

板圧延における IHI 形状制御装置

IHI Shape Control Equipment for Strip and Plate Rolling Mill

本 城 恒 元 機械事業本部産業システム事業部 技師長
佐 藤 全 佳 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長代理
口 誠 寛 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長代理

板圧延において板形状（板平坦度と板クラウンを総称して板形状と呼ぶ）を制御する板圧延形状制御装置として、さまざまなタイプのものが国内外から報告されている。当社も客先の各種要望、条件などに対応して、さまざまな種類の板圧延形状制御装置を納入してきている。これら板形状制御装置の特性、用途、適用分野などについて総括して述べる。熱間鋼板圧延においては、現在は特殊研削ロール形状を付与した作業ロールをロールシフトするタイプの板形状制御装置を主に客先に納めている。

Various types of shape control actuators for strip and plate rolling use are used worldwide (“shape” here means both strip flatness and strip crown). IHI has also supplied some types of shape control actuators for hot and cold rolling mills in the ferrous and nonferrous areas according to customer’s requirements and conditions. These IHI shape control actuators are described and the characteristics explained together with applied areas and performances. Today, IHI mainly supplies roll shifting actuators for shape control in hot steel rolling, for use with specially selected roll ground curves.

1. 緒 言

板圧延における板形状（本稿では板平坦度と板クラウンを総称して板形状と呼ぶ）制御を行う板圧延形状制御装置については、さまざまなタイプのものが開発実用化された。板圧延形状制御装置は客先の生産条件、設備条件によって、必要仕様は異なり、形態はさまざまである。

当社は客先の各種要望に応じてさまざまな種類の板圧延形状制御装置を納入してきており、これらは現在も生産設備として使われ、性能報告がされているものも多い。今後の客先の各種要望へこたえる意味で、これら各種の IHI 板圧延形状制御装置について総括して述べる。

2. 形状制御装置

2.1 ロールベンディング方式

作業ロールベンディング（以下、WRB と呼ぶ）装置はその使用しやすさ、装備のしやすさから、現在も最も広く使われている板圧延形状制御装置である。WRB 荷重容量値は圧延荷重の 1 割弱程度が理想的な目安値であるが、設備強度的にデイクリーズベンディングを合わせても、この荷重値の実現は難しい場合が多い。

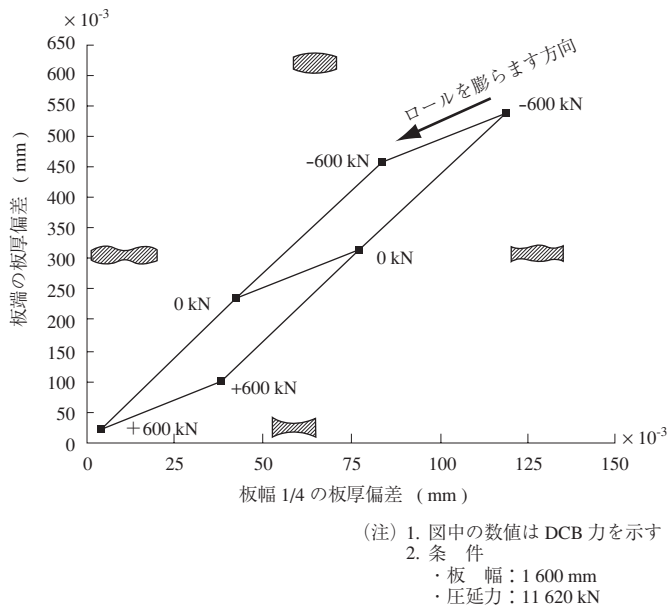
作業ロール胴端に軸箱を 2 個装備するダブルチョック

ベンディング（以下、DCB と呼ぶ）方式は WRB 装置の 3 種類の強度制約条件である、ロール強度、軸受強度、軸箱強度間のバランスを取りやすく、限られたスペースのもとで、大きなベンディング容量が得られる有効な WRB 方式である。ただし、ロール軸端がやや突き出し、改造には適さず、新設時から設備することが望ましい。

WRB は比較的簡単な装置であるため、ほかの形状制御アクチュエータと併用して設備されることが多い。第 1 図に、2.3 節で述べる VC ロールと、DCB を併用した場合の制御特性報告例⁽¹⁾を示す。図の縦軸のメカニカルクラウン値は幅方向圧延圧力分布が均一な場合の板幅中央と板端部の板厚み差を示す。

