
熱間圧延における最適操業システム

Optimized Operation System in Hot Strip Rolling

北尾 斉治(Nariharu Kitao) 小橋 正満(Masamitsu Obashi) 高木 清(Kiyoshi Takagi) 福井 雅康(Masayasu Fukui) 登田 一郎(Ichiro Toda) 石川 義三(Kozo Ishikawa)

要旨：

水島熱延工場では、加熱炉と圧延ライン全体の総合コストミニマムをめざした操業システムを開発した。本システムは、加熱炉燃焼制御、圧延ピッチ制御およびディレーテーブルからコイラーまでのダイレクトデジタル制御からなりたっており、各国有技術が有機的に結びつけられている。本システムの導入により、粗ミル出側の鋼板温度は複雑な材料構成にもかかわらず目標値の変化によく追従でき、鋼材・鋼板温度モデルを用いた場合の温度精度も σ =約 12°C であった。また、F 1 ミルインターバルも仕上設定替時で従来の平均 12 秒から、5 秒まで短縮可能となった。

Synopsis：

Optimized operation system from furnaces to coilers has been developed at the hot strip mill of Mizushima Works. This system consists of furnace combustion control, mill pacing control and direct digital control from delay table to coilers and is well combined with various rolling techniques. By introducing the system, the accuracy of the temperature calculation model of a slab and sheet bar is greatly improved, i.e., $\sigma=12^{\circ}\text{C}$, and sheet bar temperatures at the exit of roughing train follow closely changeable target values. Furthermore, the rolling interval time at No.1 finishing mill has been shortened to 5 seconds from previous 12 seconds, when the setting of finisher rolling speed is changed.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

北尾 斉治*2 小橋 正満*3 高木 清*4 福井 雅康*5 登田 一郎*6 石川 好蔵*5

Optimized Operation System in Hot Strip Rolling

Nariharu Kitao, Masamitsu Obashi, Kiyoshi Takagi, Masayasu Fukui, Ichiro Toda, Kozo Ishikawa

要旨

水島熱延工場では、加熱炉と圧延ライン全体の総合コストミニマムをめざした操業システムを開発した。本システムは、加熱炉燃焼制御、圧延ピッチ制御およびディレーテーブルからコイラーまでのダイレクトデジタル制御からなりたっており、各固有技術が有機的に結びつけられている。本システムの導入により、粗ミル出側の鋼板温度は複雑な材料構成にもかかわらず目標値の変化によく追従でき、鋼材・鋼板温度モデルを用いた場合の温度精度も σ =約12°Cであった。また、F1ミルインターバルも仕上設定替時で従来の平均12秒から、5秒まで短縮可能となった。

Synopsis:

Optimized operation system from furnaces to coilers has been developed at the hot strip mill of Mizushima Works.

This system consists of furnace combustion control, mill pacing control and direct digital control from delay table to coilers and is well combined with various rolling techniques.

By introducing the system, the accuracy of the temperature calculation model of a slab and sheet bar is greatly improved, i.e., $\sigma = 12^{\circ}\text{C}$, and sheet bar temperatures at the exit of roughing train follow closely changeable target values. Furthermore, the rolling interval time at No. 1 finishing mill has been shortened to 5 seconds from previous 12 seconds, when the setting of finisher rolling speed is changed.

1. 緒 言

水島製鉄所熱間圧延工場は、昭和45年1月稼動後、圧延機および加熱炉の増設により、年間460万トン体制を確立し、現在に至っている¹⁾。その間、圧延設備に対する積極的な増強と改善、加熱炉の効率化推進²⁻⁴⁾、ホットチャージの拡大、低温抽出の強化⁵⁾、さらにきめ細かな操業改善を推進してきた。

