
冷間タンデムミルの全デジタル速度制御

All Digital Speed Control System in Cold Tandem Mills

土井 克彦(Katsuhiko Doi) 佃 一二三(Hihumi Tsukuda) 山本 和明(Kazuaki Yamamoto) 石井 功一(Kouichi Ishii) 江藤 孝治(Takaharu Eto) 小松 富夫(Tomio Komatsu)

要旨：

冷延鋼板の板厚寸法精度は、制御技術の進歩とともに向上してきた。しかしながら、従来の圧延機のロール速度制御装置（アナログレオナード制御装置）では、アナログ演算アンプの非線形性、温度ドリフトなどの問題があり、特に低速域で速度制御精度、揃速性の確保が困難であった。このために、通板、尻抜け時や圧延速度の加速、減速時の板厚制御性に問題があった。そこで、水島製鉄所冷間5タンデムミルでは世界で初めて主機の直流サイリスタレオナード装置と、速度主幹制御装置の全デジタル化を実施した。その結果、通板低速域での向上、揃速性の向上などにより板厚制御性と生産性に著しい効果があった。

Synopsis：

The gage accuracy of strip coil in cold tandem mills has undergone much improvement with the evolution of control techniques. In the conventional analog speed control systems, however, rolling speed (specially at low-speed threading) at each stand was unable to be controlled accurately and cooperatively because of nonlinearity, thermal drift, etc., of transistor operated amplifiers. These phenomenon had harmful effects on gage control in coil threading and tailing-out, and/or accelerating or decelerating of rolling speed. Therefore, the all digital thyristor Leonard and the all digital speed master control system have been employed at Mizushima's 5-stand tandem cold mill. The new speed control system has produced remarkable results in gage control and improvement in productivity.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

土井 克彦* 佃 一二三** 山本 和明** 石井 功一*** 江藤 孝治**** 小松 富夫*****

All Digital Speed Control System in Cold Tandem Mills

Katsuhiko Doi, Hihumi Tsukuda, Kazuaki Yamamoto, Kouichi Ishii, Takaharu Eto, Tomio Komatsu

要旨

冷延鋼板の板厚寸法精度は、制御技術の進歩とともに向上してきた。しかしながら、従来の圧延機ロール速度制御装置（アナログレオナード制御装置）では、アナログ演算アンプの非線形性、温度ドリフトなどの問題があり、特に低速域で速度制御精度、揃速性の確保が困難であった。

このために、通板、尻抜け時や圧延速度の加速、減速時の板厚制御性に問題があった。

そこで、水島製鉄所冷間5タンデムミルでは世界で初めて主機の直流サイリスタレオナード装置と、速度主幹制御装置の全デジタル化を実施した。

その結果、通板低速域での速度精度の向上、揃速性の向上などにより板厚制御性と生産性に著しい効果があった。

Synopsis:

The gage accuracy of strip coil in cold tandem mills has undergone much improvement with the evolution of control techniques.

In the conventional analog speed control systems, however, rolling speed (specially at low-speed threading) at each stand was unable to be controlled accurately and cooperatively because of nonlinearity, thermal drift, etc., of transistor operated amplifiers. These phenomenon had harmful effects on gage control in coil threading and tailing-out, and/or accelerating or decelerating of rolling speed. Therefore, the all digital thyristor Leonard and the all digital speed master control system have been employed at Mizushima's 5-stand tandem cold mill.

The new speed control system has produced remarkable results in gage control and improvement in productivity.

1. 緒 言

近年、冷延鋼板に対する薄物化、寸法精度など品質面でのユーザーの要求は、ますます厳しくなっており、これらの要求に応じ、かつ、歩留向上を目指して板厚制御および形状制御の高性能化・高精度化に各社とも努力を払っている。

水島製鉄所5スタンド冷間タンデムミル（以下水島タンデムミルという）でも圧延全域にわたる張力、板厚制御法としてATGCシステム（Advanced Tension and Gage Control System）を開発し、操業の安定化およびオフゲージの減少に成果を得ていたが、速度系が従来のアナログ方式であるために、通板、尻抜け時の低速域での速度制御精度不良による通板トラブルや、速度検出精度不良によるマスフローAGC（Automatic Gage Control）の制御性などに問題があった。また、電圧や温度ドリフトによる影響を受けたり、経年変化を受けるなどの問題もあり操業の安定化のために7～10日間ごとの点検、調整を必要とし電気保守員の大きな負担となっていた。

そこで、水島タンデムミルでは

- (1) 通板時低速域での速度精度向上
- (2) 加減速時のスタンド間張力変動低減のための揃速性向上
- (3) マスフローゲージ演算精度向上のための速度検出精度向上
- (4) 電気制御系の安定化、保守性、信頼性向上

を目的に、主機の速度主幹制御系と直流サイリスタレオナード装置^{1,2)}の速度系全面デジタル化を1981年10月に実施し効果を上げた³⁻⁵⁾。

本文では、デジタル速度制御システムの概要とオンライン操業結果についてまとめた。

2. 設備仕様

2・1 ミル仕様

Table 1に水島タンデムミルの設備仕様を示す。水島タンデムミルは、建設稼働当初4 Hi 5スタンドミルであったが、1981年10月No.5スタンドを6 Hi ミルに改造した。Table 1に示す仕様は、この改造後のものである。

2・2 システム構成

Fig. 1に水島タンデムミルの全体システム構成を示す。

パススケジュール計算は、プロセスコンピュータ（以下プロコンという）により行われ、速度設定値や圧下位置設定値などのプリセットデータは、データウェイのステーションを介して、各スタンド速度設定（SSRH：Stand Speed Rheostat）、速度マスター（MRH：Master Rheostat）演算、サクセシブ演算などの速度主幹の制御用PLC（Programable Logic Controller）および圧下・中間ロール・サイドガイド各位置の自動設定（APC＝Automatic Position Control）用PLCに伝送され、各PLCは、それぞれのアクチュエーターの制御系（主機はデジタル速度制御、圧下はアナログ速度制御、中間ロールは電磁弁制御、サイドガイドは交流モータ制御）の指令値を演算し、制御系に指