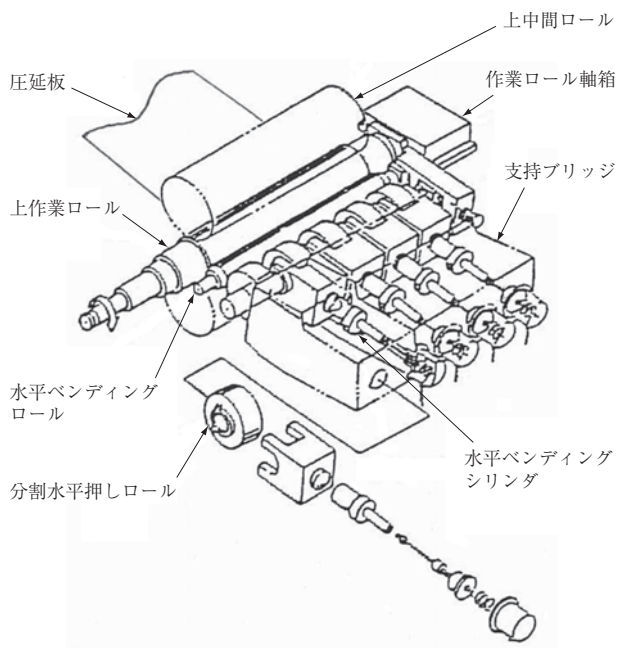
ベンディング荷重を与える油圧装置には高応答が要求されており、当社で開発の直動サーボ弁が使用されるときもある。噛み込み通板の頻度の多い圧延機では、デイクリーズベンディングは使用しにくい場合が多いが、高応答のサーボ弁を短い配管長で使用することによって、噛み込み戻抜け時のデイクリーズベンディングの操作性が改善される。

極薄板、硬質材は小径作業ロールが圧延荷重低減に有効であるが、小径ロールの場合はロール端でロールを曲げる方式である WRB は、曲げ効果が中央部に及びにくい。



第 1 図 「VC + DCB」の制御特性⁽¹⁾
Fig. 1 Control characteristic of VC roll with DCB⁽¹⁾

ロール胴長の範囲のなかで作業ロールを接触支持し、曲げあるいはサポート効果を与える押しロールを別に付加装備することも可能である。押しロールは圧延荷重を支持するロールとは別に、斜め水平方向から押す構造とする。場合によっては、第 2 図に示すような積極的に油圧で作業ロール胴の特定部を選択的に押すロールによって形状制御を行う方式（FFC 方式）が採用された⁽²⁾。



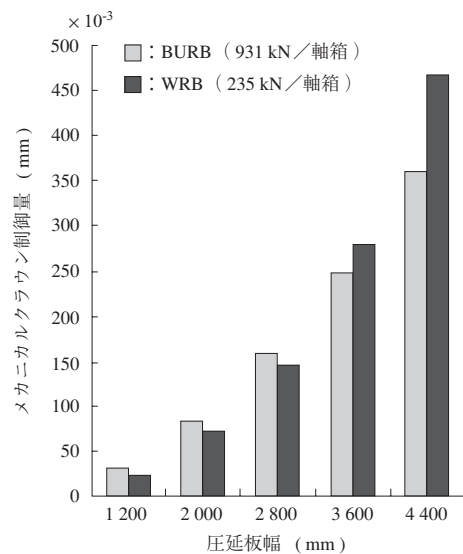
第 2 図 水平ベンディング（サポート）ミル
Fig. 2 Lateral bending (support) mill

一方、胴長の長い圧延機用として、ロール胴長の範囲以外から曲げを与える方式として、控ロールにアウトボードベンディング機構を付け、大径の控ロールを曲げて胴長の長い作業ロールを間接的に曲げることも行われている。第 3 図に作業ロール直径 1 020 mm、控ロール直径 1 830 mm、胴長 4 700 mm の鉄鋼用厚板圧延機⁽³⁾の場合についてのアウトボード式控ロールベンディング装置（以下、BURB と呼ぶ）による圧延板幅別メカニカルクラウン制御効果計算値を示す。第 3 図には WRB による圧延板幅別メカニカルクラウン制御効果を併せて示す。第 3 図の結果でも、板幅が広い時は WRB 制御効果の方が大きい。板幅が狭くなり、ロール胴長中央部でのロール曲げ効果を使うときは WRB 制御効果よりも BURB 制御効果が大きいことが示されている。

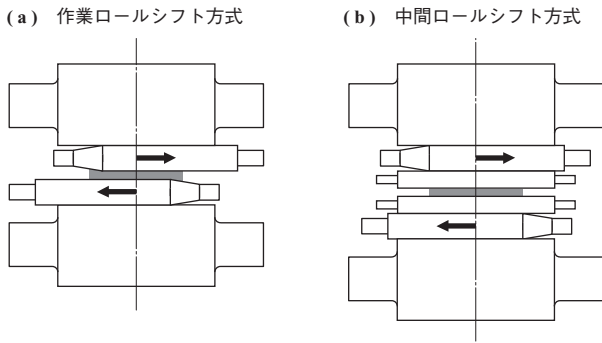
また、多段圧延機（例えば 6 段圧延機）であれば、大径の中間ロールに垂直ベンディング機能を与えて作業ロールを間接的に曲げることも行われる。中間ロールベンディング方式や、控ロールベンディング方式は、作業ロールの組み換えや、板の通板、戻り抜き時に必要な煩雑な WRB 圧力操作に影響されないで使える良さがある。

