

High-accuracy Gauge Control Technologies over the Full Length and Full Width of Cold Rolled Strip



水島 成人
Narihito Mizushima
水島製鉄所 制御技術
部冷延制御課長



深谷 敏弘
Toshihiro Fukaya
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(主席掛長)



鞍掛 浩
Hiroshi Kurakake
水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(掛長)

要旨

近年、お客様の品質要求の厳格化により、冷間圧延鋼板のコイル長手方向（圧延方向）および幅方向板厚精度は、従来以上に極めて重要な品質管理項目となっている。川崎製鉄では、長手方向板厚精度の向上を図るために、ミル主機ドライブの高応答化、全スタンド AGC システム、およびダイナミックセットアップ制御システムを開発した。幅方向板厚精度に関しては、片テーパ付きワークロールシフト圧延法とエッジドロップ計を用いたエッジドロップ制御システムを開発した。これらの長手方向・幅方向の板厚制御システムを各冷間タンデム圧延機にて実用化したことにより、冷間圧延鋼板の全長・全幅にたり $\pm 0.5\%$ 以内の高精度な板厚品質を達成した。

Synopsis:

At tandem cold rolling mills in Kawasaki Steel, by means of applying newly developed strip longitudinal (rolling) and transverse gauge control systems, high accuracy of thickness of within $\pm 0.5\%$ has been achieved over the full length and full width of cold rolled strip, as gauge accuracy in a coil in longitudinal and transverse directions has become an extremely important quality control item in the manufacturing of cold rolled sheets due to the stricter quality requirements of customers, in recent years. The longitudinal gauge accuracy has been improved by the development of a high-response drive system for a mill main motor, an all-stands gauge control system and a dynamic set-up control system. The transverse gauge accuracy has been improved by applying a one-side tapered work roll shifting method and the development of an edge drop control system in terms of the optimum use of an edge drop sensor.

1 緒 言

近年、お客様における歩止向上、省工程、自動化のニーズが高まり、それにともない冷間圧延鋼板製品に対する品質要求は、一段と厳しくなっている。中でも板厚に関してはコイル全長・全幅にわたって高精度の要望が強くなっており、板厚精度の向上は鉄鋼の製造工程における重要課題である。

長手方向板厚精度に関しては、圧延機操作端・センサー・制御方式それぞれの高精度化と高応答性を極限まで追求し、高度な板厚制御システムを開発してきた。幅方向板厚精度に関しては、片テーパ付きワークロールシフト (KWRS) 圧延方式を基本技術とし、種々の制御技術を組み合わせたエッジドロップ制御システムを構築してきた。

本報では、川崎製鉄にて冷間タンデム圧延機 (TCM) を対象に実用化してきたこれらの高精度な長手方向・幅方向板厚制御システムについて述べる。

2 長手方向の板厚制御技術

従来、加減速域や低速域などの非定常圧延域においては、鋼板とロールとの摩擦係数変動や圧延ロール駆動電動機（ミル主機）の揃速性の乱れなどのために、板厚変動や張力変動が生じていた。この時の課題と解決策を Fig. 1 に示す。中でもミル主機や圧下装置などの圧延機操作端の高速化と、スタンド間の板厚計や板速計を用いた高応答の AGC システムが、非定常圧延域の板厚精度向上にとって大きな効果が期待されるので、制御システムの高速・高応答化に視点を置いて長手方向板厚制御技術を開発した。

2.1 ミル主機ドライブシステムの交流可変速化^{1)~3)}

板厚精度を向上させる上で、次の 2 つの課題を解決する必要がある。1 つは従来の直流電動機を用いるドライブシステムでは整流の制約により速度応答性や界磁制御範囲に限界があること、もう 1 つは加減速時や低速圧延時にスタンド間での揃速性の乱れがあることである。このため、冷間タンデム圧延機のミル主機ドライブとして世界で初めて全面的に交流可変速ドライブシステムを適用し、その技術を確立した。

交流電動機を適用するにあたって、(1) トルクリップレス、(2)