* 水島製鉄所動力部動力技術室主任（課長）

** 水島製鉄所動力部動力技術室

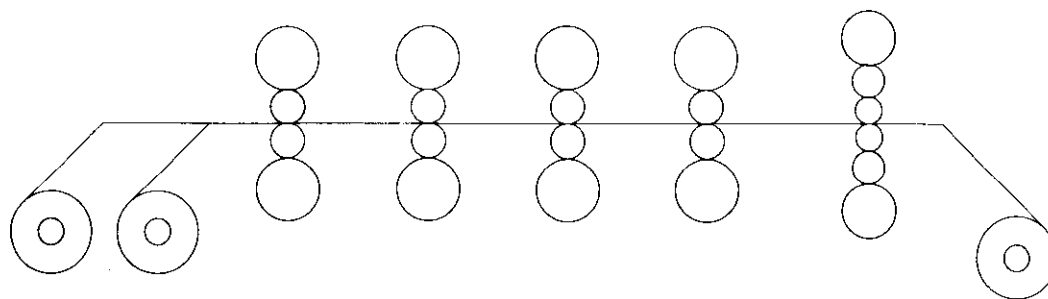
*** 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主任（課長）

**** 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主任（課長補）

***** 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室

〔昭和57年12月8日原稿受付〕

Table 1 Specification of tandem mill



	No.1 POR	No.2 POR	No.1 STD	No.2 STD	No.3 STD	No.4 STD	No.5 STD	TR
Mill type	—	—	4Hi	4Hi	4Hi	4Hi	6Hi	—
Motor power	400kW×2	400kW×2	950 kW×2×2	1 350kW×2×2	1 350kW×2×2	1 350kW×2×2	1 350kW×2×2	475kW×3×2
Motor drive	—	—	Twin drive (Mechanical tie)					—
Motor RPM(rpm)	200/870	200/870	175/525	200/580	225/585	225/585	200/580	100/522
Gear ratio	1/3.34	1/3.34	1/1.643	1/1.406	1/1.138	1.104/1	2.524/1	1.8/1
Control	ACR	ACR	ASR	ASR	ASR	ASR	ASR	ACR
Roll size (mm)	—	—	610×1 730 1 520×1 730	610×1 730 1 520×1 730	610×1 730 1 520×1 730	610×1 730 1 520×1 730	420×1 730 530×1 730 1 350×1 730	—
Screw-down	—	—	Hydraulic					—
Strip thickness(mm)	1.8~6.0					0.15~3.2		
Strip width (mm)	600~1 600							
Coil weight (tf)	Max. 50							
Line speed (mpm)	1 800							

命を与える。

AGCは、前述のようにATGCシステムを採用している。この方式は、マスフローゲージ演算を基本とし、各スタンド出側板厚予測値に基づく板厚制御方式で、通板時の非定常領域においては速度による張力一定制御のもとに圧下による板厚制御を行い、高速度においては速度による板厚制御と圧下による張力リミット制御を行う。

速度系は、No.5スタンドをピボットスタンドとし、各スタンドにサクセシブバーニアと単独バーニアを有する。

3. 従来のアナログ制御系の問題点

Fig. 2にアナログ式速度制御系のブロック図を示す。従来、サイリスタレオナード系は、主として速度、電流応答が速く、コストが安いことからアナログ方式であった。しかし、アナログ方式は、下記のような問題点を有していた。

- (1) アナログ信号の精度は、最大出力を100%としたときに0.1%が限度である。
- (2) 速度検出器として指速発電機を使用しているため、速度検出精度は0.1%~0.5%が限界で、特に低速時は非線形性、偏芯によるリップルなどの問題がある。
- (3) 上記欠点のため、主機速度系の総合精度としては、0.7% (100%速度に対して) の誤差となり、これは通板速度 (5%速度) に対しては14%もの誤差となり、通板性阻害の第一要因となっていた。
- (4) アナログ信号は電圧変動、温度によるドリフト、機器の経年変化による誤差が発生するので上記レベルでさえも維持するためには、7~10日の休工ピッチに零点調整などの点検調整が必要で、これは保守員の大きな負担であった。

4. リプレースの基本方針

速度系全面デジタル化リプレースの基本的な考え方は、下記のとおりである。

- (1) 速度精度に関する系は、すべて一貫してデジタル化とし、高精度を確保できるようにした。つまり、プロコン、速度主幹制御、サイリスタレオナード系のデジタル化と、おのおののリンケージのデジタル多重伝送を行いアナログ系は混在しない系とした。
- (2) デジタルレオナード部は、直流モータ制御のみとし、ハード、ソフトともに可能な限り単純化し、高精度と応答性の確保を第1に、サンプリング時間をできるだけ短縮するように考慮した。
- (3) これは、直接のモータ制御部ゆえ、トラブルが重大事故につながることで、マイクロコンピュータは機械言語で、電気保守員全員が取扱うには無理があることを考慮したからである。ただし、切離しが困難な垂下特性、IR補償、ロードバランスなどは標準的なソフトのみを組入れ、アプリケーションソフトは上部の速度主幹制御用PLCで処理するようにした。
- (4) デジタルレオナード部の保護機能は、ソフトウェアで全て処理し、過電流、過電圧、過速度は、ハードウェアでバックアップする系とした。また、ゲートシャ断、接地検出、非常停止回路も、ハードウェア処理とし、CPUの暴走にも対応できるように考慮した。
- (4) 速度検出器は、デジタル速度制御系のキーとなるので、サンプリング時間の短いもの、検出精度の良いもの、機械的強度信頼性の高いものを選択した。