2.2 ロールシフト方式

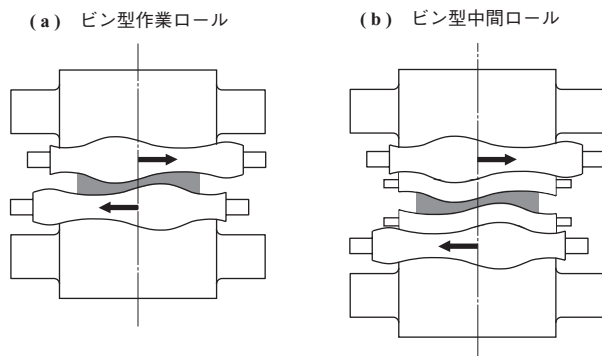
ロールシフト形状制御方式としてさまざまな方式が国内外から報告されているが、① 作業ロールをシフトすることによって、板幅外のロール同志の接触部を短くして圧延ロールのたわみ変形を改善し、形状制御効果を上げる方式（第 4 図）② シフトロールに特殊なロール形状を付けてシフトさせ、幾何学的な幅方向のロールギャップ分



第 3 図 圧延板幅別メカニカルクラウン制御能力比較
Fig. 3 Mechanical crown control range



第4図 ロールシフトによる作業ロールのバックアップ長さ
可変の方式
Fig. 4 Shape control with adjustable roll contact length



第5図 特殊形状（ピン形）ロールを軸方向にシフトする
クラウン制御
Fig. 5 Shape control with specially curved shift rolls

布変化効果によって、形状制御効果を上げる方式（第5図）に基本的に分類⁽⁴⁾される。

当社は各種ロールシフト方式を経験してきたが、第5図に示すシフトロールの幾何学的形状の効果に基づいたやり方は、幾何学的形状によって形状制御効果を自在に設定できる点が有利である。最近のNCロール研削盤の普及によって、研削ロールカーブの自在設定能力は向上しており、最適ロールカーブの効果をより上げやすくなっている。

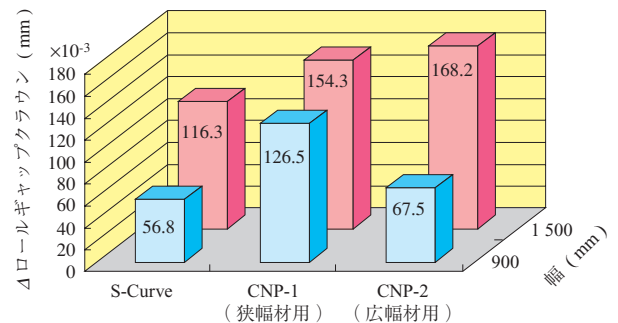
シフト機構は前記①、②いずれの方式でも基本的には共通であるため、客先の生産条件、設備条件に合わせて最適な幾何学形状（最適化手法は、例えば特許公報⁽⁵⁾の一例に示す）を使用時に提案する。同時に、そのロール形状に合わせたシフト位置、ロールベンディング圧力設定値などを演算指令する自動設定システムを同時に納入することによって、客先での操業効率を高めるように努めてきた。当社は最適化形状のシフトロールをCNP（Combined Numerical Profile）ロールと総称している。

シフトロール形状の最適化を進める場合には、圧延工場ごと、圧延スタンドごとにもロール形状を最適化すると

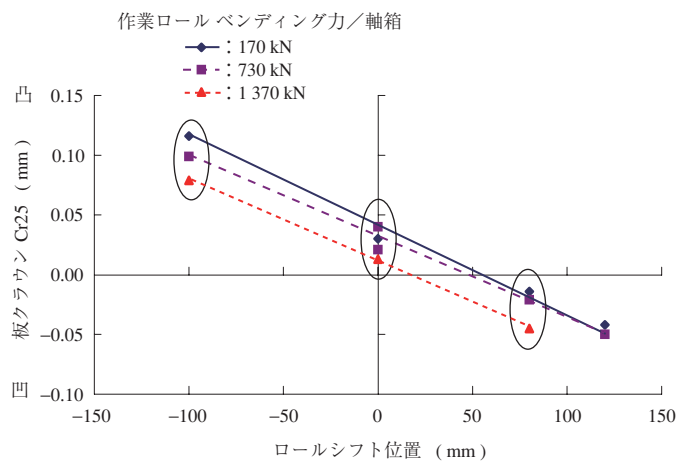
もに、同一スタンド内でも生産比率の大きい板幅に形状制御効果が大きくなるようにも対応できる。このような最適化形状シフトロールとしてのCNPロールを備えるときの、板幅ごとの板クラウン形状制御効果例を単純凹凸形ロールプロファイル（S字形カーブ）のミルと比較して第6図⁽⁶⁾に示す。最適化徹底を図るため、ロール形状は特定関数ではなく、数値データ群で定められるときも多い。

本思想による形状のロールを仕上ホットストリップミル最終スタンドに装備した場合の板クラウン制御能力試験結果を第7図に示す。第7図において縦軸の板クラウンCr25は板幅中心と板幅端部から25mm内側の幅方向位置の板厚差を示す。

作業ロールシフト方式は、鉄鋼の熱間圧延で問題になるロールの段差磨耗を軽減するためのロール磨耗分散にも使用される技術である。磨耗分散効果を確認するため、ホットストリップミルで試験した例を第1表および第8図～第10図に示す。本試験では、板100本分の圧延に相当



