

最近の高機能形状制御圧延機

中野 恒夫*

Recent Trends of Advanced Technologies for High Performance Shape Control Mill

Tsuneo NAKANO

Key words: shape control; strip crown; strip flatness; roll profile.

1. まえがき

わが国の圧延技術は、圧延機の大型化及び高速化による生産性の向上や、省エネルギー及び歩留向上による製造コスト低減を目的として著しい進展を遂げた。最近では、鋼板需要家のニーズの高級化と多様化に対応するための高品質化と小ロット圧延技術も急速に進歩している。

これらは、新型圧延機の開発に見られる圧延機そのものの性能向上と各々の圧延機の機能を十分活用した各種制御技術、さらにこれらの開発を支えた圧延理論の進歩によるところが大きい。

新型圧延機の大半がわが国で開発され、多くの実績をあげているが、いずれも圧延製品の寸法精度向上を目的としたいわゆる高機能圧延機であり、特に形状制御機能に対して各圧延機で特徴を有している。

本稿では、まず圧延機に要求される形状制御機能とその方法を整理し、各種形状制御圧延機の構造と特徴を概説すると共に、性能比較を試みた。

2. 圧延機に要求される形状制御機能と方法

板クラウンや平坦度など、板形状は本質的にはいずれも板幅方向の板厚差に起因する問題であり、この板幅方向の板厚差を如何に高精度に制御できるかがポイントとなる。板形状に影響する因子は非常に多く、図1に示すように¹⁾、圧延ロール、圧延素材及び圧延条件に関係するものと様々である。また時間の経過とともに変動するものもある。これら諸因子の中で、圧延機ハード側の問題として、圧延ロールに関する因子を種類別に整理すると、(1)圧延荷重によるロール曲げ変形、(2)圧延圧力によるロール表面の扁平変形、(3)材料からの熱や更に圧延による加工・摩擦熱それ

に冷却も加わってのロールの熱変形、(4)高温、高荷重あるいは高速などの厳しい条件下での材料との滑りによるロールの摩耗、となり、これらが総合されて板形状に影響する。板形状制御は、これらによるロールプロファイルの変化を必要に応じて補償する技術と言うことができる。表1に、ロールプロファイル変化の因子と必要な制御機能、制御方法を関連づけて示す。板形状を制御する方法としては、ロールベンド、ロールシフト、ロールクロス、ロールクラウンアジャスト、ロールクリーリング、オンラインロール研磨に大別できることがわかる。

3. 各種板形状制御圧延機の概要

ここでは板形状制御方法の観点から、各種制御圧延機、装置を概説する。現在パイロットテスト段階も含めて開発が公表されている主な制御圧延機、装置を図2²⁾に示す。

3・1 ロールベンド法

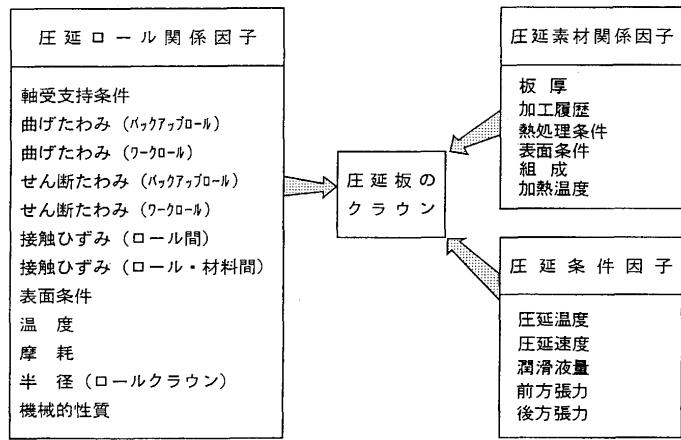
3・1・1 垂直ベンド

板クラウンを制御するためには、上下WRの軸線を含む垂直面内の両ロールの間隙を変化させるのが最も直接的な発想であり、制御圧延機として最初に実用化されたのが垂直面内で上下WRを曲げるワークロールベンダ(WRB)である。構造が簡単でほとんどの形式の圧延機に採用可能ということもあって1960年代から北米で普及はじめ、その効果も一般的に認められている。しかしながら、板幅とWR径の比が大になると板幅中央部に曲げ効果が及ばなくなること、また軸受容量、ロールネック強度、チョック強度などにより、ロール曲げ力が制限されるという問題がある。

