

高精度形状制御圧延機“UC-MILL” Universal Crown Control Mills

近年、鉄鋼業の量から質への転換及び軽薄短小指向の中で、ストリップ圧延分野での製品品質の向上、薄物圧延技術の向上は、業界の重要課題となっている。

日立製作所は、これまでにHC-MILLを開発し、各分野へ適用を図り、上記課題に対処してきた。更に、最近の「より広く、より薄いストリップを、より高精度に圧延したい」というニーズに対して、研究を重ね、HC-MILLに新しい機能を付加し、多様性のある形状制御特性をもつUC-MILLを開発し、実用化に成功した。その結果、広幅、薄物材の複合形状修正、高硬度材の高能率圧延、電子部品材料の極薄圧延などのニーズに対応可能となった。

秦 和宣* Kazunori Hata
 芳村泰嗣* Yasutsugu Yoshimura
 二瓶充雄* Mitsuo Nihei
 安田健一** Ken'ichi Yasuda

1 緒 言

日立製作所は、これまでにストリップの品質向上、省エネルギーなどを目的とし、従来形4Hミルに比較して格段に優れた形状制御特性、及び形状安定性をもつHC-MILLを開発し、冷間圧延、熱間圧延分野だけでなく、各分野に適用し、実績を挙げてきた¹⁾²⁾。

一方、最近の圧延業界では、「より広く、より薄いストリップを、より高精度に圧延できる圧延機」のニーズが一段と強くなってきている。

UC-MILL(Universal Crown Control Mill)は、上記ニーズに対処するため開発したもので、HC-MILLを基本とし、これに新しい機能を付加して、多様性のある形状制御を行なわせるものである。すなわち、作業ロールを小径化し、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制御手段によって形状制御を行なうもので、その構造及び特徴は表1に示すとおりである。

以下、UC-MILLの必要性、形状制御特性と制御能力、実圧延例、実機適用状況、今後の展開などについて述べる。

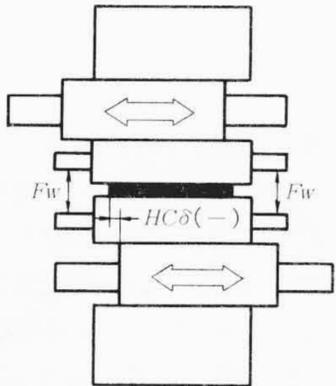
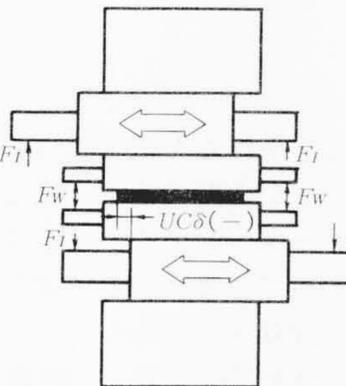
2 UC-MILL開発の背景と必要性

2.1 UC-MILL開発の背景

冷間圧延分野での最近のニーズは、図1に示すように品質向上、生産性向上による製品コストの低減が主体である。一方、製品別にみると、普通鋼では、広幅材の薄物圧延での複合形状修正、ステンレス鋼など高硬度特殊鋼での高品質化、高能率圧延、また最近、成長著しい電子部品材料である高ニッケル合金、銅や銅合金の極薄圧延などのニーズがある。

HC-MILLの適用により、上記ニーズのかなりの部分を満足させることができるが、より高品質化、高硬度材圧延をねらいとする場合には、作業ロールの小径化及び高次形状制御手段をもつ圧延機の出現が必要となる。ここにUC-MILL開発の背景がある。

表1 UC-MILLの構造と特徴 UC-MILLは小径作業ロールをもち、中間ロールベンダ、中間ロールシフト、作業ロールベンダの3制御手段で形状制御を行なう。

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_i (2) 中間ロールシフト $UC\delta$ (3) 作業ロールベンダ F_w
構造		

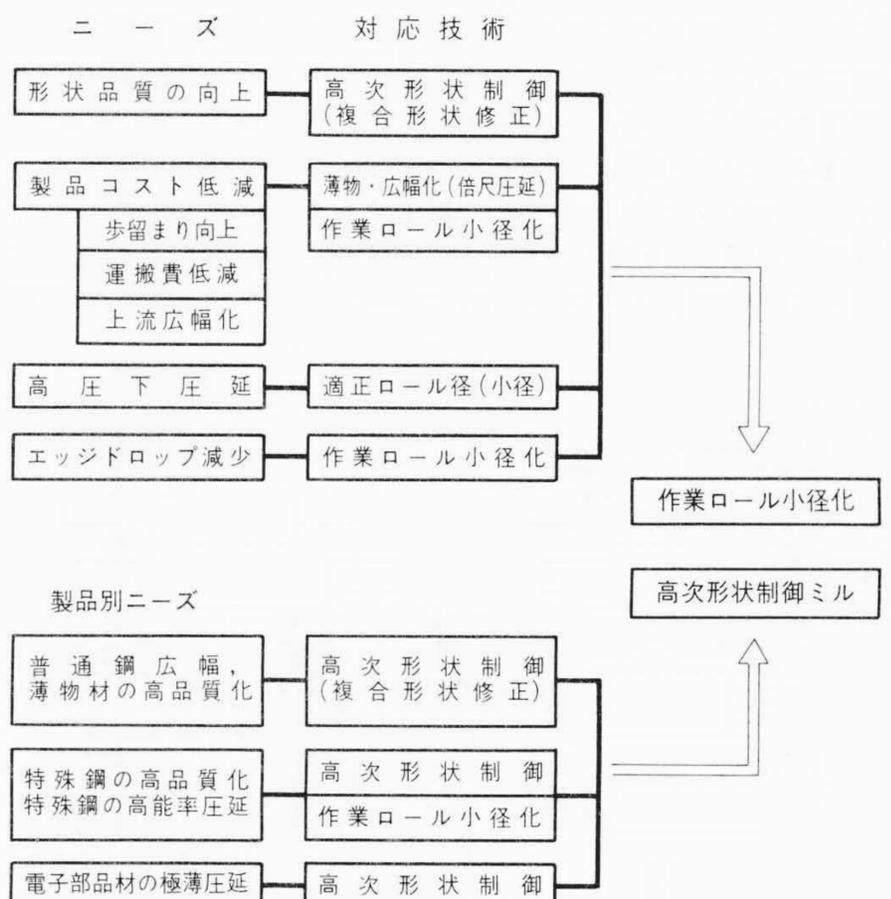


図1 冷間圧延での最近のニーズ 形状品質の向上など、冷間圧延での最近のニーズに対応するためには、作業ロールの小径化、高次形状制御機能をもつことが必要で、UC-MILLは、正に、このニーズに適合している。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所機械研究所 工学博士

