

日立新形圧延機 (HC-MILL) の特性	3
最近におけるコールド タンデム ミルの動向	9
圧延機油圧圧下系の応答	15
電気油圧サーボ弁を使用した油圧圧下装置 (HYROP-S) の開発	21
高速 2 スタンド タンデム冷間アルミニウム圧延設備	27
鋼片圧延設備の最近の動向	33

なお、一般論文中の本特集に関連するものとして次の 3 編があります。御参照ください。

1. 最近の熱間圧延機用ロール	73
2. 最近の冷間圧延機用ロール	79
3. 圧延機制御装置標準化シリーズ	85

日立新形圧延機 (HC-MILL) の特性

ストリップ ミルの代表的形式である 4H MILL は、圧延の基本特性を決定する作業ロール径と、圧延荷重を支える補強ロール径とをそれぞれ自由に選べる大きな特色をもち、製品の品質上重要な要素である形状の平たん度は、補強ロールのたわみ剛性によって大勢が決まるという認識があった。この認識が真実でないことに着目し、真に形状の平たん度を阻害している要因を突き止め、その合理的な解決法として開発されたのが日立製作所の HC-MILL である。本稿は、このミルの優れた諸特性のうち、形状の安定化及び修正能力がいかに画期的なものであるかを、理論計算と実験結果とに基づいてそれらの概要を紹介するものである。

最近におけるコールド タンデム ミルの動向

最近のコールド タンデム ミルに関し、その製作実績及び最新の技術開発の成果を基に、油圧圧下装置、板厚制御、形状制御、高速圧延、自動化、連続ミル及び計算機制御などの最新技術の現況と今後の見通しについて述べている。

圧延機油圧圧下系の応答

圧延機において板厚を一定に制御する場合、圧下系の応答を良くすることが第一に要求される。この目的に対し油圧サーボを使用した油圧圧下装置が近年使用されるに至っていることは周知である。しかし、十分な高応答性を得るには各制御要素についての十分な検討が必要であり、現状においては必ずしも満足すべき応答が安定良く得られているとは言いにくい。そこで今回は、油圧サーボ弁を BISRA・AGC 系 (ロールギャップを圧延力に無関係に一定に保つことを特長とする、Automatic Gauge Control) に適用した場合の応答性について詳細に検討し、高応答を得る方策を求めようとした。

まず、ロール ギャップの設定時において問題になる位置サーボ系の応答に及ぼす諸因子の影響を明らかにし、BISRA 系との関係を解明した。

BISRA 系により見かけ上ミルの剛性をあげるに従ってロール偏心の影響が大きくなることは周知の事実である。従来もこれを除去するために種々の方法が発表されているが、今回は日立製作所が新しく開発した相関関数を用いる方法について紹介する。

電気油圧サーボ弁を使用した油圧圧下装置 (HYROP-S) の開発

電気油圧サーボ弁と、圧下シリンダ内に設置された位置検出器とを組み合わせ、新方式の油圧圧下装置 HYROP-S を開発して、住友軽金属工業株式会社に納入した。

本機は、昭和48年11月より運転に入り、現在順調に稼動中である。この HYROP-S は、応答性能に優れており、周波数応答において、90度位相遅れ周波数15Hz 以上の性能をもっている。なお、現在、四重アルミ圧延機用 HYROP-S を 1 セット製作中である。

以下、HYROP-S の位置検出位置、原理、理論解析、特長、応答性能などについて、その概要を紹介する。

高速 2 スタンド タンデム冷間アルミニウム圧延設備

昭和48年に住友軽金属工業株式会社に建設された高速 2 スタンド タンデム アルミニウム圧延設備は、ユーザー及びメーカーの最新の技術を投入した新鋭設備で、カルーゼル式ペイオフ リールの使用による前処理の合理化、高性能油圧圧下装置 HYROP-S の採用、スタンド間ストリップ冷却による高速高压下実現の新機軸を折り込んだもので、本稿ではこれらの新技術について紹介している。

鋼片圧延設備の最近の動向

本稿は、このほど南アフリカ共和国の South African Iron and Steel Industrial Co., Ltd. に納入され、昭和49年4月20日の試圧延以後、順調に操業を続けている最新式鋼片圧延設備を中心に、最近における鋼片圧延設備の動向と新技術について紹介したものである。

日立新形圧延機(HC-MILL)の特性

Properties of Hitachi New Type Mill (HC-MILL)

As a typical strip mill, the 4H Mill (4 high mill) has such a significant feature that its work roll diameter which determines fundamental characteristics of rolling and back up roll diameter which provides roll separating force can be selected freely. And it has been generally understood that the flatness of strips by this mill is influenced largely by the rigidity for deflection of the back up roll. Disapproving this general notion the authors succeeded to locate causes that really deteriorate flatness of the strip. In Hitachi's new HC-Mill are incorporated several technical breakthroughs by the authors which have made it possible to achieve ideal strip flatness. This article introduces the outline of properties of this mill, and discusses its high shape control capability based on the results of theoretical analysis and experiments.

梶原利幸* *Toshiyuki Kajiwara*藤野伸弘* *Nobuhiro Fujino*西 英俊* *Hidetoshi Nishi*志田 茂** *Shigeru Shida*

1 緒 言

圧延製品の二大品質は、板厚精度とストリップの平坦度(形状)である。このうち、長手方向の板厚精度は、圧延荷重の変化によって生ずるロール間隙の変動を高性能の圧下装置、又はストリップ張力の制御によって抑える、いわゆる自動板厚制御(AGC)によって急速に向上し、現在ほぼ満足する段階にある。一方、板幅方向については、板幅方向の板厚精度と形状の問題がありこの両者は素材の状態と関連して密接な関係があるが、実際問題としては、形状が優先される⁽¹⁾。いずれにしても、良い形状の製品を圧延するためには、圧延荷重による作業ロールの板幅方向の変形が少なく、且つ必要に応じてその量を大きく制御できることが望ましい。従来までの圧延機は、この二つを満足するにはほど遠い状態であった。

圧延機の前形は 2H (2High) MILLである。しかしながら、2H MILLでは、圧延の基本特性を決定するロールと、圧延荷重に耐え得るロールが同一のものであるという点において根本的限界がある。すなわち、圧延特性上好ましいロール径は、耐負荷上の強度メンバーとして、更にはロールのたわみを抑える剛性メンバーとしては、必ずしも十分でないからである。

このようにして4H MILLが生まれた。4H MILLでは、圧延するロールと、負荷を受け持つロールが別々に選択できる自由度があり、この大きな機能のためストリップミルの代表的形式として永い間、ストリップミルの王座を占めてきた。そしてそのゆえに、作業ロールの数十倍の曲げ剛性を有する補強ロールは、荷重を支えるほかに、板幅方向のたわみ量を決定する最大の要素と考えられ、設備費を犠牲にして大径の補強ロールを用い、剛性を大きくすれば、良い形状の製品を圧延するのに極めて有効であると認識されていた。しかしこれは、作業ロールと補強ロールを正方形断面を有する重ねはりとして等価であると認識することから生ずる誤りであって、実際の圧延機では補強ロールと作業ロールは円柱同士の接触であり、この接触面ではかなりの接触変形が生じ、このために

作業ロール軸線のたわみは、補強ロール軸線のたわみに一致する傾向が薄れ、作業ロール自体の力学的関係によって定まることになる。この関係に着目して新形圧延機を創案し、厳密計算で確かめ、面長 400 mmの実機によってこれを確認することができた。日立新形圧延機HC-MILLは、上述の理念の正しさを証明するとともに、4H MILLで対応でき得なかった大幅な圧延条件の変化に対応して、優れた形状の圧延を可能にすることができた。このHC-MILLについては、形状問題のほか、いろいろな板幅方向の諸問題の改善、厳密な理論計算による大形機での特性の検討、実用上の問題点の解決などが進められたが、本稿では小形機における実験結果を主体に、ストリップ形状に関する機能についてその概略を述べる。

2 4H MILLの特性と限界

図1に示す4H MILLにおいて1.で述べた形状に対する補強ロールの役割は、現在では、電子計算機を用いた数値計算を、ここに焦点を当てて行なえば直ちに明白となるであろう。筆者らは既にその一例について発表⁽¹⁾したが、図2に示す実験結果は、約10年前に行なったもので測定自体厳密なものではないが、形状に対する補強ロールの役割を見直し、真の要因を突き止めるという意味で大きな意義があった。図2は、80in 4H MILLを用い、各種の幅を有する板材をロール間にかみどめし圧延荷重を同じ量だけ変化させて作業ロールの軸方向のたわみ変化を測定し、作業ロール胴長全長のクラウン量に換算してプロットしたものである。この結果、同じ圧延荷重変化に対する作業ロール軸方向のたわみは、板幅によって大幅に変化し、板幅がロール胴長に比べ狭いほど、作業ロールのたわみが大きくなることが分かる。ところで、作業ロールのたわみが補強ロールのたわみによって規定されるものであるとすれば、大きな曲げ剛性を有する補強ロールのたわみは、支点間距離約3,300mmに対し分布荷重の幅が1,800mmから800mmに変化してもせいぜい1割程度変化するに過ぎないので、数倍にも及ぶ作業ロールのたわみの変化は、補強ロー

