

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、圧延機の大形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、圧延ロールに関係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

に冷却も加わったのロールの熱変形、(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ィールの変化を必要に応じて補償する技術と行うことができる。表1に、ロールプロフィール変化の因子と必要な制御機能、制御方法に関連づけて示す。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

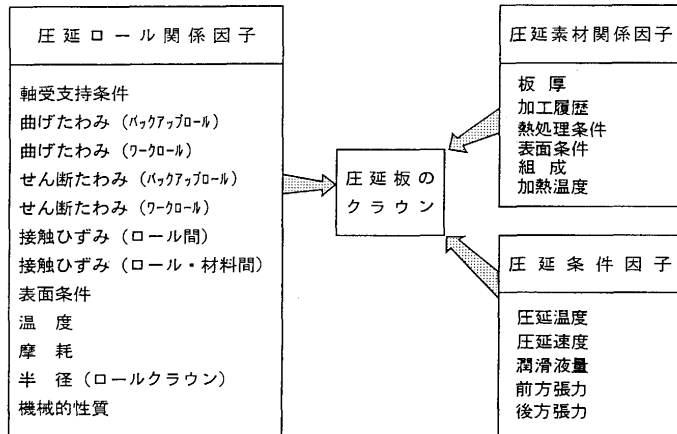
3・1・1 垂直ベンド

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しはじめ、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径の比が大きく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 Kannonschinmachi 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、ディクリースペンディ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す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

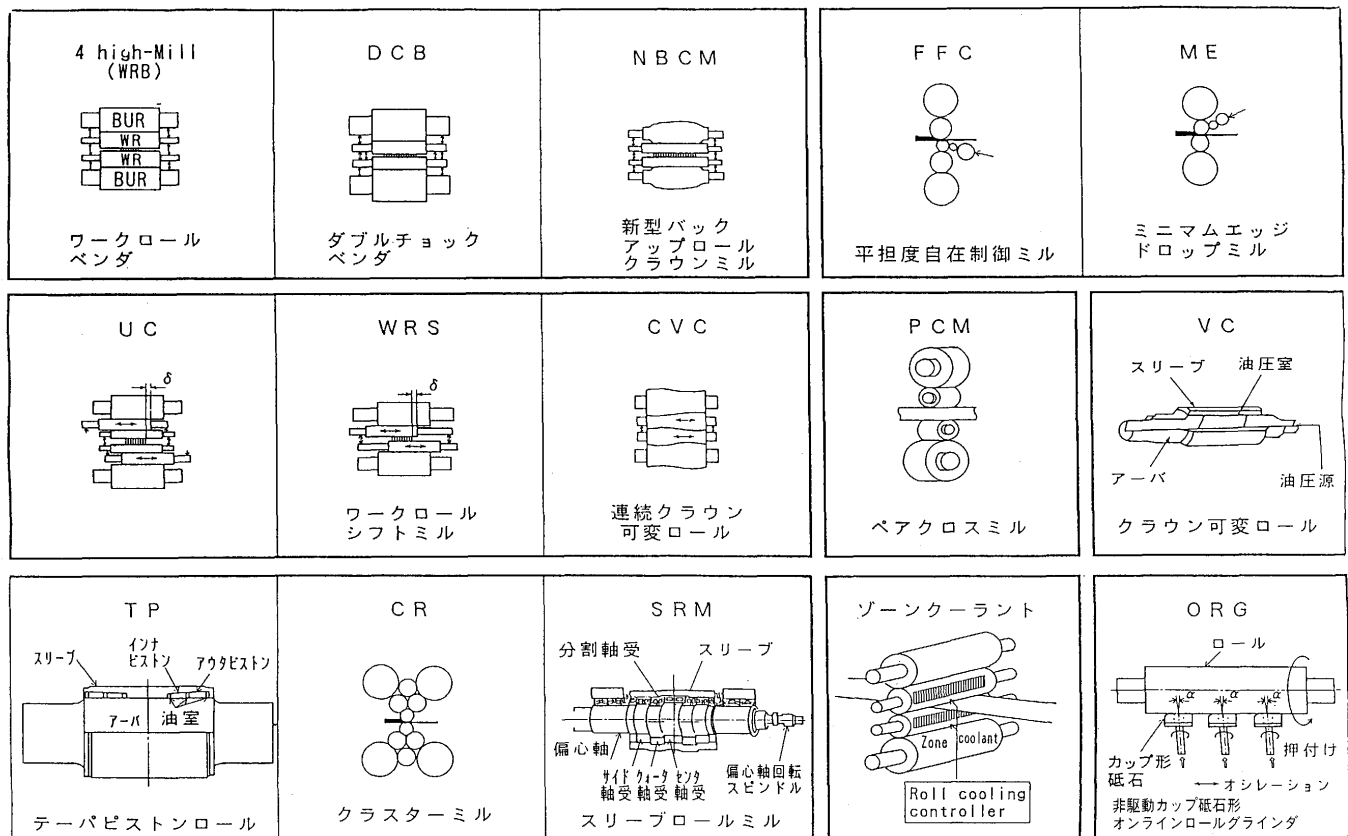
板形状	ロールプロフィール変化	制御機能	制御方法
○板クラウン	○ロール曲げ変形	○曲げ変形矯正	○ロールベンド ○ロールシフト ○ロールクロス ○ローラクラウンアジャスト
○エッジドロップ	○ロール接触偏平変形	○接触偏平変形矯正	○ローラリング
○ハイスレット	○ロール熱変形	○熱変形矯正	
○平坦度	○ロール摩耗	○摩耗対応	○オンラインロール研磨

