

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.26 (1994) No.1

熱延工場仕上ミル高精度制御システム

High Quality Control System for Hot Strip Finishing Mill

浦野 朗(Akira Urano) 村山 薫(Kaoru Murayama) 潮海 弘資(Hiroshi Shiomi)

要旨：

水島熱延工場では、製品品質の向上等を目的として、仕上ミル制御システムを新たに建設した。新システムでは、センサーベース、モデルベースの制御をすべく、スタンド間板厚計をはじめとしたセンサーの導入、高性能プロセスコンピュータの導入、高速ネットワークの導入を行った。これらハードウェアの充実とともに、制御モデルの開発、制御の機能分担の見直し、新たな制御ロジックの開発を行った。これらにより、制御性能が向上し、製品品質ならびに自動圧延率が向上した。さらに、新システムではシステム開発性も向上した。

Synopsis：

In the hot strip mill at Mizushima Works, a new control system for the finishing mill was developed in order to improve the strip dimensional quality. In the new system, sensors such as interstand thickness gauges, high-performance process computers and the high speed network were introduced. Based on the new hardware, new control models were developed, functions of the computers were rearranged, and a new control algorithm was developed. As the result, the strip quality has been improved and the ratio of full automatic rolling has been raised. Also, the period for development of a new control system has been shortened.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

High Quality Control System for Hot Strip Finishing Mill



浦野 朗

Akira Urano

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長補)

村山 薫

Kaoru Murayama

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(掛長)

潮海 弘資

Hiroshi Shiomi

水島製鉄所 熱間圧延
部熱延技術室 主査
(掛長)

要旨

水島熱延工場では、製品品質の向上等を目的として、仕上ミル制御システムを新たに建設した。新システムでは、センサーベース、モデルベースの制御をすべく、スタンド間板厚計をはじめとしたセンサーの導入、高性能プロセスコンピュータの導入、高速ネットワークの導入を行った。これらハードウェアの充実とともに、制御モデルの開発、制御の機能分担の見直し、新たな制御ロジックの開発を行った。これらにより、制御性能が向上し、製品品質ならびに自動圧延率が向上した。さらに、新システムではシステム開発性も向上した。

Synopsis:

In the hot strip mill at Mizushima Works, a new control system for the finishing mill was developed in order to improve the strip dimensional quality. In the new system, sensors such as interstand thickness gauges, high-performance process computers and the high speed network were introduced. Based on the new hardware, new control models were developed, functions of the computers were rearranged, and a new control algorithm was developed. As the result, the strip quality has been improved and the ratio of full automatic rolling has been raised. Also, the period for development of a new control system has been shortened.

1 緒 言

ホットストリップミルの仕上圧延は、シートバーと呼ばれる板厚30~50 mmの中間素材を製品板厚(1.2~30 mm)まで圧延する設備である。本設備で重要な製品品質指標である寸法が決まるが、7台連続圧延であるため、その制御は複雑となる。このため、従来より計算機を用いた制御が行われている^{1,2)}。水島製鉄所でも操業開始より計算機による制御が導入され³⁾、その後、圧延機更新^{4,5)}にともない、計算機も更新した^{7,8)}。一方、製品品質要求の厳格化、操業形態の多様化が要求されており、より一層の制御精度の向上が必要不可欠となってきた。このため、各種制御系の改善を実施してきた。しかしながら、現状の制御システムでは機能・能力的に限界に達してしおり、より一層の品質向上には対応できなくなった。

そこで、仕上圧延制御システムを一新し、精度向上を図った。本システム建設にあたっては、従来システムの欠点を打破すべく、センサーベース、モデルベースの制御を行うことを重点課題とした。

本報告では、仕上圧延機設備の概要を述べたあと、制御システムに関して述べる。そこでは、従来システムの問題点、システム構成方針、センサー、制御装置に関して示す。次に、制御方法を示し、システムの評価を最後に述べる。