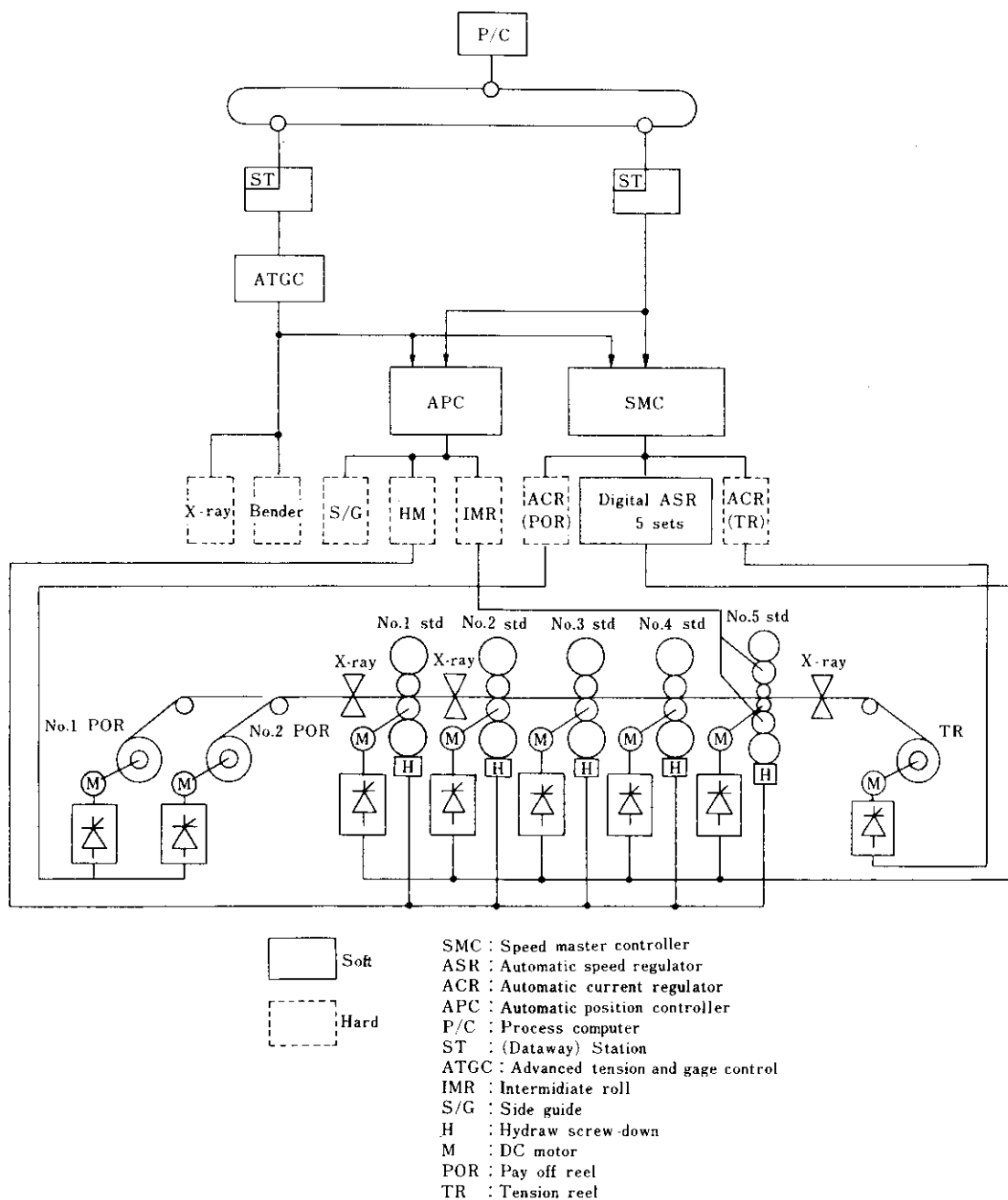


Fig. 1 System configuration of cold tandem mill

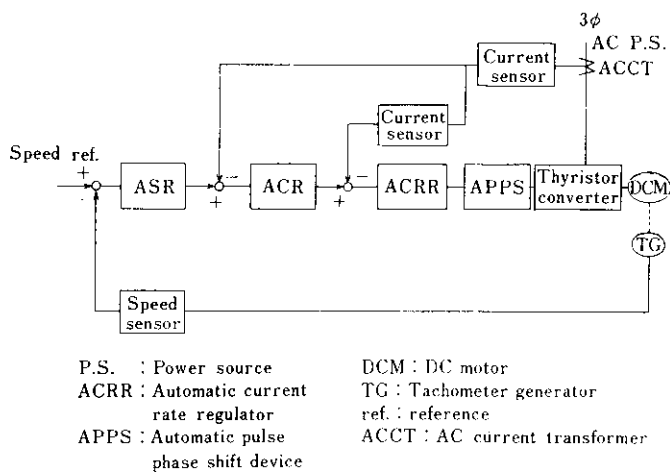


Fig. 2 Block diagram of conventional analog speed control system

5. デジタルレオナード制御系の概要

5.1 主機速度制御系

Fig. 3に主機速度系統図を示す。主機速度系のハード構成は、速度主幹制御 PLC とデジタルレオナード部から成る。

速度主幹制御系 (SMC) は、各スタンドの SSRH, MRH 演算, AGC, パーニア補正のサクセシブ演算やリール張力制御演算 (加減速補償, 逆起電圧制御, ATR=Automatic Tension Regulator など) を、20ms の周期で処理する。各スタンドの速度指令は、多重伝送装置 (伝送速度128点/2.4ms・スタンド) によりデジタルレオナード部に送られ、速度制御演算 ASR (Automatic Speed Regulator) を10ms (マイナーの電流制御演算 ACR (Automatic Current Regulator) は、2.8ms) で行う。

