

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.28 (1996) No.2

タンデムコールドミルにおける板厚・形状制御へのファジィおよびニューラルネットワークの適用

Fuzzy and neural Network for Gauge and Shape Control in a Tandem Cold Rolling Process

後藤 俊二(Syunji Goto) 水島 成人(Narihito Mizushima) 花田 眞一郎(Shinichiro Hanada)

要旨：

近年、冷延鋼板の板厚精度、形状品質に対する需要家の要求はますます厳格化してきている。水島 No.1 冷延タンデムミル(1TA)においては高品質の鋼板を供給するために、ダイナミックシミュレータを開発し、その結果に基づき板厚・形状制御の改善を実施した。更に、ファジィ理論、ニューラルネットワークを用いた新しい板厚・形状制御システムを構築し、実機に適用した。1TA ではこれらの新技术を最大限に活用して、高品質の冷延鋼板を高歩留り、高生産性で製造している。

Synopsis：

Recently, customers' requirements of cold strip for thickness accuracy and shape quality are becoming extremely rigorous. To supply high quality cold rolled steel strips, the authors have developed a dynamic simulator and have applied the simulation to No.1 cold Tandem Mill (1TA) at Mizushima Works. Furthermore, the authors have developed new gauge and shape control systems using fuzzy theory and neural networks, and applied the Control systems to the cold rolling mill in an actual operation. Owing to these systems, 1TA has been producing high quality cold rolled strip with the high levels of yield and productivity.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

タンデムコールドミルにおける板厚・形状制御への ファジィおよびニューラルネットワークの適用*

川崎製鉄技報
28 (1996) 2, 95-102

Fuzzy and Neural Network for Gauge and Shape Control in a Tandem Cold Rolling Process



後藤 俊二
Shunji Gotō

水島製鉄所 冷間圧延
部冷延技術室 主査(掛
長)



水島 成人
Narihito Mizushima

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(課
長補)



花田 眞一郎
Shinichiro Hanada

水島製鉄所 設備技術
部冷延整備課 主任部
員(課長補)

要旨

近年、冷延鋼板の板厚精度、形状品質に対する需要家の要求はますます厳格化してきている。水島 No.1 冷延タンデムミル(1TA)においては高品質の鋼板を供給するために、ダイナミックシミュレータを開発し、その結果に基づき板厚・形状制御の改造を実施した。更に、ファジィ理論、ニューラルネットワークを用いた新しい板厚・形状制御システムを構築し、実機に適用した。1TA ではこれらの新技術を最大限に活用して、高品質の冷延鋼板を高歩留り、高生産性で製造している。

Synopsis:

Recently, customers' requirements of cold strip for thickness accuracy and shape quality are becoming extremely rigorous. To supply high quality cold rolled steel strips, the authors have developed a dynamic simulator and have applied the simulation to No.1 Cold Tandem Mill (1TA) at Mizushima Works. Furthermore, the authors have developed new gauge and shape control systems using fuzzy theory and neural networks, and applied the control systems to the cold rolling mill in an actual operation. Owing to these systems, 1TA has been producing high quality cold rolled strip with the high levels of yield and productivity.

1 緒 言

冷延鋼板の板厚・形状品質に対する要求は、近年ますます厳しくなっている。したがって、板厚・形状品質の向上は冷延タンデムミルにおける最重要課題の1つであり、鉄鋼各社においても主力ミルについてその品質向上に力を注いでいる^{1,2)}。

水島製鉄所 No.1 タンデムミル(以下、水島1TA)においては、板厚・形状精度向上対策として、昭和44年の稼動以来、主機のデジタルASR化、No.5スタンドHCミル化改造、No.1スタンド高速油圧圧下化改造、完全連続化³⁻⁵⁾等の改造を行ってきた。そして今回、更なる品質向上のために、板厚・形状品質改善工事を実施した。

本報告では、1992年11月に完工した品質改善工事の概要および工事に先立ち実施した、板厚制御シミュレーターによるシミュレーション結果概要、さらに本工事に伴い導入したファジィ・ニューラルネットワークを利用した高精度圧延制御技術の概要を述べる。

2 設備概要

2.1 水島1TA設備概要

Fig.1に水島1TAの設備概要・主仕様を示す。ミル形式は5スタンドタンデムミルであり、酸洗ラインと直結した連続ミルである。ミルは前段No.1~No.4スタンドが4Hiミルであり、最終のNo.5スタンドが6HiのHCミルとなっている。

酸洗セクションの入側にはテンションレベラーを配し、さらに酸洗槽はBOX化改造を実施して⁶⁾ミル能力に見合った高効率な酸洗を実現している。そして、溶接機にはフラッシュバットウェルダ(KMW)、酸洗出側には走間幅替可能なトリマーを配しライン能力を最大限に生かす設備構成となっている。

2.2 リフレッシュ工事概要

今回のリフレッシュ工事の概要は以下に示すとおりである。本改造において新設、改造したセンサ・機器をFig.2に示す。

(1) 板厚精度向上対策

- ①全スタンドバックアップロールのローラ軸受化
- ②スタンド間センサの増設による高応答制御の導入
(No.3スタンド板厚計, No.2~5スタンド板速計)

