



鋼板における寸法制御と精度向上

君嶋 英彦*

Improvement of Size and Gauge Control in Steel Sheet Rolling

Hidehiko KIMISHIMA

Key words: thickness control; width control; crown; shape; thickness accuracy; width accuracy; automatic gauge control.

1. 緒言

鋼板加工分野において、省工程、自動化、加工の高度化により加工プロセスを簡易化し、生産効率をあげるのは、コストダウンを図るうえで必然の趨勢であり、近年とみにこの動向に拍車がかかっている。

加工プロセス簡易化を達成するうえで、素材となる鋼板の果す役割は大きく、均等、均質で安定的に供給されることが、鋼板にとって要求される条件である。

中でも寸法は最重要条件であり、その精度の向上は、常に需要家から鋼板製造メーカーに強く求められ続けてきた課題である。

この要望に応えるとともに、鋼板製造段階での、歩留りをはじめとする生産性を向上するため、寸法制御に関する各種の技術開発が鋼板製造メーカーと圧延設備製造メーカーにより活発に取組まれ、その多くが実用に供されている。その結果、一昔前にくらべると国内の寸法制御技術は、鋼種の多様化、チャンスフリー化等圧延条件の悪化するなかで、格段の進歩をとげてきたといえる。

この動向を代表するものとして、ハード面では油圧圧下の普及と大型圧延機への板厚プロフィール及び形状制御機能の採用があげられる。

また、ソフト面では圧延理論解析をベースにしたコントロールモデルの高度化に対応した、制御システムの構築があり、それは、電気、機械、計測各分野の先端制御技術の総合化により、高精度、高応用機能のもとに実現可能となった。

これら技術の展開は、鋼板の特性により若干の差は有るが、厚板、熱延、冷延各鋼板製造分野に共通して見られるものである。一例として、厚板の要素技術展開の経過をFig. 1に示すが、熱延、冷延についても同様の状況にあると考えて良い。

以下、各鋼板分野における寸法制御の現状とその精度向上について述べる。

2. 厚板鋼板

2・1 厚板圧延における寸法制御技術

厚板分野においても、寸法制御技術は、設備・センサーの開発や、それらをコントロールするモデルの研究、計算機・DDC (Direct Digital Controller) の技術進展とあいまって、格段に進歩してきた。Fig. 1 に技術発展の歩みを示したが、なかでも油圧圧下の導入や平面形状制御技術の進展、厚板圧延へのクラウン制御ミルの導入はその代表的な例である。Fig. 2 に1976年と1991年の板厚と板幅の寸法精度の比較を示すが、大幅な向上が見られる。

2・1・1 板厚精度向上

板厚精度を評価する指標として平均板厚精度を示す狙い厚精度と、板内板厚精度を示す長手方向厚偏差がある。国内の狙い厚精度の平均値の推移をFig. 2 (a)に示したが、著しい向上がみられる。狙い厚精度は油圧AGC (Automatic Gauge Control) の導入により大幅に向上し、絶対値AGC, FF (Feed Forward) -AGC, モニタリングAGCなどのAGCの高機能化によりレベルアップが図られてきたことをFig. 3の某ミルの推移で示す。ここでミル直近(約2m)に設置可能な厚さ計によるモニタリングがAGCをより効果的なものとしている。

一方、Fig. 2 (b)に示すように、加熱炉のスキッドマーク等に起因する長手方向板厚偏差も油圧AGCにより大幅に改善された。FF-AGC等により $\bar{X}=65\mu\text{m}$ を達成しているミルもある。

現在の油圧圧下装置の大部分は1976年～81年にかけて導入されたものであるが、一部のミルでは、サーボ弁の直動化やAGC盤のDDC化がなされており、制御の高応答化と高

平成4年7月29日受付 平成4年12月8日受理 (Received on July 29, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼展望)

* (社)日本鉄鋼協会共同研究会鋼板部会長(Chairman, Steel Plate and Sheets Committee, The Joint Research Society, The Iron and Steel Institute of Japan, 1-9-4 Ohtemachi Chiyoda-ku Tokyo 100)