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所

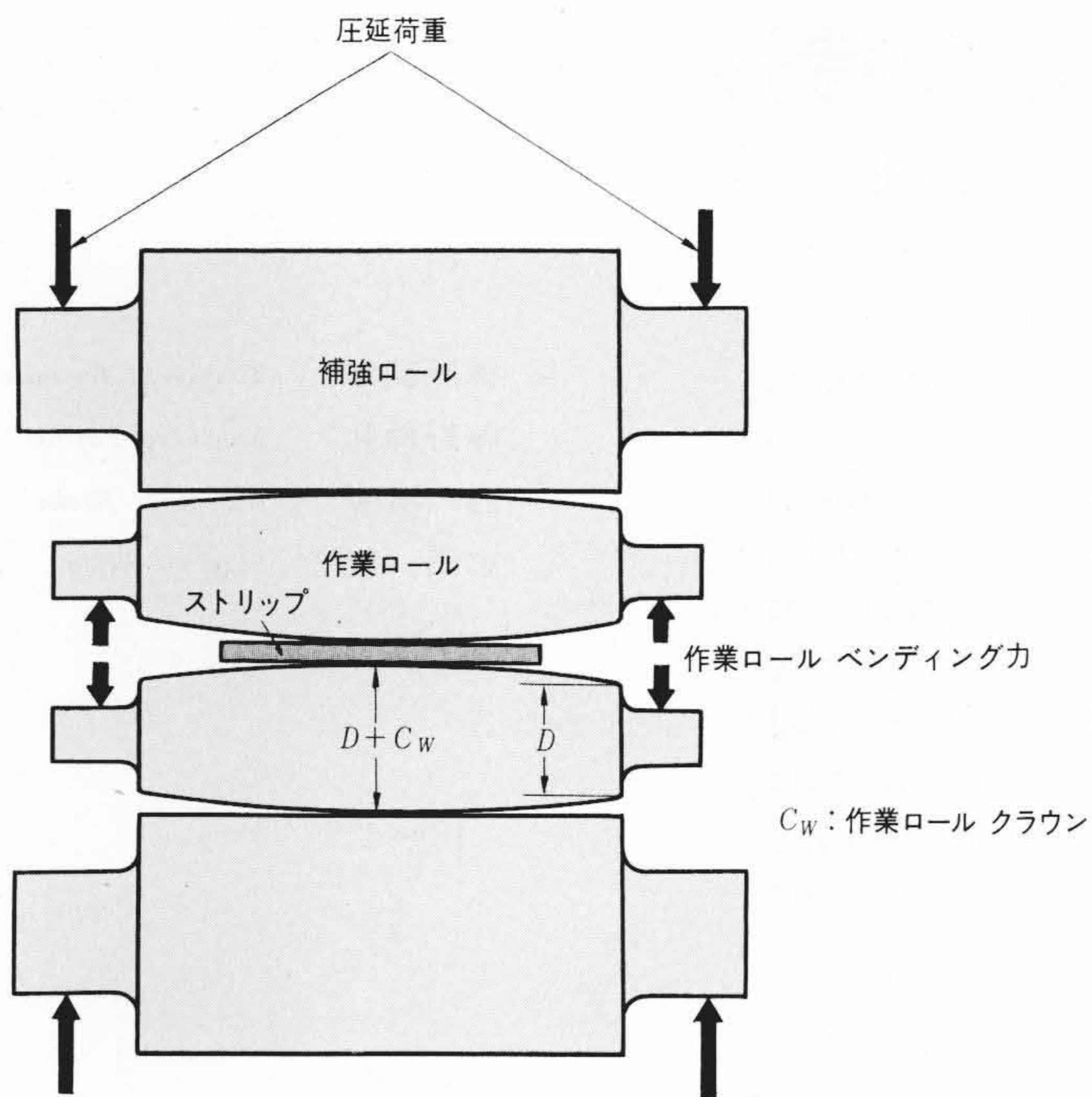


図1 4H MILL 4H MILLでは、作業ロールのクラウンや、ロール ベンディング力により形状制御が行なわれるが、これらの効果は非常に小さい。
Fig. 1 4High Mill with Crowned Work Roll and Work Roll Bending for Shape Control

ルのたわみとは無関係と考えざるを得ない。すなわち、作業ロールがたわむ原因は、両ロールの接触部における接触変形によるばね定数の低下によって、板幅より広い部分で作業ロールが補強ロールからスプリング的に曲げ力を与えられることによると見るのが妥当である。この現象のため、作業ロールのたわみも大きく、且つ板幅の変化によるたわみの変化も大で、更には、作業ロール ベンディングによる効果も減殺されることになる。

従って、実際の4H MILLの操業に当たっては、図1に示すように作業ロールのロール クラウンと作業ロール ベンディング法を併用しても、形状を平たんにできる圧延スケジュールの自由度は大幅に狭められ、且つ同じスケジュールでも熱的变化、圧延とともに変わるロールの表面状態などの変化に対しての追従が困難で不満足な製品の圧延が避けられない一方、板幅などの変化に対しては、何種類かのイニシャル クラウンのロールを必要とし、ロール組替頻度の増加や、予備ロール本数の増大が余儀なくされる。

3 HC-MILLの原理と構造

前述したように、4H MILLの作業ロールのたわみは、

- (1) ロール間接触部の剛性が低い。
- (2) 補強ロールの胴長が一定で、且つ圧延しているストリップ幅より広い。

以上二つの要因の併存によって生ずるものであるから、その中の少なくとも一要因を消滅できれば、作業ロールのたわみを大幅に小さくすることが可能である。ところで、ロールの接触部の剛性を飛躍的に増加することは不可能に近いが、補強ロールの有効長をストリップ幅に応じて調整することは不可能ではない。その具体的方法として創案されたのがHC-MILLであり、図3はその構造の一例を示すものである。す

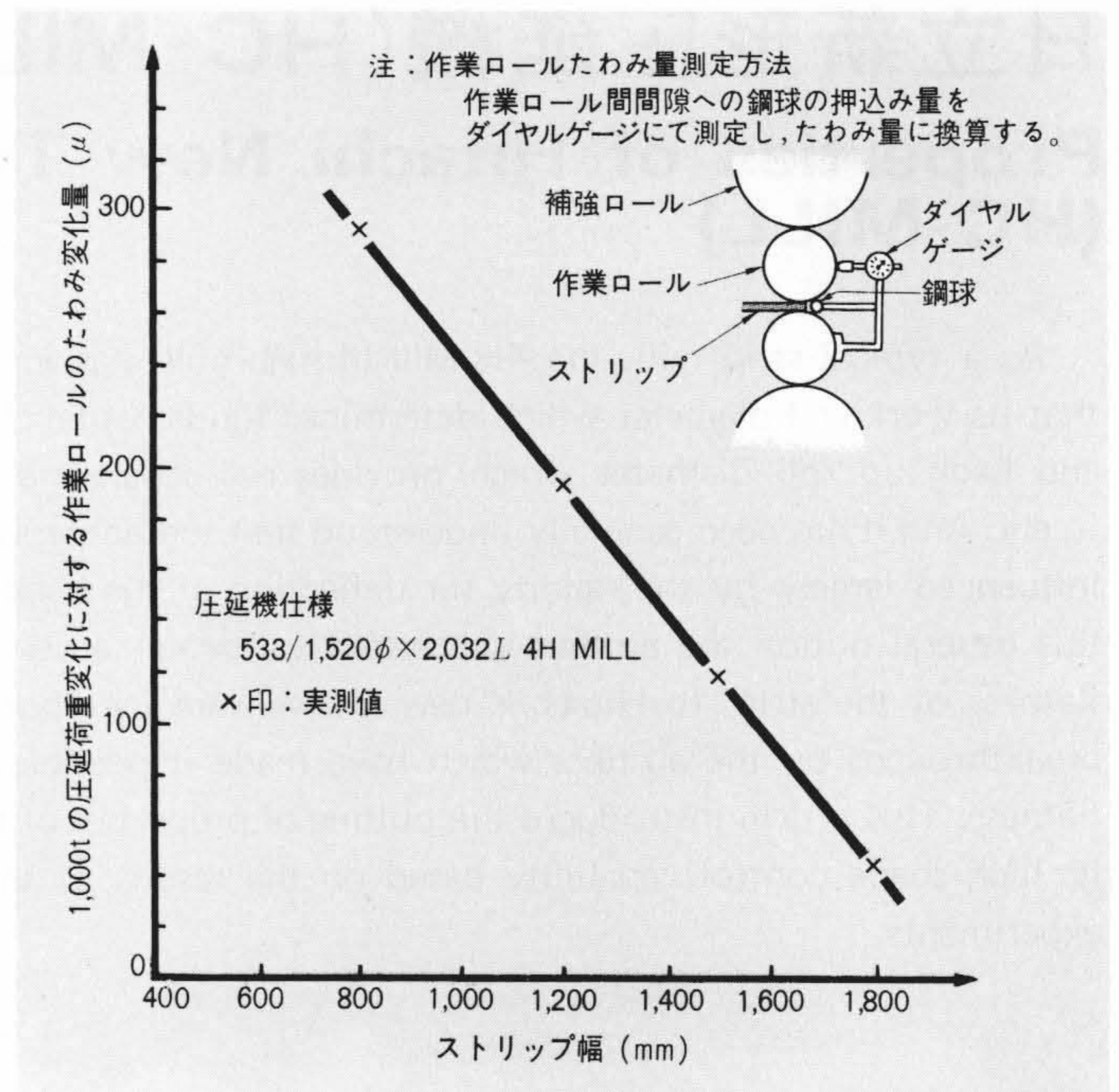


図2 作業ロールのたわみに及ぼすストリップ幅の影響(実測値) 作業ロールのたわみ量は、ストリップ幅によって大きく変化する。
Fig. 2 Effect of Strip Width on Deflection of Work Roll (Experimental Data)

なわち、上下とも作業ロールと補強ロールの間に中間ロールを設け、この中間ロールを軸方向に上下で逆方向に移動して、そのロール端部を板幅に応じて設定することができるようになっている。このようにして作業ロールが板幅より外側の補強ロール接触から断たれ、曲げモーメントの影響を受けず、且つ作業ロール ベンディングの効果を顕著にさせることが可能となる。この構造では、例えば図3の左側（操作側）について言えば、上作業ロールはその意図を達成しているが、下作業ロールについては接触部は、依然として存在している。しかし下ロールの左側では、荷重分布が小さいため接触部の曲げ効果が小さいこと、上ロールの効果が十分下ロールの曲げ作用を補い得ることなどが理論的にも実験的にも立証された。図3の右側（駆動側）については、左側と上下の関係が逆になるだけで同じ作用を持つ。

以上により、HC-MILLは、中間ロールの軸方向の位置により、圧延荷重による作業ロールのたわみを大幅に低減することができ、作業ロール ベンディングの効果を拡大させ、且つ中間ロールの位置を調整することによってもクラウン コントロールが可能になるなど、従来の4H MILLには見られない形状安定機能及び形状修正能力を併せ持つことになる。

4 HC-MILLの性能

4.1 実機による実験結果

図4、5は小形実機HC-MILLの全景及び正面を、また表1は、その主仕様を示すものである。

更に図6はこの実機により得られた実験結果を示すもので、板厚0.8mm、板幅150mm、200mm及び300mmのストリップを5~10%、20%及び30%の圧下率で圧延した際に、HC-MILLと従来形ミルとの各の形状制御能力の範囲内で得られる最も良好な形状のストリップの外観比較を行なったものである。