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間ロール (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て種々開発されたが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ィー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ィールを用いれば、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

アーバとスリーブの間の圧力室に高压油を送りこむことによって、スリーブ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。本ロールはスリーブ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

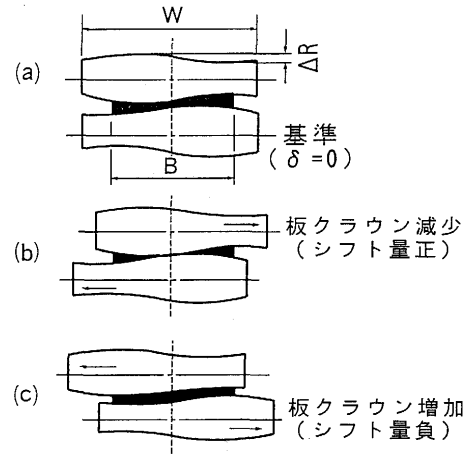


図3 CVCミルのクラウン制御原理⁹⁾

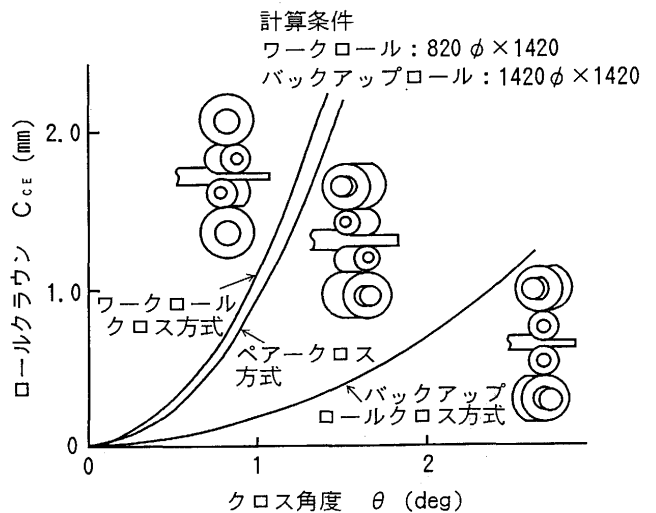


図4 各種ロールクロス方式とクラウン量¹⁰⁾

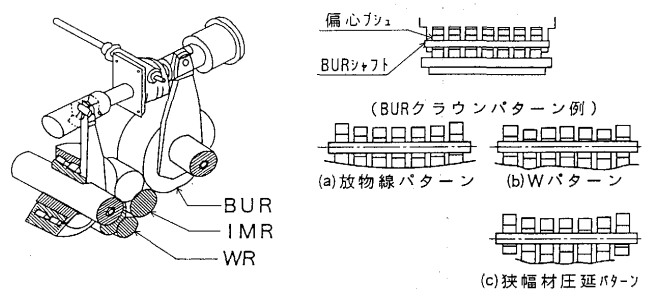


図5 CRミルのBURクラウン調整装置とBURクラウンパターン例¹⁴⁾

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φ60~120mmの小径WRを用いることができるので、冷延分野での硬質特殊鋼向リバー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⁾。