そこでWRチョックを2分割して、それぞれチョックに加える曲げ力とその方向を独立にとり得るダブルチョックベンダ(DCB)が開発された。この方式の特徴はロールバ

平成4年10月15日受付 平成4年12月8日受理 (Received on Oct. 15, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼解説)

* 三菱重工業(株)広島製作所製鉄部主管 (Hiroshima Shipyard and Engine Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 4-6-22 Kannonshinmachi Nishi-ku Hiroshima 733)



(因子の不均一分布→クラウン)

図1 板形状に影響する因子¹⁾

ランス力 (WR と BUR がスリップしないように、上下 WR 間に与えておくコンタクト力) を確保した上で、ディクリースベンドイング領域まで曲げ力をかけ得る点にあり、通常の WR ベンダに比較して制御能力が大幅に向上去ることが報告されている³⁾。

また、WR と BUR との接触幅を狭くすると WRB による軸心変形の制御効果が増大するという考え方から、大きな BUR クラウンをつけた NBCM (New Back up roll Crowning Mill) が提案され、その効果も認められている⁴⁾。

3・1・2 水平ベンド

表1 板形状制御に必要な制御機能と方法

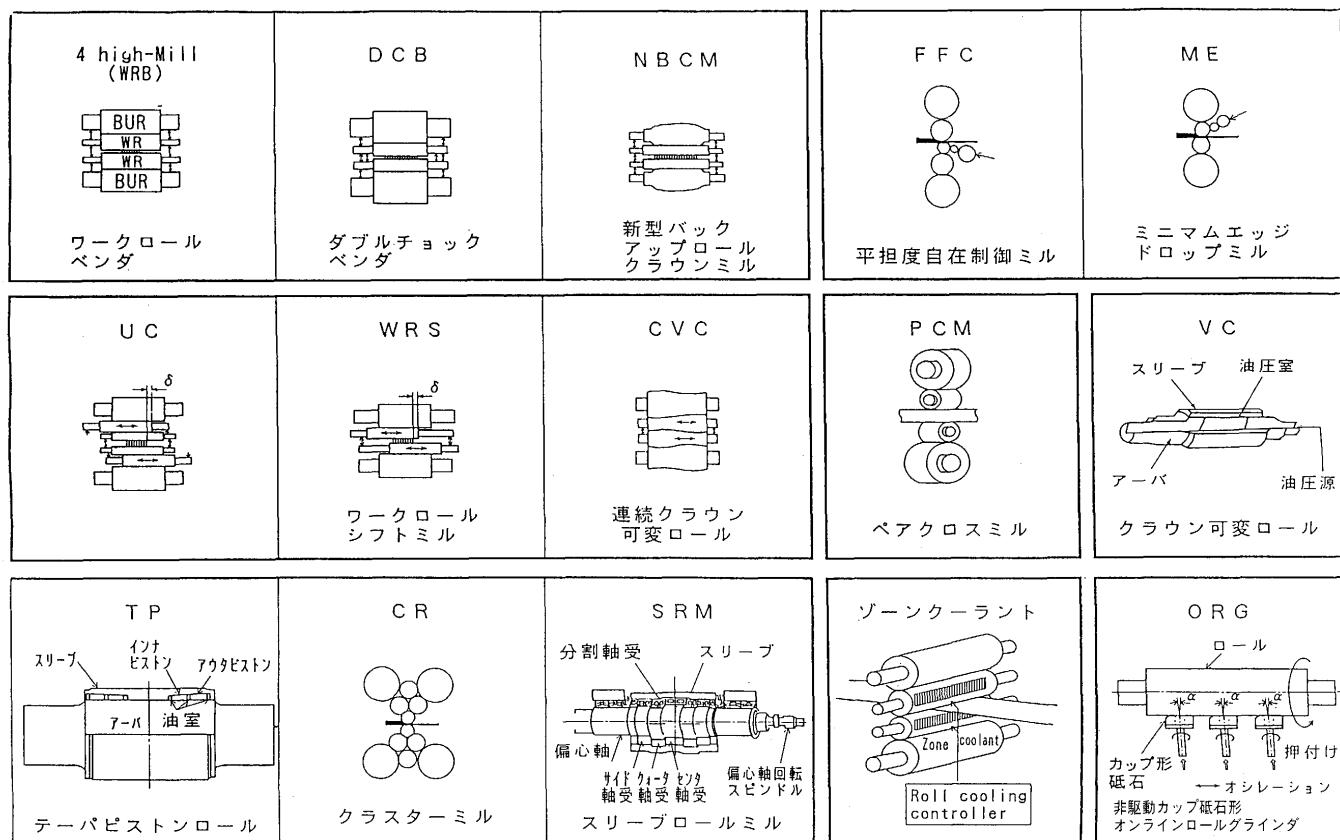
板 形 状	ロールプロフィル変化	制 御 機 能	制 御 方 法
○板クラウン	○ロール曲げ変形	—○曲げ変形矯正	○ロールペンド
○アイドロップ	○ロール接触偏平変形	—○接触偏平変形矯正	○ロールシフト ○ロールクロス ○ロールクラウンアジャスト
○ハイドロップ	○ロール熱変形	—○熱変形矯正	○ロールケーリング
○平坦度	○ロール摩耗	—○摩耗対応	○オンラインロール研磨

