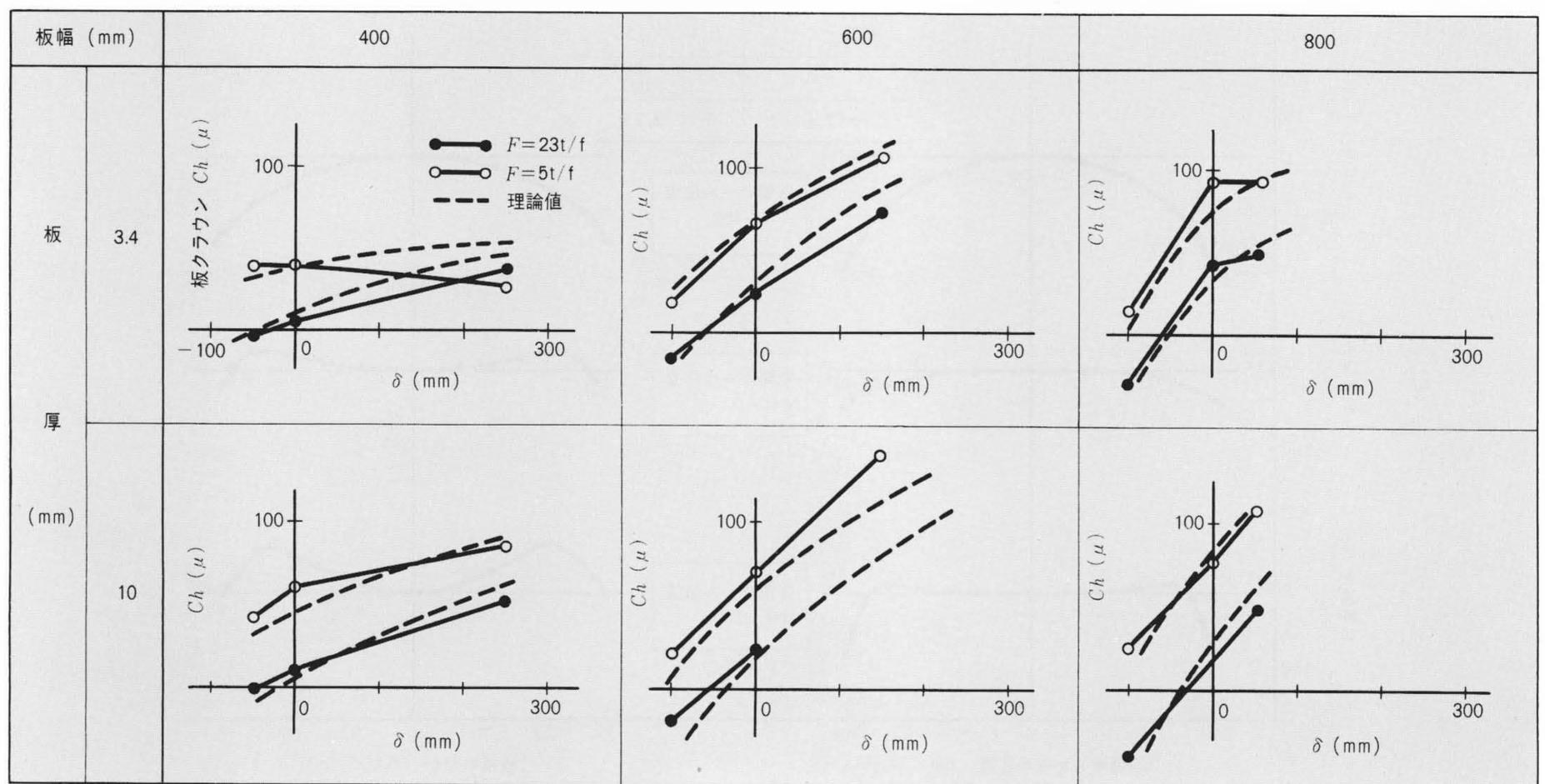


図6 試験ミルによる板クラウン制御特性 δにより板クラウンは大きく変化させ得ることが分かる。従来、4段ミルではこの図のδが最大の位置でFの効果だけにより板クラウン制御を行なうが、これの効果は少ない。なお、板クラウンは板幅端25mmを基準に測定した値である。