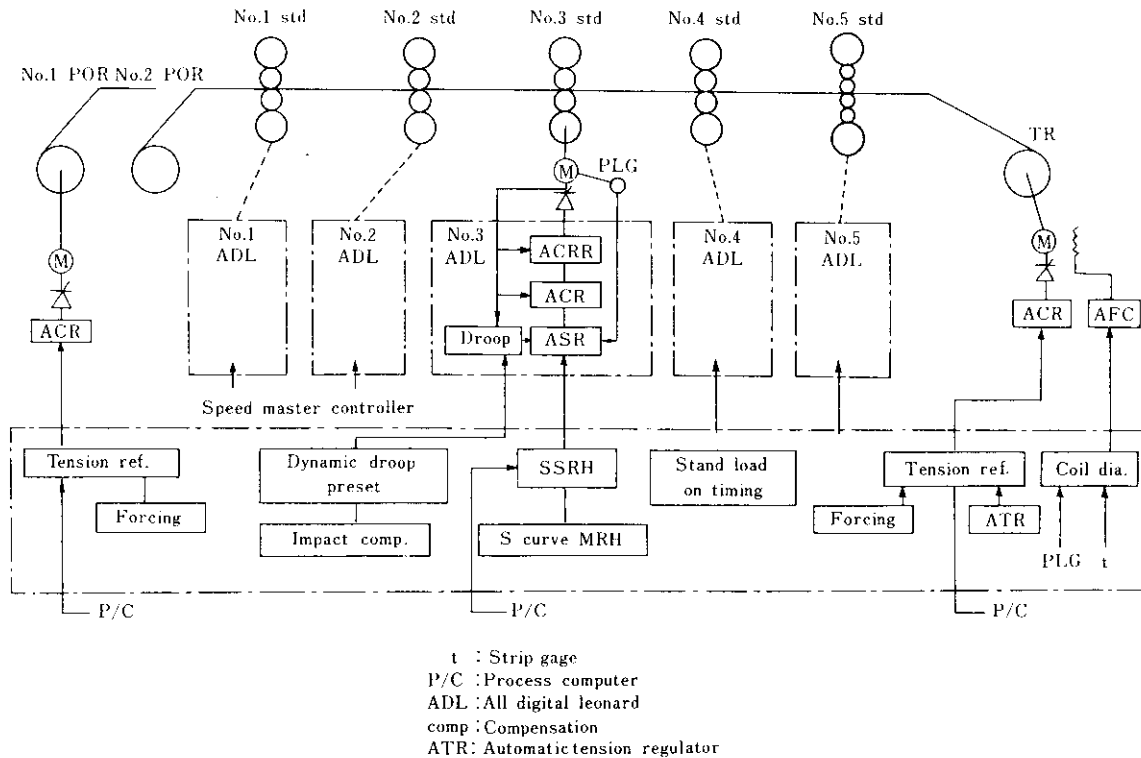


Fig. 3 Schematic diagram of all digital speed control system

5.2 デジタル速度制御系

Fig. 4 にデジタルレオナード部のハード構成図を示す。主回路は逆並列接続の二組みの3相全波サイリスタ変換装置から成り、サイリスタレオナードを構成している。検出器は電流検出用として交流変流器 (CT) を、速度検出用として回転数に応じた周波数のパルスを発生するパルス発生器 (PLG) を用いている。更に、デジタル制御部は、同期信号発生回路 (Synchronizing circuit)、電流検出回路 (Current sensor)、ゲートパルス発生回路 (Gate pulse generator)、速度検出回路 (Speed sensor)、中央処理装置 (CPU: 16ビットマイクロプロセッサ 8086)、イニシャル処理プログラムメモリ (IC Memory)、アプリケーションプログラムメモリ (Core Memory)、プラントインターフェース (SEO I/O)、速度主幹用 PLC (SMC) とのインターフェース (R I/O)、およびマンマシンインターフェースツール (Typuter) とのインターフェース (Typ INF) からなる。

Fig. 5 にマイクロプロセッサで処理する内容を示す。速度指令、速度帰還信号及び電流帰還信号をもとに、マイクロプロセッサのソフトウェアで演算処理を行い、最終的にゲートパルス発生回路への制御角指令を発生する。ASR では PI (比例積分) 補償を用いている。ACR では、マイナーループに電流レート制御 ACRR (Automatic Current Rate Regulator 以下 ACRR という) をつけて電流断続領域の非線形補償を行い、電流の全動作領域で高速応答が可能となるように考慮している。更に、4象限運転を行うための切替論理がある。

その他の主な機能項目としては全速度範囲速度ゲイン補償、ドロップ特性機能などを有している。Table 2 に、デジタルレオナード基本仕様を示す。

5.3 主幹制御系の機能

デジタル速度主幹制御系は各スタンドの速度指令、逆転指令ロジック、サクセシブ演算をデジタル処理し、デジタルレオナード部に多重伝送ラインで伝送している。

デジタル速度主幹制御系は、その他に以下のような機能を持つ。

- (1) テンションとペイオフリール張力の制御
- (2) 2重化 MRH
- (3) S 字速度指令
- (4) インパクトドロップ補償
- (5) ダイナミックドループ
- (6) ロードセンシングバックアップ
- (7) 過速度、過電流の自動制限

5.4 故障自己診断機能

Fig. 6 に故障自己診断機能の概念図を示す。故障自己診断機能は、制御系の主要データを、マイクロコンピュータのメモリーに、常時蓄積 (データセービング機能) しておき、故障発生時にセービングされたデータをもとに事故原因の解析ができる。また、起動前診断として、サムチェック、ベリファイチェックなどの、オンライン診断としてフィードバック異常チェックや合理性チェックなどの診断機能を有する。