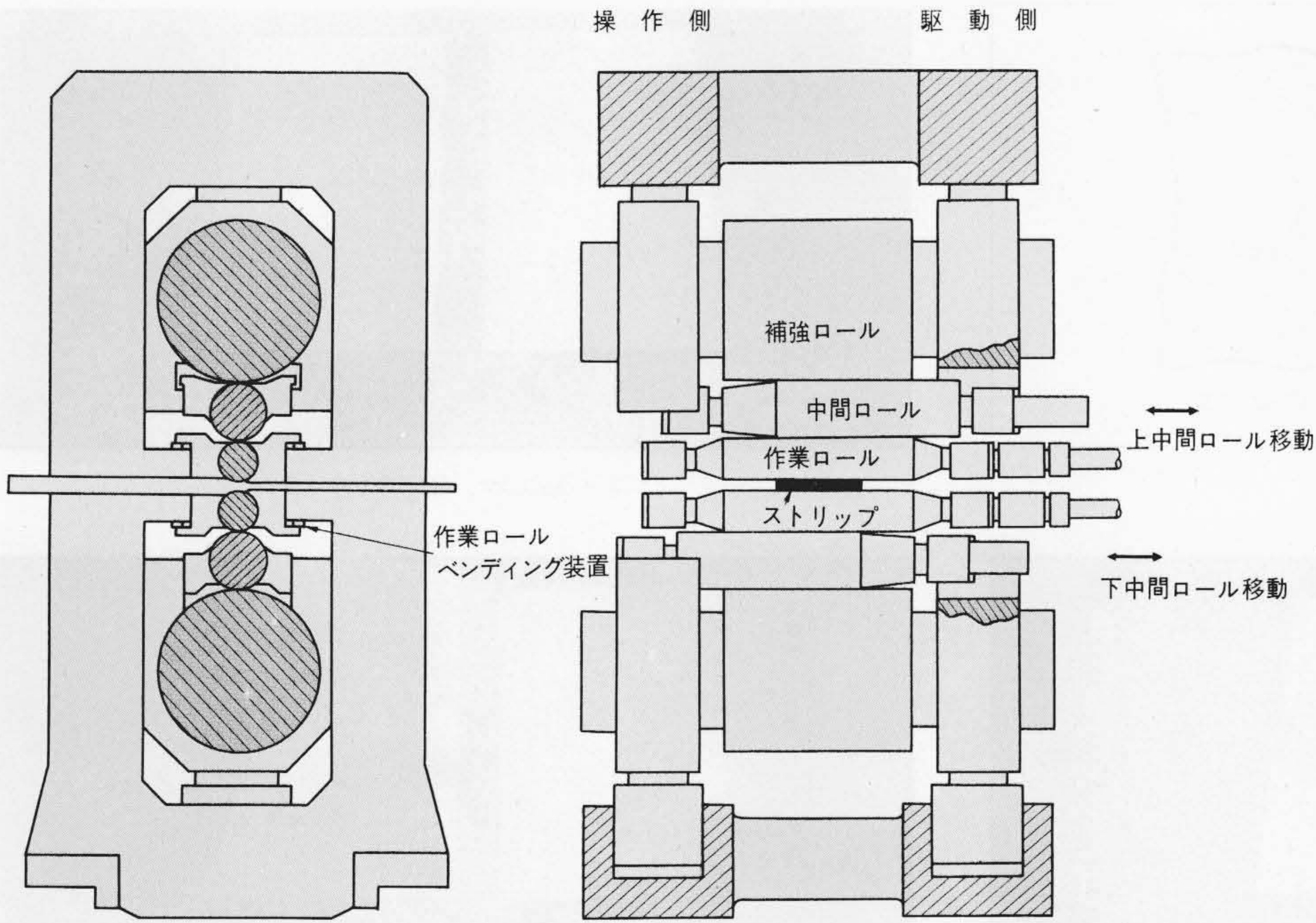


図3 HC-MILLの構造 HC-MILLでは、上下中間ロールが軸方向に移動可能となっており、また作業ロール ベンディング装置も設置されている。

Fig. 3 HC-MILL with Intermediate Roll Shift and Work Roll Bending

同図中、各写真の左側がHC-MILLによるもの、右側が従来形ミルによるものである。なおここで、本実験では両ミルの特性を同じ基準のもとで比較するため、作業ロールにはイニシャル クラウンのついていないフラット ロールを用いている。また後述するようにHC-MILLでは、中間ロールをロール同士が全幅接触する位置に設定すると、その特性が4H MILLの特性に似てくる（厳密には、4H MILLよりも多少

優れている。）ため、この中間ロール位置設定でのHC-MILLを従来形ミルとして取り扱った。

さて図6から明らかなように、従来形ミルではストリップ幅200mm、圧下率5%の条件下でのみ形状がほぼ平たん（正確にはやや端伸び）となっているのに対して、HC-MILLでは作業ロール イニシャル クラウンなしにもかかわらず、すべての条件下で常に形状が平たんとなり、HC-MILL

表1 小形実機HC-MILLの主仕様
本稿では作業ロール ベンディング力はすべて作業ロールの左右軸端に加わる力の合計値で表示している。

Table 1 Main Specifications of Test HC-MILL Shown on Fig. 4,5

項 目	仕 様
ロ ー ル 径	補強ロール 300φ
	中間ロール 130φ
	作業ロール 100φ
ロ ー ル 胴 長	400mm
中間ロール移動ストローク	上下各 155mm
主 電 動 機	DC 75kW 750/1,500rpm
最大圧延速度	190m/min
最大作業ロールベンディング力	左右合計 4t
最大圧延荷重	100t
油 圧 圧 下 (HYROP)	
最 大 張 力	1,500kg