2.2 UC-MILLの必要性

薄物圧延や高硬度材を圧延する場合、作業ロールの小径化が有利であることは一般に知られている。しかし、4Hミルではもちろんのこと、HC-MILLでも作業ロールを更に小径化すると、剛性低下によって図2(a)に示すように、ストリップ両端近傍に減厚部分が発生し、平坦な高品質ストリップの確保が困難になる。そこで、小径作業ロールの全体の曲りを抑制するために、移動する中間ロールにもベンディング機能をもたせることによって、同図(b)に示すような高品質ストリップの確保を可能としたのがUC-MILLである。すなわち、UC-MILLは小径作業ロールをもち、中間ロールのベンディング、中間ロールの軸方向移動と作業ロールのベンディングの3制御手段によって、多様性のある形状・板クラウン制御を実現できる^{3)~5)}。

3 UC-MILLの各制御手段の効果

次に、これら三つの制御手段の効果、及びこれらを組み合わせることによって、多様性のある形状・板クラウン制御が可能であることを板クラウン計算結果をもとに説明する⁵⁾。図3は、ロール寸法 $\phi 320 \cdot \phi 600 \cdot \phi 1,350 \times L2,000$ (mm)のUC-MILLによって、素材板厚4.0mm、入口板厚0.39mm $\times 1,800$ mmの低炭素鋼を0.27mmまで圧延する際の、(1)作業ロールベンダ F_w 、(2)中間ロール移動 $UC\delta$ 、(3)中間ロールベンダ F_l の各効果の計算結果を示したものである。本図から明らかなように、 F_l は、二次曲線的な板クラウン制御を支配し、したがって、板全体のクラウン制御を行ない、 F_w は、板端付近の板クラウンを制御し、かつ四次以上の高次制御成分をもっていることが分かる。一方、 $UC\delta$ は、前記の F_l と F_w の中間の効果をもっていると同時に、 F_w 、 F_l の効果を拡大する機能をもっている。このように、UC-MILLでは、 F_l 、 $UC\delta$ 、 F_w は、それぞれ異質の制御効果をもっているため、これらの組合せによって、多様性のある板クラウン・形状制御が可能となるのである。ただし、ロール径、特に作業ロール径の値を種々変化させることにより、図3の特性も異なってくる。

図4に、UC-MILLの多様性ある制御特性を利用して、ロールサーマルクラウンによって悪化する板クラウンを修正した計算例を示す。4Hミルでは、作業ロールベンダだけの制御であり、制御範囲も小さいため、サーマルクラウンなしの状態

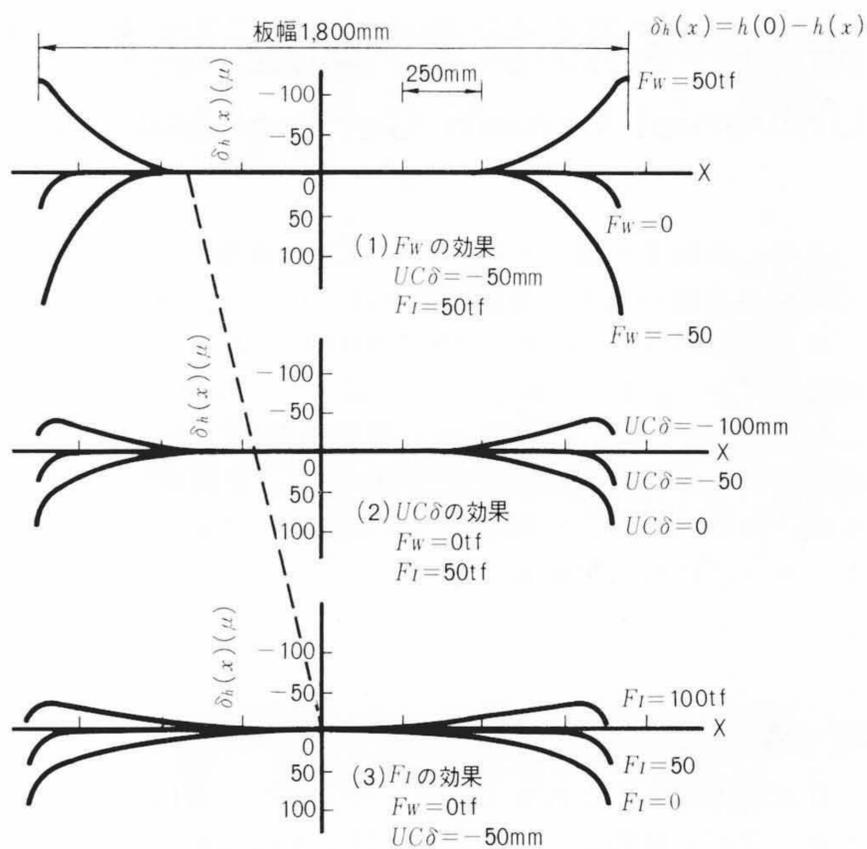


図3 UC-MILLの各制御手段の効果(作業ロール径320mm) UC-MILLの3制御手段である。 F_l 、 $UC\delta$ 、 F_w は、それぞれ異質の効果をもっている。したがって、これらを適宜組み合わせると多様性のある形状制御ができる。