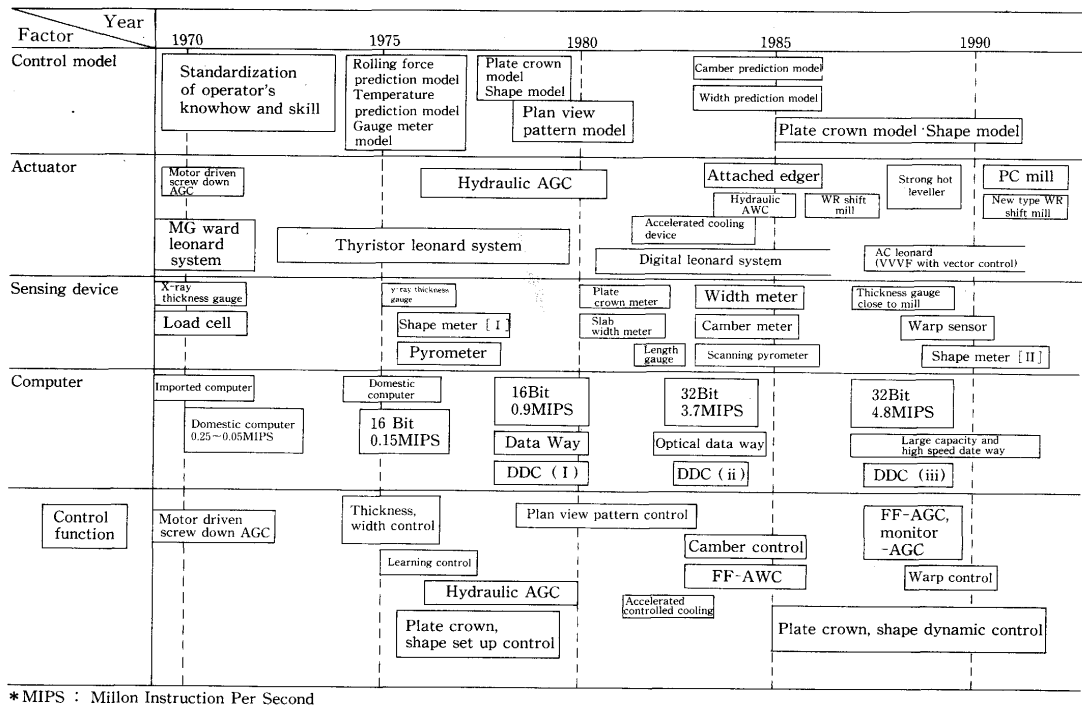


Fig. 1. Development of plate rolling technology.

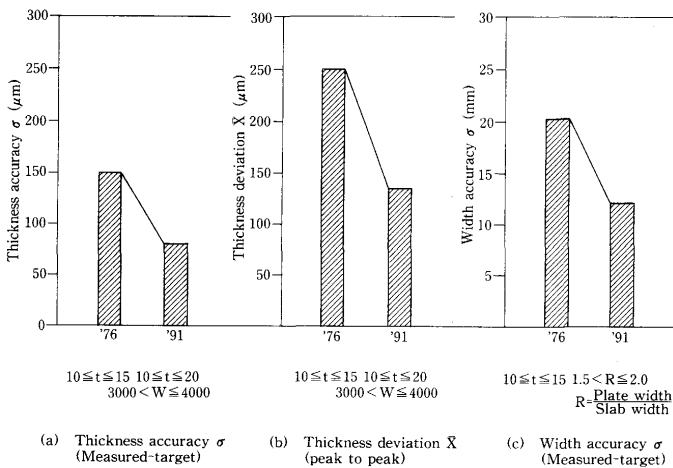


Fig. 2. Trends of plate rolling accuracy (average in Japan).

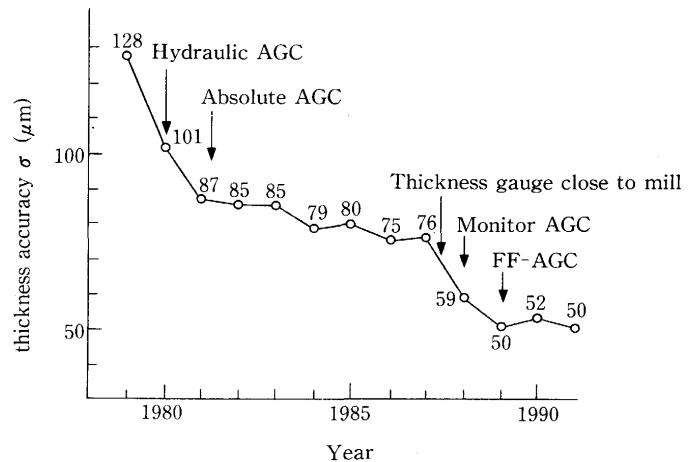


Fig. 3. Trends of thickness accuracy at a plate mill in Japan.