6. オンライン操業効果

Table 3 に従来のアナログ式 ASR 系とデジタル式 ASR 系の応答性および制御精度比較を示す。

通板時の低速域における速度制御精度は、通板速度を 5% 速

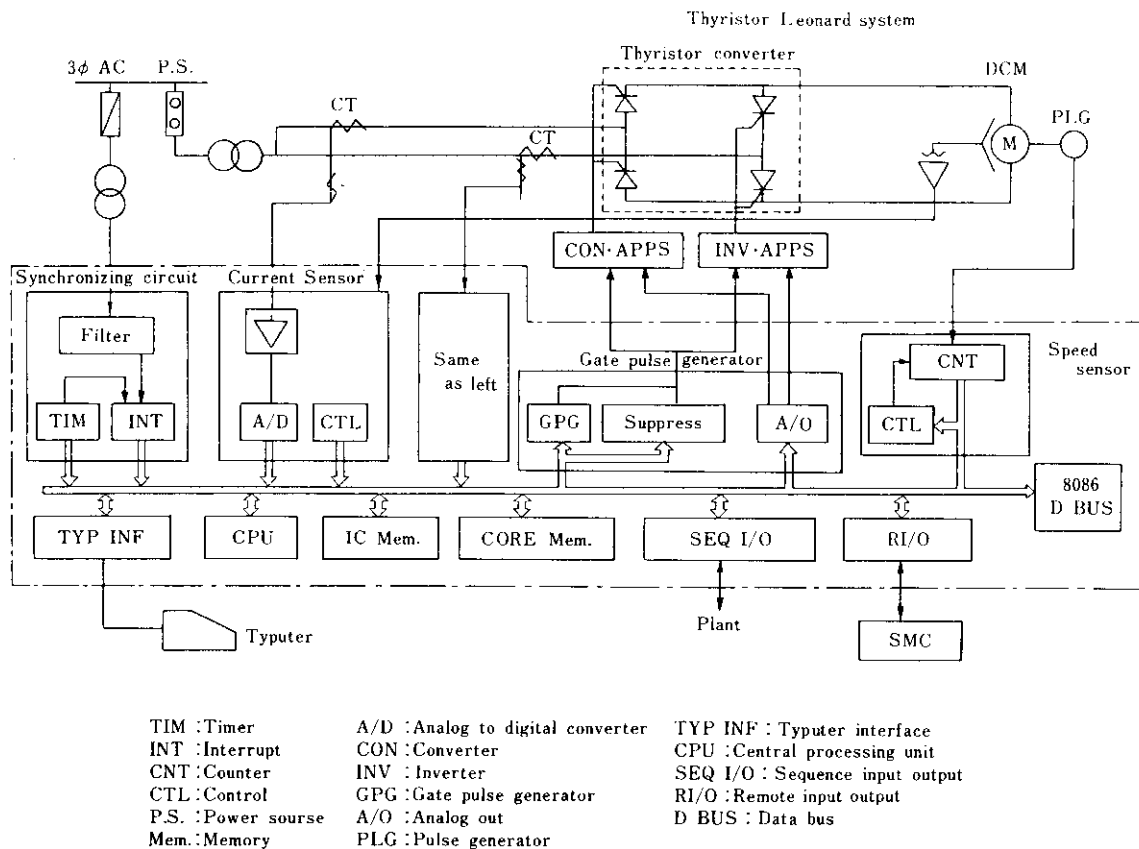


Fig. 4 Constitution of all digital Leonard hard wear

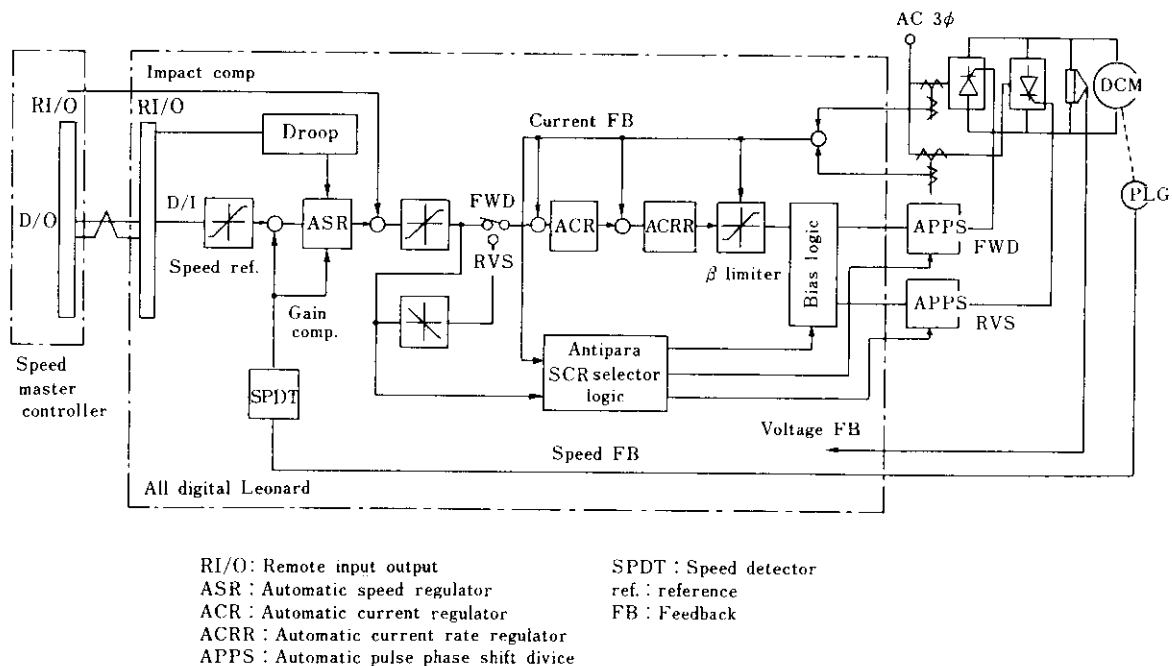


Fig. 5 Block diagram of all digital Leonard

度として、

従来 ASR : $\pm 0.7/0.05 = \pm 14\%$

デジタル ASR : $\pm 0.02/0.05 = \pm 0.4\%$

であり、デジタル ASR 化により、飛躍的に向上した。

また、応答性は、従来各スタンドで不揃いであったが、デジタル ASR 化により揃えることができ、揃速性が向上した。応答速度は、ロールとの機械的共振の問題で 7 rad/s に制限している。