WR に水平方向の曲げ力を加えて水平面内で曲げると、WR は圧延荷重によって BUR に常に押しつけられ、垂直面内に変位の差が生じるので幅方向板厚制御ができる。

この考え方に基づいた形状制御圧延機として、FFC ミル (Flatness Flexibility Control Mill) が開発された⁵⁾。本ミルは小径 WR を多分割ロールで水平方向に押し曲げて中间ロール (IMR) の周りに沿って変化させる構成としている。また、下 WR を駆動し、アイドルとした極小径上 WR に水平曲げを作用させ、等価ロール径を小さくすることにより幅方向板厚精度向上、特に熱延鋼板のエッジドロップ低減を目的とした ME ミル (Minimum Edgedrop Mill) が開発された⁶⁾。

3・2 ロールシフト法

4段圧延機で圧延する場合の板クラウン、平坦度制御上の問題点の一つは、板幅より外側での WR と BUR の接触によって生ずる WR 軸心のたわみである。この問題を解決

図2 各種板形状制御圧延機、装置^{2)他}

するためには、ロール間接触長さを変化させることが有効である。

6段圧延機のIMRを軸方向にシフトすることによりロール軸心たわみを制御し、ロールベンダ効果を大きくしたHCミル(HCM)が1970年代前半に出現し、国内外で多くの稼働実績を有している。本ミルはその後、ロール形式、シフト形式、ベンダ形式などの組合せで種々開発されたが⁷⁾、最近ではIMRにもベンダ力を付与するUCMが中心となっている。

この応用として、WRを軸方向にシフトし、ロールベンダ効果を上げるとともに、WRの摩耗及びヒートクラウンの分散を狙ったWRS(Work Roll Shift)ミルがある⁸⁾。

図3に示すような特殊プロファイルを有するロールを⁹⁾、上下逆方向にシフトさせることによりクラウン制御を狙うユニークな圧延機としてCVCミル(Continuous Variable Crown Mill)がある。3次曲線カーブのロールプロファイルを用いれば、ロール間隙の分布は2次曲線で中凸から中凹みまで制御できる。

3・3 ロールクロス法

上、下両ロールの交叉(Cross)角を変えると、図4に示すように¹⁰⁾大きなクラウンが得られる。これをを利用してクラウンを制御する構想は古くからあったが、ロール軸方向に生ずる推力(スラスト力)が問題とされていた。この中で、上、下、それぞれのWRとBURを対にしてクロスさせる方式のPCミル(Pair Cross Mill)に生じるスラスト力は、WRと材料間の摩擦にのみ起因するので比較的小さい。そこで、各種ロールクロス方式の中で最初に鋼材圧延に対し実用化され、現在国内外で相当数の稼働実績を有している¹¹⁾。

3・4 ロールクラウンアジャスト法

アーバとスリープの間の圧力室に高圧油を送りこむことによって、スリープを外側に膨らませロールの膨らみ形状を可変にしたVCロール(Variable Crown Roll)が開発実用化され¹²⁾、スキンパスミル、冷延・熱延タンデムミルに適用されている。

BURの両端部近くに設けたテーパーのついた空間の中で、ピストンに油圧を加えて軸方向に移動させ、端部近くの外径を変化させることによってロールクラウンを制御する方式として、TPロール(Taper Piston Roll)¹³⁾がある。本ロールはスリープとアーバがロール中央部にて焼ばめにより固着しており、その両端にはリング状のピストンがそれぞれ挿入されている。VCロールは幅中央部の外径を変化させ、TPロールは幅両端部を変化させる点では特性が異なるが、ロールクラウンを積極的に変化させるという点では同様である。