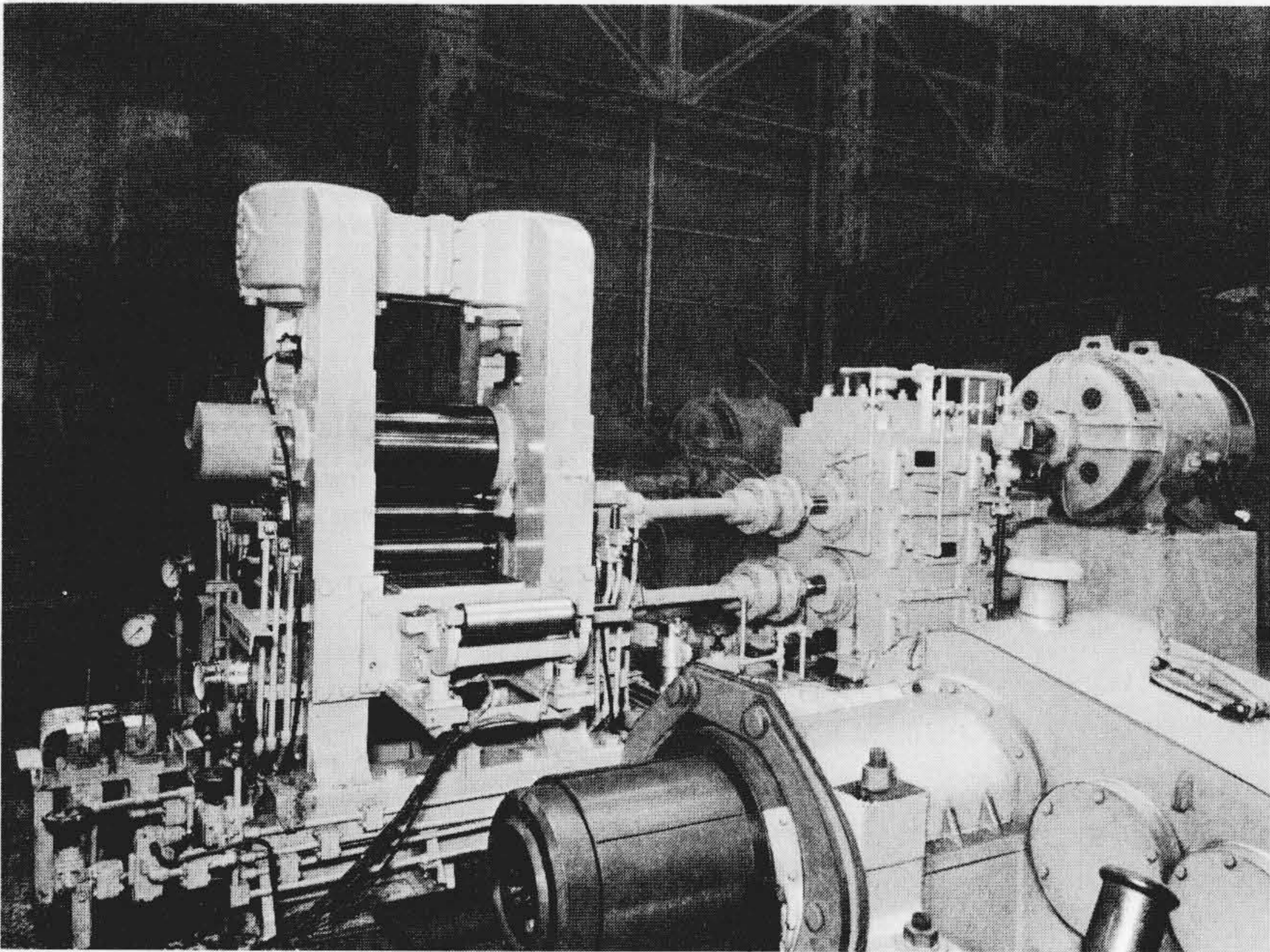


図4 小形実機HC-MILL ミル内部に上作業ロール、中間ロール及び補強ロールが見える。

Fig. 4 General View of HC-MILL

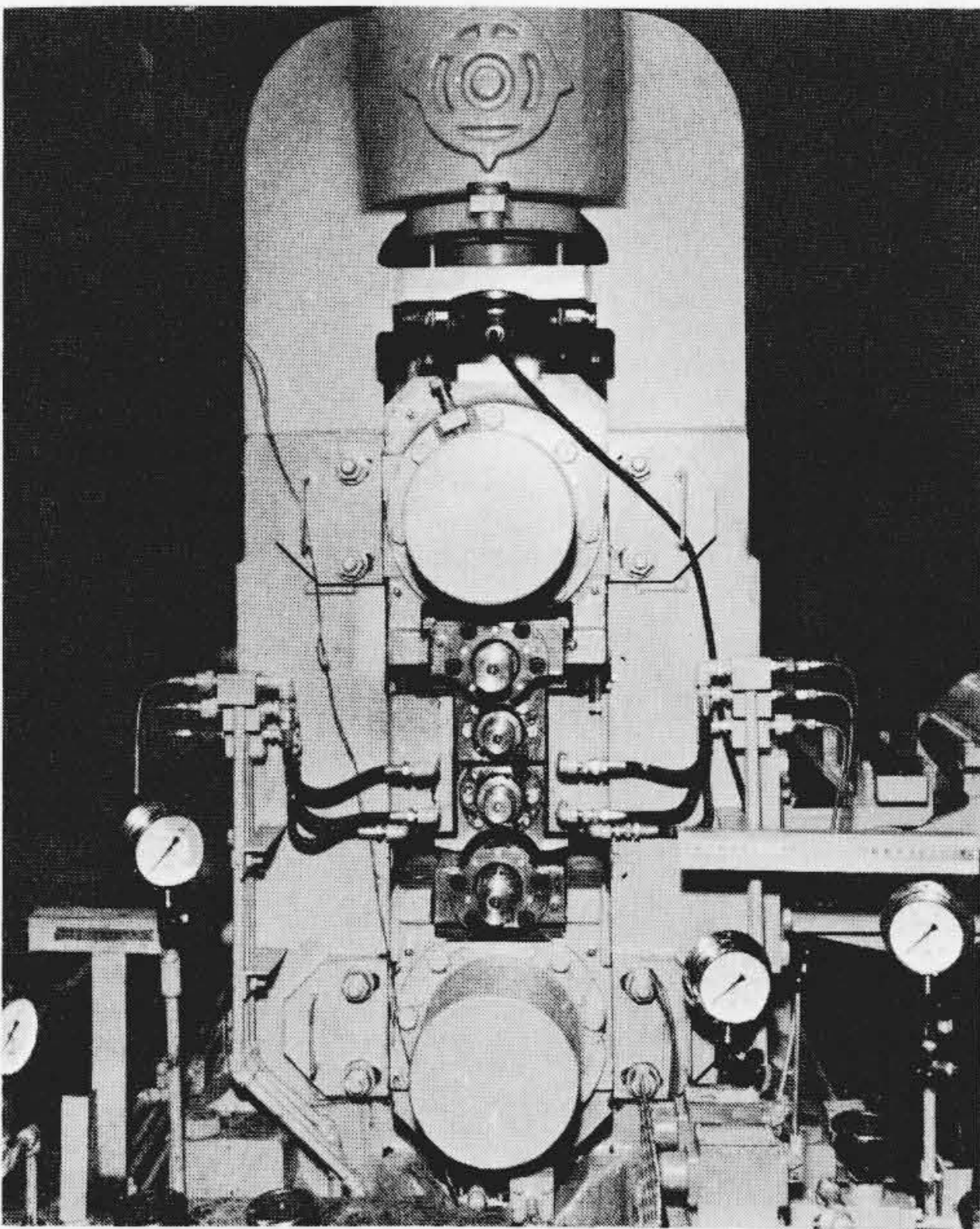
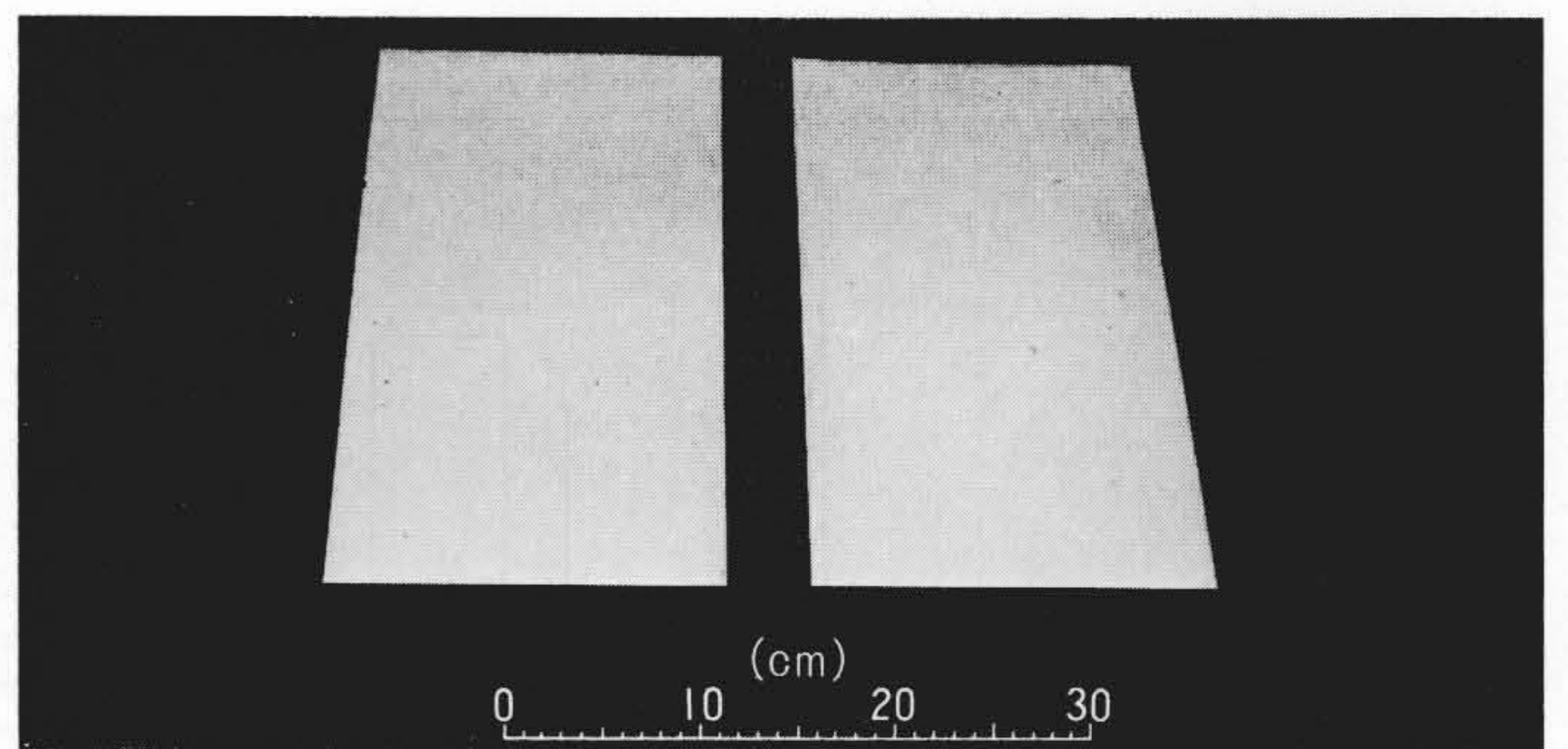