機能化が図られてきている。このような油圧AGCの新たな展開は、噛み込み端部の非定常部分の板厚精度向上にも大きな期待ができるものと思われる。

2.1.2 板幅精度向上

板幅精度についても、Fig. 2 (c)に示すように、大幅な向上が見られる。絶対値AGCによる幅出し終了後の厚み精度の向上に加えて、スラブ幅計・ミル幅計による実幅測定技術の向上が幅精度の向上に大きく寄与している。

また、厚板圧延では、厚板特有の幅出し圧延を活用した平面形状制御技術が開発されてきた。1978年頃からMAS圧延法やDBR法と呼ばれる新平面形状制御法の開発や粗圧延段階でのエッジャーの活用により、幅形状改善に加えてク

ロップ形状も改善されてきた。さらに、仕上げ圧延段階での幅変動や非定常メタルフローによる先後端の幅偏差をより少なくするために、仕上ミルアタッチドエッジャーによるFF-AWC (Automatic Width Control) 制御が開発された。この技術は、幅精度の向上にも大きく貢献している。

2.1.3 板クラウン・平坦度

厚板圧延における板クラウン・平坦度制御はパススケジュールを主体に展開されてきたが、材質造り込みによる圧下の制約やより厳しい要求レベルを満たすには不十分であった。1985年ロングシフト・強力ベンダを備えたワークロールシフト (WRS) ミルが導入され、板厚とクラウン・平坦度を独立して制御できるようになった。これによりロールチャンスフリー、薄物ステンレス圧延も容易になった。

また、1991年にはペアクロス (PC) ミルと新型シフトミルが厚板に導入されており、厚板での板クラウン・形状制御技術の大幅な進展がみられつつある。Fig. 4 に現在の仕上げミルの形式別台数を示す。

一方、センサーを駆使した制御技術も向上してきた。平坦度計をミルに設置し、パス間で測定した平坦度データを使ってロールベンダ圧を制御する平坦度FF制御も実用化されている。また、ロールクーラントによりサーマルクラウンをコントロールした平坦度制御技術も開発されてきている。

2・2 今後の課題

最近、需要家からの要求品質はさらに厳格化してきている。用途によってはきびしい板厚公差を要求されることも多く、非定常部も含めた板厚精度のより一層の向上が必要である。また圧延での反り制御や平坦度制御はTMCP (Thermo Mechanical Control Process) や直接焼入の適用拡大でその重要度を増しており、厚板での品質造り込み技術の確立のためにもさらなる向上が望まれる。

一方、油圧AGCの応用技術として差厚プレートやテーパプレートなどの異形鋼板製造技術が開発されており、ファブリケーターでの自動化、省力化に寄与するものとして今後さらに重要性を増すと思われる。

3. 熱延鋼板

3・1 寸法制御技術

ホットストリップミル (H.S.M) は現在日本国内で15ミルが稼働し、熱延鋼板 (コイル) の製造を行っている。寸法制御向上技術として、1960年代に計算機制御、電動AGCが各社で導入され熱延コイル長手方向の板厚について徐々に精度向上が図られたが、1985年頃の油圧AGCおよびクラウン・形状制御ミルへの改造により熱延コイルの低クラウン化も行われ板厚精度は飛躍的に向上した。一方板幅精度についても1980年代頃から粗圧延機のエッジアーの圧延荷重実測値を利用してエッジアーロールをコントロールする

AWCが本格化し精度アップが図られている。

3・1・1 板厚精度向上

熱延コイルの板厚精度は仕上圧延機にてほとんど決定されるが、特にセットアップと呼ばれる初期設定計算機能と、圧延中のコイルの板厚制御を行うAGC機能とが重要である。各種操業改善・設備改造の効果により、ホットストリップの板厚精度は著しく改善されている。特に油圧AGCの効果が大きく、1985年前後に国内のほとんどのミルに設置された。板厚精度向上をあらわす一例としてFig. 5 に国内H.S.Mコイル内厚み偏差の推移と油圧AGC設置の推移をしめす。また油圧圧下による高応答を利用したロール偏心除去制御、絶対値AGC、FF-AGC、ダイナミックセットアップ、仕上ミルスタンド間板厚計を利用した制御等も行われ板厚精度向上に寄与している。