2 設備概要

当工場の仕上圧延機設備の配置を Fig. 1 に、その主な仕様を Table 1 に示す。前段4スタンドは電動圧下の4段圧延機である。後段3スタンドは、断面寸法制御性の良いHCミルで、かつ応答の早い油圧圧下装置を配している。また、断面寸法を均一化するために全スタンドにワークロールベンダーを導入している。さらに、圧延によるロール摩耗を散らすためにワークロールシフト装置がある。スタンド間の張力バランスを制御するためにルーバがあり、後段側は電動にて制御性を高めている。また、各スタンド間には材料を冷却するためのストリップクーラントと称する水冷装置がある。

これら各装置の性能をうまく引出し所定の仕様の製品を作り出すことが制御システムに課せられた役割りである。

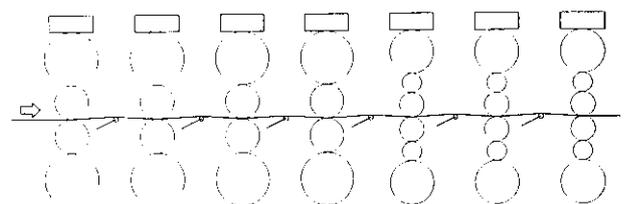


Fig. 1 General layout of hot strip finishing mill

* 平成5年10月28日原稿受付

Table 1 Specifications of hot strip finishing mill

No. 1-4 stand		4-hi work roll shift mill with strong bender
Type		
WR (mm)		820 ϕ ×2 400
BUR (mm)		1 630 ϕ ×2 300
WR shift stroke (mm)		±175
Main motor		DC 3 750kW×12
No. 5-7 stand		6-hi HC mill with hydraulic AGC and work roll shift
Type		
WR (mm)		685 ϕ ×2 380
IMR (mm)		710 ϕ ×2 345
BUR (mm)		1 340 ϕ ×2 300
WR shift stroke (mm)		750 max
IMR shift stroke (mm)		±150
Main motor		DC2 800 kW×9
Rolling speed (m/min)		1 485 max

3 仕上ミル制御システム

3.1 従来システムの問題点

品質厳格材の増加に伴い、制御システムはより精度の良い制御を行うよう要求される。このため、従来より各種レベルアップを実施してきた。しかしながら、従来と同様のアプローチでは、これ以上の精度向上は限界に達している。以下に例をあげる。

まず、板を圧延する前に、圧延現象をモデルで予測し、それに基づき各装置の初期値を設定するセットアップを実施しているが、センサーが少ないためモデルを作成する際に使用できるデータが不足しており、これ以上の精度向上が不可能である。

次に、板を圧延機列に通じて行く途中で、前段スタンド通過時にセットアップ時の予測とずれがあった場合、後段スタンド以降の設定を修正するダイナミックセットアップを実施しているが、計算機の能力上、修正用モデルの精度が良くない。また、直接板厚を測っていないため、適切な修正ができない。

さらに、圧延中はAGC (automatic gauge control) 等のダイナミックな制御を実施しているが、直接板厚を測っていないため、モデルを使わざるをえないが、使用している計算機の能力上簡易的なモデルを用いざるをえない。また、計算機能力上、複数の計算機にて分散して制御を行うため、各制御間の干渉を完全に排除できない。

以上をまとめると、従来システムの問題点として、(1) 圧延状態を検出するセンサーが十分でない、(2) 実データがないためモデル精度が不十分である、(3) 高度な制御を行うための計算機能力が不足している、(4) 高度な制御を保全する仕組みが整っていない、(5) 計算機の能力やシステム開発性にあった機能分担ができていない、ということがあった。

3.2 システム構成方針

前節で示した問題点を解決すべく、制御システムを新たに建設することとした。その基本方針として、センサーベースの制御を行うことと、モデルベースの制御を行うことの二つを取り上げた。また、それを実現するための制御装置の方針として、

- (1) 品質制御は高性能プロセスコンピュータにて行う
- (2) アクチュエータやセンサーとのインターフェースはPLC (programmable logic controller) にて行う