第6図 CNPミルの板クラウン制御能力⁽⁶⁾
Fig. 6 Strip crown controllability of CNP Mill⁽⁶⁾



第7図 CNPミルの板クラウン制御能力試験結果
Fig. 7 Measured strip crown controllability by CNP Mill
(注) 板幅：980 mm
板厚：5.0 mm

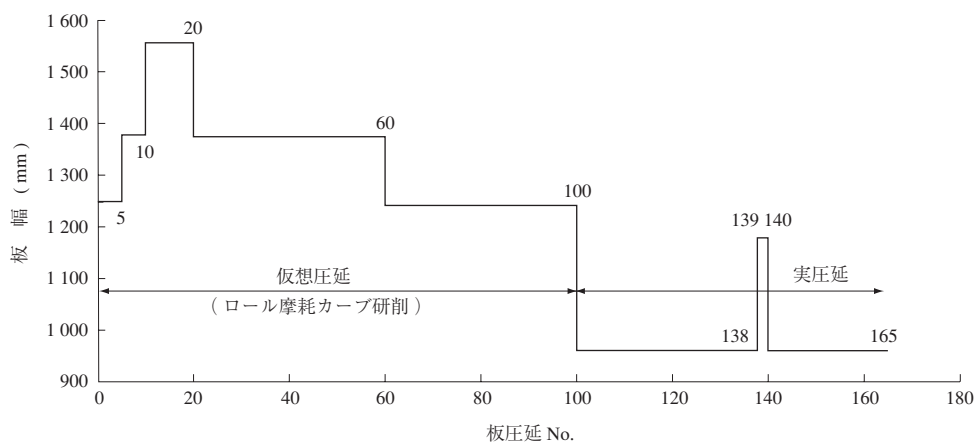
第 1 表 磨耗分散試験圧延パススケジュール
Table 1 Rolling pass schedule for roll wear dispersion tests

スタンド No.	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
出口板厚 (mm)	50.0	22.7	12.7	7.8	5.0	3.7	2.8

する磨耗形状（磨耗計算式を基に定めた形状）を，CNP ロール形状に付加したロール形状に，研削したロールを F5, F6 スタンドに最初に用意した．このロールを用いて 65 本のコイルを F5, F6 スタンドでサイクリックロールシフトを行いつつ実機圧延した．F5, F6 隣接 2 スタンドで反方向にシフトオシレーションさせ，磨耗分散による板クラウン変動を防止しつつ圧延した．第 139 本目に相当する板の形状実測値から，950 mm 板幅から 1 150 mm 板幅への 200 mm の幅戻りがあっても，いわゆるキャツ

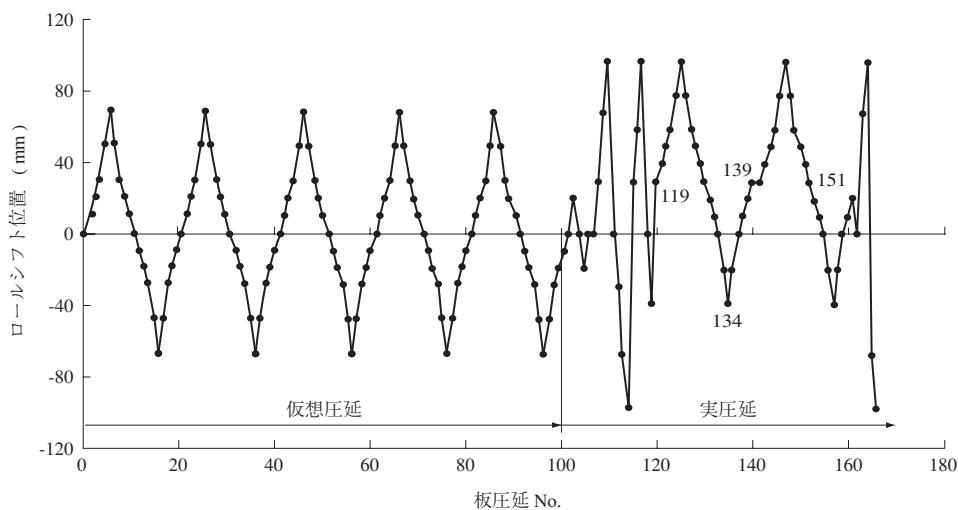
イヤ（板幅端での耳状の板厚増大現象）などのない正常な板クラウンである結果が得られており，シフトオシレーションがスケジュールフリーに役立つことが確認された．

冷間圧延の場合，エッジドロップ領域の板形状制御に主眼を置く場合は，**第 4 図 - (a)** のテーパ作業ロールシフトも使われる．板厚が薄い下流パスではテーパ噛まし圧延は板破断の危険がある．このため，厚みが厚く，幅方向マスフローの起きやすい上流パスでテーパ噛まし圧延を行い，下流パスの普通圧延の後でも上流パスの制御効果が残るようにする．**第 11 図** にエッジドロップの 3 パス圧延履歴特性を示す．直径 400 mm のテーパ作業ロールで板幅端テーパ噛ましの冷間圧延を行い，エッジドロップ板クラウン制御効果を確認した結果である．**第 11 図** に示す縦軸は板幅中心と板幅端部から 7.5 mm 内側の幅方向位置の板