一方、最近の動向をみると、圧延プロセスへの自動化の浸透に目を見張るべきものがある。これまでに、各社熱間圧延工場において加熱炉燃焼制御、電気・計装のダイレクトデジタル制御など、各工程における自動化の導入あるいは、既存の制御を結びつけたシステムの開発・改善が行われてきている。当工場では、以下に示すような多方面からの要求を考慮して、加熱炉燃焼制御、搬送スケジュール計算、および圧延ピッチ制御の各固有技術を計算機制御化するだけでなく、有機的に結合させた最適操業システムを開発した。

- (1) 加熱温度の厳しい管理を要求される高品質材への対応
 - (2) 低温抽出、ホットチャージ拡大、省エネルギー志向型ヒートパターン操業など、複雑な操業方法への対応
 - (3) 加熱炉のソフト面の効率化の推進
 - (4) 省エネルギーおよび高品質の両条件を満足した最適温度での圧延の達成
 - (5) 種々の圧延条件に対応できる適正な圧延ピッチ制御の実現
 - (6) 個別の固有技術を有機的に結びつけた操業技術の確立
 - (7) ライン全体でのコストを最小化した操業システムの確立
- その柱となるのは、
- (1) 加熱炉燃焼制御

- (2) 圧延ピッチ制御
- (3) ダイレクトデジタル制御

である。以上の制御システムは、昭和57年7月より、オンライン化されており、そのシステムの概要、および操業結果について、以下に報告する。

2. システムの概要

2-1 基本方針と本システムの特徴

システムの基本方針のポイントは、加熱炉単独の計算機制御システムのみでなく、圧延ラインも含めた総合システムの確立にある。従来の操業上の問題点をあげると

- (1) 複雑な材料構成および目標抽出温度の変化に対して燃焼制御の追従性が十分でない。
 - (2) オペレーターの判断による抽出ピッチの決定では、生産能率向上に限界がある。
 - (3) 圧延ライン各設備の速度設定の信頼性が低い。
- などであった。そこでこれらの各要求に対応し、熱圧工場での総合コストミニマムを目指したシステムとした。Fig. 1に熱延工場の計算機システムの構成を、Table 1にミルラインの仕様を示す。

本システムの特徴は、品質、コスト、生産性の要求水準に応じて、評価関数が最適となるように、目標抽出温度と圧延ピッチを決定する最適化機能を有していることである。

具体的には、最適化の評価関数を次の4つのモードで与える。

- (1) 圧延能率指定モード

*1 昭和58年7月18日原稿受付

*2 水島製鉄所システム制御技術室主査(課長)

*3 水島製鉄所動力部動力技術室主査(部長)

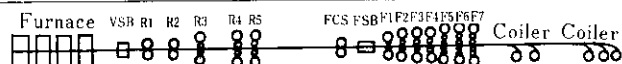
*4 水島製鉄所保全全部保全技術室

*5 水島製鉄所動力部動力技術室

*6 水島製鉄所システム制御技術室

Table 1 Basic specification of the facilities

Facilities	Number	Type and capacity
Slab reheating furnace	4	6-zone pusher type, Effective hearth length : 32.0 m, Hearth width : 12.9 m, Nominal capacity : 325 t/h, Type of fuel : oil and mixed gas
Vertical scale breaker	1	Overhead driven type Max. reduction : 75 mm at $t = 305$ mm
Roughing train	5	R1 : 2 high reversible type, R2 : 2 high non-reversible type, R3, R4, R5 : 4 high non-reversible type, tandem rolling between R4 and R5
Flying crop shear	1	2 cut inner stand type, Max. cutting thickness : 60 mm at sheet bar width of 1500 mm
Finishing scale breaker	1	Pinch roll and high pressure water spray type Pressure : 150 kgf/cm ²
Finishing train	7	F1, F2, F3, F4 : 4 high type, F5, F6, F7 : 6 high type
Thin gage coiler	2	4 blocker roll type down coiler, Thickness of strip : 1.2-8.0 mm, Coil diameter : max. 2300 mm Main motor : D.C. 280 kW×2
Thick gage coiler	2	No. 1, 2 : 4 blocker roll type down coiler, Thickness of strip : 1.2-13.0 mm, Coil diameter : max. 2300 mm, Main motor : D.C. 280 kW×2 No. 3 : 4 blocker roll type down coiler with bending roll, Thickness of strip : 2.3-32.0 mm, Coil diameter : max. 2300 mm, Main motor : D.C. 500 kW×2