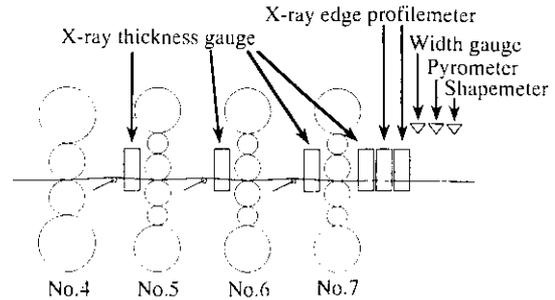


Fig. 2 Layout of hot strip finishing mill sensing devices

Table 2 Specifications of sensors

Equipment	Interstand thickness gauges	Edge profilemeter	Shapemeter
Type	X ray	X ray	Laser
Measuring range	1.0~32.0 mm	1.0~32.0 mm	0~5%
Accuracy	±0.15% × thickness	±0.15% × thickness	±0.1%
Response time	30 ms	30 ms	200 ms
Scan interval	—	5 s	—
Noise	±0.06~±0.31% × thickness	±0.06~±0.31% × thickness	—

(3) プロセスコンピュータと PLC 間は高速データ通信を行う

(4) 通信データを高速周期にて監視して制御チューニングに使うことを掲げた。

3.3 センサー配置

従来より品質保証・品質作り込み用のセンサーとして、最終圧延機出側に板厚計 1 台と走査型板厚計 1 台を配し、幅方向中央部の板厚と幅方向板厚分布を測定していた。また、板幅計、板温度計、平坦度計を導入していた。一方、スタンド間センサーは品質制御にとって重要であり、従来より各種開発が行われている⁹⁻¹¹⁾。今回、制御システムの建設にあたり、新たにセンサーを導入し、センサーベース制御に対応した。Fig. 2 にセンサー配置を示す。後段スタンド間に 3 台の板厚計を導入し、また、最終圧延機出側の走査型板厚計を 1 台増設するとともに、走査方式を新たにし、幅方向板厚分布測定周期を短縮した。さらに、老朽化していた平坦度計を更新した。新規導入したセンサーの主な仕様を Table 2 に示す。

以上により、4 スタンド目以降の出側板厚、最終スタンド出側板断面寸法 (厚み分布、幅)、平坦度、温度を測定できるようになった。また、従来より、各スタンドのロール開度、ロール回転数、圧延荷重は測定している。これにより、各データを直接利用した制御や制御モデルの学習ができる形が整った。

3.4 制御装置

センサーベースおよびモデルベースで制御すべく、制御装置も更新した。システム構成を Fig. 3 に示す。システムは 2 階層に分かれており、統括制御・各種品質制御を行う高性能プロセスコンピュ

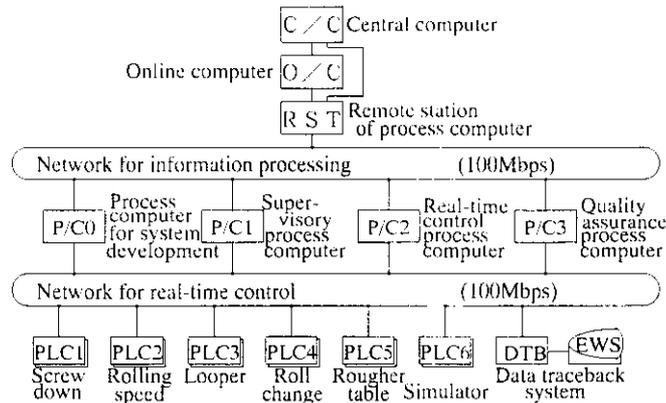


Fig. 3 Configuration of finishing mill control system

ータ群とアクチュエータを直接制御する PLC からなる。また、それらを高速ネットワークにて結び付けている。さらに、制御の状態を監視するデータトレースバック装置を備えている。