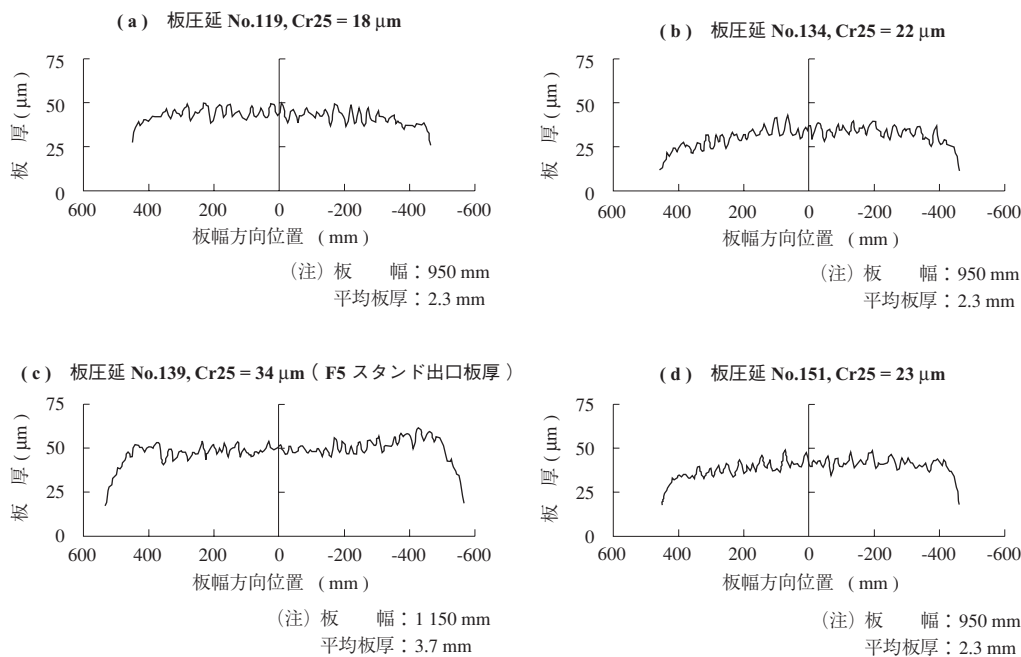
(注) 圧延機：φ760 / φ1 380 × 2 032 mm ホットストリップミル

第 8 図 磨耗分散試験圧延スケジュール
Fig. 8 Rolling schedule for roll wear dispersion tests

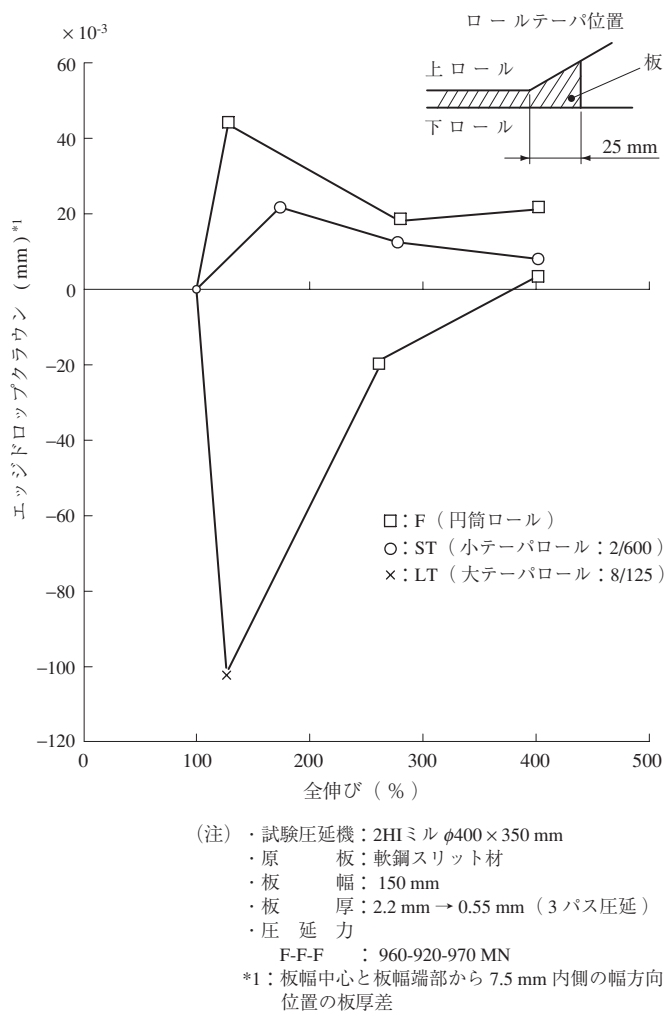


(注) F5 スタンド

第 9 図 磨耗分散試験オシレーションスケジュール
Fig. 9 Oscillation schedule (at F5 stand) for roll wear dispersion tests



第 10 図 F7 スタンド出側板厚分布と板クラウン値
Fig. 10 Delivery strip profile and crown values from an actual F7 stand