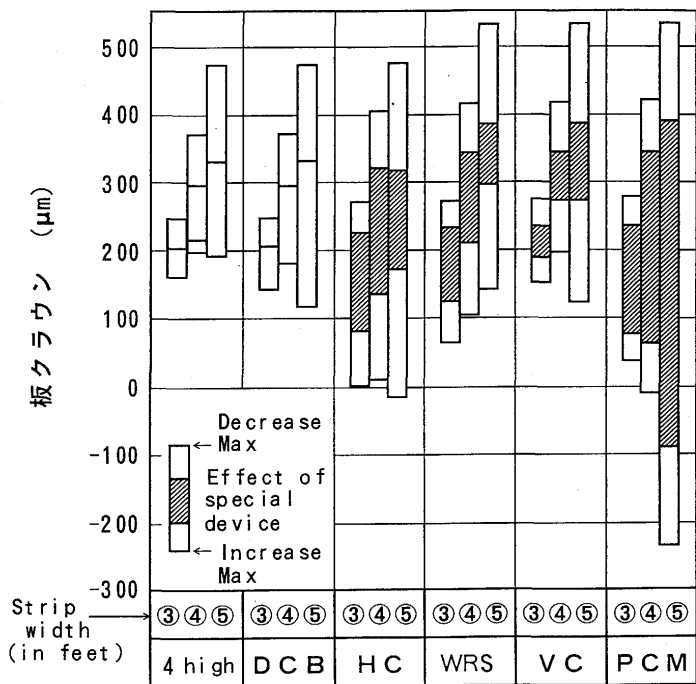


図8 クラウン制御範囲 (均一荷重条件) の計算結果²¹⁾

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³⁾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の条件で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たらない。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、クォ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