従来、ミルの初期設定値を決める所をプロセスコンピュータにて、その後の品質制御を含むリアルタイム制御を PLC にて実施していた。ところが、PLC の能力、プログラム開発性がプロセスコンピュータにくらべ著しくおとっており、問題であった。そこで、今回、プロセスコンピュータと PLC の機能分担を見直すこととした。

プロセスコンピュータは、32 ビットの高性能ミニコンピュータを用い、制御用のプログラムはリアルタイム制御 OS 下で高速に動作し、システム開発はツールの豊富な UNIX 下にて行える仕組みを備えている。プログラムは FORTRAN にて作成しており、PLC に比較し、開発性は格段に向上している。仕上げ制御では、初期設定や制御で用いるモデルの学習を行う統括制御計算機と、高速周期 (20 ms) にてアクチュエータを制御するリアルタイム制御計算機、操業実績データを収集し品質判定する品質管理計算機を用いる。さらに、システム開発用の計算機を備えている。

PLC は、制御専用のマイクロコンピュータで、アクチュエータを直接制御する。PLC は既設のハードウェアを流用し、従来実施していたリアルタイム品質制御機能をプロセスコンピュータに譲り、アクチュエータとシステムを高速でインタフェースする機能を盛り込んだ。これにより、PLC は統括計算機にて決定した初期設定値まで設備を動作させる機能、リアルタイム制御計算機からの指令をアクチュエータへ高速に伝える機能と、アクチュエータ等からの実績を高速に各計算機へ伝える機能を実施することになった。

高速ネットワークは FDDI 規格に準拠したもので、100 Mbps の通信速度を持つ。各計算機間でデータ交換を 1 ms にて行え、制御上の無駄時間が小さくできる。また、プロセスコンピュータはプロセスとの通信を全てこのネットワークにて行っているため、開発機でのプログラムの並行ランによるテストが可能となっている。

データトレースバック装置は、データ収集用のマイクロコンピュータとデータ表示用の EWS (engineering work station) からなり、20 ms ごとに 512 バイトのデータを高速ネットワークからサンプリングする。そして、あるトリガーの前後 3 分間分のデータをディスクに保存する。このデータをグラフ等に表示し、制御の調整等に役立てている。

4 制御アルゴリズム

4.1 基本思想

センサーベース、モデルベースの制御を基本方針とした。したがって、圧延前の初期設定はセンサーにて測定したデータに基づき作成したモデルを用いて行う。通板中の再設定はセンサーからのデータを用い、かつ、モデルに基づいてフィードフォワードする。圧延中のダイナミックな制御はセンサーデータをもとにフィードバック制御を行う。また、圧延中のセンサーデータをもとにモデル学習を行う。以上を基本思想とした。

4.2 セットアップ計算

板を圧延する前に各装置の初期設定を行う。すなわち、最終製品仕様に基づく、各圧延機のロール間隙や回転数等を設定する。その初期値を決定するセットアップ計算を新たに開発した。

セットアップ計算では Fig. 4 に示すように、仕上げ圧延前の材料の板厚、温度実績をもとに、圧延荷重、ミル剛性、板温度等の予測を行い、それをもとに各設定値を決定する。各予測はそれぞれ物理モデルにて実施している。特に最先端板厚精度向上のために従来より圧延荷重モデルのレベルアップを実施してきた^{15,16)}。今回、センサーを増設したことにより、そのレベルアップを再度実施した。

圧延荷重モデルの形を下に示す。

$$P = fc \cdot km \cdot W \cdot Qs \cdot \sqrt{Rs' \cdot (H - h)} \quad (1)$$

ここで、 P : 圧延荷重 (N)