第 11 図 エッジドロップの 3 パス圧延履歴特性
Fig. 11 Edge drop crown progress with 3 pass rolling

厚差を示す。

上流パスでのエッジドロップ制御効果はその後の下流パスでの普通圧延で急激にそのこん跡が小さくなり、製品エッジドロップ制御効果を減らすので、上流パスではエッジアップに近い制御効果を与える必要があることが分かる。テーパ作業ロールシフトの圧延では、テーパ部の位置を細かく設定する必要がある。

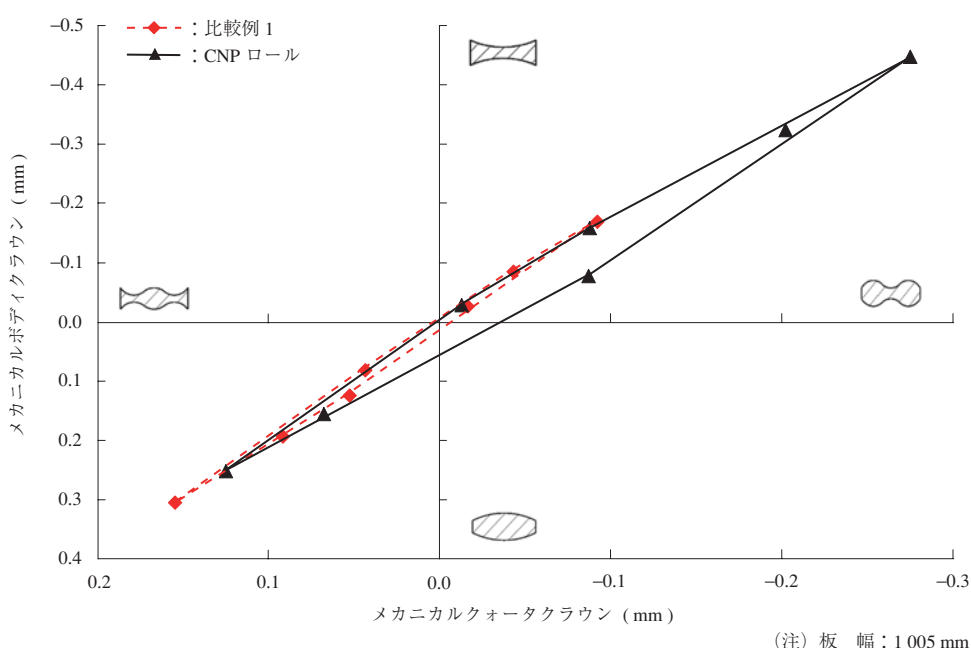
最エッジのエッジドロップ低減のためには縦ロール圧延機が採用されたこともある⁽⁷⁾。

冷間多段圧延機の場合には、板表面性状への作業ロールシフトの影響を防ぐなどの理由から中間ロールシフト方式による形状制御能力拡大も行われる。中間ロールシフトの場合は、作業ロールの曲げ剛性があるため、前記の中間シフトロール形状の幾何学的形状効果は板に及びにくい。このため、ロールの弾性変形効果も考慮したシフトロール形状の最適化を行うことで形状制御効果を図る。第 2 表および第 12 図に最適化形状シフト中間ロール (CNP ロール) と、第 4 図 - (b) の通常のシフト中間ロールの場合の 6 段圧延機との理論解析による形状制御効果の比較を示す。

シフト装置は客先の作業性、保守性に対する要求に応じて、作業側、駆動側のいずれにも設置可能である。ロールシフト形状制御装置はロール形状の選定によって自在な制御効果が得られ、また熱間厚板ミルのような大型圧延機に

第2表 6HI 中間ロールシフトミル形状制御能力計算条件
Table 2 Calculation conditions for shape control of 6HI Mill

項目	単位	CNP ロール	比較例 1
作業ロール直径	mm	400	400
中間ロール直径	mm	440	440
控ロール直径	mm	1 200	1 200
作業ロール胴長	mm	1 420	1 420
中間ロール形状	—	0.2 mm 局部凸カーブ	第4図-(b)タイプ
中間ロール可能設備最大シフト量	mm	±125	0 ~ 250
圧延力	kN	6 600	6 600
板幅	kN	1 000	1 000
公称出口板厚	mm	0.5	0.5
作業ロールベンディング荷重	kN	+ 400, - 200	+ 400, - 200
中間ロールベンディング荷重	kN	+ 400	+ 400



第12図 6HI ミル二次元表示形状制御能力
Fig. 12 Characteristic in two dimensional strip shape with 6HI Mill