CRミル(Cluster Rolling Mill)は小径WRを、2本のIMR及び3本のBURのクラスタ構造で支持している。BURは軸方向に5個から7個の特殊設計円筒コロ軸受からなるクラウン調整機能を有する。図5に示すように¹⁴⁾、左右2列

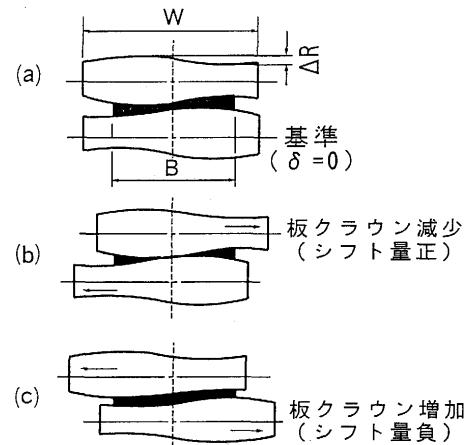


図3 CVCミルのクラウン制御原理⁹⁾

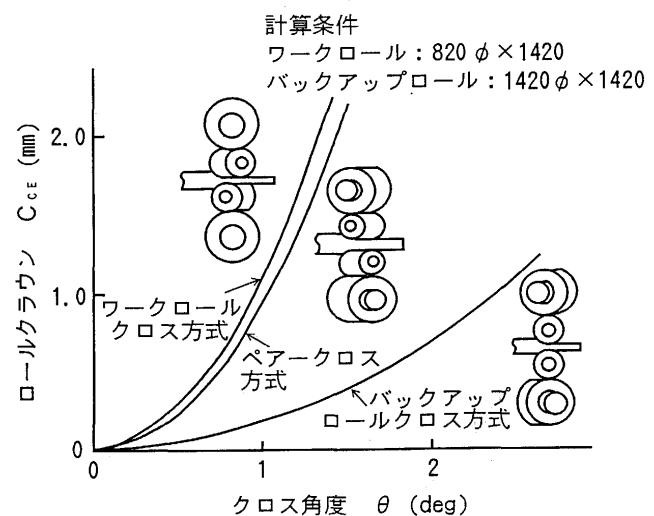


図4 各種ロールクロス方式とクラウン量¹⁰⁾

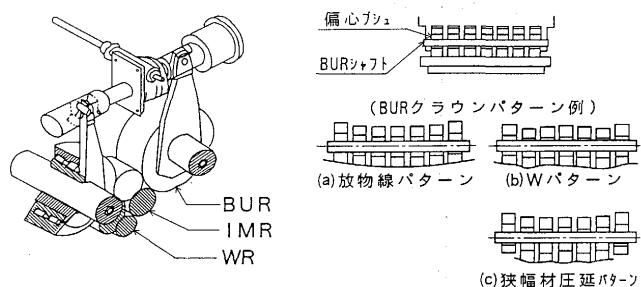


図5 CRミルのBURクラウン調整装置とBURクラウンパターン例¹⁴⁾

の大径BURは各軸受間のサドルを介して強固に支持され、各軸受の押出し量は偏心ブッシュ機構によりそれぞれ独立して操作できる構造で、多様なクラウンパターンを作ることができる。通常 $\phi 60\sim120$ mm の小径WRを用いることができる、冷延分野での硬質特殊鋼向リバースミルとして実績をあげている。また、特殊な使い方として、上ロール分のみをクラスタ化した非対称多段冷間圧延機もある¹⁵⁾。

CR ミルの高い形状制御能力を保持しつつ、構造をよりシンプルにしたものとして、スリーブ付分割バックアップロール(SRM)が考案されている¹⁶⁾。このBURは複数個(図2中では5個)の外輪回転の円筒ころ軸受を、軸に対して偏心させて焼ばめし、その上にスリーブを装着している。スリーブは軸受の外輪とともにWRに従動する。個々の軸受は偏心方向が異なっているので、軸の位相を調整することにより全体のBURプロファイルを、図6に示すようにV型とかW型に変更することができる。この機構はプロファイル創成方法は異なるが、原理はCRミルと同様である。