fc : Orowan-Sims 比

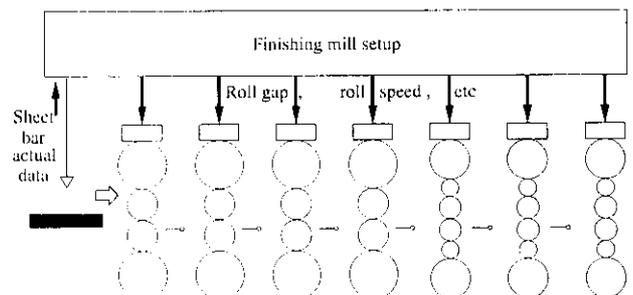


Fig. 4 Diagram of finishing mill setup system

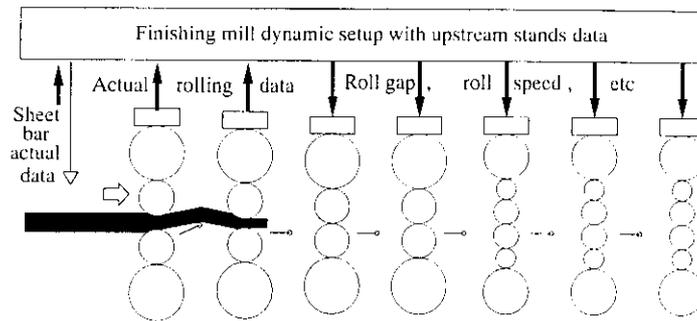


Fig. 5 Diagram of finishing mill dynamic setup system with upstream stands data

km : 変形抵抗 (N/mm²)
 W : 板幅 (mm)
 Qs : 圧下力関数
 Rs' : 扁平ロール径 (mm)
 H : 圧延前板厚 (mm)
 h : 圧延後板厚 (mm)

本モデルは、Simsの簡略式¹⁷⁾にOrowanの理論¹⁸⁾による荷重との比を乗じた形である。この比は種々の圧延要因で重回帰することにより求める。また、変形抵抗モデルは上流スタンドの残留ひずみと当該スタンドのひずみの和の累積ひずみ、高温かつ低ひずみ速度の仕上前段での動的軟化、低温の仕上後段での変態軟化を考慮したものを用いる。その係数は実圧延データと圧延荷重モデルより逆算した変形抵抗値を用いた重回帰により算出した。特に従来測定できていなかったスタンド間板厚実測値等により、従来に比べ精度よく調整を行えた。

また、各スタンドでどの程度の板厚を狙うかが操業上、品質上重要である。これに関しては、形状を考慮した新しい方法を開発した。これにより、従来に比較して安定した圧延が可能となった。

4.3 ダイナミックセットアップ

板圧延前に、セットアップ計算にて各装置の初期設定を行っている。しかしながら、あくまでも予測によるため、圧延までの時間がずれたり、予測モデルの誤差によりずれが生じる。このずれをそのまま放置しておく最終スタンド出側で狙いとずれた製品になってしまう。従来より、途中スタンドでの実績を用いて下流スタンドの設定を修正することを試みていた¹⁹⁾。しかしながら、十分な精度がえられなかった。今回、モデル精度向上や途中スタンドの板厚実測ができたため、途中スタンドまでの実績に基づき初期設定値をフィードフォワード的に修正するダイナミックセットアップを実用化してきた。

まず、Fig. 5に示すように、各前段スタンドに板が噛み込んだ時の実績値に基づきモデル計算をやり直し、次スタンド以降の初期設定値を修正する前段スタンドダイナミックセットアップ機能がある。この機能で、前段までの各種誤差を修正するようにしている。

次に、Fig. 6に示すように、スタンド間板厚計に板が迷った時の実績値に基づき次スタンド以降の初期設定値を修正するスタンド間板厚計ダイナミックセットアップ機能がある²⁰⁻²²⁾。ここでは主に板厚誤差を打ち消すようにロール開度、ロール回転数を修正するようにしている。その原理を以下に示す。

第*i*スタンド入側の板厚が実測できた時、そのスタンドのロール開度修正量を示す基本式は以下になる。

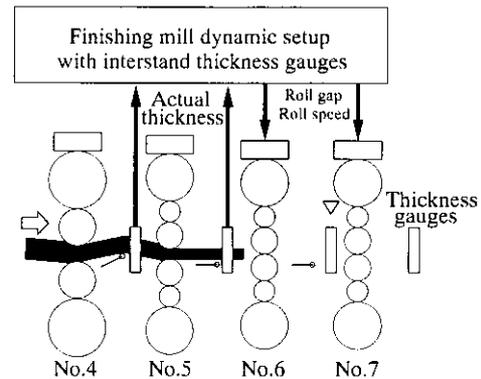


Fig. 6 Diagram of finishing mill dynamic setup system with interstand thickness gauges

$$\Delta S_i = G_i \cdot \frac{1}{M_i} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial H_i} \right) \cdot \Delta H_{x_i}$$