3・1・2 板幅精度向上

通常熱延コイル幅はスラブの幅広りと、幅圧下の組合せでおおむね決定される。このため板幅精度は粗圧延機 (エッジ圧延機) の影響を大きくうけ、粗圧延AWCの効果は大きい。当初電動AWCで行われたが、逐次油圧AWCにかわっている。板幅精度向上を示す一例としてFig. 6 に国内H.S.Mのコイル内板幅偏差の推移と油圧AWCの設置の推移をしめす。油圧AWCの設置による幅精度の向上がみられるが、板厚精度向上に比べ、板幅精度向上は顕著ではない。これ

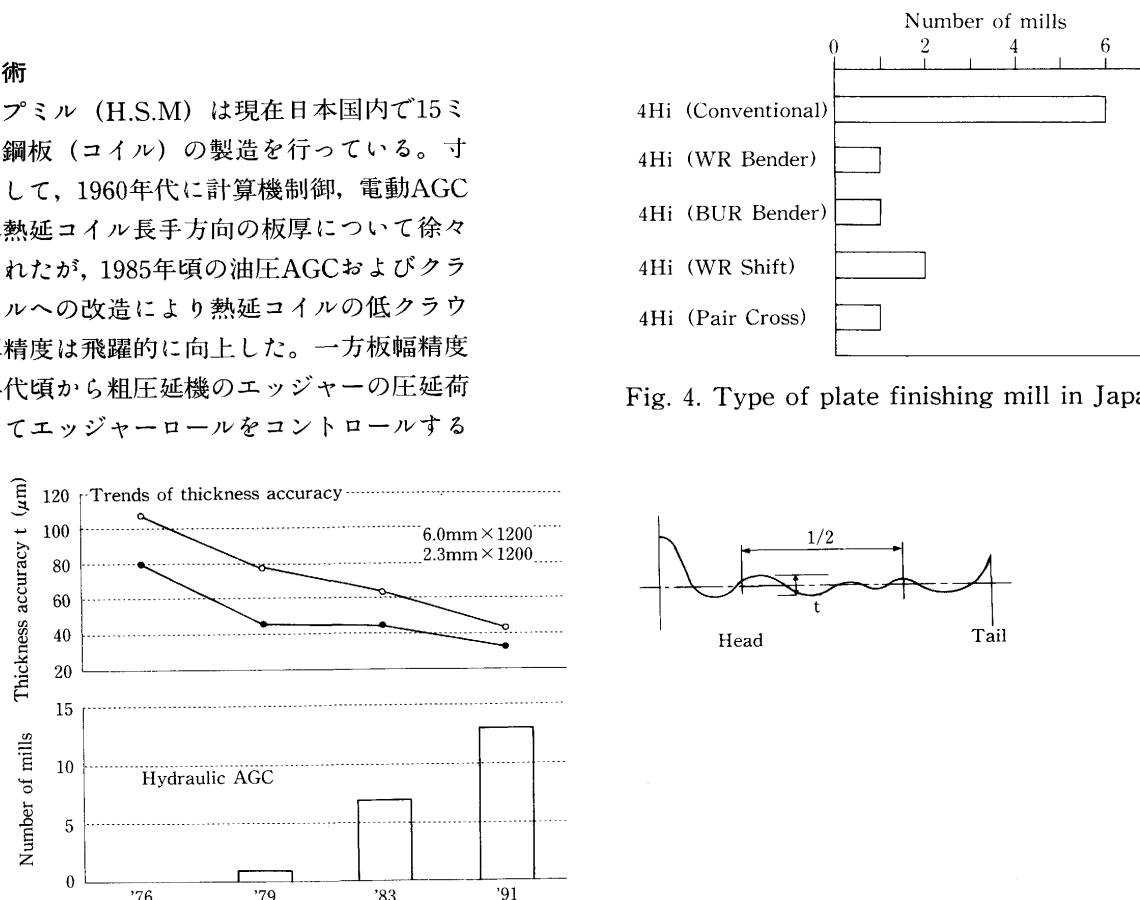


Fig. 4. Type of plate finishing mill in Japan.