*平成8年4月1日原稿受付

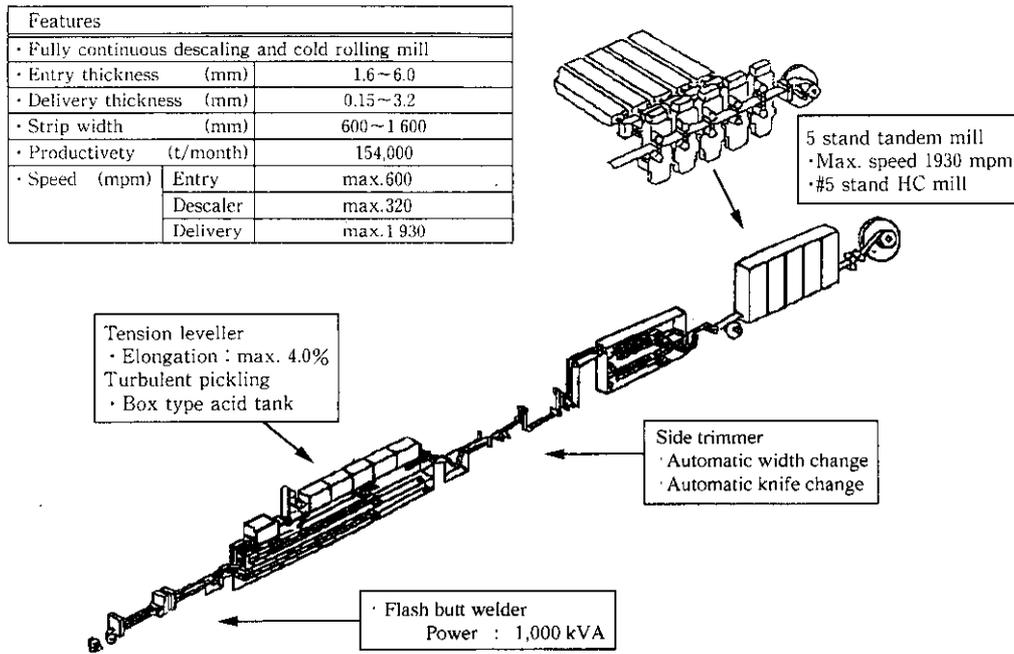


Fig. 1 Outline of fully continuous descaling and cold rolling mill

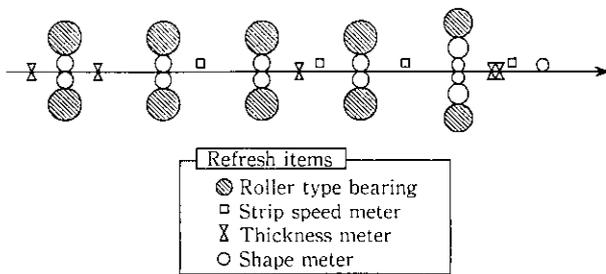


Fig. 2 Outline of the revamping

- ③ファジィ理論による板厚・張力非干渉制御の導入
- (2) 形状品質向上対策
 - ①ファジィ制御によるクーラント制御の導入
 - ②ニューラルネットワークを用いた形状制御の導入

3 板厚制御ダイナミックシミュレーターの開発

事前検討においては、水島1TAをモデルとした板厚制御ダイナミックシミュレーターを作成し、各板厚精度改善対策の効果をそれぞれシミュレーション、定量評価した。以下にその検討の結果概要を述べる。

3.1 シミュレータ概要

シミュレータは Fig. 3 に示すとおり以下の4要素から構成される。

- (a) 初期状態 (圧延条件の設定)
- (b) 動的圧延モデル
- (c) 外乱
- (d) 制御機能

動的圧延モデルは自社開発したモデル⁹⁾を基本としている。初期設定として用いた圧延スケジュールと速度パターンは Fig. 4 に示すとおりである。

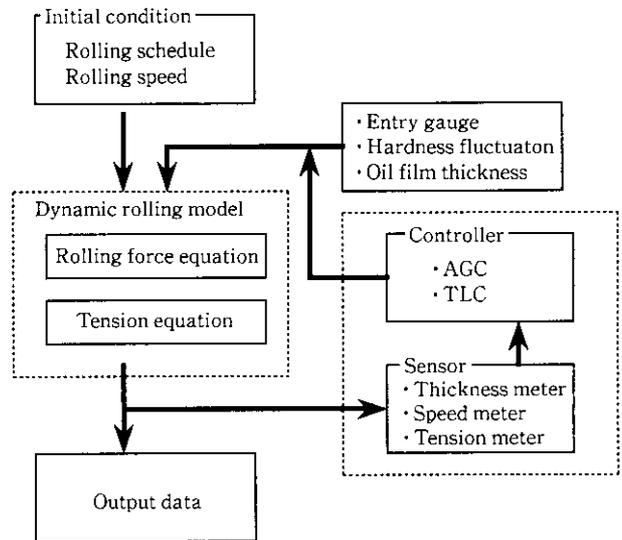


Fig. 3 Configuration of dynamic gauge control simulator

外乱としてはロール偏心、母板板厚変動、母板硬度変動を考慮した。各外乱は、周期変動 (sin カーブ) として与え、実機データに基づき周期、振幅を決定した。

ロール偏心による外乱は、速度変化に起因する油膜厚変動、ロール1周期毎の偏心、キーによるステップ状の変動に分類される。Fig. 5 にそれぞれの変動の実機データを示す。

ロール偏心のモデル化にあたっては、荷重変動実測値をミル定数で除して压下位置変動量とし、(1)式を作成した。

$$\Delta S = \Delta S1 + \Delta S2 + \Delta S3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、各偏心量 $\Delta S1$ 、 $\Delta S2$ 、 $\Delta S3$ はそれぞれ、速度による油膜厚変動、ロールの偏心量、キーによる压下位置変動を表し、モーゴイル軸受、ローラ軸受について Table 1 で示される式でモデル化される。