(2) 圧延能率最大モード

(3) 燃料最小モード

(4) コスト最小モード

さらに次式に示すように、最適化の目的変数に、目標抽出温度と圧延ピッチを定めている。

$$\left. \begin{aligned} Z &= F(Y_1, Y_2) \\ Y_1, Y_2 &= G(W_1, \dots, X_i, \dots) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} Y_{1opt}, Y_{2opt} &= f(Z_{opt}) \\ X_i &= g(Y_{1opt}, Y_{2opt}) \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

Z : 最適化の評価関数 (圧延能率, 燃料原単位, コスト)

Y : 目的変数 (目標抽出温度, 圧延ピッチ)

X : 操作変数 (鋼材毎の各帯出側目標温度, 各帯鋼材群に対する炉温設定値など)

W : 操作変数 (品質条件や温度確保条件より求められる鋼材毎の抽出温度)

まず、目標抽出温度は、品質上要求される抽出温度と所定の圧延温度を確保するに必要な抽出温度とを考慮して、搬送スケジュール計算および圧延ラインにおける鋼板温度降下量計算により加熱炉装入時に決定される。

また、圧延ピッチは、上記の(1)~(4)の指定されたモードに従って、搬送スケジュール計算と、加熱炉燃焼制御における最短圧延ピッチ計算、必要在炉時間計算、および抽出ピッチ計算、あるいは指定ピッチ計算により、圧延の進行にともない決定・修正される。この最新の圧延ピッチに従い加熱炉からの自動抽出が行われる。

2.2 加熱炉燃焼制御システム

2.2.1 制御モデルの概要

加熱炉燃焼制御のフローを Fig. 2 に示す。

制御は、以下に示す5つのモデルにより構成されている。

(1) 目標抽出温度決定

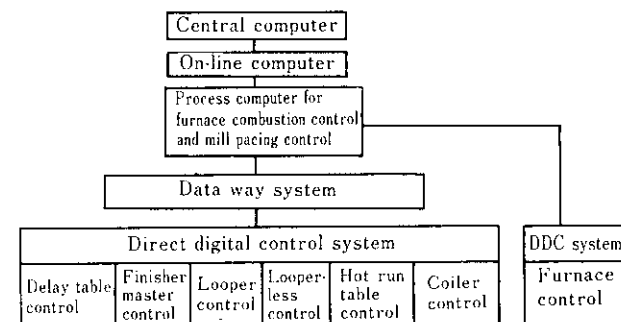


Fig. 1 Configuration and function of computer and DDC system

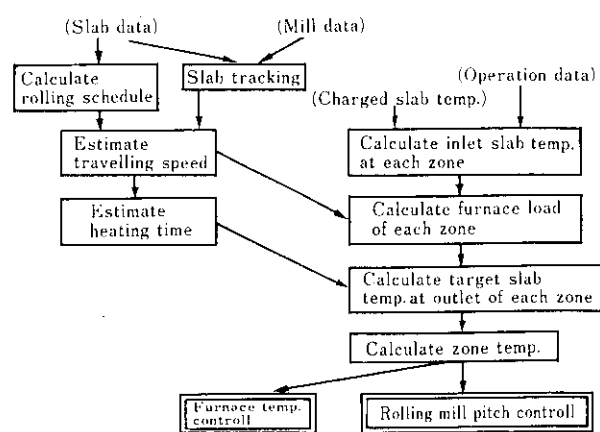


Fig. 2 Furnace combustion control

品質上要求される抽出温度と所定の圧延温度を確保するに必要な抽出温度とを考慮して、目標抽出温度 (スキッド部厚さ方向平均温度) および目標スキッドマーク量が加熱炉装入時点で決定される。