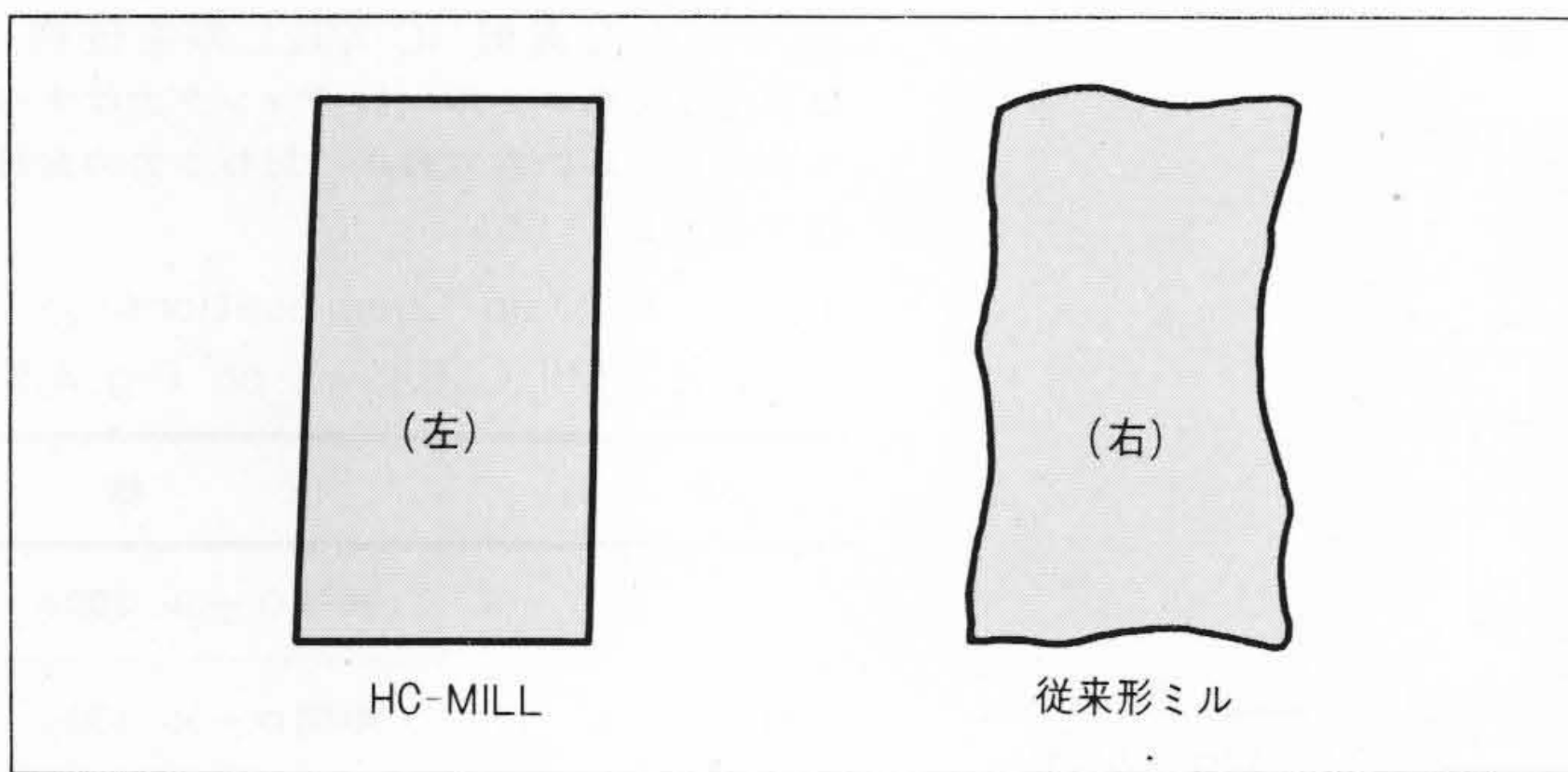
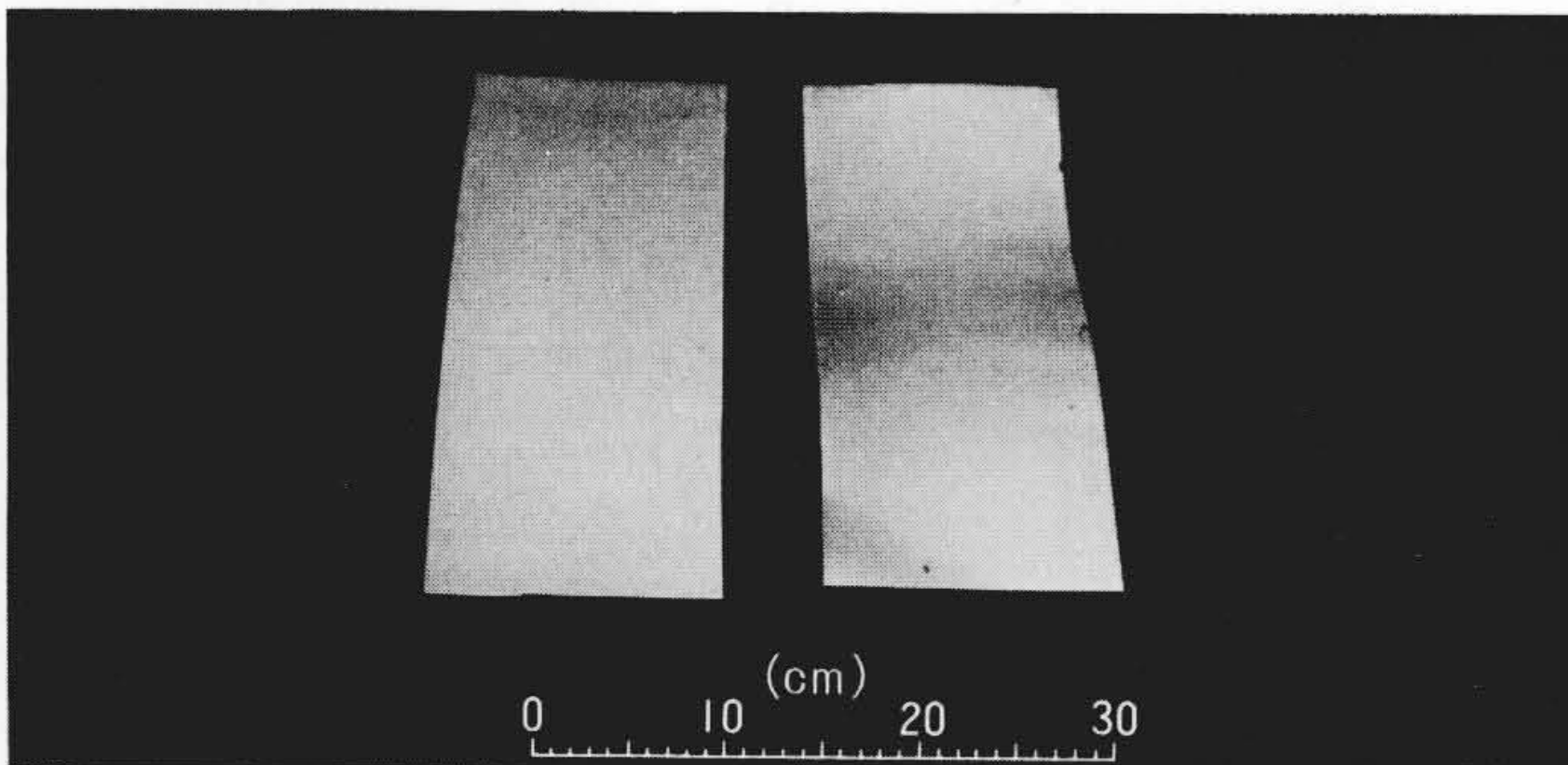
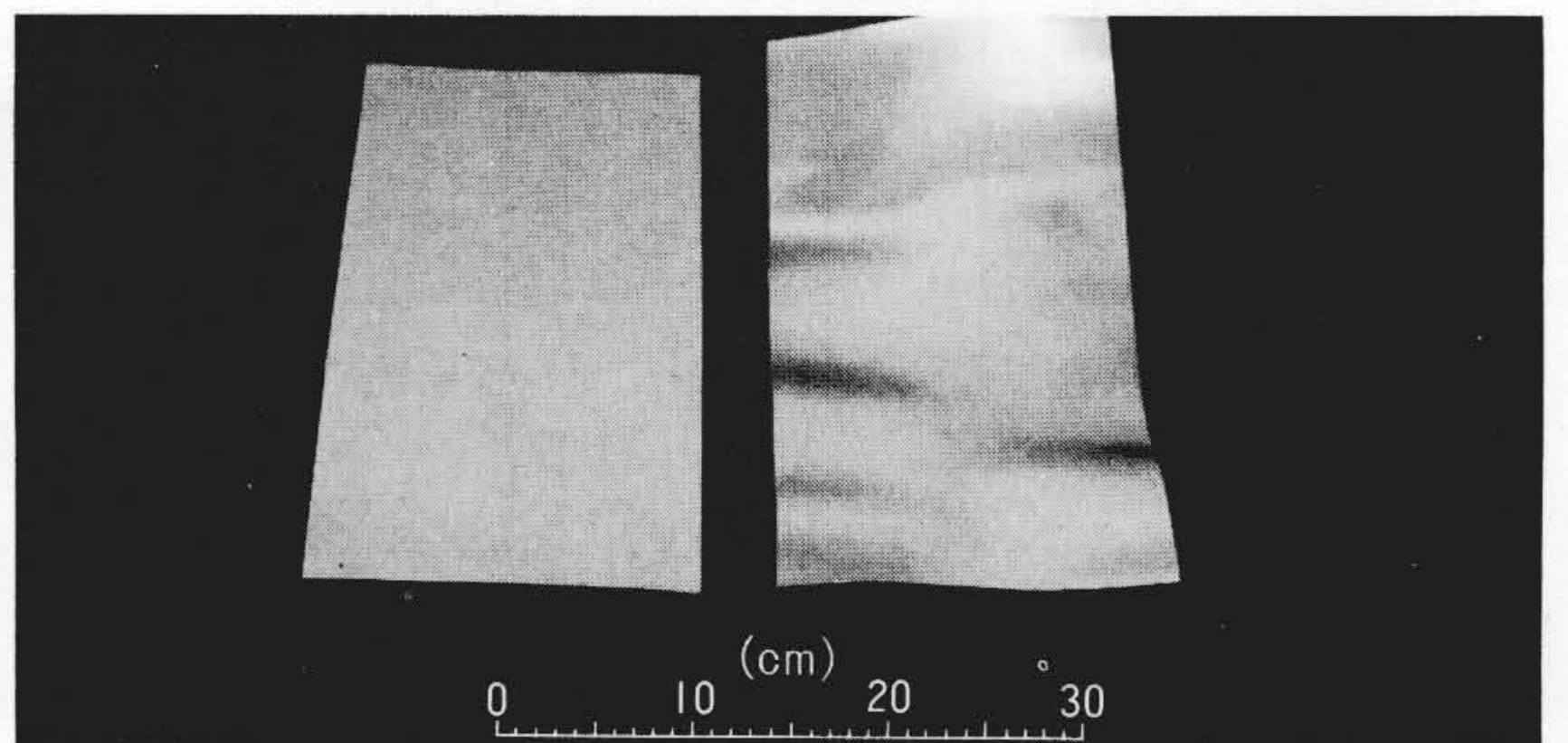
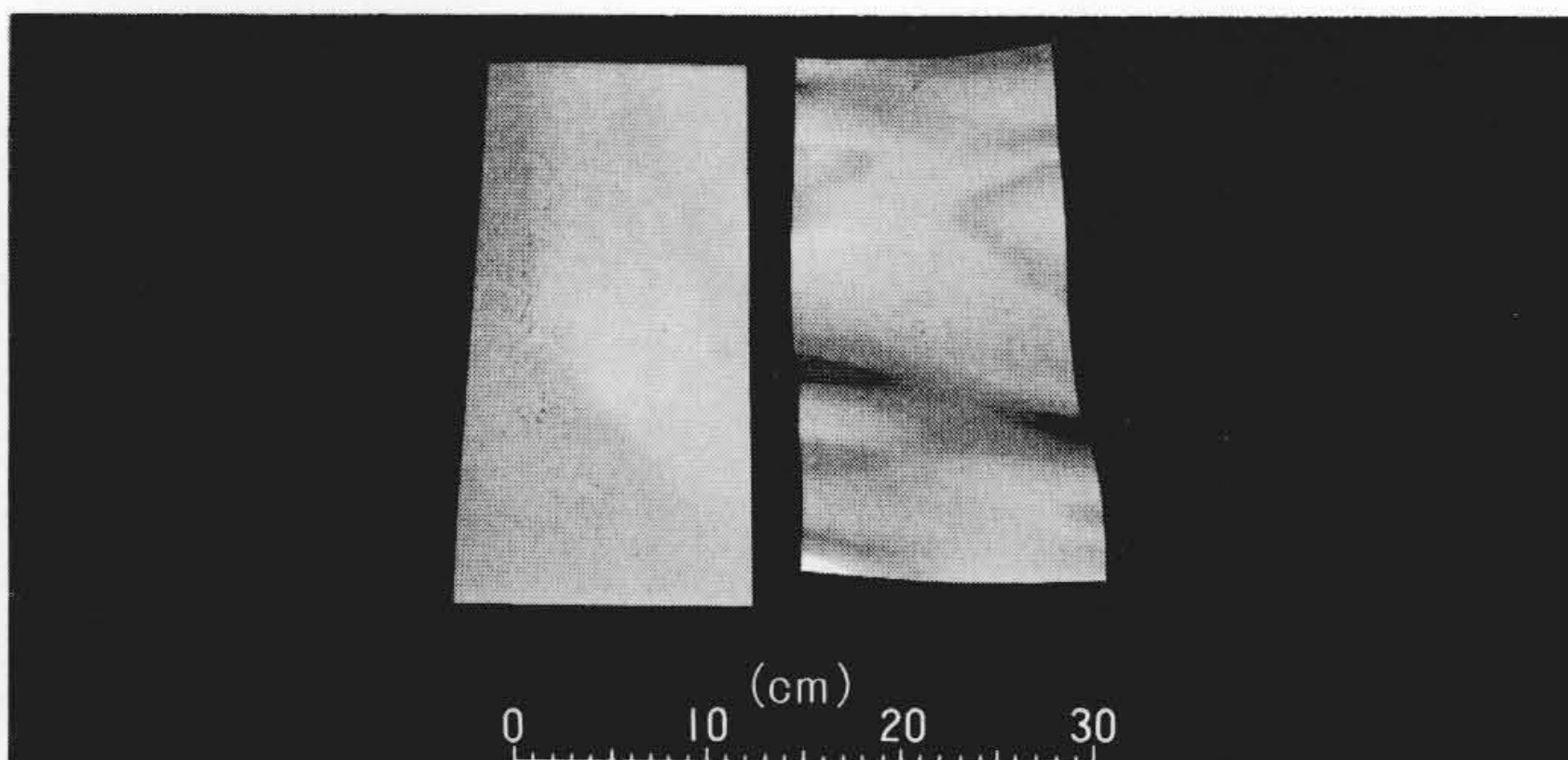
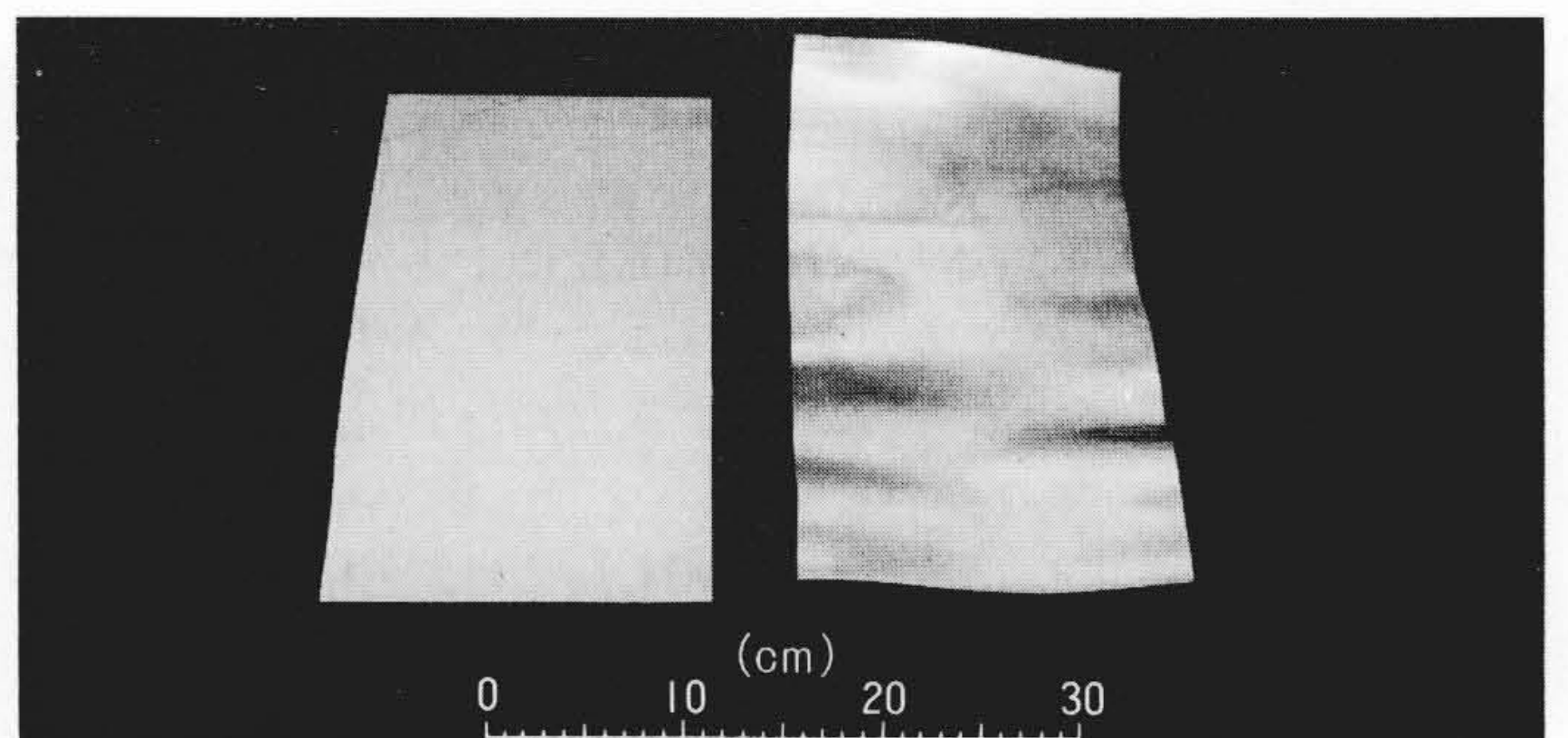