次に、母板板厚変動外乱のモデル化は、実測板厚チャートからそ

の変動を低周波、高周波成分に分類し(2)式に示すようにモデル化した。

$$\Delta h_o = C_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot x) + C_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot x) \dots\dots\dots (2)$$

Δh_o : 母板厚変動外乱成分

C_1, f_1 : 低周波成分振幅, 周波数

C_2, f_2 : 高周波成分振幅, 周波数

x : 母板移送長さ

母板硬度変動のモデル化は, (3)式に示す変形抵抗式の l を(4)式に示すように周期的に変動させることでモデル化した。

$$K = l \cdot (m + \epsilon)^n \dots\dots\dots (3)$$

l, m, n : 変形抵抗係数

$$l = l_0 + D_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_3 \cdot x) \dots\dots\dots (4)$$

l_0 : 基本変形抵抗係数

D_1, f_3 : 硬度変動振幅, 周波数

本シミュレータの妥当性を評価するために, 改造前仕様の状態の

(Rolling schedule)

Stand No.	Entry	1	2	3	4	5
Exit gauge(mm)	3.2	2.245	1.595	1.139	0.851	0.800
Reduction (%)	—	29.8	29.0	28.6	25.3	6.0

(Rolling speed)

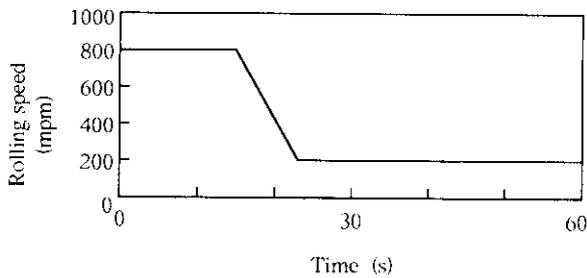


Fig. 4 Rolling schedule and speed of the simulator

シミュレーションを行った。軸受のモデルとして, 全スタンドモーゴイル軸受, また, 制御システムとして, No.1 スタンド BISRA-AGC・モニタ(MN)AGC, No.5 スタンド MN-AGCのみ使用した場合のシミュレーション結果と実機における板厚変動の周波数解析結果を比較したものを Fig. 6 に示す。板厚精度の絶対値, および各成分の占める割合ともによく対応がとれている。したがって, 本シミ

Table 1 Models of roll eccentricity

	Oil film type	Roller type
ΔS_1	$A_1 \sin(\alpha V_R)$	$B_1 \cdot V_R$
ΔS_2	$A_2 \sin(L/R)$	$B_2 \sin(L/R)$
ΔS_3	$A_3, 0$	0

A, B, α : Constant

V_R : Rolling speed

L : Length of rolled strip

R : Radius of back up roll

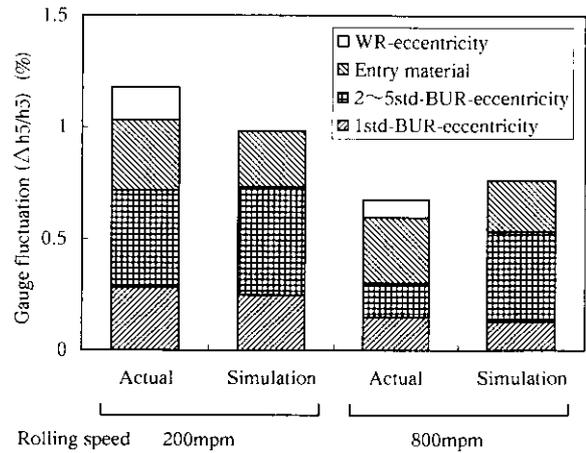
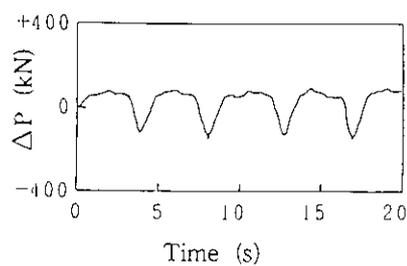
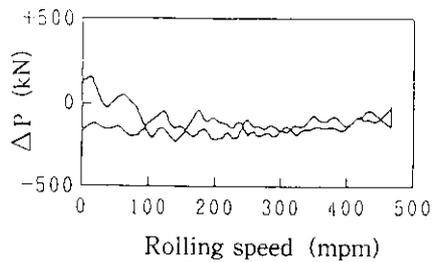
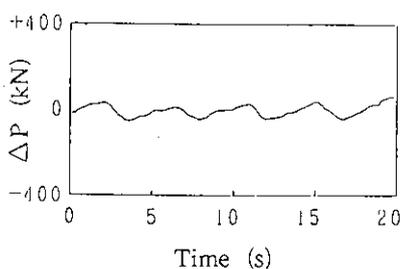
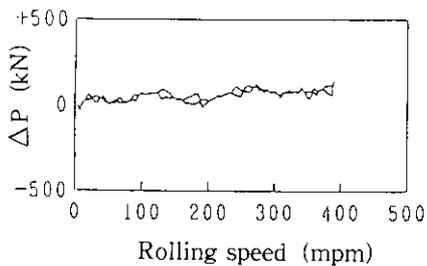


Fig. 6 Comparison between simulation result and actual data



(a) Oil film type bearing (with key)