Table 2 Controller specification

(a) All digital Leonard

Quantity	5 sets	
CPU memory	Core	8 kW
	IC	ROM 6 kW RAM 1 kW
Response	ASR	Max.20 rad/s
	ACR	Max.100 rad/s
Sampling time	ASR	10 ms
	ACR	3 ms
Speed detector	PLG	2 400 pulse/rev
CPU spec.	16 bit μ CPU(8 086)	

(b) Speed master controller

Quantity	1 set	
CPU memory	Core	32 kW
	IC	1 kW
Sampling time	20 ms	

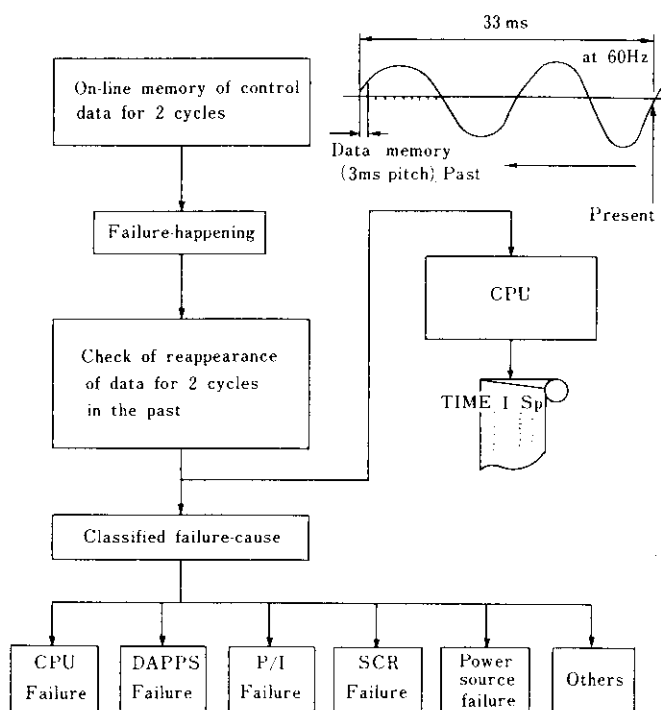


Fig. 6 Diagram of failure detection and diagnosis operation

Table 3 Effect of all digital speed control system

	Conventional system	All digital system
Speed control response ω_c	3~10 rad/s	7 rad/s
Current control response ω_c	40 rad/s	65 rad/s
Precision of speed detector	at 100% speed	$\pm 0.3\%$
	at 1% speed	$\pm 0.3\%$
Precision of total speed regulation	$\pm 0.7\%$	$\pm 0.02\%$

6.1 通板の安定 (速度制御精度向上)

通板時低速域における速度制御精度の向上は、通板の安定に

大きく寄与した。Fig. 7 に従来と全デジタル化後の通板所要時間 (No. 1 std 噛込みから No. 5 std 噛込みまでの時間) の比較を示す。

全デジタル化によって通板所要時間は、長さおよびばらつきが半減している。

なお、速度設定及び制御精度の向上により、垂下率は従来のほぼ1/2となった。

6.2 加減速の安定 (揃速性の向上)

揃速性は、ミル空転時の相隣りあうスタンドの速度比によりチェックした。その結果を Fig. 8 に示す。

従来低速域で2~3%であった揃速性のずれが、デジタル化によって1%未満となったことがわかる。

Fig. 9 に従来と全デジタル化後との加速所要時間の比較を示す。

所要時間、ばらつきとも小さくなっている。このことから、デジタル化による揃速性の向上と制御系の安定性の向上が操業の安定に寄与していることが推察される。

6.3 板厚制御への効果 (マスフローゲージ AGC の制御性向上)

Fig. 10 に従来と全デジタル化後のマスフローゲージ演算精度の比較を示す。

全デジタル化によって速度検出精度が向上し、マスフローゲージ演算精度が飛躍的に向上した。

Fig. 11 に全デジタル化後のオフゲージ長さの改善例を示す。

図は、ストリップ先端オフゲージ長さを母板長さに換算したものである。従来と比較して、オフゲージ長さは約60%に減少している。

6.4 テンションリール張力制御の安定化

Fig. 12 にテンションリール張力制御の例を示す。

張力指令系をソフト化することにより複雑なゲイン補償を実現でき、張力制御の安定化に効果があった。図より、従来、緩い加速レートで $\pm 400 \sim 500 \text{ kgf}$ であった張力変動が、ソフト化によって急速加速でも $\pm 200 \sim 300 \text{ kgf}$ 以内の変動となった。