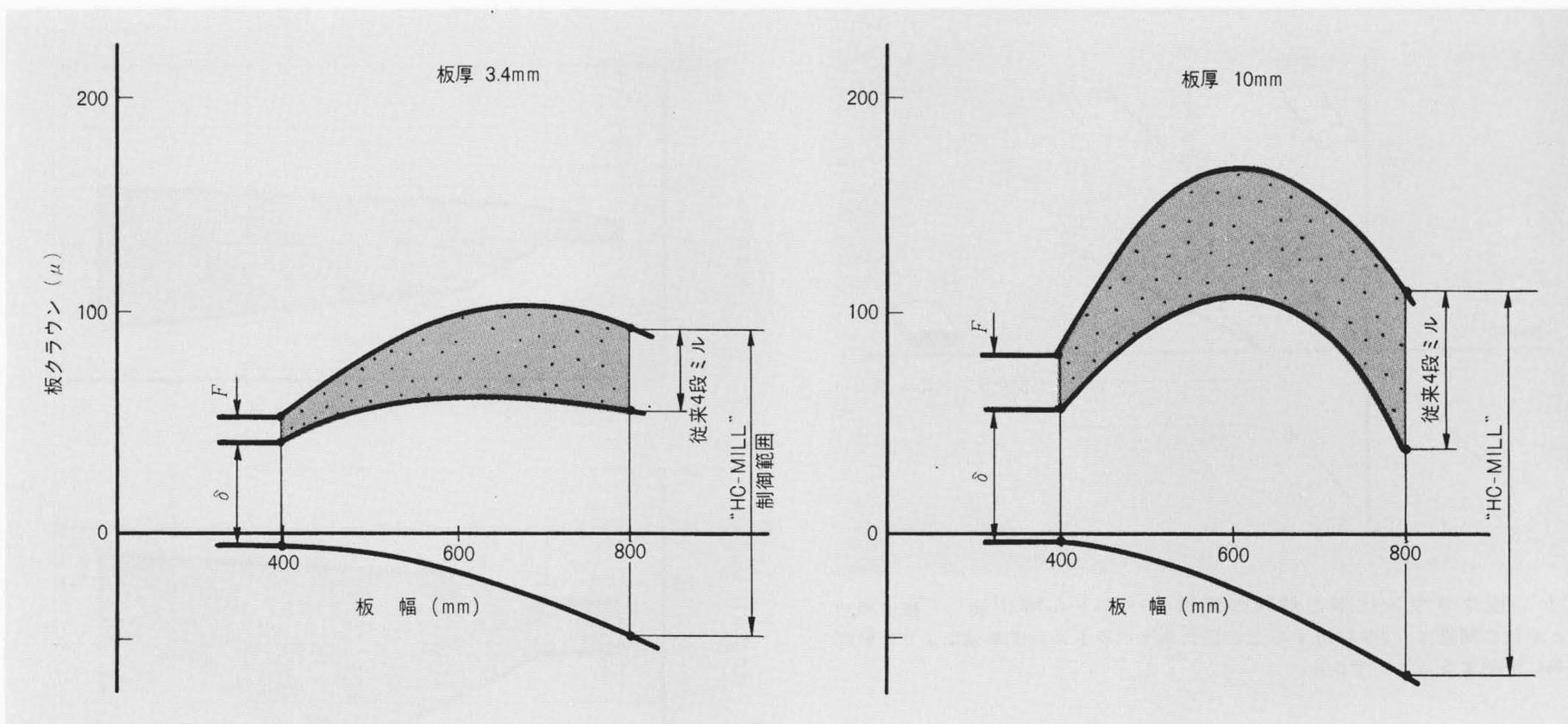


図7 “HC-MILL”と従来の4段ミルの板クラウン制御範囲比較 “HC-MILL”は従来の4段ミルに対し格段に広い板クラウン制御範囲と、板厚・板幅が変わっても共通する制御範囲をもっていることから、板クラウン制御用圧延機として極めて優れている。

スタンドから順次作図をしていけば、最終スタンド出側までの板クラウン比率及び形状の変化を容易に解析することができる。

実際のタンデムミルでの板クラウン制御を実施する場合には、円滑な操業という観点から次に述べるような形状に関する制御条件を考慮しなければならない。

(1) 最終スタンド出側では形状が平坦であること。

表1 仕上タンデムミル板クラウンシミュレーション用圧延機仕様と圧延パススケジュール 7スタンドホットタンデムストリップミルの例をとり、また、圧延パススケジュールは従来実機での代表例を用い、板クラウン制御の理論シミュレーションを行なった。