図5 小形実機HC-MILL正面 従来の4H-MILLには見られない形状安定機能及び形状修正能力を併せ持っている。

Fig. 5 Front View of HC-MILL

(b3) 板幅200mm, 圧下率(γ) = 5%(a2) 板幅150mm, 圧下率(γ) = 20%(b2) 板幅200mm, 圧下率(γ) = 20%(a1) 板幅150mm, 圧下率(γ) = 30%(b1) 板幅200mm, 圧下率(γ) = 30%

注：圧延条件 1. 作業ロール イニシャルクラウンなし 2. シート圧延 3. 圧延材料 軟鋼 4. 圧延前板厚 0.8mm

図6 HC-MILLと従来形ミルによる形状制御実験結果 従来形ミルに比べてHC-MILLは、はるかに広い範囲の圧下率、板幅に対してストリップ形状を平たんに保ち得る。

Fig. 6 Experimental Results of Shape Control by Using HC-MILL and Conventional Mill

と従来形ミルとの形状制御能力の差を明らかにみることができる。

4.2 理論計算結果

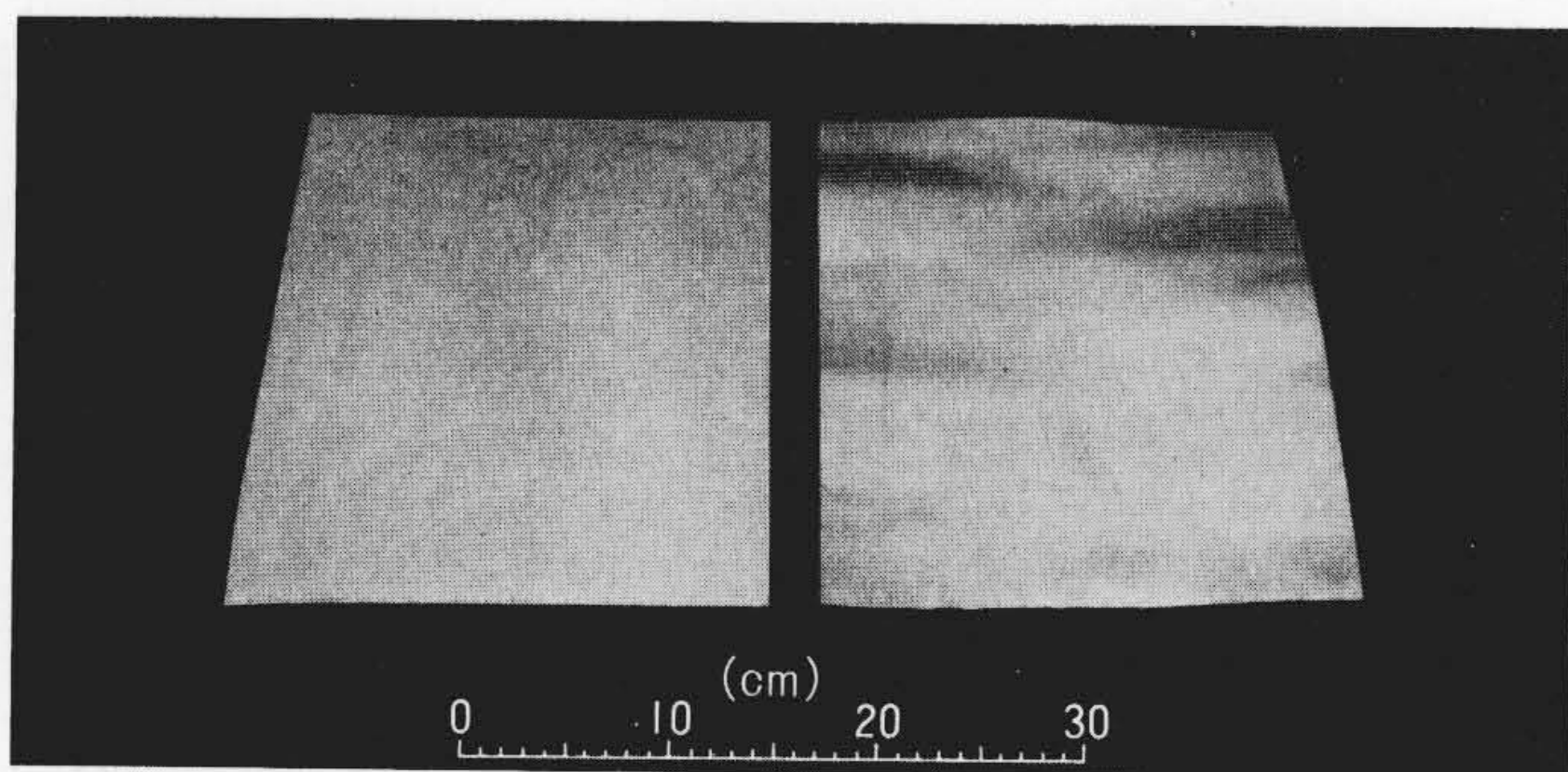
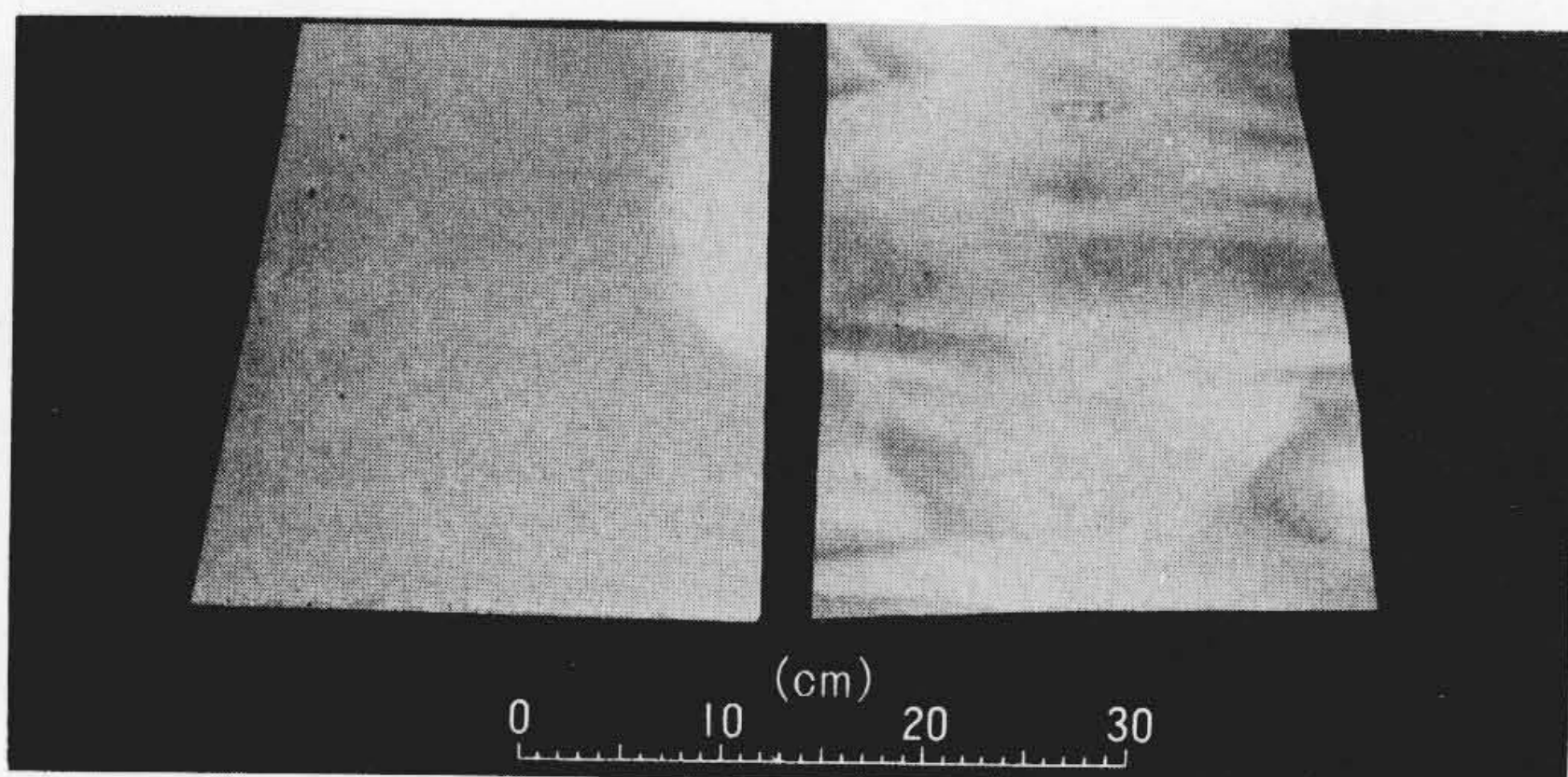
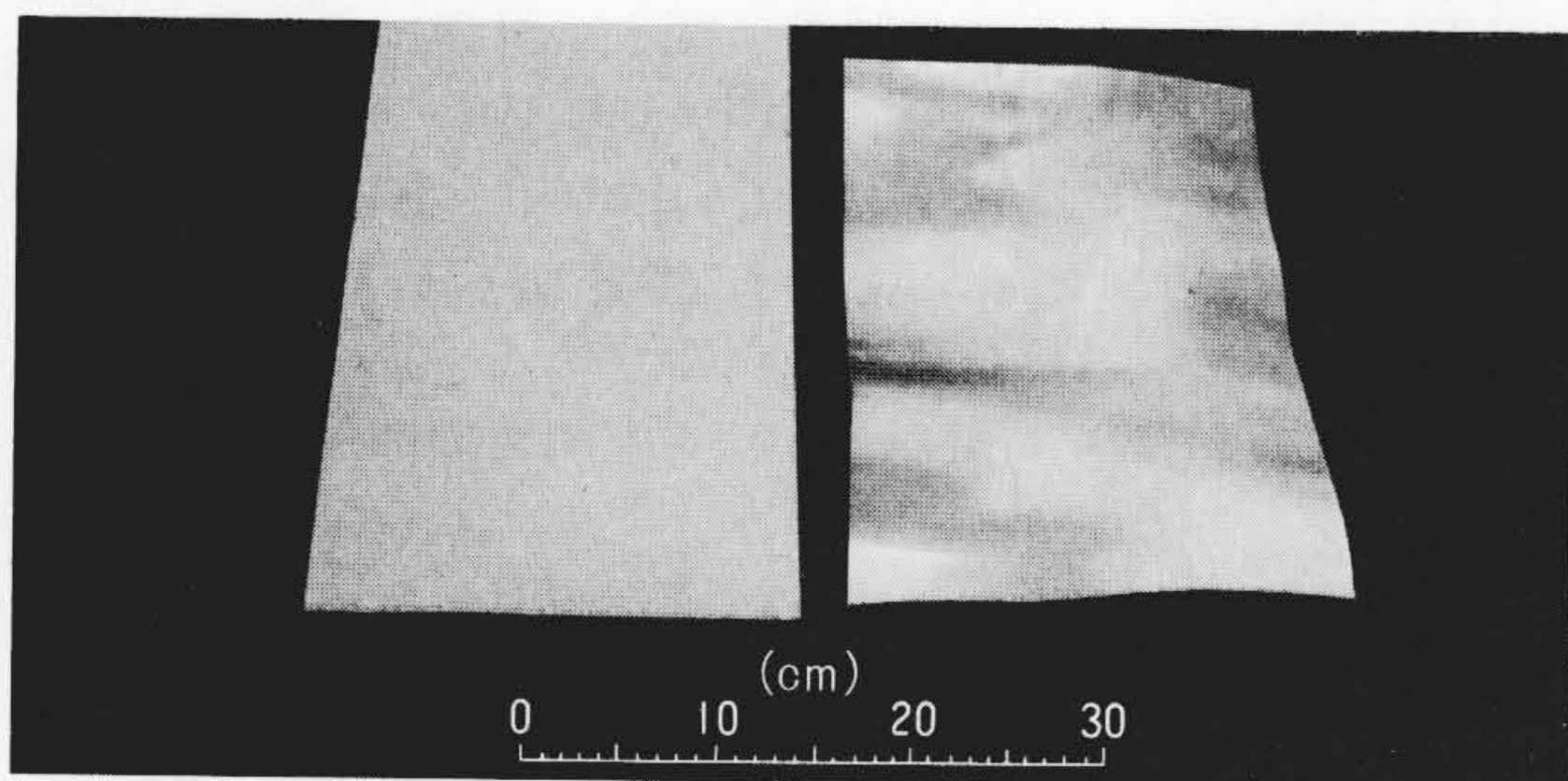
4H MILLの形状制御に関する研究は、従来より多くの研究者により行なわれている^{(2)~(6)}。日立製作所においても、従来よりこの方面の研究を行なってきたが^{(1), (7)~(9)}、今回HC-MILLを開発するに当たり、その特性の理論解析法を開発、確立した。本稿ではその具体的な内容の紹介は省略するが、本計算法によればHC-MILLのすべてのロールの変形、接触圧力分布、圧延後のストリップのクラウンなどを厳密に計算できる。