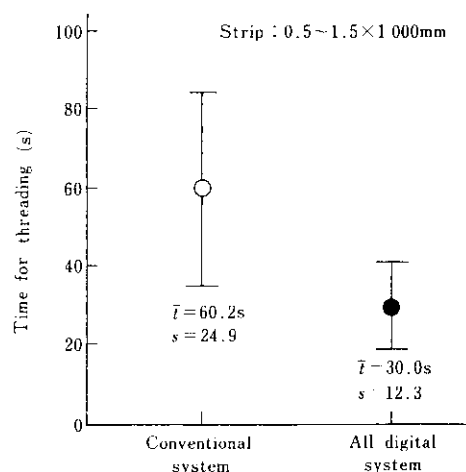
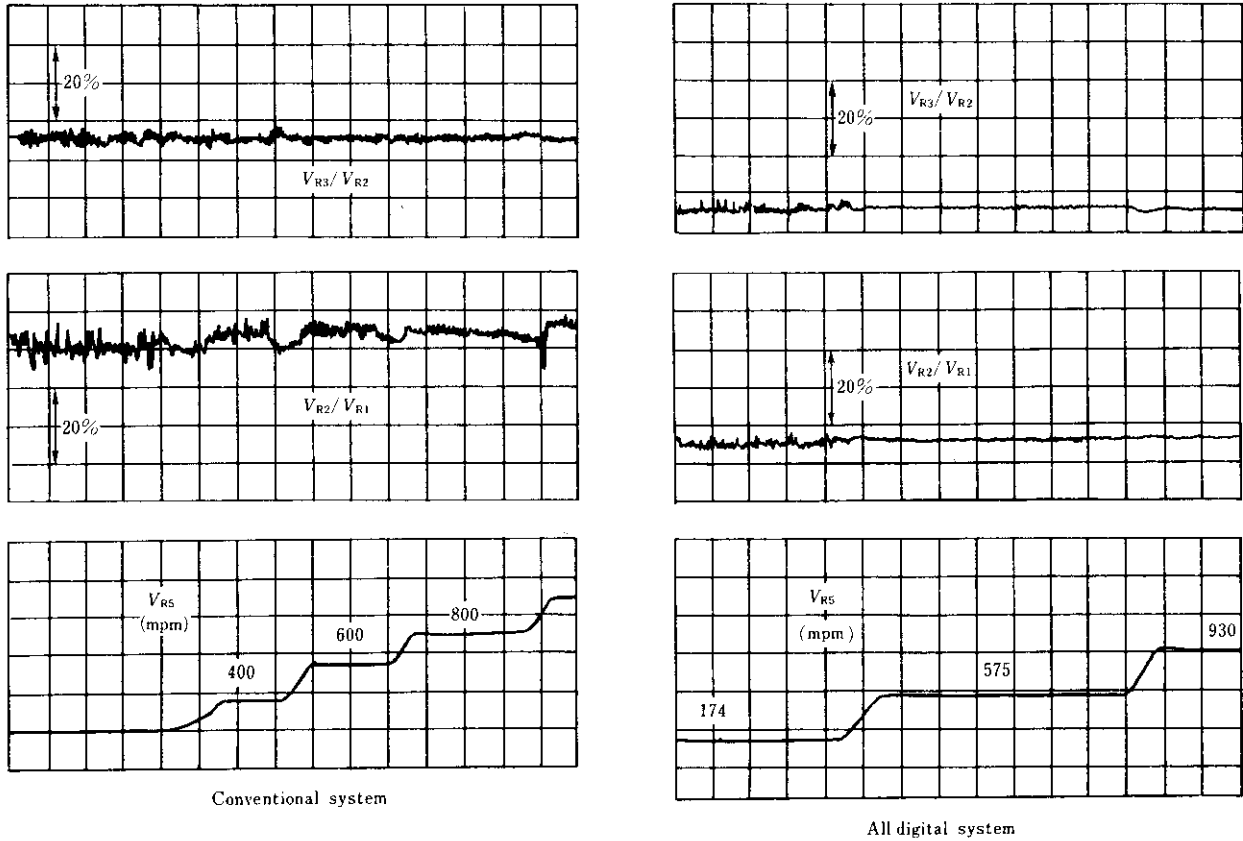


Fig. 7 Effect of DDC on threading



V_{Ri} : No. i STD rolling speed ($i=1\sim5$)