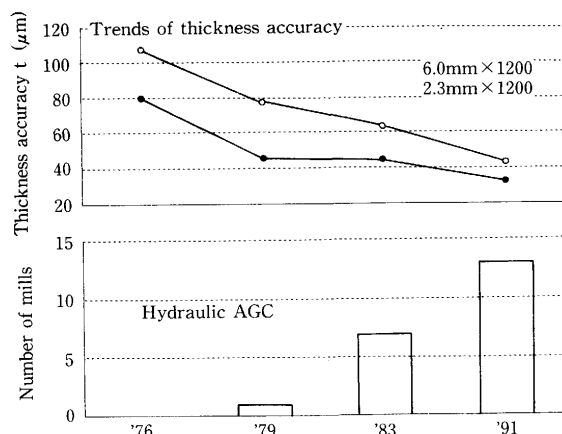


Fig. 5. Trends of thickness accuracy (average in Japanese H.S.M) and hydraulic AGC in Japanese H.S.M.

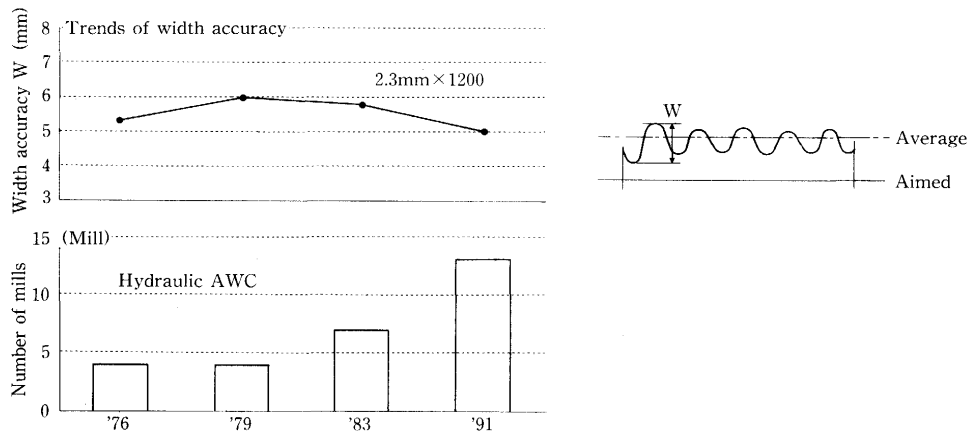


Fig. 6. Trends of width accuracy (average in Japanese H.S.M) and hydraulic AWC in Japanese H.S.M.

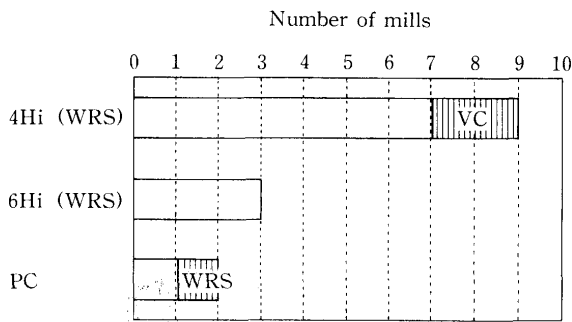


Fig. 7. Crown and shape control mills in Japan.

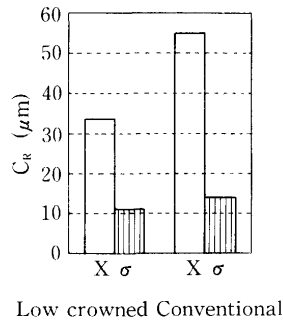


Fig. 8. Comparison of C_R between low crowned strip and conventional (average in Japanese H.S.M).

は幅圧下量との関係が強く、近年の大幅圧下の条件下では、板幅精度の大幅な向上は難しいことをあらわしている。とはいえ、近年粗圧延AWCを加えて幅プレスによる幅圧下技術、仕上げエッジャー、スタンド間張力制御を利用した仕上圧延AWCの開発も行われ、幅精度向上が更に図られつつある。

3・1・3 クラウン・形状制御

板クラウンと形状の平坦性は品質を左右する重要な項目であり、近年、WRSミル、6 Hiミル、PCミル、可変クラウン (VC: Variable Crown) バックアップロールなどクラウン・形状制御能力を持った圧延機の出現により制御能力が大幅に向上し、低クラウン材の製造が可能になった。これらの圧延機への改造は多くのミルで1985年前後に前述の油圧AGCと同時に実施されている。Fig. 7に国内H.S.Mのクラウン・形状制御能力装置の設置状況を示す。Fig. 8に国内ホットストリップミルの低クラウン材の製造実績を通常材と比較して示す。低クラウン材はだいたい30 μm 程度を目標に製造されるケースが多く、ほぼ目標を達成している。また通常材も約50 μm で従来よりも格段に低クラウン化されている。さらにクラウン・形状制御能力装置を活用し20~30 μm の低クラウン材の製造実績を有するミルもある。