3・5 ロールクーリング法

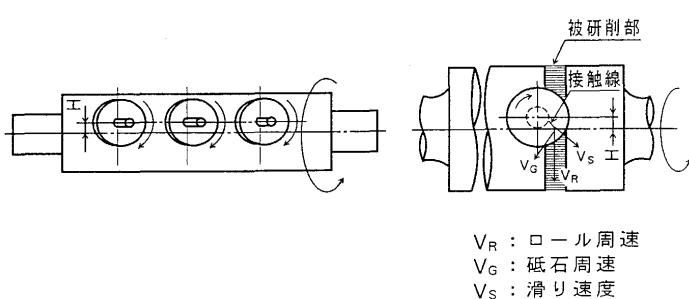
ロールのヒートクラウンを制御するために、WR胴長方向クーラント流量分布を変化させるゾーンクラント法が導入されている¹⁷⁾。これはオンラインで測定した伸び率分布が、目標の伸び率分布から外れたゾーンに対し、部分的にクーラント流量を増減してスポットクーリング制御を行い、WRベンダによる単純な端伸び、中伸びの制御だけでなく、クオータ伸び、中端伸びといった複合伸び制御を狙う。本方法は圧延機の形式に関係なく比較的簡単な操作端を設置するだけで、効果をあげている。

3・6 オンラインロール研磨法

WR摩耗の平滑化のために、圧延操業中にロール研削するオンラインロールグラインダ(On-Line Roll Grinder)が開発されている。その形式として、WRに回転する砥石を押しつける強制回転ディスク砥石形¹⁸⁾、一定幅のベルト布

	クオータ伸び	端伸び	中端伸び	中伸び
クラウンパターン				
板の形状				

図6 偏心軸の位相とクラウンパターンの関係¹⁶⁾



を押しつけこれを巻取る強制移動ベルト形¹⁹⁾、さらに非駆動カップ砥石形²⁰⁾などがある。

この中で、非駆動カップ砥石形は図7に示すように、砥石の回転軸をロール法線に対し傾斜させ、またロール軸に対しオフセットさせて押しつけることにより砥石が従動回転し、砥石とロールの相対滑りにより研削できる特徴があり、現在相当数の稼働実績を有している。

4. 各種圧延機のクラウン制御能力

図2に示した各種高機能圧延機のうち、熱間圧延設備に適用される主なものクラウン制御能力が松本ら²¹⁾や河野²²⁾によって試算されている。圧延機の性能はサイズ(ロール径、ロール胴長、最大ベンダ力)や圧延条件によって優劣にも違いができる。しかし6 Hiミルと4 Hiミルでは仕様をそろえるには無理があるようで、WR径は異なっている。

本来、クラウン制御能力は、板の変形とロール群の変形を連成して求めるべきものである。しかし、各種圧延機の固有の機能を相対的に比較する上では、板厚、張力や圧下率など特定の圧延条件を除いた方が一般化でき直感的にも理解し易い。

この観点から、両者ともWRに作用する圧延荷重は板幅方向には等分布として分割モデル解法によるロール変形計算にてクラウン制御範囲を求めている。

表2には松本²¹⁾らが検討に使用した各種圧延機の主仕様と計算条件を示す。通常4 HiミルとDCBミルのWR径は700mmで圧延荷重は19.6kN/mm、他のミルのWR径は600mmで圧延荷重は18.2kN/mmとしている。