(a) 圧延機仕様

	BUR	IMR	WR
ロール径 (mm)	1,520	760	760
ロール胴長 (mm)	2,286	2,286	2,286
ショック間距離 (mm)	3,250	3,250	3,250
ロールベンダ (t/f/ショック)	—	—	0~150
ロールシフト (mm)	—	0~800	—

(b) 圧延パススケジュール

項目	スタンドNo.	粗仕上	スタンド						
			1	2	3	4	5	6	7
板厚 (mm)		32.7*	19.79	12.67	8.52	6.32	4.81	3.90	3.50
圧延速度 (mpm)		—	130	203	302	407	535	660	735
圧延荷重 (t/f/m)**		—	1,116	1,154	1,120	891	892	742	377
WR クラウン (μ)	4H	—	-228	392	368	202	242	158	12
	HC	—	-662	-62	-1	-79	0	-12	-130

注：\* 母材クラウン  $Ch_0 = 300\mu$

\*\* 1m幅当たりの荷重で各種板幅の荷重は比例計算で算出し使用する。

(2) 途中のスタンド間でも通板上、形状の悪化は許容限度内であること。

ここでは(2)の条件に対し急峻度は2.5%以下に制限した。以上の条件を基にしてタンデムミルでの板クラウン制御を考えると、板厚が薄い状態で板クラウン比率を変えるのは、図8のξが大きいことから不利なことが分かる。したがって、板クラウン制御は板厚が比較的大きな時点で行なう必要がある。また、任意のスタンドで目標板クラウン比率に制御しても、以後のスタンドでこの目標値と異なる圧延が行なわれれば、この圧延での板クラウン比率になってしまい、更に次の圧延で目標板クラウン比率に戻そうとしてもξが大きくなり、形状の変化(悪化)が避けられなくなる。したがって、一度目標板クラウン比率に制御した後は、それ以降のスタンドでも目標板クラウン比率を保持するように圧延する必要がある。以上の理由から“HC-MILL”をホットタンデムミルに組み入

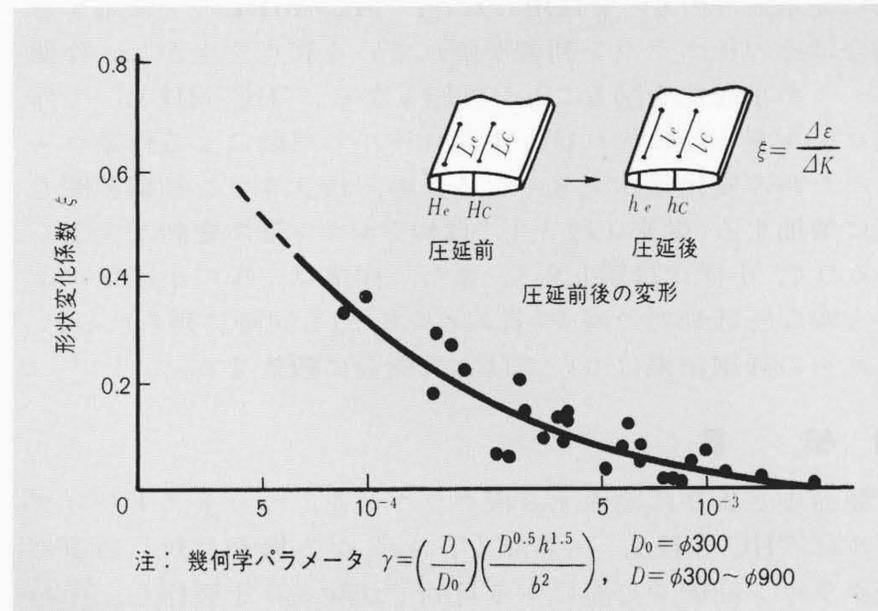


図8 形状変化係数ξ 板クラウン比率を変化させると形状変化も生ずるが、この割合はh/bが小さいほど大きい。すなわち、形状変化が大で、h/bが小さいと形状変化は少ない。