制御能力を持った圧延機の開発と同時に板クラウンと形状を測定し制御にフィードバックするためプロフィールメーター、形状計も開発され実用化されている。

以上、板厚制御、板幅制御、クラウン・形状制御について別々にのべたが、それぞれ相互に干渉しあうので相互の調和を図るような制御システムが必要であり各社で実施されはじめています。

3・2 今後の課題

寸法精度向上に対する要求は今後もますます厳しくなる傾向にあり、ホットストリップミルに課せられる課題として、コイル先後端部の板厚・板幅の制御とコイル幅方向最板端でのエッジドロップと呼ばれる過薄現象の安定制御とが重要なテーマであり一層の製造技術の向上が期待される。

4. 冷延鋼板

4・1 寸法制御技術

冷間圧延における寸法制御は、板厚精度の向上にその目的が限定され、その狙いは3種類に分類することができる。その第1は被圧延材の両端部に発生するオフゲージと呼ばれる板厚外れ部分の長さの短縮、その第2は製品となる部分での板厚の振れ幅の縮小、そして第3は、板幅方向に発生する板厚クラウン/エッジドロップの低減である。

第1の課題であるオフゲージは、被圧延材の両端における通板作業と尻抜け作業の時に発生する非定常圧延によるものである。

第2の課題である製品部分での板厚の振れ幅の縮小は、所謂AGCの方法と装置、さらに圧下制御装置や控えロールの軸受などの外的要因によって左右されるものである。

第3の課題である幅方向の板厚精度の改善は、冷間圧延のみでは改善することは叶わず、近年になって、熱延仕上げミル、および冷間タンデムミルの前段スタンドに、板厚プロフィール制御がともに導入されるようになって初めて可能になってきた。

4.1.1 オフゲージの短縮

冷延製品の両端部に発生するオフゲージの長さは、歩留りに大きく影響するため、その短縮には古くから多くの努力が払われてきた。被圧延材の先端に板厚不良部が発生する原因は、前方あるいは後方の張力が得られないことと、先端においては、被圧延材の変形抵抗が未知であり、かつ低速で通板を行うために、摩擦係数が不安定であることから、適切なロールギャップの設定が難しい事によるものである。まず張力の問題については、ロールギャップ操作により張力不足分の補償をすることによって、またロールギャップ設定誤差の解消のために、油圧圧下装置を利用した絶対値AGCやゲージメーターAGCの導入による変形抵抗誤差の吸収、摩擦係数の速度関数補正などが行われてきたが、いずれも非定常状態を完全に解決するまでには到らなかった。

これらの板厚制御技術の改善に代わって、先に述べた非定常状態を完全に解消したのが、1971年に登場した完全連続式冷間圧延機である。それ以降現在に到るまでに、国内に於ける複合プロセスを含む完全連続式冷間圧延機は、計画中のものを入れると26基のタンデムミル中18基に達し、冷延製品の歩留り向上に貢献するとともに、ロール疵の低減など、品質の向上にも大きく貢献している。

Fig. 9は1978年以降の全国各ミルのオフゲージ長さの推移と、完全連続式圧延機の増加状況を示す。

4.1.2 板厚精度の向上

第2の課題である製品の板厚精度の改善は、主にAGCに関与する計測機器、制御機器および操作機器の機能向上と制御方法の改善とによって進められて来た。

まず計測機器と制御装置の機能は、その信号処理方式がアナログからデジタルに変わったことによって、測定精度、制御精度ともに大きく進歩した。また操作機器では、油圧圧下装置の導入が、従来の電動圧下方式では避けられなかった歯車のバックラッシュや、駆動電動機の起動特性に起因する間欠動作の問題を解決し、さらにミル剛性可変制御による高性能ゲージメーターAGCの実用化に重要な役割を果たしてきた。さらに最近では、サーボバルブがフラップノズル型から直動サーボ型に進歩し、トラブル頻度の大幅な減少と、応答速度の向上による制御精度の向上を得ている。