Fig. 8 Effect of DDC on speed-matching

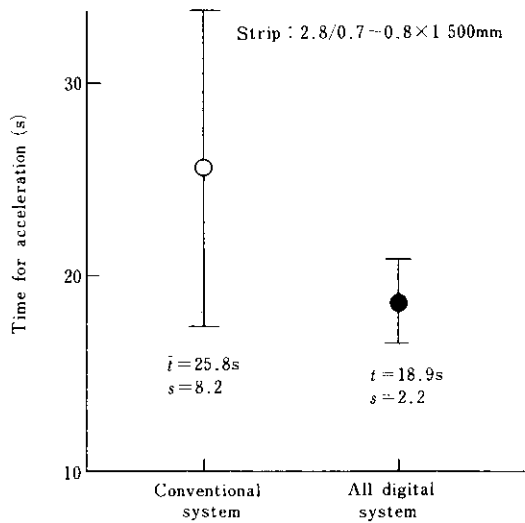


Fig. 9 Effect of DDC on acceleration

6.5 メンテナンスフリー

デジタル化により、従来7~10日間休工ごとに実施していた制御系の点検、調整などの作業が全く不要となった。

また、サイリスタレオナードの故障が発生した場合、従来は

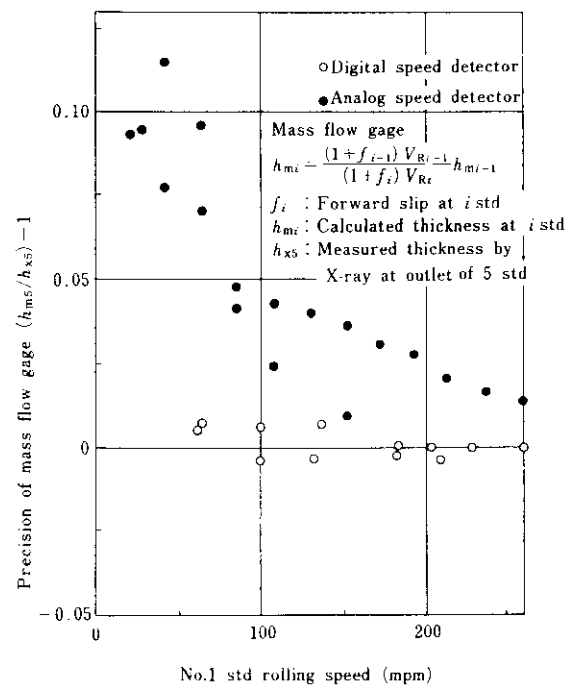


Fig. 10 Comparison of digital and analog speed detector

故障原因の表示のみであり、故障原因の解析が困難であったが、デジタル化に伴い故障直前の主要制御系のデータのセービン

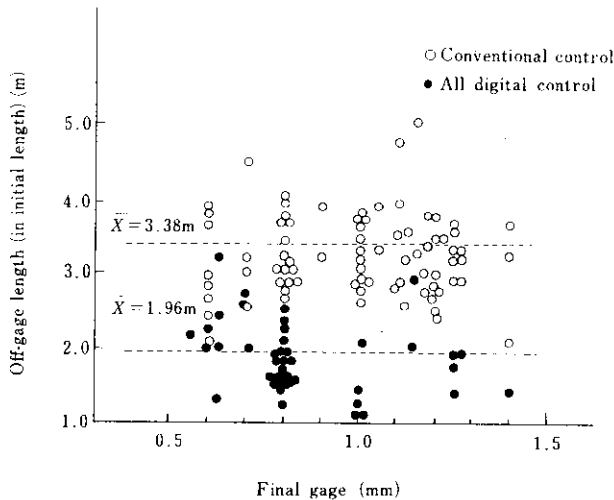


Fig. 11 Off-gage length by ATGC

グ機能により故障原因の解析が容易となった。

7. 結 言

水島製鉄所の冷間圧延工場では、通板低速域での速度制御精度の向上、速度検出精度の向上、保守性の改善を目的として、タンデムミルとしては世界初の、全デジタル速度制御装置を導入した。

その結果を次にまとめる。

(1) 速度制御精度の向上

(a) 通板低速域での速度制御精度が向上（従来アナログ方式： $\pm 14\%$ ，全デジタル方式： $\pm 0.4\%$ ， 5% 速度時）し、通板作業が安定した。通板所要時間の長さおよびばらつきは半減した。

(b) 揃速性が向上した。（従来アナログ方式： $2 \sim 3\%$ ，全デジタル方式： 1% 未満のずれ，低速時）

(2) 速度検出精度向上

デジタル化により、速度検出精度が向上（従来アナログ方式： $\pm 0.3\%$ ，全デジタル方式： $\pm 0.0088\%$ ， 1% 速度時）した結果、マスフローゲージ精度が飛躍的に向上し、オフゲージ長さが従来の 60% まで減少した。

(3) 全デジタル化により、ドリフトなどの経時変化がなくな

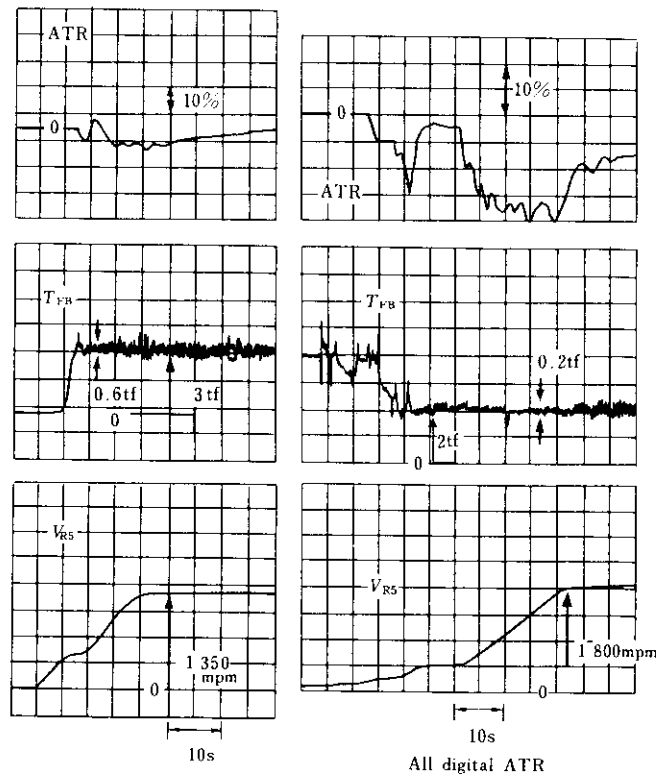


Fig. 12 An example of tension reel tension control

るとともに故障自己診断機能の導入により保守性が著しく向上した。

(4) 速度主幹制御系の全デジタル化に伴い各種付加機能を導入したが、それぞれ順調に機能しており、オペレータの負荷軽減に寄与している。

以上の結果から、全デジタル速度制御は、特に冷間タンデムミルでの効果が大きいものと判断している。

今回のデジタル化リプレースに関して御協力いただき、上記の諸成果に大きく貢献された日立製作所様の関係各位に対して、深く感謝の意を表する次第である。

なお、当社では、その後千葉製鉄所冷間5タンデムミルでも同様に、速度系の全デジタル化を実施し、効果を上げつつある。

参 考 文 献

- 1) Ohmae, Matsuda, Suzuki, Azusawa, Kamiyama and Konishi: Microprocessor-Controlled Fast-Response Speed Regulator with Dual Mode Current Loop for DCM Drivers, IEEE ISA 79: 29C, (1979), 886~892
- 2) 神山, 梓沢, 大前: 直流電動機的全デジタル制御, 日立評論, 61 (1979) 10, 19~20
- 3) 土井, 佃, 山本, 江藤, 小松: 全デジタル速度制御, 鉄と鋼, 68 (1982) 5, S387
- 4) 岩崎, 石井, 守谷, 土井, 小松, 広畑: 速度系デジタル化の板厚制御系への効果, 鉄と鋼, 68 (1982) 12, S1145
- 5) 土井, 新堀: 全デジタル化圧延機用サイリスタレオナード装置の開発, OHM, 69 (1982) 3, 20~22, [オーム社]