*平成11年8月19日原稿受付

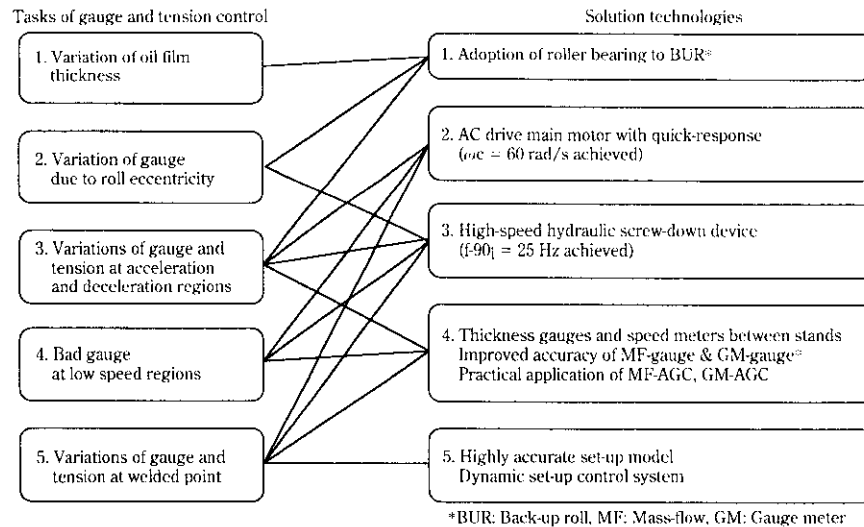


Fig. 1 Technological tasks and solution technologies of longitudinal gauge control system

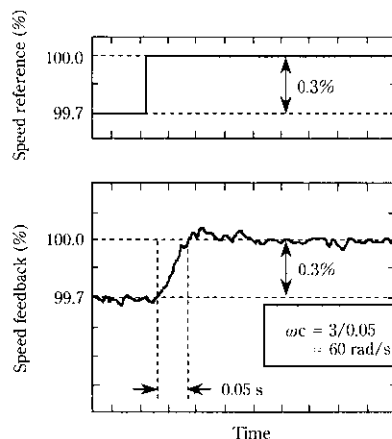


Fig. 2 Step response of AC motor drive speed

広範囲な周波数変換装置、(3) 共振対策、(4) 高精度速度検出などの新技術を開発した。また、当社で確立したドライブシステムには循環電流式サイクロコンバータと GTO (ゲートターンオフサイリスタ) インバータが使用されている。

実機での性能確性結果を以下に示す。

- (1) 速度応答: $\omega_c = 60 \text{ rad/s}$ (Fig. 2)
- (2) 速度精度: $\pm 0.004\%$ 以内 (対最高速度)
- (3) ミル揃速性: 0.005% (従来の $1/5$)
- (4) 軸共振: 軸振動抑制制御の効果により共振現象なし

これらの性能により、ライン起動・停止時においても過張力やゆるみなどの張力変動がなく、さらに全速度域においてドループ 0% の操業が可能となった。この結果、オンゲージ率が向上し、メンテナンスフリーやエネルギー変換効率の改善も実現された。

2.2 全スタンド板厚・張力制御システムの構築

従来の板厚制御システムでは、No. 1 スタンドおよび最終スタンドを中心として制御系が構成されていたが、板厚精度の厳格化に対応していく上では不十分であった。このため全スタンドにて、油圧圧下の導入とともに板厚・張力制御を行う制御システムを構築した。そのシステム構成を Fig. 3 に示す。すべてのスタンド間に板厚計と板速計を配置し、これらを用いた板厚制御を行うとともに、

張力制御においてもスタンド間張力計を用いたフィードバック制御を行っている。板厚・張力制御の各機能は PLC (programmable logic controller) や油圧圧下装置の中に組み込まれており、数ミリ秒〜数十ミリ秒の高速な周期での制御を実現している。

従来の板厚制御では、板厚計を用いたフィードバック制御 (モニター AGC) を主要機能としていたが、板厚検出の時間遅れ (むだ時間) により低速域や加減速域での板厚制御性に限界があり、板厚変動が生じていた。新しいシステムでは、全スタンド間に設置した板厚計および板速計を活用してマスフロー一定則に基づく予測板厚 (マスフロー板厚) の精度を大幅に向上させ、マスフロー板厚による板厚制御 (マスフロー AGC) を実用化した。マスフロー AGC ではモニター AGC のような計測遅れによるむだ時間がなく、全速度域において応答の速い制御 (従来の $3 \sim 10$ 倍の応答性) が可能となり、特に加減速域の板厚変動が従来の $1/5$ 以下に抑えられた。