一方AGC方式では、従来のフィードバック制御に加えて、

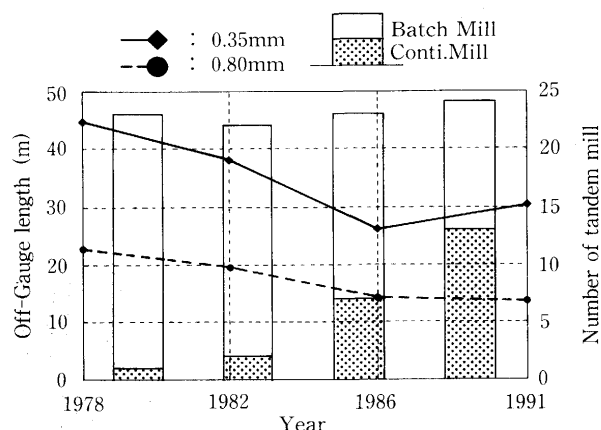


Fig. 9. Transition of off-gauge length and number of fully-continuous TCM.

フィードフォワードモニターや前述のゲージメーター制御、マスフロー制御などが加えられるようになっている。特にマスフロー制御方式では、各スタンド間における板厚及び板速度を同時に測定することによって、全スタンドを利用した板厚制御を可能とした。

その他、外的要因として冷延鋼板の板厚精度を大きく左右する要素となるのがロールの偏芯と、その軸受の形式である。特に質量の大きい控えロールのそれは、前段のスタンドにおいて、極めて大きい影響を与える。この対策としては、これまで油圧圧下によるロール偏芯制御や、油膜軸受のキーレス化、ショートキー化が行われてきたが、いずれも完全ではなく、最近ではロールの胴部、軸受部共に偏芯の発生しにくい、ローラー軸受が一般的に採用されている。

Fig.10は、現在計画中的のものを含む国内の圧延機の板厚制御機能構成を、Fig.11は1978年以降の平均板厚精度(振れ幅)の平均値の推移を示したものである。

4.1.3 板厚プロフィールの改善

圧延の際に生じるロールの偏平と撓みによって生じる幅方向のメタルフローによって形成される板厚プロフィールは、熱延では板厚が厚いため、幅中央部に到るまでの広い範囲で変化するが、冷間圧延ではそれがエッジ部分に限られる。従って冷間圧延ではエッジドロップしか発生しえず、また逆にその改善範囲もエッジドロップの部分に限られる。

そこで幅方向の板厚精度の改善のために、WRSミルやPCミルが、熱延ではクラウンの低減を図るために主として仕上げミルの後段スタンドに、また冷延ではエッジドロップを低減する為にタンデムミルの前段スタンドに導入され、徐々に改善される傾向にある。Fig.12は熱延、冷延の各圧延機の形式別組み合わせによる幅方向板厚精度の変化を示したものである。