(b) Roller type bearing

Fig. 5 Fluctuations of rolling force in kiss roll condition

ュレータはダイナミックシミュレータとして、ほぼ実機での圧延現象を再現できているといえる。

3.2 ローラ軸受化の検討

定常圧延時の板厚変動要因として最も大きいものは、Fig. 6で示されるように、バックアップロールの偏心成分である。バックアップロールの偏心成分は、軸受の構造をローラ軸受化することで小さくできることが知られている。そこで、油膜軸受からローラ軸受に変更することによる板厚精度改善効果のシミュレーションを実施した。

Fig. 7に全スタンドをローラ軸受化した場合のNo. 5スタンド出側板厚変動のシミュレーション結果と、前段スタンドから順次ローラ軸受化した場合の効果予測結果を示す。ローラ軸受化することで低速圧延時(200 mpm)で約40%の板厚精度改善効果があり、特にNo. 1スタンドのローラ軸受化の効果が大きいことが予測できる。これは、No. 1スタンドの圧下の板厚に対する影響係数が、他スタンドより大きいことによる。また、加減速部の板厚精度は、前段スタンドよりローラ軸受化することで順次向上する。これは、圧延速度に起因する油膜厚変動($\Delta S1$)がローラ軸受の場合、速度に対して単調増加となっていることによる。

3.3 高応答制御

スタンド間センサ、制御装置のリフレッシュにあたり高応答制御方式による板厚精度改善効果のシミュレーションを行った。従来のMN-AGCではロールバイト直下から板厚計までの距離が制御のむだ時間となるため、板厚変動除去可能周波数が0.2~0.3 Hz程度以下であった。これに対し、マスフロー(MF)AGC、ゲージメータ(GM)AGCは、ロールバイト直下の板厚を演算し制御するため、むだ時間が無くなり、1 Hz程度の板厚変動まで除去可能である。

上記3種のAGCを用いたシミュレーション結果をFig. 8に示す。なお、軸受のタイプは全スタンドローラ軸受とした。

本シミュレーション結果より以下の知見を得た。

- (1) MF-AGC, GM-AGCの適用により、加減速時、約30%、低速時、約5~10%の板厚精度向上が得られる。

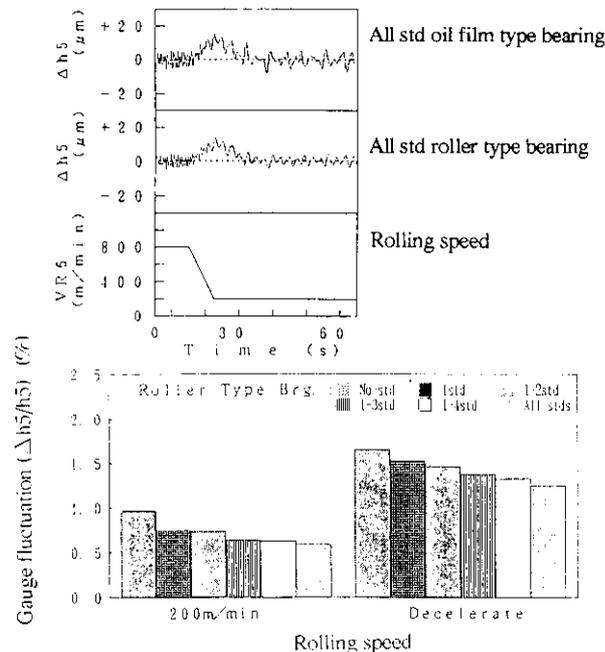


Fig. 7 Simulation results in the case of roller type bearing

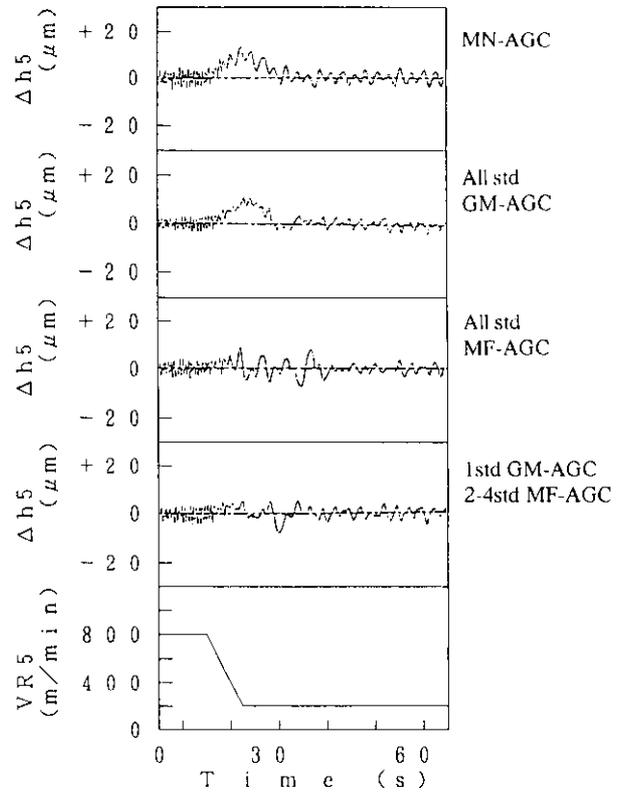


Fig. 8 Comparison between control performance of AGC systems by simulation

- (2) 加減速時に生ずる板厚偏差のうねりは、MF-AGCの適用により除去可能である。
- (3) MF-AGC, GM-AGCの組合せ(前段へGM-AGC適用、後段へMF-AGC適用)により最適な制御構成を得ることができる。