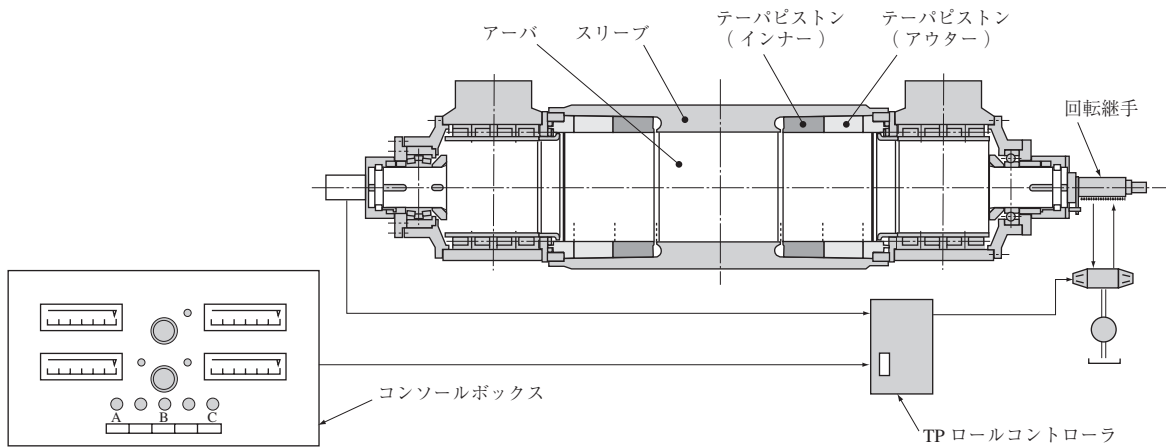
も装備可能であるため採用されるケースが増えている。

2.3 膨張ロール方式（可変クラウンロール方式）

前述のごとくロール胴長が長くなると、WRB で形状制御を行う場合は、WRB 効果が板幅中央部に及びにくくなる。控ロール径を胴方向に部分的に膨張させて形状制御する方式を WRB と併用することによって、板幅全域に板形状制御効果を確保できる。控ロールに膨張ロールを使い形状制御能力を確保できれば、作業ロールには形状制御のための凹凸のある表面カーブ加工など不要になる。このため、板幅内での板と作業ロールの不均一圧力接触の程度が小さくなるので、板表面性状変動を特に嫌う圧延の場合に有効である。

軽荷重圧延機ではロール胴長中央部に膨張用の油圧室をもつ可変クラウンロール（例えば VC ロール⁽⁸⁾）と WRB を併用することができる。φ480/φ1 220×1 950 mm の4段圧延機において膨張量 0.32 mm の VC ロールと DCB を組合せた場合の性能計算例を第1図に示す。さらに大きい圧延力の場合形状制御を行う手段として、当社は独自の方式である TP (Taper-piston) ロールを開発し、納入してきた。

第13図に TP ロールを示す。TP ロールはアーバとスリーブ、テーパピストンから構成され、テーパピストンの位置を油圧で変更することによってロールプロファイルを変更する。ピストンを片側に2個配置してプロファイル



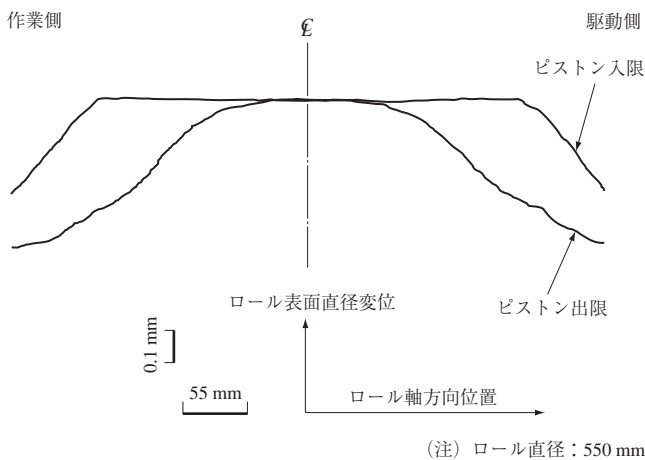
第 13 図 TP ロール⁽¹⁾
Fig. 13 Taper-piston roll⁽¹⁾

変更の自由度を大きくもできる。控ロール胴長の長いアルミ熱間圧延機などで使用されている⁽⁹⁾。

TP ロールは形状制御装置を装備しにくい 2HI 圧延機（ホットスキンプスミルにこのタイプが使われている）にも適している。この場合は作業ロールに装備するためロールは前記控ロールほどは太くなく、膨張量としては小さくなる。しかし、ロールプロファイル変化が板に対して直接効くため形状制御効果が大い。第 14 図に直径 550 mm の 2HI 用中径 TP ロールの膨張カーブ実測例を示す。

2.4 その他の方式

広幅極薄板圧延ではポケット形状が出やすく、このような任意（非対称）部の局部形状制御は今まで述べた機械的 shape control 装置の苦手とするところであり、ゾーンクーラント、スポットクーラント（ホットティングもある）コントロールが有効である。これらはクーラントによるロールの