クラウン状態	4Hミル	HC-MILL	UC-MILL
サーマルクラウンなし	イニシャルクラウンあり 板厚 板幅		
サーマルクラウンあり			
サーマルクラウン + クラウン制御			
板クラウン制御特性			

図4 UC-MILLの板クラウン制御特性 UC-MILLによって、ロールサーマルクラウンが原因で発生するクォータバックルなどの複合形状修正が可能である。

でも平坦な板クラウンを得るには、ロールイニシャルクラウンが必要である。ここでサーマルクラウンが発生し、作業ロールベンダで修正しようとする、クォータバックルが発生してしまう。HC-MILLでは、4Hミルに比較すれば大きな改善効果があるが、わずかにクォータバックル傾向が残る。これをUC-MILLで制御すると、同図に示すように、ほぼ平坦な板クラウンを確保できることが分かる。これは、サーマルクラウン発生後、板端付近の板クラウンが高次成分をもち、これを修正するためには、板端付近に高次の制御成分をもつ圧延機、すなわちUC-MILLが最適であることを意味する。

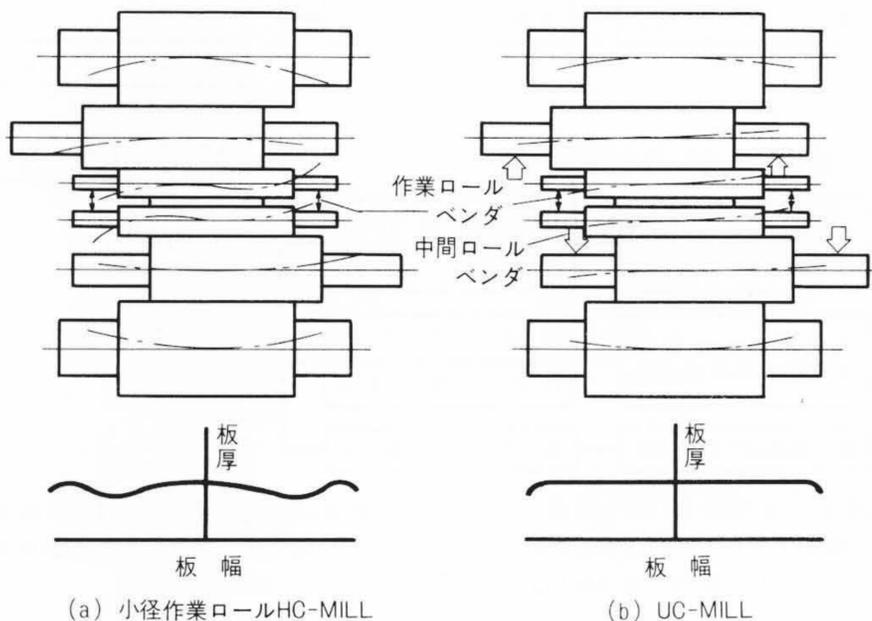


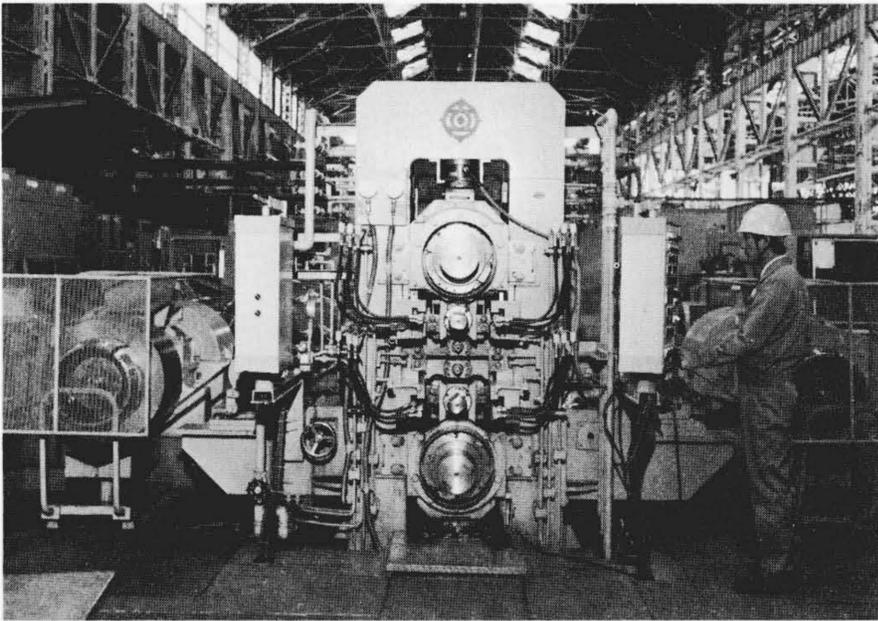
図2 UC-MILLの必要性 4Hミルはもとより、HC-MILLでも作業ロール径を小径化するにつれて、高品質ストリップの確保が困難となる。これを克服したのがUC-MILLである。

4 UC-MILLの形状・板クラウン制御特性

4.1 基本形状制御特性

前章で、UC-MILLは、多様性のある形状・板クラウン制御特性をもち、複合形状修正も可能であることを述べてきた。本章では、これらの特性を実験ミルで確認した結果について述べる⁶⁾。

図5は本テスト圧延に使用した実験ミルで、大形実機の約 $\frac{1}{3}$ の大きさである。図6は一連のテスト圧延のうち一例(作業ロール径 $\phi 105\text{mm}$, $UC\delta = 0\text{mm}$, 板厚 0.78mm の、板幅 550



項目	仕様
ロール寸法	作業ロール： $\phi 80\sim\phi 150\times L650(\text{mm})$
	中間ロール： $\phi 190\times L650(\text{mm})$
	補強ロール： $\phi 460\times L650(\text{mm})$
圧延材板幅	Max. 550mm