BURに用いられるVCロールはスリーブを膨張させてクラウンを変化させるものでWRから荷重を受けるとスリーブに局所変形が生じるが、この影響は無視されている。

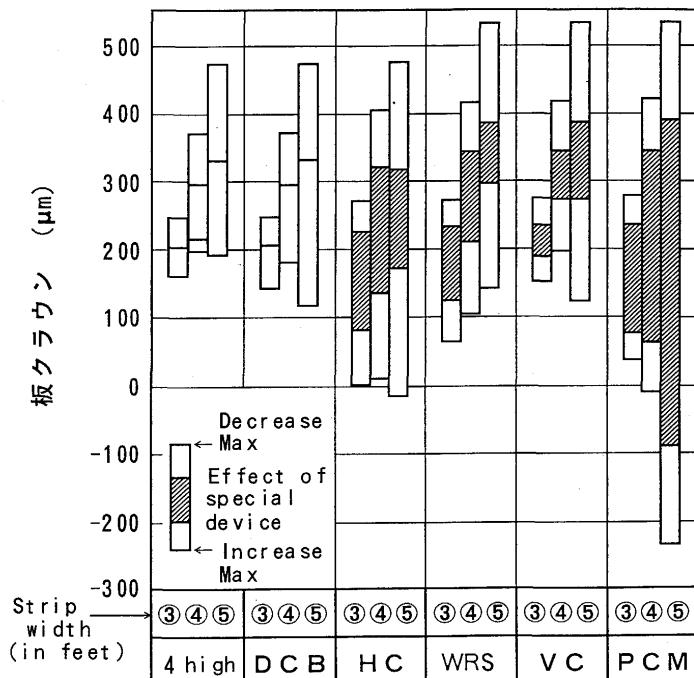
図8はその結果である。大きなクラウン制御範囲をもつ

表2(a) 比較計算を行った各ミルの条件²¹⁾

ミル	4high	DCB	HC	WRS	VC	PCM
WR径	700	700	600	600	600	600
固有機構	Bender	Bender	IMR shift	WR shift	BUR VC	Roll crossing
制約条件	+931 +1401 -931 (kN/neck)	-931 (mm)	$\delta \geq 0$ (mm)	$\delta \geq 45$ (mm)	500 (μm diameter)	$\theta \leq 1.0$ (degree)
圧延荷重	19.6kN/mm				18.2kN/mm	

表2(b) 共通計算条件(ロールカーブはフラット)

ロール	WR	IMR	BUR
Brg間距離	3050	3050	3050
バレル長	1820	1820	1820
BUR径	600	700	700
ロールベンダ力	± 637	± 637	—

図8 クラウン制御範囲（均一荷重条件）の計算結果²¹⁾

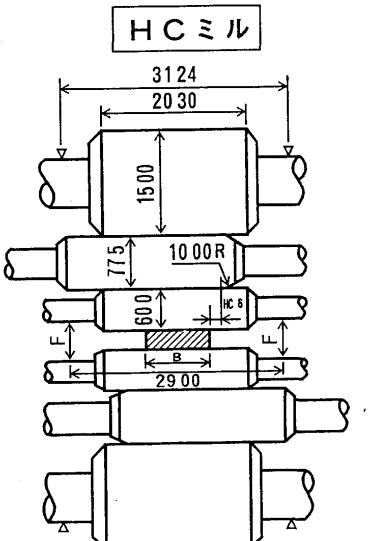
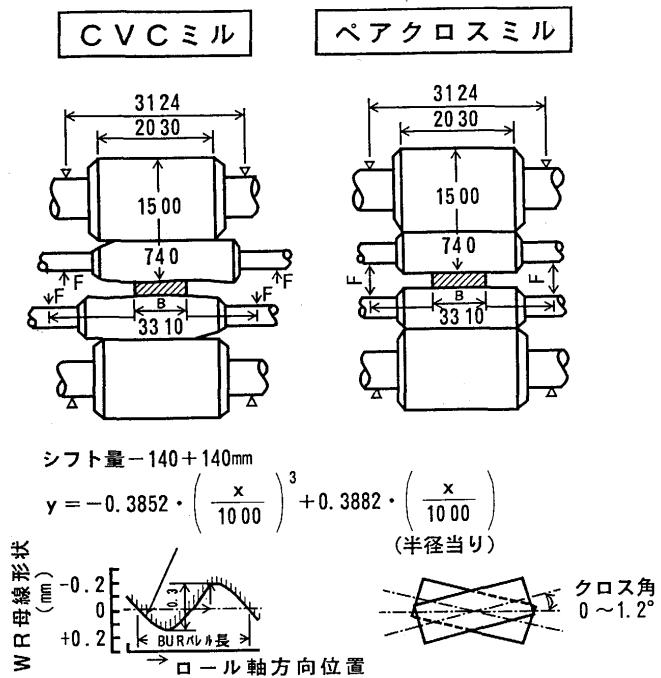
のは HC ミルと PC ミルである。狭幅板では若干 HC ミルの方が制御範囲が大きいが、全体的に最も大きい制御範囲をもつのは PC ミルである。これ以外の DCB ミル、WRS ミル、VC ロールは全く 0 クラウンが狙えず特に狭幅板に対する能力が小さい。