4 ファジィ理論を用いた板厚・張力制御システム

4.1 板厚と張力との干渉

通常の冷間タンデム圧延機後段スタンドにおいては、板厚をロール周速度を操作することにより、また張力は圧下位置をそれぞれ操作することにより制御を行っている。一方、最終スタンドに表面が粗いロールを用いて鋼板表面に適度な凹凸を付加するダル鋼板の圧延においては、圧延荷重を一定とすることで鋼板表面粗さを均一に制御する。そのため、圧下位置操作に制限が加わり、板厚制御と張力制御の操作端がともにロール周速度となり、Table 2に示すように各制御の操作指令が逆方向に出力される状況下では、両者の干渉が発生する。

4.2 制御システム構成

この干渉状態を定量的に示すためにファジィ理論を適用した板厚・張力非干渉制御システムを構築した。そのシステム構成をFig. 9に示す。

4.3 ファジィ制御機構

ファジィ制御部においては、入力として板厚実績、張力実績および速度制御指令を取り込みFig. 10に示すメンバーシップ関数を用い

Table 2 Interaction between gauge and tension

		Interstand tension	
		low	high
Exit Gauge	thin	AGC VR up TLC VR down	AGC VR up TLC VR up
	thick	AGC VR down TLC VR down	AGC VR down TLC VR up

AGC : Automatic gauge control VR : Rolling speed reference
TLC : Tension limit control : Interacting condition

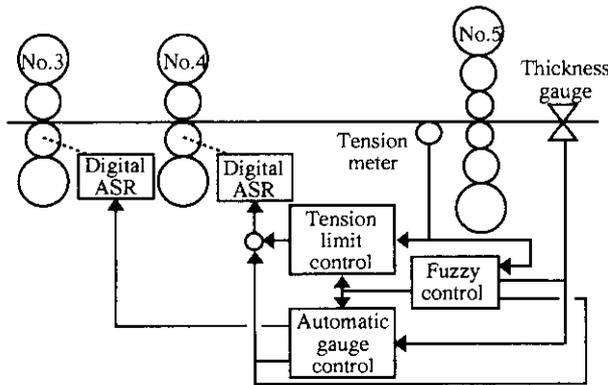


Fig. 9 Schematic diagram of fuzzy control system

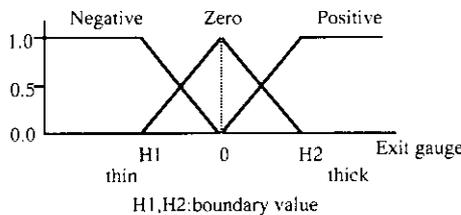


Fig. 10 Example of membership function for non-interacting control

て、定性的な知識に対する確信度に変換する。得られた確信度から干渉の度合を推定し、この干渉度に応じて以下の操作を実施する。

- (1) 張力制御のバンド幅の変更
- (2) 板厚制御負荷配分ゲインの変更

干渉防止操作の基本的な考え方として、第一に(1)を実行した上で、なお防止できない場合に(2)を実行することとした。ファジィ言語ルールとしては27ルールであり、以下に一例を示す。

IF (板厚が厚い かつ 張力が高い かつ 速度操作指令が減速限界に近い)
THEN (干渉する度合が大きい)

5 形状制御へのファジィ・ニューラルネットワークの適用

5.1 制御システム構成

最終スタンドにおける形状制御システムを Fig. 11 に示す。本システムは、最終スタンド出側に設置された形状センサーの測定値にも

とびきワークロール (WR) ベンディング、圧下レベリングおよびスポットクーラントを操作端としてフィードバック制御を実施している。板形状は板幅方向伸び率分布差として表現されるため、形状センサーからは多点測定値として計上される。そのため、一般的には多点の測定値を関数近似し、その結果から各アクチュエータの板幅方向影響係数に対応した特徴量を抽出して制御を行う。下記にその基本的な制御の考え方を示す。

- ・WR ベンディング：2次成分(A2)を制御
- ・圧下レベリング：1次成分(A1)を制御

両操作端は低次成分を主として制御するため、高次の成分をもつような複雑な板形状に対しては残差が残る。そこで、板幅方向に34分割したスポットクーラント制御により残った局部伸びを除去する。

5.2 ファジィ制御によるクーラント制御

スポットクーラントを用いて局部伸びを完全に制御するためにクーラントノズルの on-off をファジィ推論を用いて制御している。目標形状との偏差にもとづき①形状偏差の大きさ、②形状偏差の変化方向、③局部伸びの大きさなどを Fig. 12 のメンバーシップ関数を用いて定量化し、75個の推論ルールにより最終的にスポットクーラントの出力パターンを決定する。

5.3 ニューラルネットワークによる形状制御

従来の形状制御方法においては、アクチュエータに対応させて形状測定値を低次数の多項式で近似していたが、高次の次数をもつ形状に対しては制御的に正しい形状認識が行えないことがあった。たとえば、板幅方向のコータ部が伸びている場合に耳伸びと認識して、コータ部とセンター部をさらに伸ばしてしまうことがある。