但し、厳密な板クラウンの計算には板幅方向の張力分布、圧延材の横流れ現象を含めることが必要であり、これらの点で現在の理論解析法はまだ十分であるとは言えないが、形状

を平たんにする条件を求める目的に限定すれば適用可能である。

図7は、この理論計算と前記実験結果により得られた最適ロールベンディング力 F に及ぼす圧下率や板幅などの圧延条件の影響をみたものである。ここで F とは、ストリップ形状を平たんにできる作業ロールベンディング力であり、その制御可能な範囲は0tから4tまでである。従って、 F がこの範囲になれば現実には平たんなストリップは得られない。

まず図7(a)に示すHC-MILLにおいて、 F の計算値と実験値とは良い一致を示しており、ほとんどの圧延条件下で F は制御可能範囲に入っている。これに対して同図(b)に示す4H MILLにおいては、圧下率や板幅が変わると F が大幅に変化するため、 F を制限内にするには圧延条件ごとに作業ロールのイニシャルクラウンを変えねばならないことが分かる。


(c3) 板幅300mm, 圧下率(γ)=10%

(c2) 板幅300mm, 圧下率(γ)=20%

(c1) 板幅300mm, 圧下率(γ)=30%

次にHC-MILLで中間ロールをロール同士が全幅接触する位置に設定した場合の特性につき以下に述べておく。図8は、この状態での F の計算値、図6に示した実験による形状データ及び更に比較のための4H MILLの計算値などについて示したものである。まず実験では、最大ロールベンディング力4tで板幅200mm、圧下率5%の場合、形状はやや端伸びとなり、同じく300mm、10%ではかなりの端伸びとなっているが、板幅が広いほど形状の乱れが現われやすいと同時に、ロールベンディング力の形状に対する効果が向上することを考慮すれば、いずれの場合も実験における最適値は計算値の6tに近いものと推定される。また図8によれば、この状態でのHC-MILLでも4H MILLより圧延条件の影響を受けず、特性が優れていることが分かる。

以上、理論計算によってもHC-MILLの優秀性を証明することができ、HC-MILLでは板幅や圧延荷重が変わってもロールを取り替える必要がなく、4H MILLよりはるかに能率的な圧延作業が可能であることが証明された。

4.3 中間ロール位置によるHC-MILLの特性変化

以上述べてきたHC-MILLの特性は、主として中間ロールの胴端をストリップ端に合わせた場合であるが、HC-MILLにおいては、中間ロールの胴端をストリップ端に対して任意にずらすことにより、その特性を変化させることができ興味ある結果を得ることができる。

まず図7(a)において理論計算によれば、板幅300mm、圧下率30%の場合、 $F=4.8t$ であり強度上の制限を超えるため、実際には平坦なストリップが得られない。しかし同図中に示すように、中間ロール胴端位置を具体的にはストリップ端より20mmほどミル中心寄りに移動することにより、 F は0.25tとなって平坦なストリップが得られる。図6での板幅300mm、圧下率30%のHC-MILLによる平坦なストリップは実際には上記の方法により求められたものである。

ここで中間ロールの移動が、ロールのクラウン変動に有効であることを述べておく。通常圧延現場で経験するように、ロールのクラウンは熱や摩耗の影響で圧延作業の進行とともに変動する。このロールのクラウン変動は、HC-MILLにおいても避け得られず、4H MILLと同様ロールクラウンの変

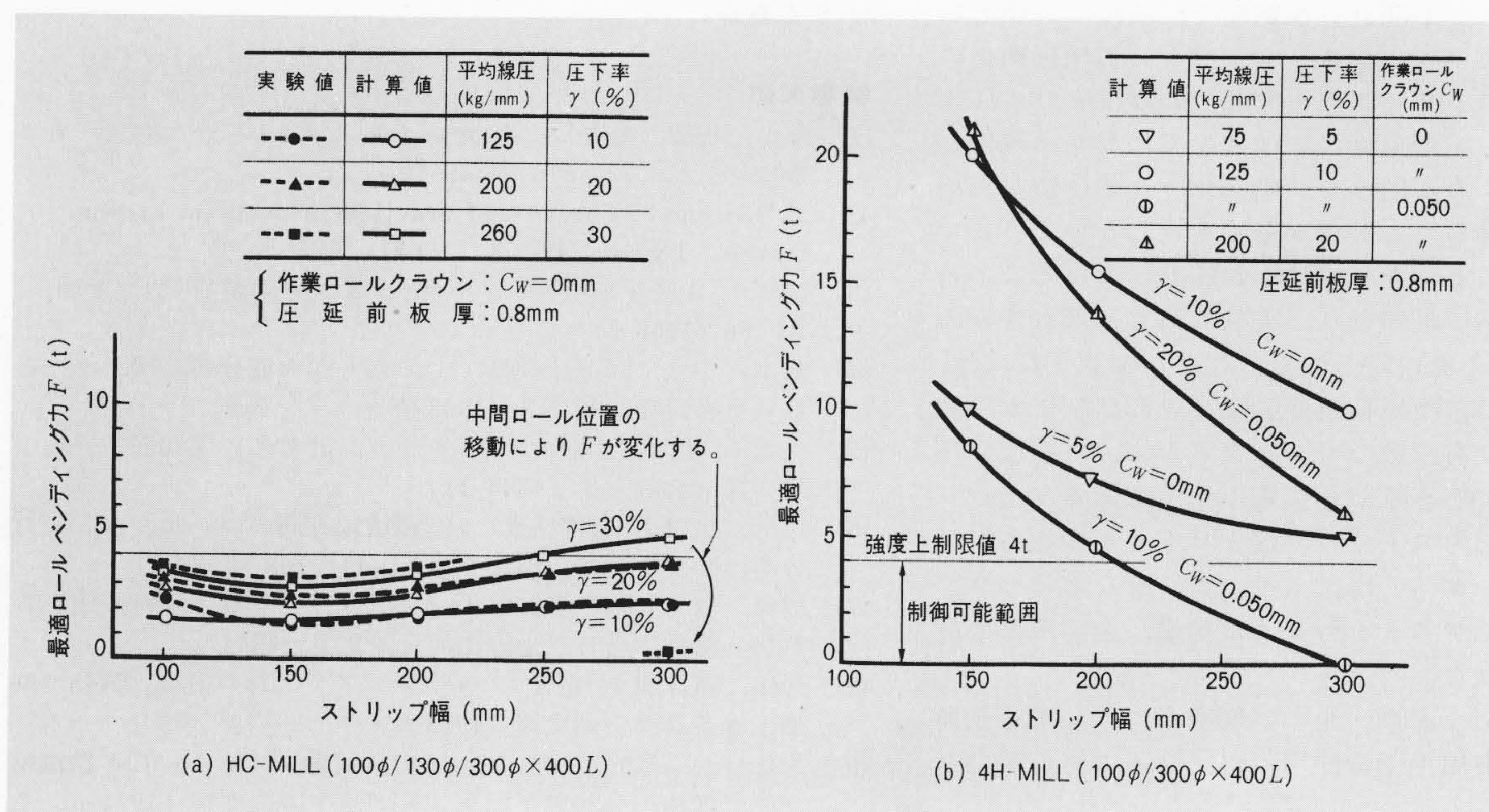


図7 最適ロールベンディング力 F に及ぼす圧延条件の影響 F の実験値と計算値とはよく一致している。またHC-MILLと4H MILLとの性能の差もみられる。更にHC-MILLでは、中間ロールを移動して F を変化できる。