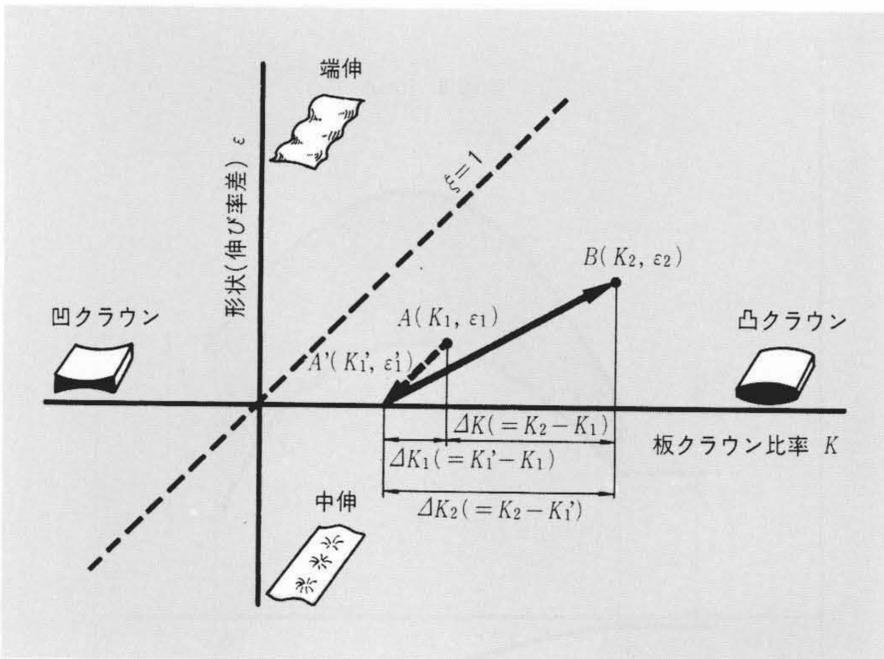


図9 板クラウン比率と形状の関係のベクトル解析法 板クラウンと形状の関係は、 $\epsilon$ を利用するこの図に示すベクトル線図解法により比較的容易に解析することができる。

れる場合は、最終のスタンドから前方に連続して必要な台数を配置することが必要である。図10にホットタンデムミル内への“HC-MILL”組込み台数と板クラウン制御範囲の関係を、3水準の板幅914mm, 1,257mm, 1,486mmについてシミュレーションにより求めた結果を示す。

図10から“HC-MILL”の台数が増加するに従い、板クラウン制御範囲が拡大されることが分かる。また、最終スタンドF7だけを“HC-MILL”としても、制御範囲は従来の全スタンド4段ミルの場合と変わらないこと、更に全スタンドに“HC-MILL”を配置しても、後段に3～4台配置した場合と効果はあまり変わらないことが分かる。板幅が914mm, 1,257mmのように狭い場合には、“HC-MILL”の原理からいっても板クラウン制御効果は十分発揮されるはずであるが、同図からも従来の全スタンド4段ミルの場合に比較し、格段に優れた制御効果が得られることが分かる。前述したように、現状のホットストリップミル製品の板クラウンの変化は、板幅変化が比較的少ない場合でも約90 $\mu$ 程度であり、更に大幅な板幅変化に対する補償が必要なことから、“HC-MILL”をホットストリップミルの後段に3～4台以上配置すれば十分制御可能なことが分かる。以上のシミュレーションでは、作業ロール径に従来並みのものを採用したが、“HC-MILL”を使用する場合はその板クラウン制御が優れている利点を生かし、作業ロールの小径化を図ることが可能となる。“HC-MILL”で作業ロールを小径にすれば、中間ロールの移動による作業ロールのたわみ変化量が大きくなるため、板クラウン制御範囲も更に増加する(従来4段ミルでは板クラウン量の変動が大きくなるので、小径化は難しい)。また、作業ロールの小径化により大幅な圧延動力の減少(省エネルギー)も同時に得られるが、これらの詳細結果については次の機会に報告する。

## 6 結 言

製品歩どまりに関係する板クラウンを、ホットストリップミルに“HC-MILL”を配置し、あらゆる場合に対し所望の板クラウン制御を可能にする目的で試験ミルを製作し、その基本特性について検討を行なった。この結果、“HC-MILL”の板クラウン制御性は従来の4段ミルに対し格段に広い制御範囲をもっていること、また各種板幅に対し共通する制御範