ここで、 ΔS : ロール開度修正量 (mm)

G : ゲイン

M : ミル剛性係数 (N/mm)

ΔH_x : 入側板厚偏差 (mm)

P : 圧延荷重 (N)

H : 入側板厚 (mm)

1スタンドでダイナミックセットアップを行っても下流側で生じる板厚誤差は吸収できないが、後段3スタンドに板厚計を設置し、順次圧下修正を行うことでほとんどの板厚誤差を修正することができる。

4.4 ダイナミック制御

板が各スタンドに噛み込んだ後に、板厚や張力、板速度を目標値にすべくダイナミック制御を行う。本制御はリアルタイム制御用プロセスコンピュータにて一括して実施している。その概要をFig. 7に示す。主な機能として、板厚を制御するAGC、張力を制御するマスフロー制御、板速度を制御する加減速制御がある。また、AGC系とマスフロー制御系の干渉をフィードフォワード的に補償する圧下補償制御がある。

AGCは目標値をそのまま狙う絶対値AGC²³⁾と、スタンド間板厚計によるモニターAGCを組み合わせ、精度向上を図った。ループ制御と圧下補償ではAGCと同じ計算機にて制御周期をAGCと同じ20msとすることにより、圧下の動作と連動した制御が可能となり、張力の安定がはかれた。

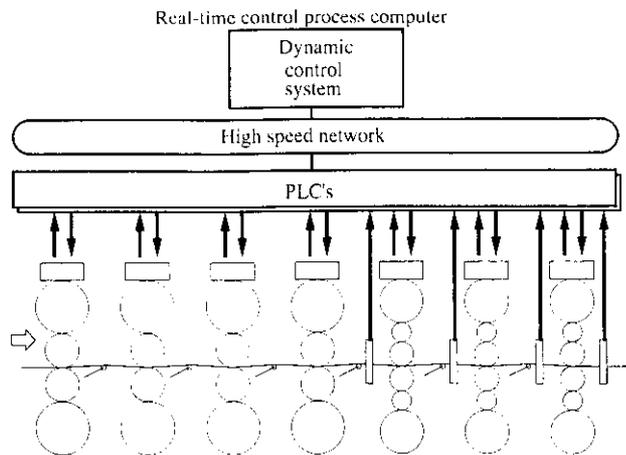


Fig. 7 Diagram of finishing mill dynamic control system

4.5 モデル学習

セットアップやダイナミック制御に用いている各モデルはスタンド間板厚計の実績値に基づきオンラインで学習する形とした。すなわち、板厚計実績に基づき、板厚モデルを学習する。また、温度モデル・荷重モデルを学習する際の各スタンド出側板厚を板厚計の実績値とすることにより、安定した学習が可能となった。

5 システム評価

5.1 制御モデルの評価

新たなセンサーを導入して各種モデルの再開発を行い、また、センサーによるオンライン学習を行う仕組みとした結果、制御モデルの精度向上が図れた。代表として荷重モデルの精度の推移を Fig. 8 に示す。実績荷重と計算荷重の比のばらつきが9%から6%に減少しており、製品品質向上に大きく寄与していることがわかる。