図5 UC-MILL実験機 UC-MILL実験機は大形実機の約 $\frac{1}{3}$ の大きさで、小径作業ロールをもち、軸方向に移動する中間ロールにベンダ装置を設けている。

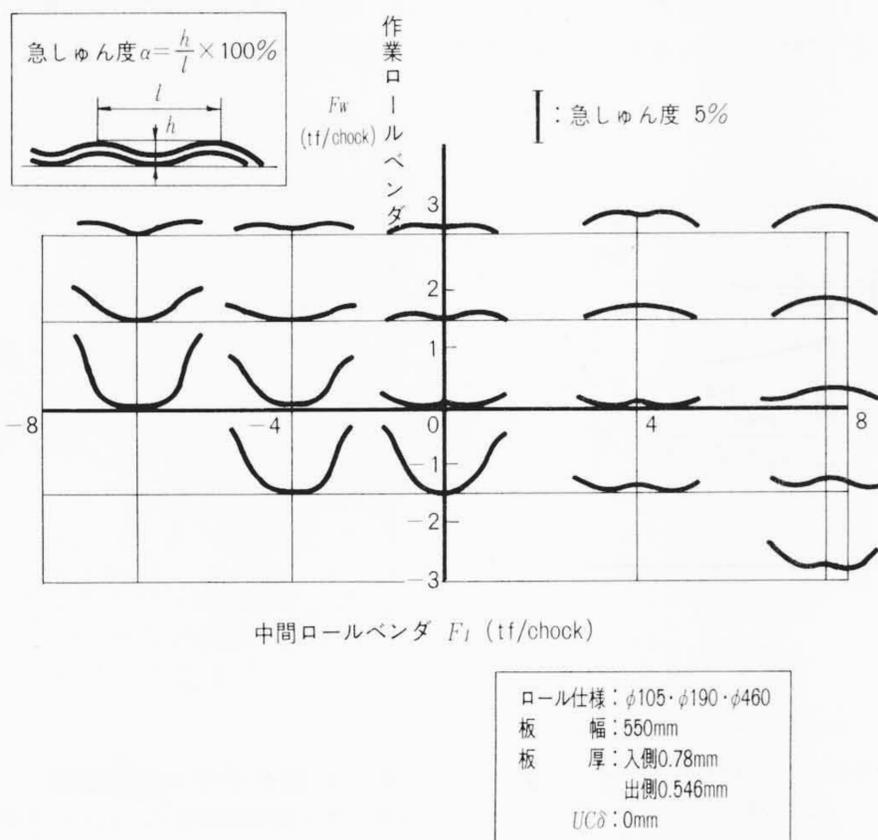


図6 UC-MILLによる形状制御 UC-MILLによる実圧延の結果、平坦形状、単純な中伸び、端伸びだけでなく、W形及びM形の複合形状を発生させることが確認できた。

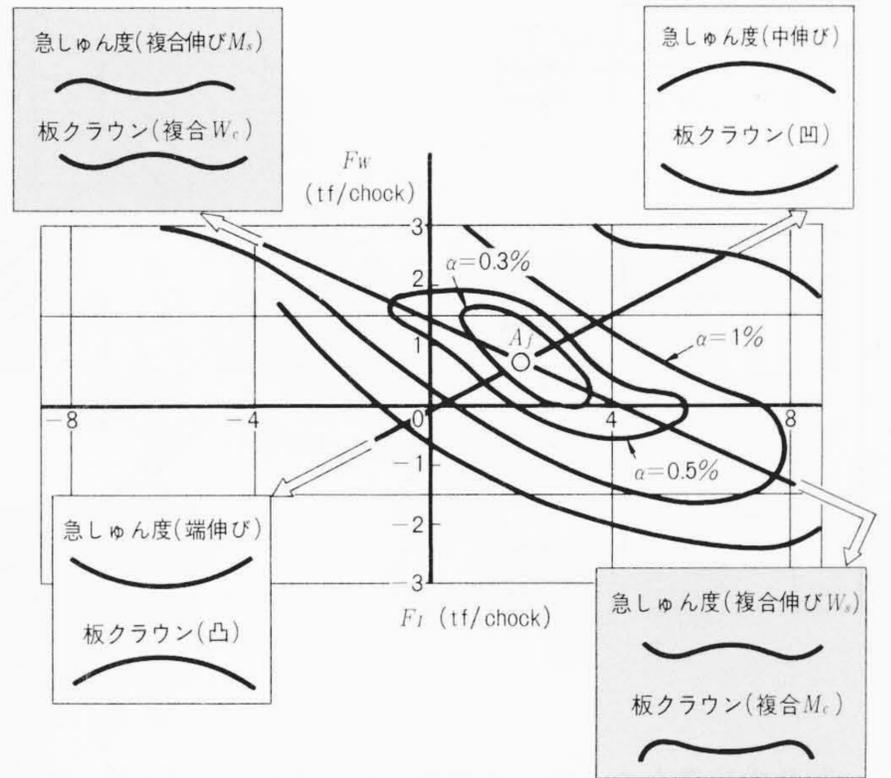


図7 UC-MILLでの等急しゅん度線図 F_I , F_W のベンダ力の範囲内に、すべての形状領域を含むことが制御能力大であり、自在の形状・板クラウン制御のできることを示している。

mmのSPCC材)を示したもので、同図中の曲線は、中間ロールベンダ F_I と作業ロールベンダ F_W の各実験点での形状(急しゅん度表示)を表わしている。ここで F_W を一定とし、 F_I を負から正方向に変化させると、板全体が端伸びから中伸びに移行し、一方、 F_I を一定とし、 F_W を負から正方向に変化させると、主として板端付近が端伸びから中伸びに移行する。更に、形状をM形→平坦→W形に変化させる右下りの軸と中伸び→平坦→端伸びに変化させる右上りの軸が存在し、両軸は、平坦形状部で交差すると思われる。すなわち、UC-MILLは F_I - F_W 平面で、平坦形状はもとより単純な中伸び、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ことを示している。このことは、例えば、ロールサーマルクラウンによって発生するM形状を修正する場合には、W形状となる F_I , F_W の適正な組合せとすることにより、平坦な形状のストリップが得られることを意味しており、図4の計算結果を裏付けている。