これらの制御方式の高精度・高応答性により、Fig. 4 に示すように、加減速域も含めコイル全長にわたって $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 以内 (板厚精度 $\pm 0.5\%$ 以内) という極めて高い板厚精度を実現している。また、張力制御においても高速油圧圧下装置により高応答の制御が可能となり、張力変動が目標張力の $\pm 5.0\%$ 以内に抑えられている。これらの効果によって、一層安定した操業が可能となり、圧下や速度に対する手介入ゼロ圧延を達成した。

2.3 走間スケジュール変更技術の高度化

走間スケジュール変更時には圧延自体が非常に不安定な状態となる。この状況においても張力・形状変動の少ない安定な通板を実現し、かつオフゲージを最小とすることを目的として、各制御機能の性能向上を図った。

- (1) セットアップモデルの高精度化

スケジュール変更量 (圧下および速度変更量) を求めるためのセットアップモデルに、弾性変形域を考慮した高精度圧延荷重予測モデルを採用した。また、全スタンド間に設置した板厚計、板速計の実測値を活用した学習制御システムを構築した。これらにより、Fig. 5 に示すように、セットアップモデルの圧延荷重予測精度が $\sigma = 2.2\%$ と非常に高い精度を実現した。

- (2) ダイナミックセットアップ制御によるスケジュール変更量の精度向上⁴⁾

従来、次圧延材のスケジュール変更量を製造命令や操業条件

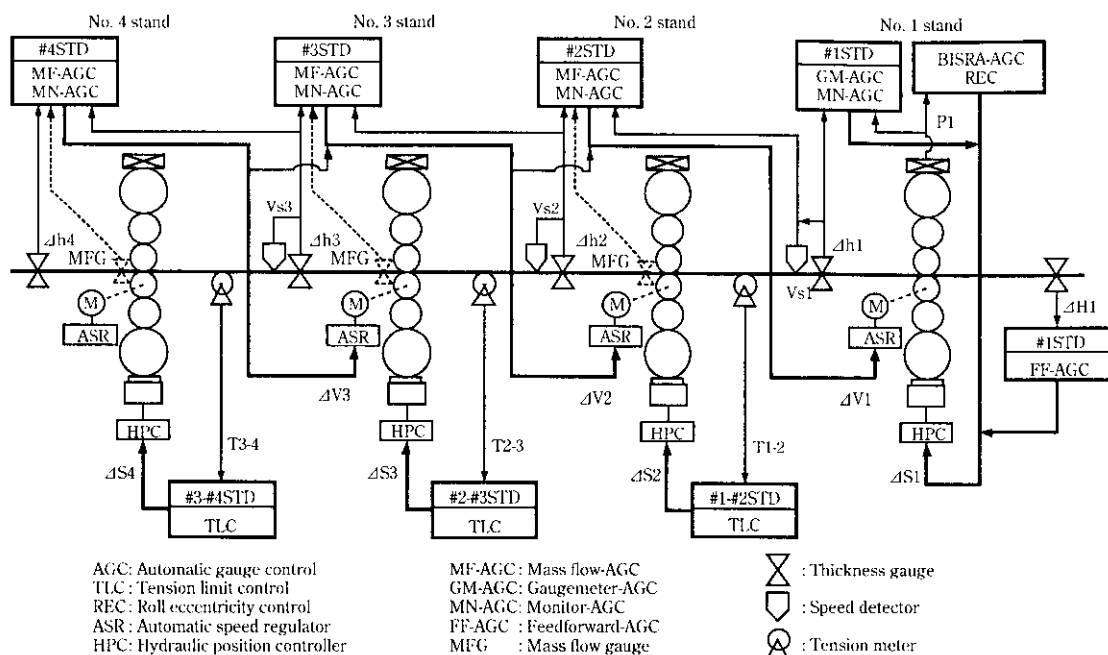


Fig. 3 Schematic diagram of gauge and tension controls on all stands