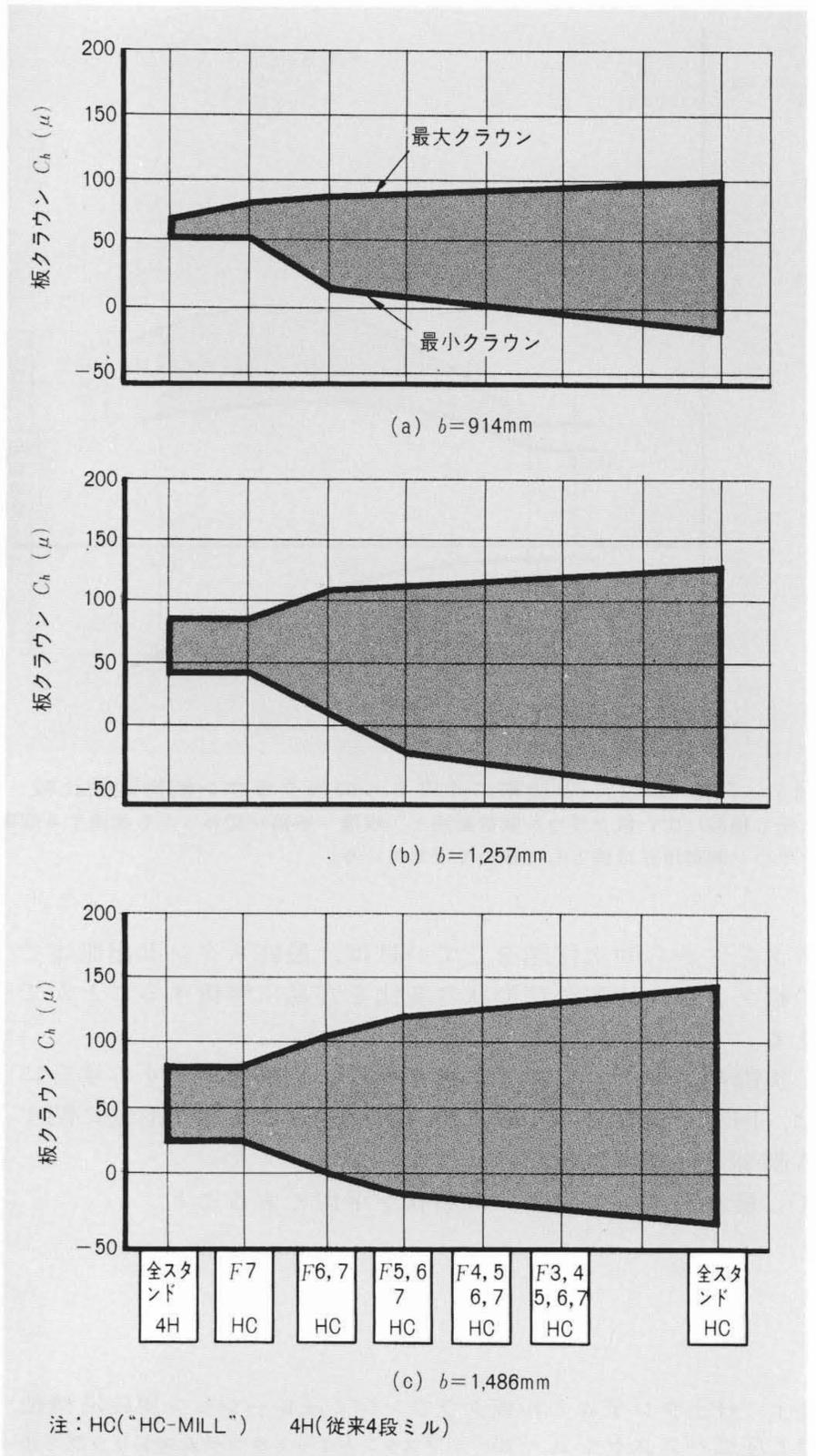


図10 “HC-MILL”適用スタンド数と板クラウン制御範囲( $h=3.5\text{mm}$ ) “HC-MILL”をタンデムミルの後段に3～4台以上設置すれば、実機で必要とされる板クラウン制御が十分可能である。

囲をもっていることから、ホットストリップミルでの板クラウン制御に対し極めて優れていることが分かった。また、ホットタンデムミルで所望の板クラウン制御を行なうには、後段側に“HC-MILL”を3～4台以上連続して配置すればこれが可能なことが分かった。

終わりに、新日本製鐵株式会社と日立製作所が共同で行なったこの研究に対し、多大の御指導、御協力をいただいた多くの関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

## 参考文献

- 1) 新日本製鐵株式会社：日本鉄鋼協会第90回講演大会講演論文集, No. 199～201 (昭50-10)
- 2) 中島, ほか8名：昭和54年度塑性加工春季講演会, ホットストリップのクラウン・形状制御法に関する研究, 第1～4報, 320～323 (昭54-5)
- 3) 新日本製鐵株式会社・日立製作所：第62回圧延理論部会資料, No. 62-9 (昭54-3)