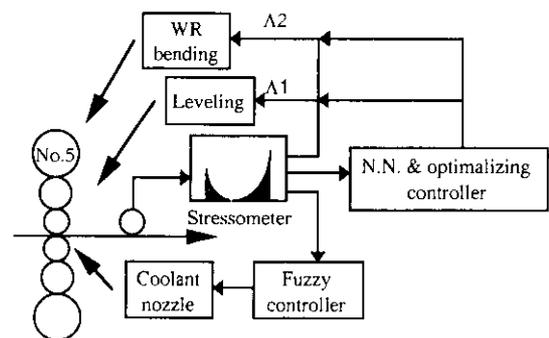


Fig. 11 Schematic diagram of shape control system

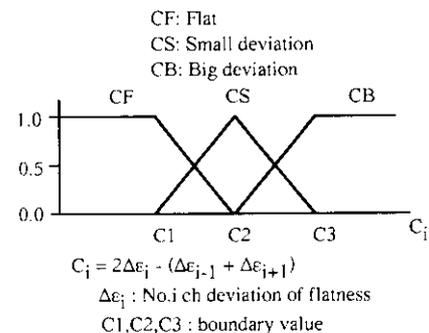


Fig. 12 Example of membership function for coolant control

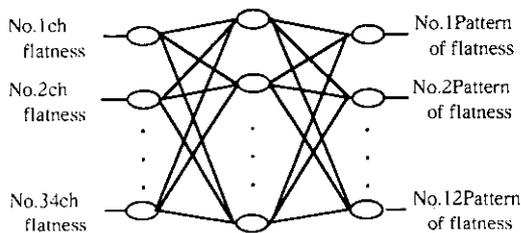


Fig. 13 Structure of neural network

そこで、実形状を Fig. 13 に示すニューラルネットワークを用いて 12 種類の代表的な形状パターンに分類し、それにもとづいて目標形状に最も近づくように各アクチュエータを制御する機能を開発した。ニューラルネットワークは 3 階層からなり、入力層は形状センサーの各チャンネルに対応し、出力層は 12 種類の代表形状パターンの適合度が出力される。この適合度にもとづき再度形状パターンに合成することにより、発生し易い高次の形状パターンを認識できるとともに、異常な形状パターンによる誤認識を防ぐことが可能となった。

6 実機への適用結果

水島 1 TA においては、前記知見に従い板厚形状品質改善工事を実施した。以下に各項目における工事内容及び結果を示す。

6.1 ローラ軸受化

ローラ軸受の導入にあたっては、既設モーゴイル軸受のロール及びショックを加工することでローラ軸受への転用を行なった。Fig. 14 にショックの改造内容を示す。

ローラ軸受化前後の板厚精度の比較を Fig. 15 に示す。ローラ軸受化を行なうことでシミュレーションで得られた知見通り、約 40% の板厚精度改善効果が得られた。

6.2 高応答制御の導入

高応答制御の実機導入にあたっては、No.1 スタンドに GM-AGC, No.2 ~ 4 スタンドに MF-AGC の適用を行なった。リフレッシュ後の制御構成図を Fig. 16 に示す。加減速時の板厚精度につい