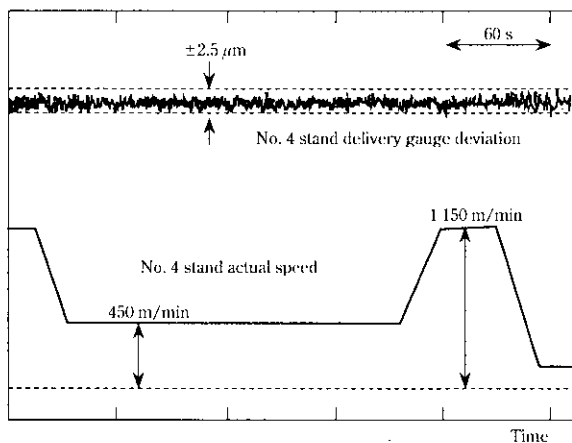
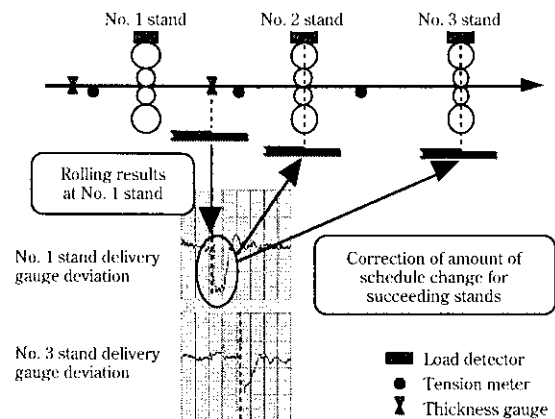
Fig. 4 Control result of new AGC ($t = 0.5$ mm)

Fig. 6 Conception of dynamic set-up control

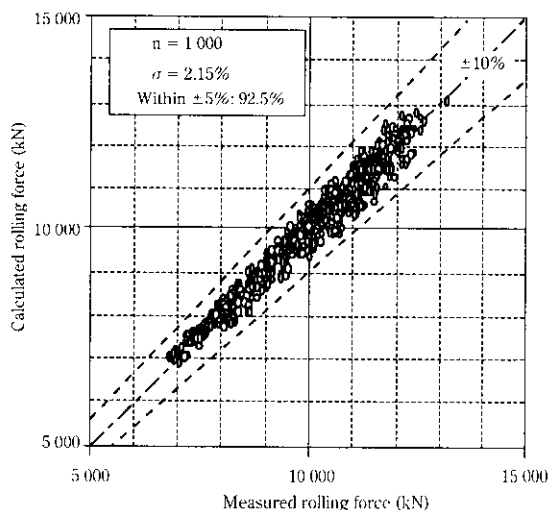


Fig. 5 Comparison of rolling force between measurement and model calculation

に基づいて事前に計算していたが、母材の板厚変動や硬度変動などのために実際の走間スケジュール変更時にセットアップ誤差が生じ、オフゲージを発生させていた。このため、スケジュール変更量を圧延実績に基づいて修正するダイナミックセットアップ制御を冷間タンデム圧延で初めて実用化した。

ダイナミックセットアップ制御では Fig. 6 に示すように、次圧延材先端部の前段スタンドでの圧延実績を用いて後段スタンドのスケジュール変更量を修正する。スケジュール変更量の修正方法を Fig. 7 に示すが、次圧延材先端部の前段スタンドにおける板厚、圧延荷重、張力、速度などの圧延実績から材料塑性特性 $\bar{\sigma}$ 測値 $(k + \Delta k)$ を修正し、それに基づき圧下位置を S から S' に修正する。速度変更量に関しては先端部の板厚実績 $(H + \Delta H)$ を用いて速度比を修正する。Fig. 8 に示すように、従来は No. 1 スタンドで発生したセットアップ誤差などに起因した板厚変動がそのまま No. 5 スタンドまで残り、オフゲージを発生させていた。ダイナミックセットアップ制御により、