図7には、図6で等しい急しゅん度の値を結んで得られる等急しゅん度線図として表現したもので、 F_I , F_W のベンダ力の範囲内にすべての形状領域が含まれることが、制御能力大であり自在の形状、板クラウン制御ができることを意味している。また、この形状領域の広さ及び位置は、作業ロール径、 $UC\delta$, 板幅などによって変化する。

4.2 作業ロール径, $UC\delta$, 板幅の影響

前節でUC-MILLの基本形状制御特性について述べたが、次に、この制御特性、特に複合形状修正能力が、作業ロール径 D_W , 中間ロール位置 $UC\delta$, 圧延材板幅 B によって、どのように変化するかを実験結果に基づいて説明する⁶⁾。

図8は、作業ロール径 $\phi 105\text{mm}$ を基準とし、 $\phi 120\text{mm}$, $\phi 86\text{mm}$ の3種類、板幅 400mm , 550mm , $UC\delta = 30\text{mm}$, 0mm , $+30\text{mm}$ の各組合せについての実験結果をもとに、UC-MILLの形状制御に及ぼす D_W , $UC\delta$, B の影響を F_I - F_W 平面上で評価したものである。ここで、 D_W/B の表現は、作業ロール径 D_W と板幅 B の逆数 $\frac{1}{B}$ の制御特性に与える影響が、ほぼ等価であることを実験で確認した結果に基づいている。

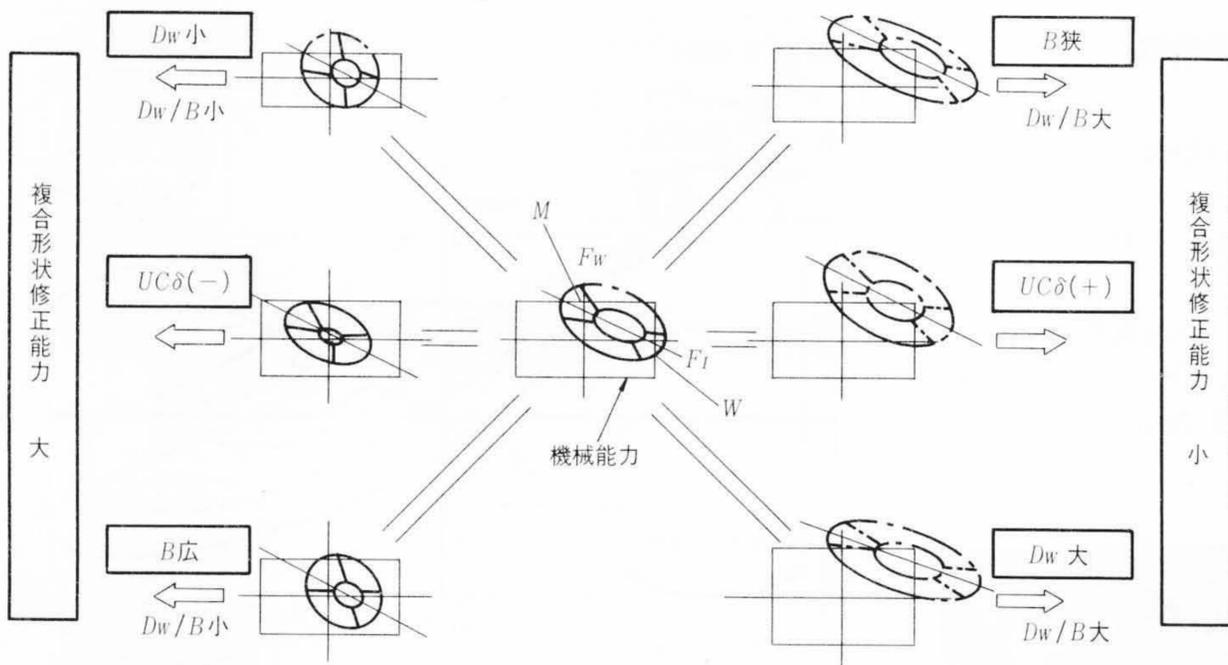


図8 UC-MILLの制御特性に及ぼす D_w , $UC\delta$, B の影響 UC-MILLの形状制御特性は D_w , $UC\delta$, B によって変化し, D_w/B が小さいほど, 複合形状修正能力は大である。また, この複合形状修正能力は $UC\delta$ で変更可能である。

図8の結果をまとめると次のとおりとなる。

- (1) 作業ロール径 D_w が小さいほど, 圧延機板幅 B が広いほど, すなわち, D_w/B が小さいほど, 複合形状修正能力は大である。また, D_w/B には構造上下限値が存在する。ただし, この下限値は作業ロールを水平方向に支持することによって拡張可能である。
- (2) 上記複合形状修正能力は, 中間ロール位置 $UC\delta$ で変更可能である。また, D_w/B が大の場合でも $UC\delta$ を変更することによって, 複合形状修正能力を保有させることができる。

4.3 形状・板クラウン制御範囲

UC-MILLの形状制御特性については, 図8に示したとおりであるが, 次に, F_I , $UC\delta$, F_w の3制御手段で制御可能な範囲を V_1 , V_2 の板クラウン平面上で評価してみる。ここに, V_1 , V_2 は図9に示した値で, 板クラウン制御の多様性を評価するものである。制御範囲は, ストリップの軸方向張力分布及び材料横流れを考慮した板クラウン計算によって求めたもので, 同図中に実験点も記入してある。

図9から, UC-MILLの板クラウン制御範囲は, $UC\delta$ 一定のもとでも, ある面積をもっていることが分かる。更に, $UC\delta$ を変化させればより広い面積となることは言うまでもない。