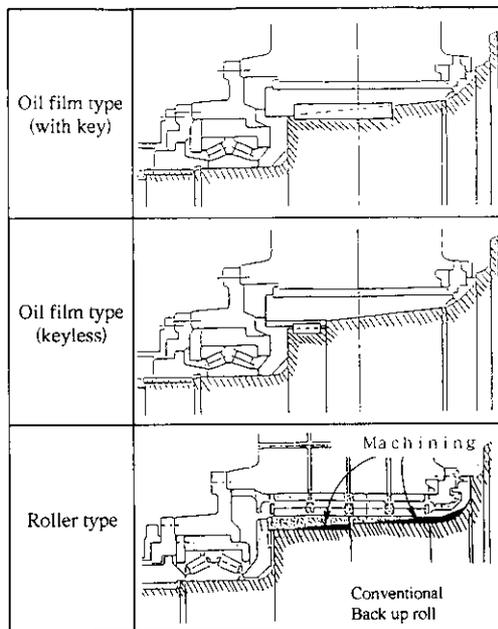


Fig. 14 Structure of bearing chock

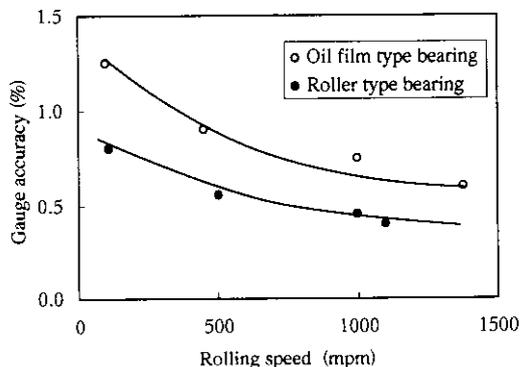


Fig. 15 Improvement of gauge accuracy by roller type bearing

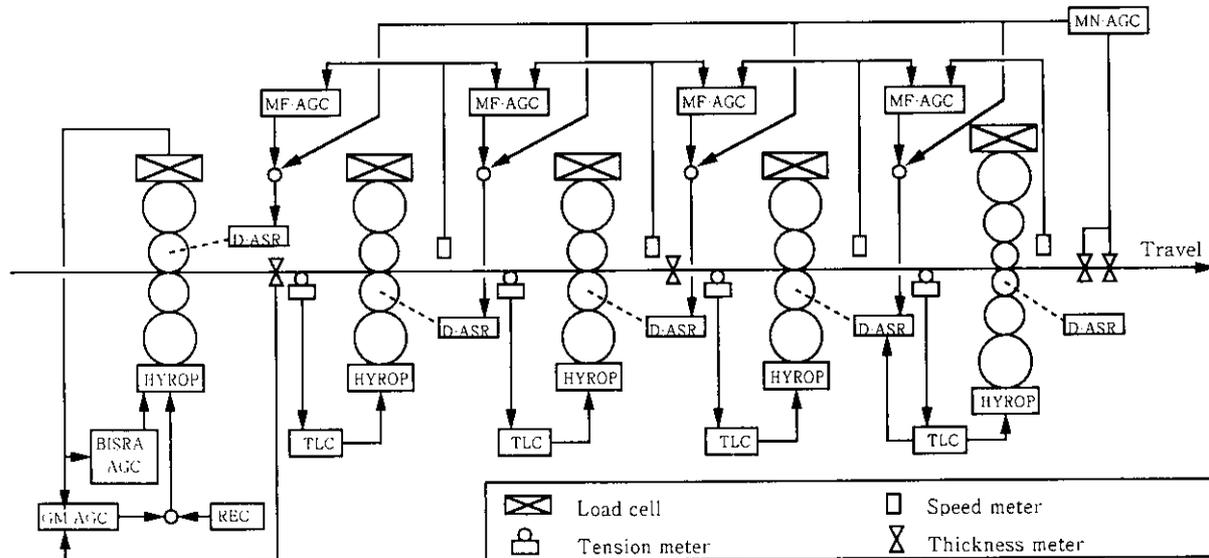


Fig. 16 AGC system configuration

で、シミュレーション結果と実機適用結果を比較したものを Fig. 17 に示す。高応答 AGC についても期待通りの効果を得ることができた。さらに、改造工事前後の板厚チャート比較を Fig. 18 に示す。本改造工事の実施により低速部、加減速部の板厚精度を大幅に改善する事ができた。

6.3 板厚・張力非干渉制御システムの導入

ファジィ理論を用いた板厚張力非干渉制御を導入した結果を Fig. 19 に示す。本チャートの最下段はファジィ理論で推定した板厚制御と張力制御の干渉の度合いを定量的に示したものであるが、設定変更直後に発生した干渉の度合いに応じて制御出力を適切に操作することで干渉の時間が半減し、結果として目標板厚への収束が早くな

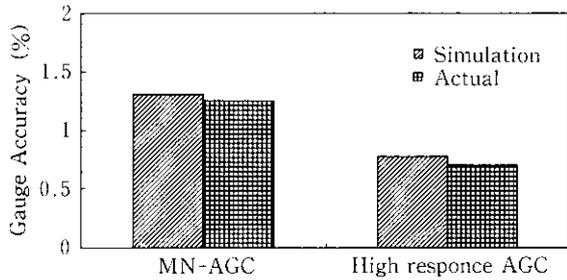


Fig. 17 Effect of high response AGC

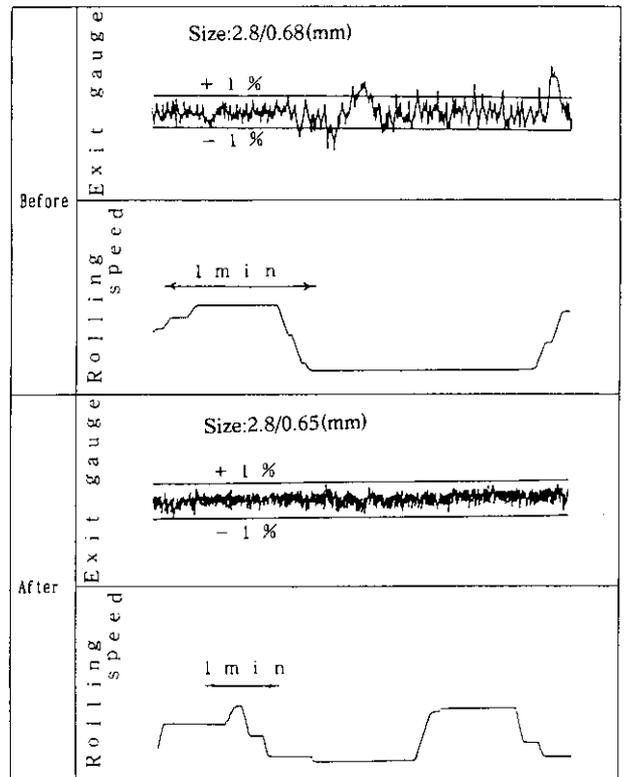


Fig. 18 Gauge chart before and after revamping

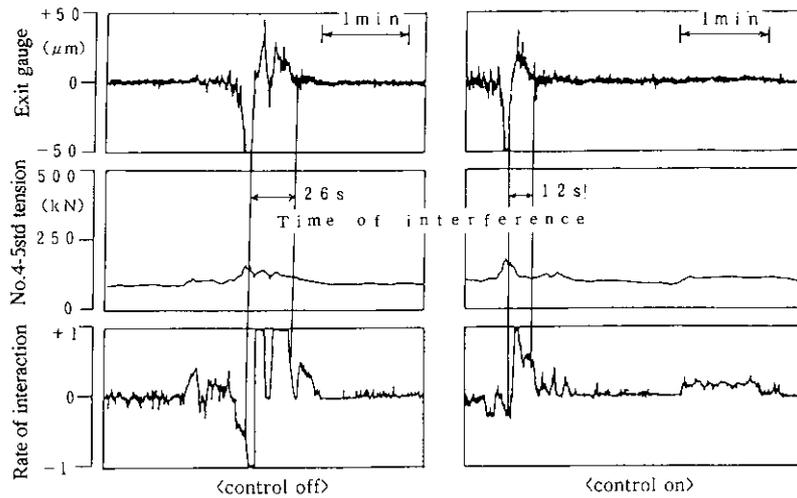


Fig. 19 Effect of fuzzy control system (Coil size : 2.3/0.605 × 1006 mm)