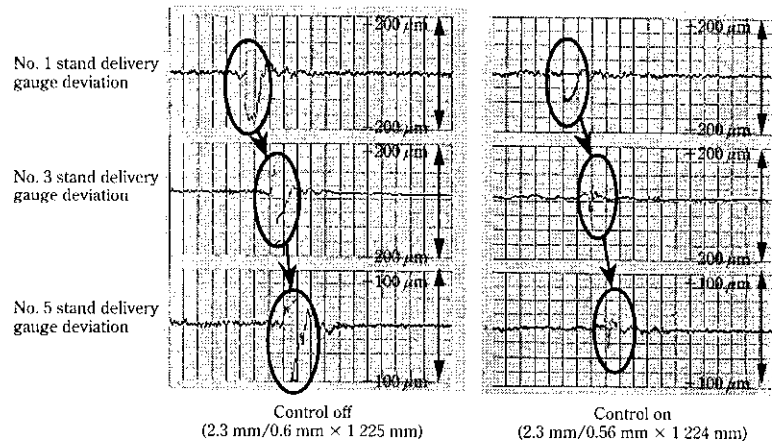


Fig. 8 Control result of dynamic set-up control

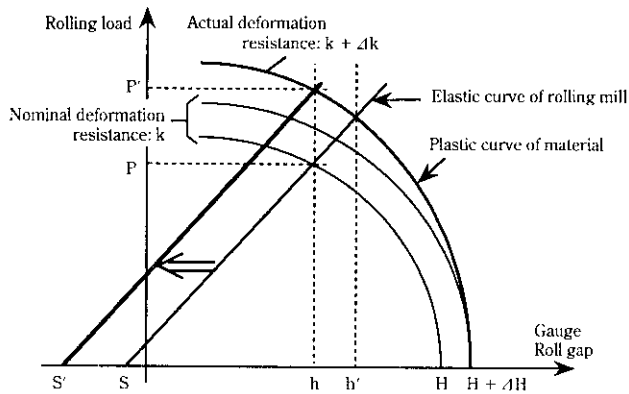


Fig. 7 Correction of amount of roll gap change

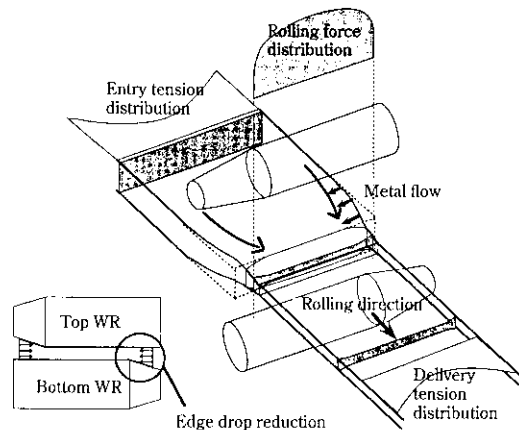


Fig. 9 K-WRS rolling method

No. 1 スタンドでの板厚変動に基づき後段スタンドのスケジュール変更量が修正され、No. 5 スタンドでのオフゲージ発生が解消できている。

(3) 圧延機操作端の高速化

高速油圧圧下装置および高応答ミル主機ドライブシステムによってスケジュール変更区間を最小にするとともに、張力制御との併用によって張力変動の最小化を図った。

(4) ミル内トラッキング精度の向上

スタンド間板速計を用いて先進率をダイナミックに修正し、かつトラッキング演算を高速化することによってミル内のトラッキング精度を向上させた ($3\sigma = 15\text{ mm}$)。

これらの走間スケジュール変更技術の高度化により、走間スケジュール変更時の張力変動が従来の 1/4 以下に抑えられ、安定通板能力が向上するとともに、オフゲージ長さが 1/10 に削減された。

端部のロールギャップを拡大し、幅方向のメタルフローを板の内部に呼び込んで板幅端部の板厚を改善するものである。当社が開発した K-WRS 圧延法は、国内、国外を問わず幅広く技術供与され、数多くのミルに導入されて良好な効果を上げている。

当社の冷間圧延機への適用は、水島製鉄所 No. 1 TCM の No. 1 スタンドに K-WRS 圧延法を 1984 年 12 月に実用化した。その後、同所 No. 2 TCM の全スタンドにその技術を適用 (1987 年 1 月) するとともに、熱間圧延鋼板のクラウン変動に対応したエッジドロップのフィードフォワード制御とミル出側に配置したエッジドロップ計を用いたフィードバック制御技術を確立した⁶⁾。さらに、千葉製鉄所 No. 2 TCM の第 1 スタンドに K-WRS 圧延法を適用⁸⁾ (1995 年 7 月) し、長手方向の変動に対応した前記の制御技術を導入するとともに、異なる規格の接合部における走間エッジドロップ変更技術を確立した。