Fig. 7 Effect of Rolling Condition on the Optimum Work Roll Bending Force F

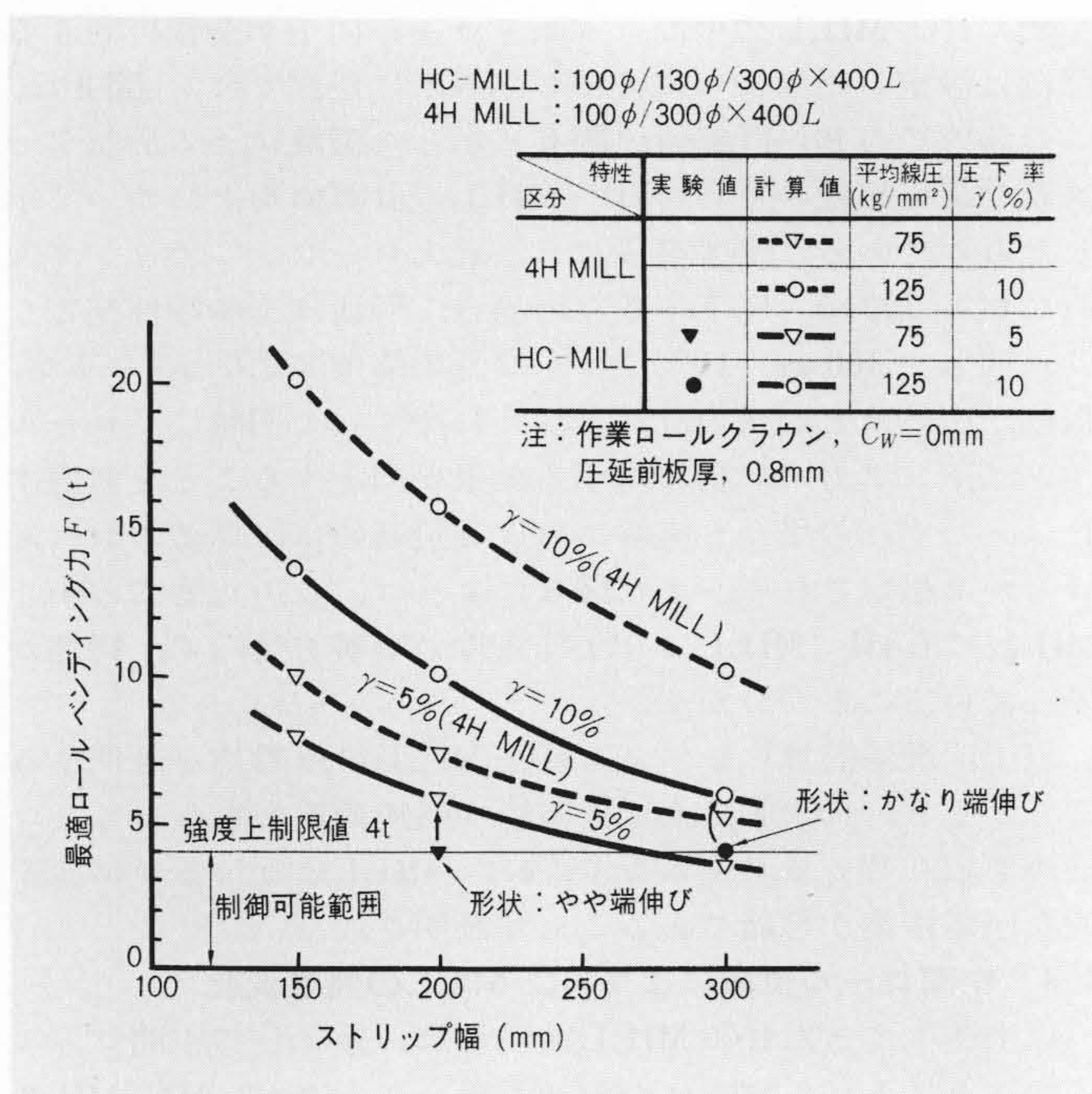


図8 中間ロールを全幅接触させた場合のHC-MILLの特性 中間ロールを全幅接触させた場合のHC-MILLでも4H MILLより優れた特性を有している。

Fig. 8 Even HC-MILL Under Full Barrel Length Contact Condition of Intermediate Rolls Surpasses 4H MILL in Crown Control

動があれば F を変更しなければならない。しかし、もし F の値が制限範囲を超えるようであれば、中間ロールの位置をずらせることにより F を制御範囲内にもどすことができ、従ってHC-MILLにおいては、4H MILLにおけるようなロールクラウンの厳重な管理は不要であり、ロール組替頻度も少なく能率的な作業が可能となる。

図9は、中間ロールの移動により生ずるHC-MILLのもう一つの特性について示すものである。同図はストリップの形状に及ぼす圧延荷重の影響をみたものである。通常の4H MILLや中間ロール胴端をストリップ端付近に合わせたHC-MILLでは圧延荷重の増加とともに形状は中伸びから端伸びへ推移する。これに対して中間ロール胴端を極端にミル中心寄りに移動すると、作業ロールがストリップからの圧延荷重により逆に曲げられてストリップの中央部分が端部よりも圧下されやすくなるため、圧延荷重の増加とともに形状は端伸びから中伸びへと推移する。従って、中間ロールの位置しだいでは、圧延荷重が変動しても形状が全く変化しないようにできる位置が存在することになる。HC-MILLにおけるこの特性は、理論的には容易に証明され、実験的にも一部存在が確認されたが、広い圧延条件に対してその存在が確認されれば、ストリップ圧延における圧延荷重変動下での形状制御が不要となり、実用上非常に有意義なものとなるため、今後広い圧延条件下での存在の有無を確認していく予定である。

なお、中間ロール端をストリップ端よりもミル中心寄りに置いた場合のストリップへの傷付きや、マークなどにつき、念のため長時間の圧延テストを行なった結果、全くその心配のないことが確認された。

また、スポーリングなどロールの強度寿命についても長時間のテストの結果、実用上十分使用に耐え得ることを確認した。

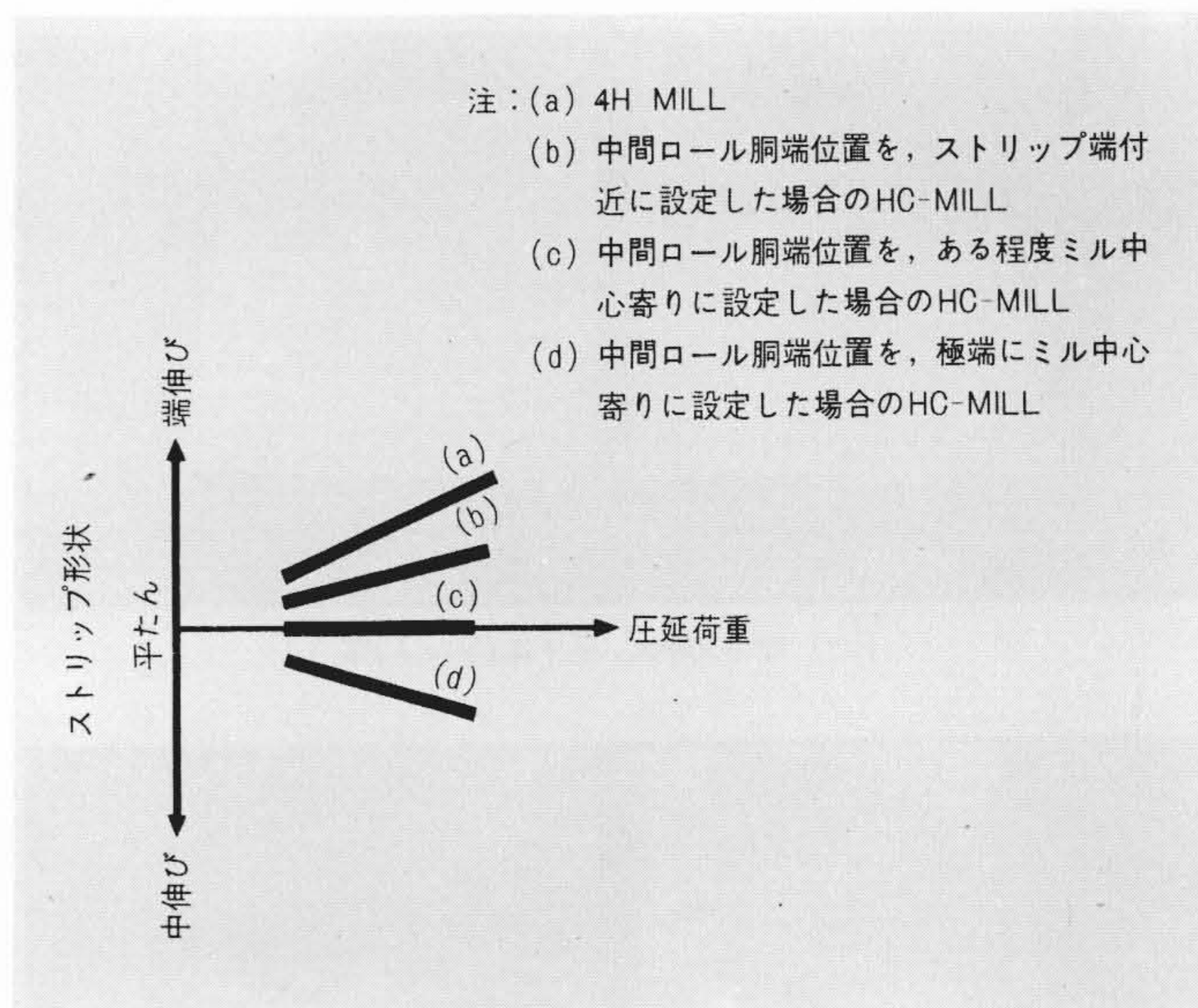


図9 ストリップ形状に及ぼす圧延荷重の影響 HC-MILLの中間ロールをある位置に設定すると、圧延荷重が変動しても全く形状が変化しない。

Fig. 9 Effect of Rolling Load on the Strip Shape

5 結 言

以上、4H MILLの形状制御に関する限界に着目し、これを本質的に改革する新しい形式の圧延機HC-MILLの内容についてその概要を述べた。ストリップ形状に関する問題は極めて難解な問題を含んでおり、この完全な解決は、いわばストリップ圧延における永遠の課題であろう。今回のこの新しい圧延機の開発によって、大わくの問題が解決されたことは一大前進と考えてよいであろう。このような結果を招来し得た要因は、我が国における各圧延技術者の飽くことのない品質向上への意欲がその最大のものであり深く敬意を表わしたい。

我々はこのHC-MILLが、品質の向上、圧延の能率化などの面において実用面で貢献することを祈念してやまない。なお、HC-MILLについては、本稿で述べた以外に、エッジドロップを減少させる機能も有しており、小形機と同様の効果が期待される大形広幅機の特長とともに別の機会に紹介する予定である。

参考文献

- (1) 原口、梶原、秦：「冷間圧延におけるストリップの形状」日本機械学会誌，73，616（昭45-5）
- (2) M.D.Stone：「Theory and practical aspects in crown control」I&SE，42，8（1965）
- (3) 塩崎：「4段圧延機のロールベンディングの解析」塑性と加工，9，88（1968-5）
- (4) 鈴木、本城：「薄板圧延における幅方向肉厚分布に関する一考察」生産研究，20，7（1968-7）
- (5) 美板：「4段圧延機のロールクラウン計算法」第20回塑性加工連合講演会論文集（昭44-11）
- (6) 戸沢、上田：「冷間圧延における板幅方向のロール変形と圧力分布に関する研究」塑性と加工，11，108（1970-11）
- (7) 梶原、西：「冷間圧延におけるストリップ形状とロール変形の解析」機械学会日立地方講演会論文集（昭44）
- (8) 志田、栗津原：「最適ロールベンディング力の実験」昭48塑性加工春季講演会論文集（1973-5）
- (9) 志田ほか：「冷間圧延における形状制御システム」日本鉄鋼協会圧延理論部会20周年記念シンポジウム論文集（1974-6）