河野²²⁾も、図9に示す圧延機サイズを想定して表3の条件下 HC ミル、CVC ミル(4 Hi)、PC ミルのクラウン制御能力の比較を行っている。松本らは PC ミルの最大クロス角を 1° と設定したが、河野は 1.2° としている。なお実際に稼働している熱延ミルでは、クロス角は最大 1.4~1.5° で設計されている。

図10は河野による計算結果である。この結果によると、クラウン制御範囲が最も大きいのは PC ミル、次いで CVC ミル、HC ミルの順である。更に、板幅が 900mm から 1850mm までのすべての板に対し、0 クラウンが狙えるのは PC ミルだけとなっている。

一方、平坦度制御能力については、個々のミルの実機テスト結果の報告は多くあるが、ミルの相互比較を行ったものは見当らない。これは、平坦度を統一的に評価するための解析手法が未だ確立していないためと思われる。一般に平坦度制御も圧延機側からみると直接的にはクラウン制御と同じ機構が使用される。例えば、中伸びや端伸びなどの単純な形状はロールベンダーやロールクラウンで制御でき、クラウン制御能力がほぼそのまま平坦度制御能力になる。しかし、クオータの伸びや中端伸びなど複合伸びの制御はそれだけでは不十分で WR のたわみモードの変更が必要である。

複合伸びの制御はステンレス等の極薄板圧延で特に重要



$$HC \delta = 0 \sim \text{Max} \left(= \frac{2030 - B}{2} \right)$$

図9 各ミルの検討寸法²²⁾表3 計算条件²²⁾

ミル	CVC ミル	PC ミル	HC ミル
WR 径 (mm)	740	740	600
IMR 径 (mm)	—	—	775
BUR 径 (mm)	1500	1500	1500
WR 軸受間距離 (mm)	3310	3310	2900
BUR 軸受間距離 (mm)	3124	3124	3124
WR ベンダ力 (kN/Neck)	392~1960	392~981	
圧延荷重 (kN/mm)	18.6	15.7	
制約条件	径差 0.6mm	クロス角 0~1.2°	$\delta \geq 0$
	シフト量 +140mm		

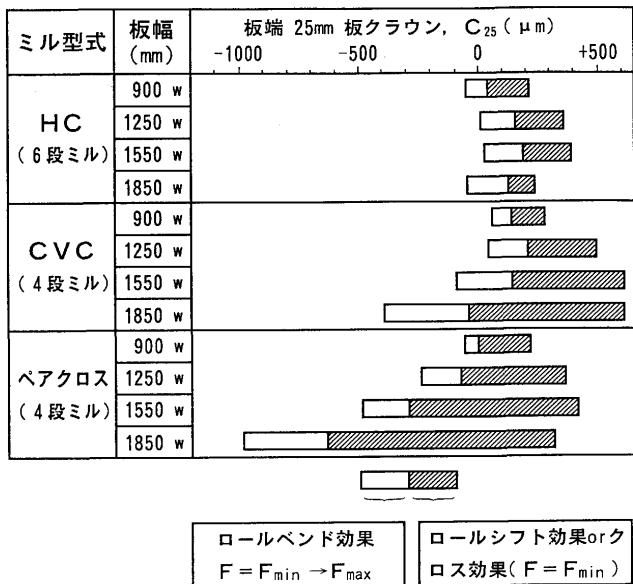


図10 板クラウン制御効果（シミュレーション計算）²²⁾

視される。クラスタミルやFFCミルは分割ロールでWRの曲げを胴長部で行う方式の圧延機で、平坦度制御を主体とする高機能圧延機である。

図11は、12段クラスタ圧延機による実機形状制御結果²³⁾であり、自動形状制御システムを用いることによりほとんどの板が急峻度で0.5%以内という良好な結果が得られている。

5. あとがき

6段圧延機の出現以来、各種高機能圧延機の開発が相ついで行われたが、最近は一段落した感がある。これら圧延機の性能評価の一例として、公表されている文献をもとにクラウン制御能力について若干の検討を行った。各圧延機とも一長一短はあるが一応の能力をもっていることが示された。未だ熱延前段から冷延後段、更には極薄圧延まで共通して使用できる高機能圧延機は見当らないが、それが必ずしも重要とは思われない。すなわち、ラインごとに目的を明確にすれば必要な能力をもつ圧延機の選定は可能である。むしろ、圧延機の能力を十分に發揮させるための制御システム、板や圧延機の状態を正確に把握するためのセンシング技術の充実が重要であろう。