3 幅方向の板厚制御技術

3.1 幅方向板厚制御技術の開発経緯

当社は、これまでに熱間・冷間圧延において、Fig. 9 に示す片テーパ付きワークロールシフト圧延法の適用によるクラウンおよびエッジドロップ制御技術を先駆的に開発してきた。K-WRS 圧延法は、板幅端部にテーパ部を合わせて圧延することにより、板幅

3.2 幅方向板厚分布測定技術の変遷

Fig. 10 に幅方向板厚分布測定技術の変遷を示す。タイプ 1 のような非接触式の放射線板厚計を幅方向に走査して鋼板の板厚分布を測定するプロフィール計が登場した。その後、板幅端近傍の板厚分布がより重要視されるようになり、タイプ 2 のようなマルチチャンネル型のエッジドロップ計が実機化された。さらに、両サイドの同時測定に対する要求の高まりにより、タイプ 3 のようなエッジドロ

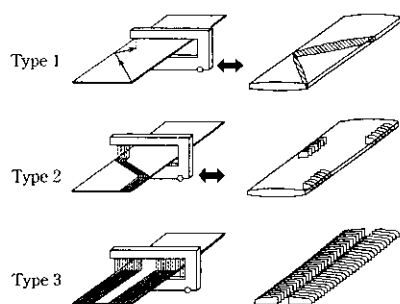


Fig. 10 Progress in measuring transverse thickness of strip

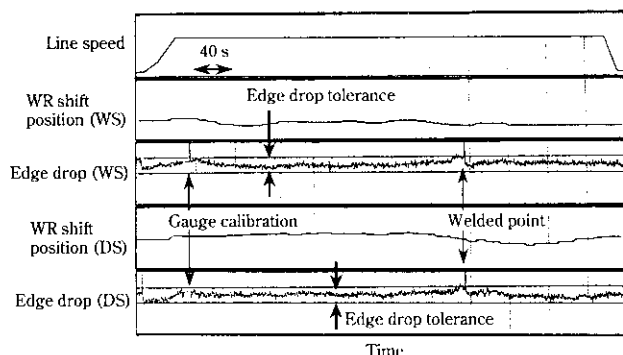


Fig. 11 Effect of edge drop feedback control

ップ計へと進展した。

水島製鉄所 No. 2 TCM では、タイプ 2 のエッジドロップ計を国内で初めて導入し、エッジドロップフィードバック制御技術の基礎を確立した。千葉製鉄所 No. 2 TCM ではタイプ 3 のエッジドロップ計を用い、鋼板両サイドで同時にかつ独立にエッジドロップ制御する技術を完成させている。

3.3 エッジドロップのフィードバック制御

熱間圧延においては均一なクラウンを作り込むことは難しく、長手方向でのクラウン変動や鋼板の左右でクラウンが異なることが避けられない。より高精度な幅方向板厚制御を行うためには、これらの母板クラウン変動に対して追従可能なフィードバック制御が有効である。そこで、千葉製鉄所 No. 2 TCM では左右のエッジドロップを常時測定できるセンサーを用いて、上下非対称ワークロールシフトによって左右独立にかつ連続的に制御するフィードバック制御を開発した。Fig. 11 は本フィードバック制御中のチャートである。上下のワークロールシフト位置を独立かつ頻繁に動作させることで、エッジドロップ量を許容範囲内に制御できていることがわかる。

3.4 パターン制御およびフィードフォワード制御

熱間圧延鋼板の先尾端はクラウンが増大する傾向がある。これを修正する目的で、熱間圧延鋼板の先尾端を対象としたワークロールシフト位置のパターン制御を開発した。また、熱間圧延設備出側に設置されたプロフィール計の測定情報などを用いて、熱間圧延コイルの実際の先尾端のクラウン変動に応じた冷間圧延機でのワークロールシフト位置パターン設定制御（フィードフォワード制御）も実現している。これらの制御は、水島製鉄所 No. 2 TCM および千葉製鉄所 No. 2 TCM で実機化されている。