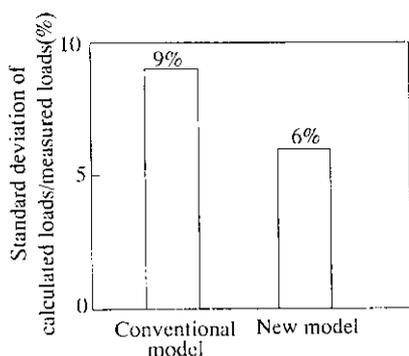


Fig. 8 Accuracy of rolling loads model

5.2 制御結果の評価

これまでに示したシステムを開発することにより、自動化率が向上し、製品品質を向上させることができた。Fig. 9 に、自動圧延率の推移を示し、Fig. 10 に製品の最先端板厚精度を示す。両者とも、新システム導入により大きく向上し、自動圧延率は97%以上となり、また最先端板厚精度は28 μm 以下のばらつきとなった。

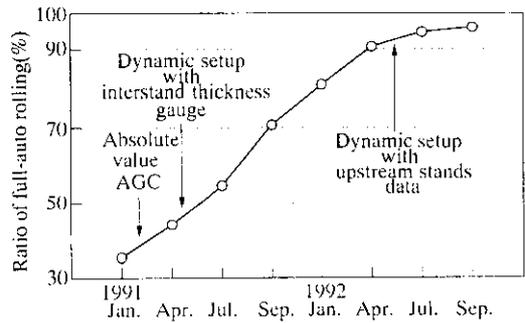


Fig. 9 Ratio of full-auto rolling

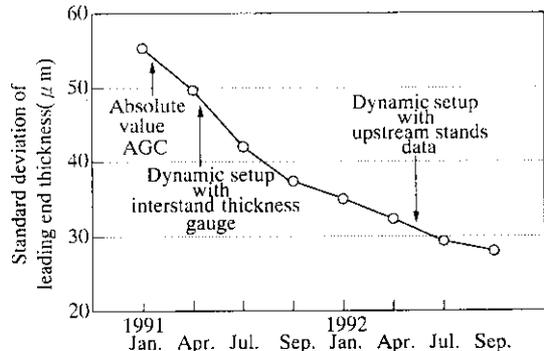


Fig. 10 Accuracy of gauge control

5.3 制御装置の評価

プロセスコンピュータにて品質制御を実施するようにした。特にリアルタイム制御は従来複数の PLC にて実施していた制御を一つのプロセスコンピュータにて行うことにより、機能間の伝送遅れや重複処理を無くすることができ、品質上、保全上の向上がはかれた。また、UNIX 環境下で FORTRAN にてコーディングできるようになり、保全性が格段に向上した。さらに、プロセスコンピュータとプロセス間の情報を全て高速ネットワークにて交換するようにしたため、開発機での並行テストが可能となり、システム品質も向上した。特に、20 ms で動作するリアルタイム制御の並行ランが可能となり、新制御開発が容易となった。さらに、高速ネットワーク上のデータを高速で監視するデータトレースバックを用いることにより、制御の調整が容易になった。このため、ある制御を実現するための開発期間は Fig. 11 に示すように従来に比べ、1/2 となった。

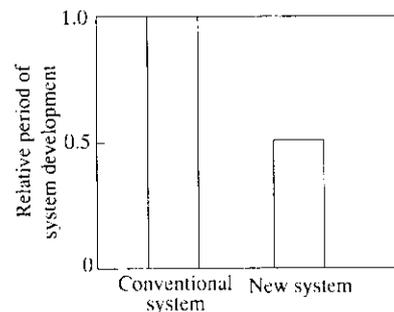


Fig. 11 Comparison of system development period between conventional system and new system

6 結 言

水島製鉄所熱延工場の製品品質向上を目的として、仕上制御システムの建設を行った。その特徴は以下のとおりである。

- (1) センサーベースの制御を行うべく仕上ミル4スタンド目以降に板厚計等のセンサーを増設した。
- (2) 制御系の能力限界を打破すべく制御装置(高性能プロセスコンピュータ、高速ネットワーク、データトレースバックシステム)の導入を行った。