4.1.4 形状制御

形状制御は、1974年に6重式の6Hiミルが登場して以来、中間ロールのシフトとワークロールベンディング、左右ロ

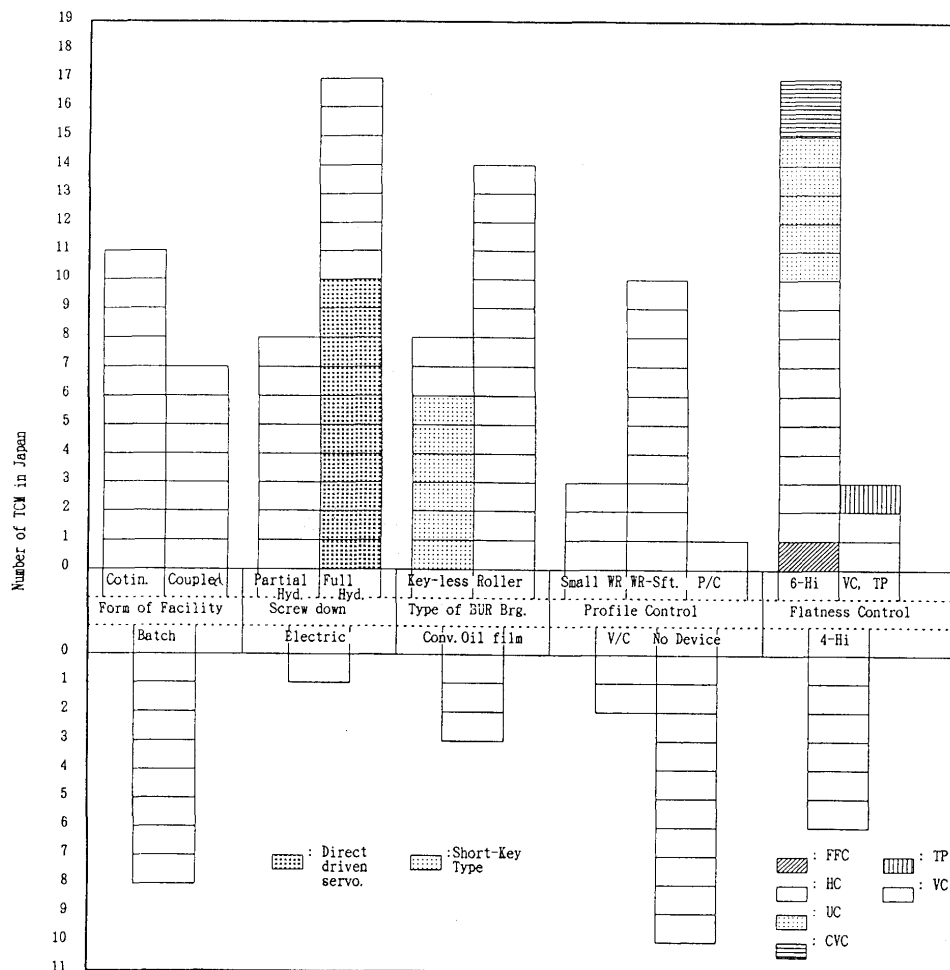


Fig. 10. The functions & devices for gauge accuracy which are adopted in tandem cold mills in Japan. (Datas include the plans which are announced up to the middle of 1992)

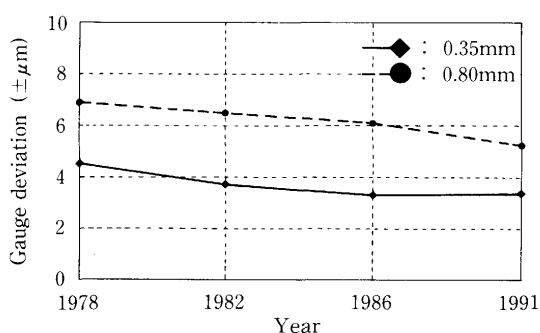


Fig. 11. Transition of gauge deviation.

ール間隙のレベリング、ロール冷却の4種の制御機能の組み合わせで行われてきたが、最近では中間ロールベンディングを加えたUC (Universal Crown Control) ミルや中間ロールにコークボトルクラウンを持たせたCVC (Continuous Variable Crown) ミル、さらにVCロールやTP (Taper Piston) ロールなどの可変クラウン式控えロールの採用など、様々な試みが行われている。一方、形状検出器も、非接触式、接触式とも、検出方式の多様化と検出精度の向上が進み、形状改善に貢献している。

4・2 今後の課題

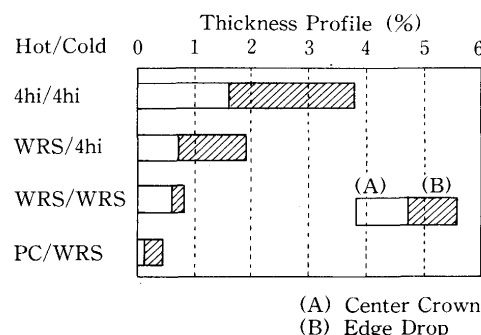


Fig. 12. Variation of thickness profile of cold rolled sheet formed by the combination of the type of hot & cold rolling mill.

冷間圧延における板厚精度は、制御の為の設備と方法の改善によって大きく進歩してきた。またオフゲージは圧延機の完全連続化によって、現在要求されているレベルではほぼ完全に解消された。

今後残されている課題は、材質及び圧延形状が不連続となる熱延コイルの接続部前後での制御精度の改善と、さらなる外的要因の排除である。そのためには、被圧延材の変形抵抗のオンライン計測技術の確立と、研磨技術の改善に

よる作業ロール，控えロールの偏芯量の圧縮が今後に期待される。

5. 結言

圧延鋼板の各分野を共通してまとめれば，圧延方向先後端の示す若干の不安定性と，エッジドロップを除けば，板

厚・板幅を合わせた定常部の三次元での制御方法は，ほぼ確立したといえる。今後はその最適化により，一層の精度向上をめざす時代にはいつている。

残る課題は非定常部の改善である。特にエッジドロップの制御技術が現在の焦点であり，メカニズムの解析が緒につき制御方法の具体化が始まった段階にあり，これからの発展が期待される領域である。