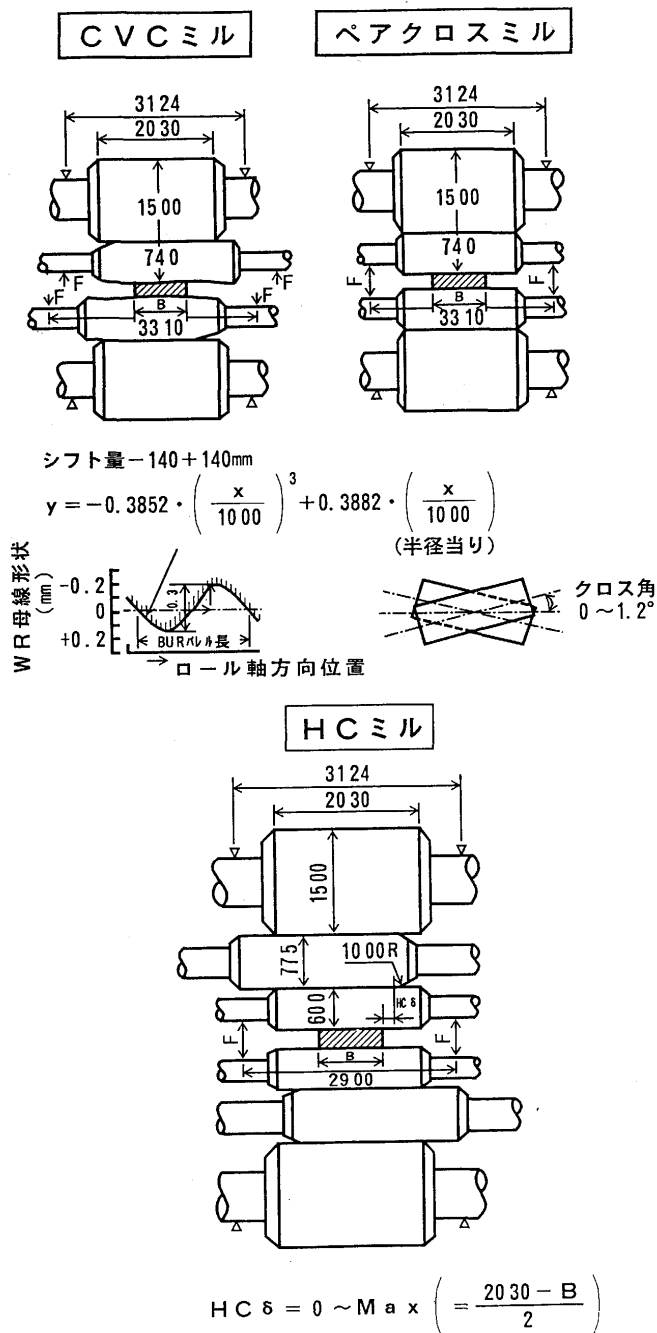
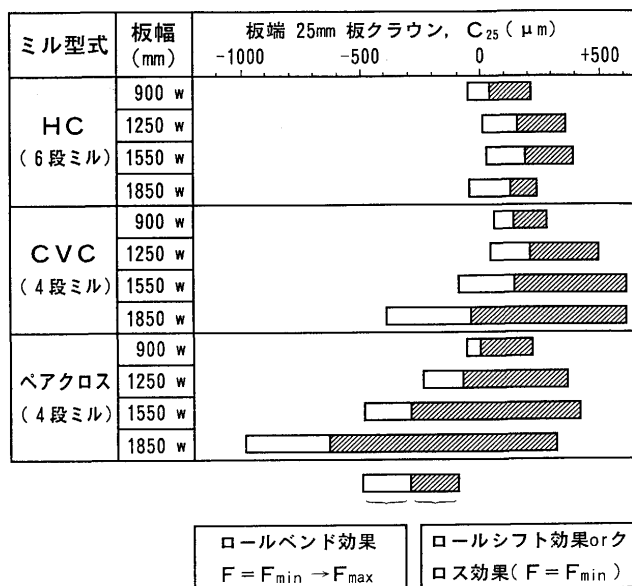


図9 各ミルの検討寸法²²⁾

表3 計算条件²²⁾

ミル		CVCミル	PCミル	HCミル
W	R 径 (mm)	740	740	600
I	M R 径 (mm)	—	—	775
B	U R 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	$\delta \geq 0$
		シフト量+140mm	0~1.2°	

図10 板クラウン制御効果 (シミュレーション計算)²²⁾

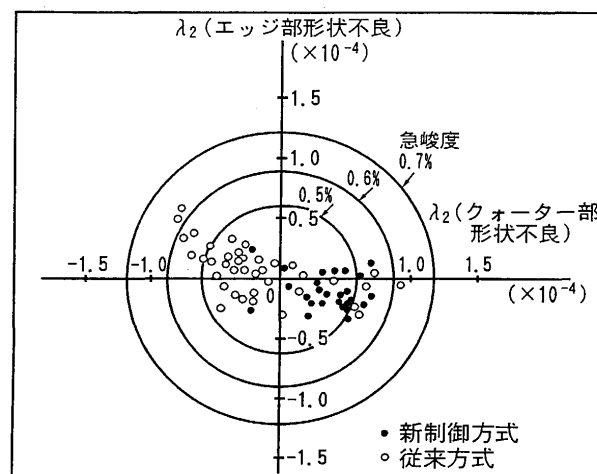
視される。クラスタミルやFFCミルは分割ロールでWRの曲げを胴長部で行う方式の圧延機で、平坦度制御を主体とする高機能圧延機である。

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たらないが、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、圧延機的能力を十分に発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, 木崎皖司, 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) 欽本 紘, 塩崎宏行, 藤田文夫, 木崎皖司, 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, 塚本顕彦, 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, 安居栄蔵: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) 斉藤輝弘, 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, 塚本顕彦, 江川庸夫, 後藤崇之:三菱重工技報, 25 (1988), p.352
- 21) 松本純美, 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