- (3) モデルベースの制御を行うべく圧延荷重モデル等の各種モデルの開発を行った。
- (4) 新センサー、新モデル導入に伴い、ダイナミックセットアップやスタンド間板厚計モニター AGC 等の新制御を開発した。
- (5) 新制御システムにより、自動圧延率が97%以上に、最先端板厚精度が28 μ mのばらつき以下になり、制御性能が向上した。本システムは1992年9月に切替えを完了し、順調に稼働している。今後、より一層の製品品質向上のために、さらなるレベルアップを実施して行く。

参 考 文 献

- 1) 美坂佳助, 高橋亮一: 鉄と鋼, 67 (1981) 15, 60
- 2) 黒津亮二, 豊坂秀夫, 伊藤 実, 片岡健二, 峰松隆嗣, 御厨 尚: 川崎製鉄技報, 3 (1971) 3, 35
- 3) 清水勇夫, 武田利式, 梅本純生: 川崎製鉄技報, 5 (1973) 2, 104
- 4) 直井孝之, 柴田克己, 浜田圭一, 梅本純生, 広瀬勇次, 三宅裕史: 鉄と鋼, 70 (1984) 5, 126
- 5) 高木 清, 内藤 隼, 浜田一明, 浜田圭一, 渡辺敏雄, 中野貞則: 鉄と鋼, 70 (1984) 5, 127
- 6) 奥田隆康, 石川好藏, 土井克彦, 高木 清, 春日弘夫, 田辺 護: 鉄と鋼, 70 (1984) 5, 128
- 7) 山本義之, 登田一郎, 浦野 朗, 北尾斉治, 広瀬勇次, 春日弘夫: 鉄と鋼, 70 (1984) 5, 129
- 8) 浦野 朗, 北尾斉治, 葛原民雄, 田井英一: 鉄と鋼, 70 (1984) 5, 53
- 9) 新田純三, 御厨 尚, 武智敏貞, 森山暢孝: 鉄と鋼, 70 (1984) 13, 49
- 10) 前田一郎, 御厨 尚, 新田純三, 北尾斉治, 吉村宏之, 吉田那雄: 鉄と鋼, 70 (1984) 13, 50
- 11) 新田純三, 御厨 尚, 前田一郎, 武智敏貞: 川崎製鉄技報, 18 (1986) 2, 107
- 12) 上原淳則, 藤原洋一, 山崎順次郎, 浅野一哉: 材料とプロセス, 1 (1988) 5, 1586
- 13) 布川 剛, 江藤 学, 田中俊光, 山本章生, 本城 基, 原木 裕: 材料とプロセス, 2 (1989) 2, 485
- 14) 木村和喜, 本城 基, 原木 裕, 高橋亮一, 江藤 学, 窪田淳之: 材料とプロセス, 2 (1989) 2, 486
- 15) 藤本隆史, 伊藤澄彦, 上原淳則, 浦野 朗, 岡田公之, 二階堂英幸: 材料とプロセス, 2 (1989) 5, 1473
- 16) 小関智史, 吉田 博, 藤本隆史, 浦野 朗, 上原淳則, 二階堂英幸: 材料とプロセス, 3 (1990) 2, 475
- 17) 吉田 博, 伊藤 庸, 浜田圭一, 広瀬勇次, 須藤象洞: 鉄と鋼, 63 (1977) 2, A 25
- 18) E. Orwan: Proc. Inst. Mech. Engr., 150 (1943) 4, 140
- 19) 吉田 博, 広瀬勇次, 浦野 朗: 第35回塑性加工連合講演会予稿集 (1984), 197
- 20) 小関智史, 吉田 博, 上村正樹, 藤本隆史, 上原淳則: 材料とプロセス, 5 (1992) 5, 1514
- 21) 上原淳則, 村山 薫, 上村正樹, 池田晴行, 岡田公之, 二階堂英幸: 材料とプロセス, 5 (1992) 5, 1515
- 22) 上村正樹, 藤本隆史, 上原淳則, 村山 薫, 吉田 博, 小関智史: 材料とプロセス, 5 (1992) 5, 1516
- 23) 平 明典, 潮海弘資, 藤本隆史, 上村正樹, 上原淳則: 材料とプロセス, 4 (1991) 5, 1557