一方, 例えば従来4Hミルでは, 制御手段は F_w だけであるため, F_I - F_w 平面上で評価する限り, $F_I=0$ の一曲線上を動く。ただし, 図9の場合は, $UC\delta=-30\text{mm}$ で F_w の効果は拡大されているが, 実際には F_w は補強ロールの拘束により効果は小さく, 大部分, 第一象限に含まれる。したがって, クラウン制御は, イニシャルクラウンを付与して行なうなどの手法をとらざるを得ない。また, HC-MILLの場合は, F_I - F_w 平面では F_w だけ変化するので, 一曲線上を動くことになるが, 実際には中間ロール位置 $HC\delta$ を変化させることができるので, UC-MILLに比較すれば小さいが, ある面積を保有している。更に $F_w=0$ に固定し F_I だけ変化させた場合, 本平面上では, $F_w=0$ の一曲線上を動くことになるが, 中間ロール移動を考慮すると, ある面積をもつことができる。いずれにしても, 3制御手段をもつUC-MILLが, 最も広い制御範囲をもっていることが明らかである。

5 UC-MILLによる高硬度材圧延例

5.1 ステンレス鋼の圧延特性

これまで述べてきたように, UC-MILLは, 複合形状制御など多様性のある形状・板クラウン制御特性をもっているが,

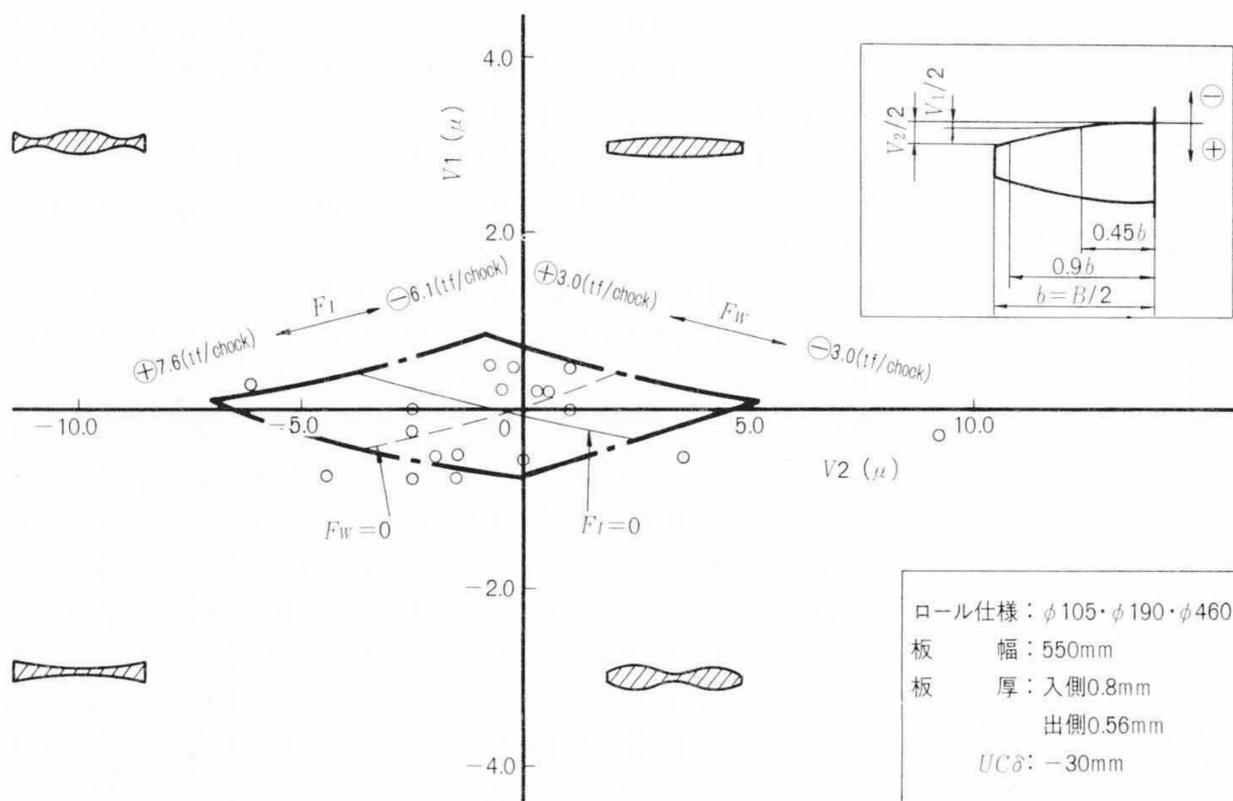


図9 UC-MILLの板クラウン制御範囲 UC-MILLの板クラウン制御範囲を V_1 , V_2 という板クラウン平面上で評価すると, ある面積をもつため, 4Hミル($F_I=0$, $UC\delta\text{Max.}$)はもとより, 作業ロールベンダをもたないミルやHC-MILL($F_I=0$)に比較して多様性に富んでいる。

同時に、作業ロールを小径化しているために、圧延荷重の軽減も可能で、ステンレス鋼などの高硬度材を良好な形状を維持して圧延するのも適している。その結果、形状が障害となって制限を受けていた高速、高能率圧延が可能となった。そこで、SUS304(1mm×500mm)を作業ロール径φ86mmを使用して圧延した実験例について説明する⁹⁾。この場合、作業ロールには、水平支持装置を設置している。

実圧延では、圧延中、作業ロールに発生するサーマルクラウンが原因で、形状は、クォータバックル(M形複合形状)となりやすい。

本実験では、上記のクォータバックルをあらかじめ圧延によって発生させ、これを平坦形状に修正して、形状制御の確認を行なった。ここで、実験機では、実圧延と同等のサーマルクラウンを発生させることが困難なため、このような近似方法を採用した。図10に、その結果を示す。1～3パスで