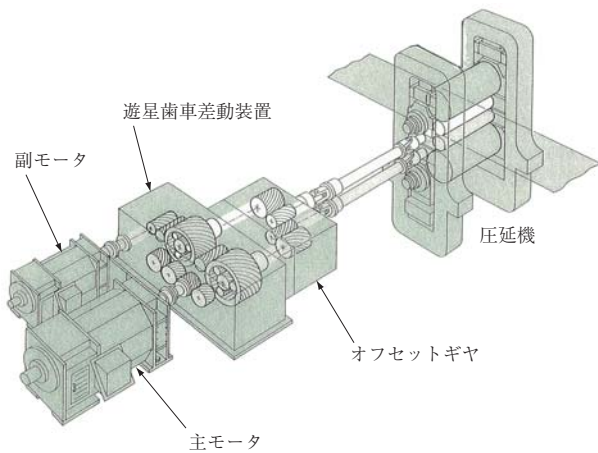
第 14 図 中径 TP 作業ロールの膨張カーブ
Fig. 14 Roll surface displacement in TP work roll with intermediate diameter

熱膨張，熱収縮を利用する方式であり，板平たん度センサと組合せた自動形状制御システムは非鉄圧延機で AFC (Automatic Flatness Control) システムとして多用されている。詳細は，本 IHI 技報掲載論文「冷間圧延における形状制御と空気軸受式形状計」を参照されたい。

板圧延形状制御は形状センサ出力に基づいてアクチュエータを操作制御する方式が基本である。このため，アクチュエータ能力が大きくても形状検出誤差，フィードバック演算誤差が形状誤差として残る場合がある。このような点から板平たん度に対して機械的の自己修正能力のあるテンションレベラが薄板用の最終仕上げ設備として採用されるケースもある。さらに，この効果を極薄板用に高めたものとして，極小径曲率半径の板曲げのヘッドをもつハイドロテンションレベラ⁽¹⁰⁾が使われる場合もある。

圧延機の上，下ロールを異周速にする異周速圧延機は圧延荷重低減効果があるため，生産性の向上に寄与するとともに，① 圧延限界厚みを小さくする効果 ② 板成形性の改善効果 ③ 結晶粒の微細化効果，などがある。異周速比を可変にすれば圧延荷重可変となり，形状制御効果を生む。このような総合的観点から，第 15 図に示す異周速圧延設備が納入された。遊星歯車差動装置の採用によって，設備モータパワーを大きくすることなしに，任意異周速比を実現できる。最近では自動車部品板を想定したアルミニウム圧延において 4HI 異周速圧延機によって成形性指標値である r 値（ランクフォード値）改善効果が大きくなることが報告されている⁽¹¹⁾。

多段クラスタ圧延機の場合は，以上に述べた各種形状制御装置を組み合わせることで形状制御が実施される⁽¹²⁾。



第 15 図 異周速圧延機
Fig. 15 Differential circumferential speed rolling mill

3. 結 言

当社は板圧延形状制御装置としてさまざまな種類のものを入りしてきた。本稿ではそのうちの主要なものを列記し、それらの設備面、使用面での特長を紹介した。各種ロールベンディング方式、シフトロール方式、膨張ロール方式などは圧延設備の使用状況に見合った装備をされることが望ましい。また、鉄鋼熱間圧延ではシフトロール方式の採用が増えている。

本稿で述べたように、形状制御装置の採用に当たっては圧延生産条件と要望によってさまざまな選択肢があるので、客先における設備化の検討に当たっては、本紹介を生かして種々の要望にこたえていく。

今後も、形状制御圧延機として、さらなる発展に注力していく所存である。

参 考 文 献

(1) 口 誠寛ほか：アルミニウム圧延機の現状 石川島播磨技報 第 43 巻 第 4 号 2003 年 7 月 pp. 129 - 133

(2) 富田省吾：圧延加工プロセスの研究技術開発材料とプロセス 第 17 巻 第 2 号 2004 年 3 月 p. 258

(3) 高谷周一ほか：バックアップロールベンディング装置による厚板クラウン制御技術の開発 第 110 回圧延理論部会資料 110 圧理-11 1999 年 7 月

(4) 鈴木 弘：圧延百話 初版 養賢堂 2000 年 pp. 106 - 109

(5) IHI：公開特許公報 2 005 - 14 061 本城 恒ほか

(6) 佐藤全佳ほか：熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御技術 石川島播磨技報 第 44 巻 第 5 号 2004 年 9 月 pp. 352 - 357

(7) 田添信広ほか：熱間仕上げスタンド間エッジャーによるエッジドロップの制御 CAMP-ISIJ 第 5 巻 1992 年 pp. 475 - 478

(8) 益居 健ほか：可変クラウンロールを有する圧延機の形状制御特性 塑性と加工 第 31 巻 第 350 号 1990 年 pp. 515 - 521

(9) 小林博幸ほか：アルミ熱間圧延における TP ロールの適用について 古河電工時報 第 89 号 1991 年 12 月 pp. 152 - 159

(10) 河合三郎ほか：静圧式テンションレベラの開発 石川島播磨技報 第 21 巻 第 1 号 1981 年 1 月 pp. 63 - 70

(11) 小松原俊雄ほか：温間異周速圧延による Al-Mg-Si 系合金の成形性向上 Furukawa-Sky Review No.3 2007 年 4 月 pp. 25 - 30

(12) 岩崎孝行ほか：小径 12 段冷間圧延機（通称：12 段 X ミル）の特性 石川島播磨技報 第 45 巻 第 2 号 2005 年 6 月 pp. 91 - 95