ただし、最近の圧延板の寸法精度向上の対象であるエッジドロップについては多くの報告²⁴⁾はあるものの、制御技術が確立されているとは言い難い。この問題に対しては現象解明研究が続けられており、圧延現象に基づいた新しい制御圧延機や制御技術の出現が望まれる。

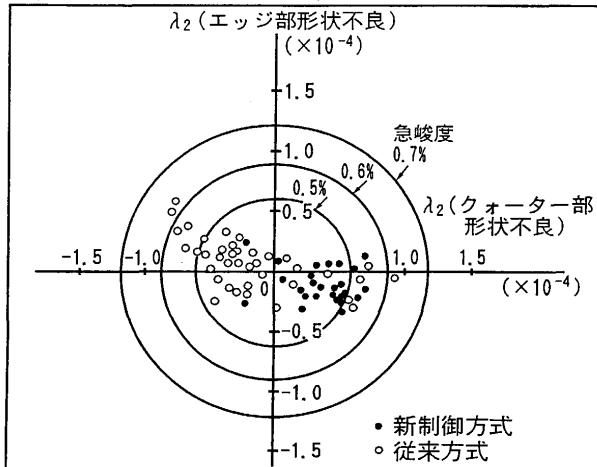


図11 CR ミルの自動形状制御の効果²³⁾

文 献

- 1) 鈴木 弘:機械の研究, 42 (1990), p.530
- 2) 阿高松男:塑性と加工, 32 (1991), p.415
- 3) 本城 恒, 木崎院司, 宮阪清人:塑性と加工, 23 (1982), p.1132
- 4) 渡辺英一, 本郷政信, 西本正則, 徳長幹恵:塑性と加工, 23 (1982), p.1139
- 5) 鍬本 純, 塩崎宏行, 藤田文夫, 木崎院司, 佐藤一幸:塑性と加工, 23 (1982), p.1259
- 6) 倉橋隆郎, 早稲田孝, 中村 充, 貞広真二, 加藤平二:塑性と加工, 31 (1990), p.632
- 7) 藤野伸弘, 杉山徳治, 清水五雄:日立評論, 72 (1990), p.393
- 8) 中西恒夫, 杉山徳治, 飯田芳彦, 西村貞夫, 栗津原博:日立評論, 67 (1985), p.275
- 9) 河野輝雄:住友金属, 42 (1990), p.190
- 10) 鈴木 弘:機械の研究, 43 (1991), p.427
- 11) 中野恒夫, 大園隆一, 荒谷博史, 塚本穎彦, 森本和夫:三菱重工技報, 29 (1992), p.3
- 12) 原 千里, 山田純造, 広岡栄司, 滝川敏二, 益居 健, 安居栄藏:住友金属, 33 (1981), p.313
- 13) 鈴木 弘:機械の研究, 42 (1990), p.1142
- 14) 中野恒夫:第140回塑性加工シンポジウムテキスト, (1992), p.37
- 15) 板摺康宏, 酒本義嗣, 藤原俊朗, 川並高雄, 鶴博彦:鉄と鋼, 72 (1986), S1248
- 16) 中野恒夫, 福山五郎, 松岡 央, 松本 将, 梶原哲雄, 森本和夫:第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.327
- 17) 斎藤輝弘, 大西建男, 小松富夫, 三吉貞行, 北村秀樹, 北浜正法:川崎製鉄技報, 22 (1990), p.19
- 18) 勅使河原敏, 近藤幸生, 渡辺克己, 新城昭夫, 坂本浩一, 白井康太:鉄と鋼, 71 (1985), S319
- 19) 石川 孝, 武智敏貞, 松本政臣, 豊島 貢, 加藤平二:材料とプロセス, 1 (1988), p.1487
- 20) 山本国雄, 林 寛治, 塚本穎彦, 江川庸夫, 後藤崇之:三菱重工技報, 25 (1988), p.352
- 21) 松本紘美, 竹本 統, 川並高雄:製鉄研究, (1988) 328, p.49
- 22) 河野輝雄:住友金属, 42 (1990), p.190
- 23) 加地孝行, 御厨 尚, 福原明彦, 寺戸 定, 葉山安信, 福山五郎:鉄と鋼, 73 (1987), p.338
- 24) 北村邦雄, 鎌田征雄, 菅沼七三雄, 中西敏修, 豊島 貢:川崎製鉄技報, 23 (1991), p.265