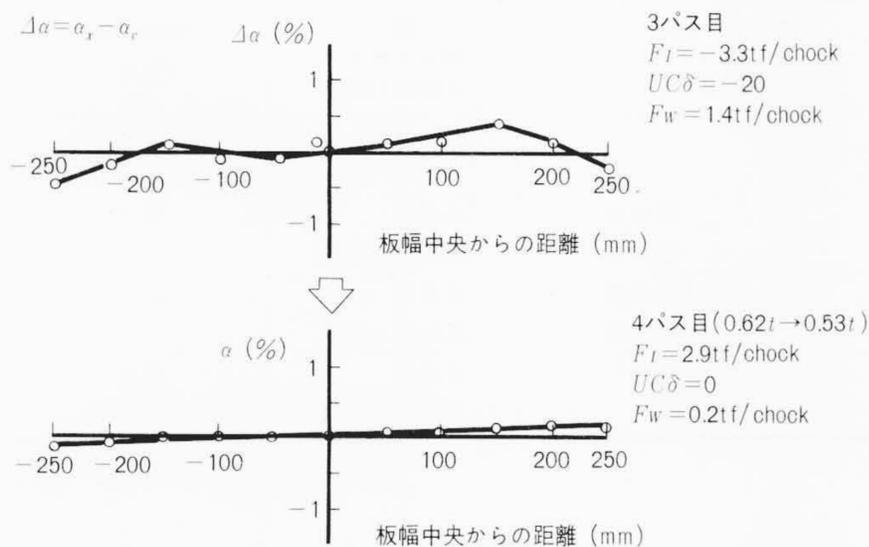


図10 SUS304(素材1t×500b)の形状制御 UC-MILLは、ステンレス鋼などの高硬度材の複合形状修正も良好に行なうことができる。その結果、形状が障害となって制限を受けていた高速、高能率圧延も可能となる。

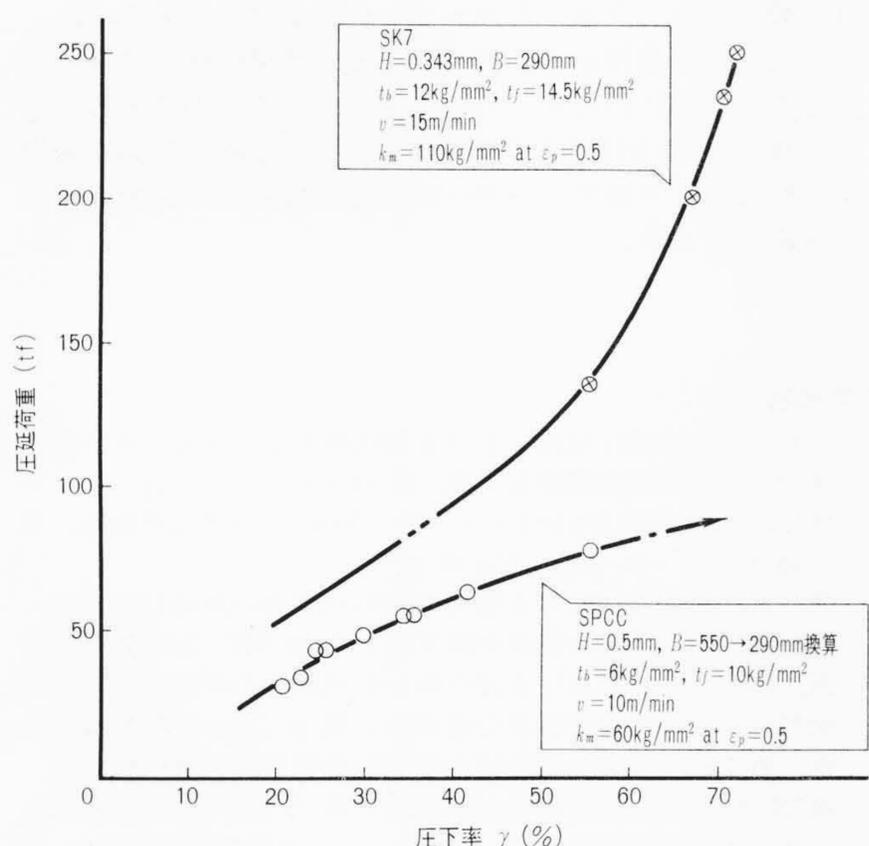


図11 UC-MILLによる高硬度材の高圧下圧延特性(ロール径φ105mm) 小径作業ロールをもつUC-MILLは、高硬度材などの高圧下圧延を安定して行なうこともできる。

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, UC2-MILL, UC3-MILL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	mm						用途
	Dw/1,250	125	250	375	500	625	
	mm						
	Dw/B	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
4Hミル							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

注：略語説明 Dw(作業ロール径), B(圧延材最大板幅)

クォータバックルを発生させるような中間ロールベンダ F_I 、中間ロール位置 $UC\delta$ 及び作業ロールベンダ F_W を設定し、これに対して、4パス目でクォータバックルを修正し、平坦な形状をねらったものである。同図から明らかなように、あらかじめ発生させたクォータバックルは、4パス目ではほぼ平坦な形状に修正されていることが分かる。形状の左右非対称性は、素材がテーパ状であることに起因している。

5.2 高硬度材高圧下圧延特性

小径の作業ロールをもつUC-MILLは、高硬度材の高圧下圧延という点でも有効である。

図11には、高硬度材(SK材：変形抵抗110kg/mm²)の高圧下圧延例を示す。すなわち、素材を1パスで安定して圧延できる最大圧下率を実験により確認したものである⁹⁾。同図中には、SPCC材の例も示してある。圧下率60%程度では、形状もほぼ良好であるが、70%に達するとやや悪化してくる。

6 UC-MILLの展開

HC-MILLに新しい機能を付加し、多様性のある特性をもつUC-MILLは、その対象圧延材と用途により、適正な作業ロール径を選択することが必要である。表2は、従来4HミルからHC-MILL, UC-MILLへの展開過程と、 D_w/B の範囲及び主な用途との対応を示したものである。もともと小径作業ロ