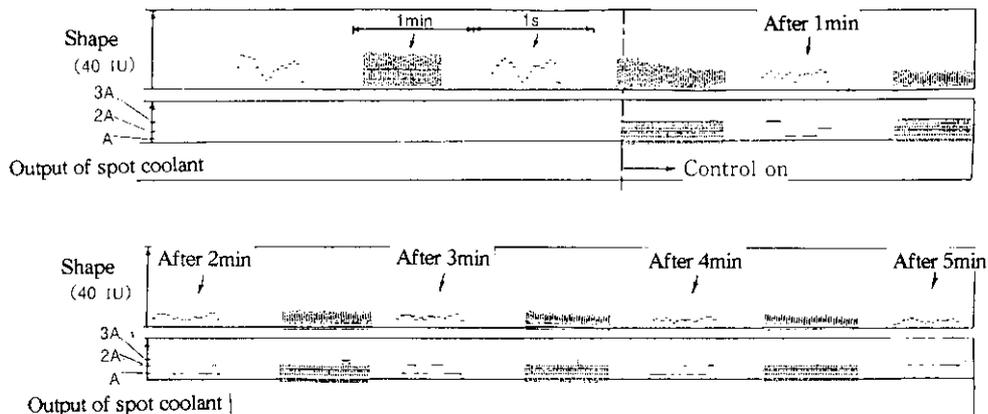


Fig. 20 Effect of fuzzy shape control

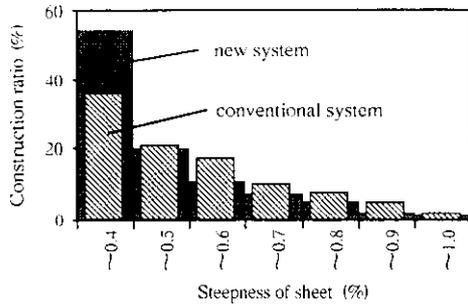


Fig. 21 Control performance of shape control system

っていることがわかる。

6.4 新形状制御の導入

新形状制御適用時の形状チャートを Fig. 20 に示す。チャート上段は幅方向形状偏差を示しており、1分ごとにチャートを早送りして全幅の形状を確認した。下段は幅方向でのスポットクーラント出力を示しているが、幅方向形状偏差に対応してファジィ推論によりスポットクーラント出力を決定している。本制御の適用により複合伸び(クォーター伸び)が除去され良好な形状品質が得られるようになった。さらに、ニューラルネットワークの適用結果を Fig. 21 に示す。本制御の適用により被圧延材の鋼種・サイズに関わらず形状を的確

に認識できるようになり、形状品質のバラツキを削減することができた。

7 結 言

水島冷延 No.1 タンデムミルの板厚・形状品質向上を目的として、板厚制御総合シミュレータの開発、およびシミュレーション結果にもとづいた改造工事の実施、ファジィ・ニューラルネットワークを用いた高精度圧延制御の導入を実施した。その結果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 実機データに基づいた板厚制御総合シミュレータを開発し、ローラーベアリング化、高応答制御について各々の効果、および複合効果を予測することができた。
- (2) 上記シミュレーション結果にもとづき板厚精度改善工事を実施し、シミュレーション結果通りの効果を得ることができた。
- (3) ファジィ推論を用いた板厚・張力非干渉制御を開発し、設定変更直後に発生する板厚・張力の干渉時間の半減、ひいては走間板厚変更時の板厚不良部長さの削減効果を得た。
- (4) ファジィ推論、ニューラルネットワークを用いた新形状制御を開発・導入して形状品質のバラツキ削減に大きく効果を上げることができた。

この結果、お客様から高い信頼と評価を得られているが、今後さらに一層の高品質・高効率の操業技術の確立を図っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 大西忠治, 寺崎忠男, 谷口弘志, 吉見 洋, 井ノ口齊亮, 石原 明, 平山曠一, 谷口政隆, 服部正志: *CAMP-ISIJ*, 4(1991)5, 1388
- 2) 菅藤秀一, 出石智也, 安東 均, 石岡弘之, 福田 真, 岡上正明: *CAMP-ISIJ*, 1(1988)2, 551
- 3) 湯浅博康, 中西敏修, 竹野忠吉, 田淵 衛, 山本和明, 小松富雄: *鉄と鋼*, 74(1988)3, 473
- 4) 菅沼七三雄, 小松富雄, 内藤 肅, 渡谷 聡, 広畑和宏, 山本和明: 昭和60年塑性加工春季講演会論文集, (1985), 41
- 5) 小松富雄, 進 修, 菅沼七三雄, 中西敏修, 渡谷 聡, 黒田 茂: 昭和60年塑性加工春季講演会論文集, (1985), 45
- 6) 中野 浩, 黒田 茂, 酒井直樹, 古谷 匠, 津元良公, 平井祝郎: *CAMP-ISIJ*, 8(1995)5, 1254
- 7) 後藤俊二, 菅沼七三雄, 黒田 茂, 西田哲郎: 平成4年度塑性加工春季講演会論文集, (1992), 709
- 8) 山下道雄, 北村邦雄, 鎗田征雄, 佐々木徹, 長南富雄, 三宅英徳, 御厨 尚: 第35回塑性加工連合講演会, (1984-10), 243