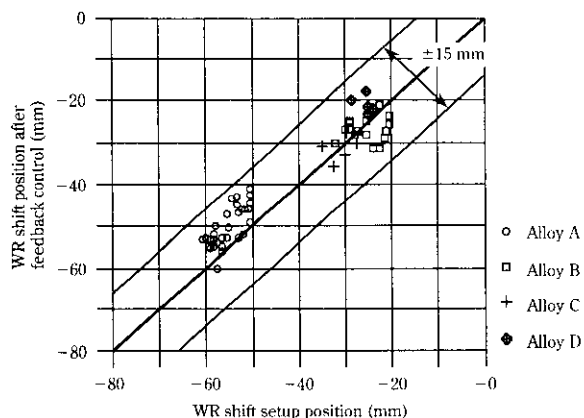


Fig. 12 Comparison of WR shift setup position and feedback controlled position

3.5 走間エッジドロップ変更

完全連続式の冷間圧延機では走間でのスケジュール変更機能を有することが必須であるが、多品種小ロット化・高精度化が進んでいる現在の状況下では、エッジドロップ制御においても走間変更機能が重要となる。

千葉製鉄所 No. 2 TCM では、ワークロールシフト位置が後述するセットアップ計算に基づき適切に走間変更されており、ラインを停止させることなしに、エッジドロップが処理材の先端から許容範囲に制御されている。

3.6 エッジドロップセットアップ計算

千葉製鉄所 No. 2 TCM のセットアップ計算では、母板情報と予定圧延条件などから最終スタンド出側のエッジドロップ量を予測計算し、目標とするプロフィールが得られるようにワークロールシフト位置を決定する。また、素材の接合条件に対応した走間変更パターンや走間変更開始点、フィードバックおよびパターン制御用パラメータなどを決定する機能も設けている。エッジドロップ予測モデルは、母板プロフィールが冷間圧延後の幅方向板厚分布に及ぼす影響と、ワークロールの片テーパ部によるエッジアップ効果などを考慮した構成をとっている。Fig. 12 はワークロールシフト位置のセットアップ値とその後のフィードバック制御で修正された実績位置の関係を示している。両者は $\pm 15 \text{ mm}$ 以内でよく一致しており、本エッジドロップ予測モデルは十分な精度を有している。

4 結 言

川崎製鉄では、冷間タンデム圧延機において高精度な長手方向・幅方向板厚制御システムを開発し、実用化した。その結果を以下に示す。

- (1) 圧延機操作端の高応答性、全スタンド AGC システムなどの技術により、コイル全長にわたり $\pm 0.5\%$ 以内の高い板厚精度を達成した。
- (2) ダイナミックセットアップ制御などの走間スケジュール変更技術の高度化により、コイル先端部のオフゲージ長さを従来の $1/10$ 以下と大幅に削減した。
- (3) ミル出側のエッジドロップ計を用いて、コイルの板幅両端にて独立にかつ連続してエッジドロップを制御するフィードバック制御技術を確立した。

- (4) エッジドロップ予測モデルと走間エッジドロップ変更技術によって、コイルの最先端からエッジドロップ量を許容範囲内に収めることが可能となった。

これらの技術で作られた板厚精度の高い製品は、お客様から高い信頼と評価を得ている。今後さらに高品質な製品の製造技術の確立を目指していく。

参 考 文 献

- 1) 近藤 徹, 菅沼七三雄, 宮崎容治, 土井克彦, 佃一二三, 細田博美: 鉄と鋼, **73**(1987)4, S341
- 2) K. Yamamoto, K. Doi, and Y. Miyazaki: *Iron & Steel Eng.*, **5**(1989), 38-41
- 3) 金子智弘, 増田博昭, 竹澤幸平: 川崎製鉄技報, **28**(1996)2, 108-113
- 4) 安田真也, 後藤俊二, 鞍掛 浩, 土田尚史, 水島成人, 服部 哲, 齊藤 裕: 材料とプロセス, **10**(1997), 1106
- 5) 鞍掛 裕, 土田尚史, 水島成人, 安田真也, 後藤俊二, 服部 哲, 齊藤 裕: 材料とプロセス, **10**(1997), 1013
- 6) 水上 進, 小野智陸, 黒田 茂, 侍留 誠, 広畑和宏, 北村邦雄: 材料とプロセス, **2**(1989)2, 465
- 7) 蛭田敏樹, 赤木 功, 水島成人: 川崎製鉄技報, **28**(1996)2, 103-107
- 8) 禮場 強, 今井久雄, 金子智弘, 深谷敏弘, 館野純一, 剣持一仁: 材料とプロセス, **10**(1997), 1105