表3 UC-MILLの納入実績 製品ストリップの高品質化をはじめとする各種ニーズに適合したUC-MILLは、最近になり急速な普及を示しつつある。

No.	ミ ル 仕 様		圧 延 材	用 途	稼働開始
	形 式	ロール径, 面長, 圧延速度			
1	R	$\phi 80 \sim 150 \cdot \phi 190 \cdot \phi 460 \times L 650$	鉄 非鉄	テスト用	昭和56年
	UC 1	$V = 60\text{m/min}$			
2	R	$\phi 105 \cdot \phi 250 \cdot \phi 630 \times L 560$	SUS 特殊材	高品質 高硬度材圧延	同上
	UC 1	$V = 400\text{m/min}$			
3	6T #6	$\phi 440 \cdot \phi 505 \cdot \phi 1,190 \times L 1,420$	普通鋼 特殊鋼	高品質	昭和57年
	UC 1	$V = 2,170\text{m/min}$			
4	R	$\phi 135 \cdot \phi 300 \cdot \phi 700 \times L 800$	SUS	高品質 高硬度材圧延	昭和58年
	UC 1	$V = 500\text{m/min}$			
5	R	$\phi 135 \cdot \phi 300 \cdot \phi 630 \times L 800$	銅 銅合金	高品質 銅はく圧延	同上
	UC 1	$V = 700\text{m/min}$			
6	R	————	————	高品質	昭和59年
	UC 1	————			
7	R	————	————	高品質	同上
	UC 1	————			
8	3T #3	$\phi 475 \cdot \phi 535 \cdot \phi 1,360 \times L 1,730$	軟鋼	高品質 高硬度材圧延	同上
	UCIW	$V = 1,200\text{m/min}$			
9	R	$\phi 135 \cdot \phi 300 \cdot \phi 630 \times L 800$	銅 SUS	高品質 銅はく圧延 高硬度材圧延	昭和60年 (予定)
	UC 1	$V = 800\text{m/min}$			
10	R	————	————	高品質	同上
	UC 3	————			
11	R	$\phi 135 \cdot \phi 300 \cdot \phi 630 \times L 800$	特殊材 銅合金	高品質 高硬度材圧延	同上
	UC 1	$V = 224\text{m/min}$			
12	R	$\phi 440 \cdot \phi 510 \cdot \phi 1,350 \times L 1,420$	普通鋼 特殊鋼	高品質 高硬度材圧延	同上
	UC 1	$V = 1,400\text{m/min}$			
13	R	$\phi 105 \cdot \phi 250 \cdot \phi 560 \times L 630$	特殊材 SUS	高品質 高硬度材圧延	同上
	UC 1	$V = 400\text{m/min}$			

注：R(シングルスタンド可逆ミル), 6T #6(6スタンドタンデムミル #6Std)

ールをもつUC1-MILLを更に小径化したUC2-MILL及びUC3-MILLでは、中間ロールあるいは補強ロール駆動となり、その接線力によって、作業ロールには水平たわみが発生する。そのために、この防止対策として作業ロールに水平支持装置を設置している。またUC3-MILLは、高硬度材の圧延と同時に、表面光沢を重要視する圧延材の圧延をねらいとするもので、極小径作業ロールをもち、また軸受箱を設けずにロール組替えなどを簡単に行なえる構造としてある。

このように、HC-MILL, UC1-MILL, UC2-MILL, UC3-MILLは、その用途に応じて適切に選定することにより、各々の特性を十分に発揮することができ、また、場合によっては、これらのコンビネーション構成として、多目的圧延機能をもたせることができる。

7 UC-MILLの実機への適用状況

製品ストリップの高品質化をはじめとする各種ニーズに適合したUC-MILLは、最近になり急速な普及を示しつつある。表3は、UC-MILLの実機への適用状況を示したもので、広幅材の薄物圧延での複合形状修正、ステンレス鋼など高硬度材の高品質化、高能率圧延や高ニッケル合金、銅、銅合金などの20~30 μ 程度の極薄圧延など、UC-MILLのもつ圧延特性を十分に発揮している。

8 結 言

HC-MILLに新しい機能を付加したUC-MILLは、最近のニーズであるストリップの高品質化、高硬度材の高能率圧延、

電子部品材料の極薄圧延などに最適なミルであることを述べた。今後は、普通鋼、特殊鋼兼用の冷間圧延機への対応、熱間圧延機への適用拡大、低速・高圧下化による連続化への適用などにつき、取り組んでいきたい。

日立製作所は、今後ともユーザーの要望にこたえるため、高品質化、高生産性をより向上させる圧延機の開発に努める考えである。更にいっそうの指導を希望するものである。

終わりに、UC-MILLの実機適用に対して、終始懇切な御指導をいただいた多数のユーザー関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 今井, 外: 冷間圧延機における形状制御法の開発, 第29回塑性加工連合講演会講演論文集, p. 94~105(1978-11)
- 2) 梶原, 外: 冷間圧延における“HC-MILL”の最近の動向, 日立評論, 61, 9, 625~630(昭54-9)
- 3) 西, 外: 板圧延における複合伸び形状制御の研究(第1報), 第33回塑性加工連合講演会講演論文集, p. 127~130(1982-11)
- 4) 西, 外: 板圧延における複合伸び形状制御の研究(第2報), 第33回塑性加工連合講演会講演論文集, p. 131~134(1982-11)
- 5) 西, 外: 板圧延における複合伸び形状制御の研究(第3報), 第33回塑性加工連合講演会講演論文集, p. 135~138(1982-11)
- 6) 二瓶, 外: 新型圧延機UC-MILLによる高硬度材圧延特性, 鉄と鋼, 第107回講演大会討論会講演論文集, p. 76~79(1984-4)
- 7) 西, 外: 冷延における板クラウンと形状解析法, 機械学会日立地方講演会論文集, p. 64~66(1978-9)