(2) 鋼材温度計算

オフラインの伝熱シミュレーションモデル⁶⁾を近似化した計算式を用いて、装入温度と操炉実績とから、スキッド間およびスキッド部の厚み方向平均温度と上下面温度が計算される。スキッド部温度の計算においては、スキッドマーク伝熱解析によるスキッド熱貫流係数が定量化され、モデルに組み込まれている。以下に、厚み方向平均温度の計算式を示す。

$$\theta_0 = \theta_s - (\theta_s - \theta_{s0}) \exp(-\alpha \cdot t/D) \quad \dots\dots\dots(2)$$

θ_0 : 帯出口鋼材温度 (°C)

θ_s : 帯入口鋼材温度 (°C)

θ_g : 炉内温度 (°C)

α : 伝熱係数 (m/h)

t : 在炉時間 (h)

D : 鋼材厚 (m)

(3) 抽出ピッチ制御

装入鋼材1枚毎にミル能力、加熱炉能力および現状操業形態を満足するような抽出ピッチが設定される。抽出ピッチは実際の圧延ピッチと加熱実績に基づき適宜修正される。

(4) 鋼材負荷計算

各制御帯内の鋼材の寸法・重量と、抽出ピッチから求められる鋼材移動速度とから、鋼材負荷 (t/h) が計算される。

(5) 炉温制御

燃焼帯内鋼材は Fig. 3 のように入炉側鋼材群①と出口側鋼材群②に分けられ、①ゾーンの炉温 θ_A は、燃焼帯鋼材負荷、帯入口実績鋼材温度、帯出口目標鋼材温度から求められ、

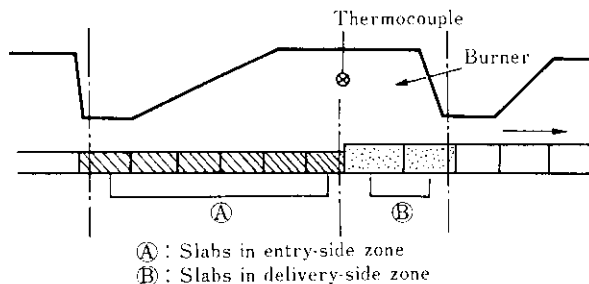


Fig. 3 Schema of delivery temperature control of slabs of each zone

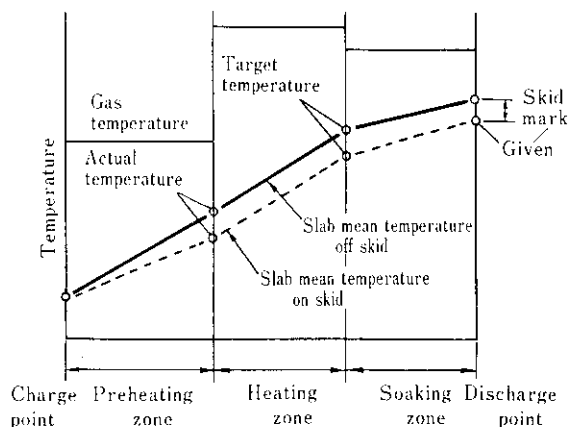


Fig. 4 Calculation of slab temperature (at heating zone)

②ゾーンの炉温 θ_B は加熱実績、残り炉時間、帯出口目標鋼材温度から求められる。 θ_A 、 θ_B の荷重平均値が設定炉温とされる。以下に炉温計算式を示す。

$$\theta_A = f_1(M, \theta_{s1}, \theta_{s0}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta_B = f_2(t_r, \theta_{sA}, \theta_{s0}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

θ_A, θ_B : ①, ②の各炉温 (°C)

M : 燃焼帯鋼材負荷 (t/h)

θ_{s1} : 帯入口実績鋼材温度 (°C)

θ_{s0} : 帯出口目標鋼材温度 (°C)

t_r : 残り炉時間 (h)

θ_{sA} : ①入口実績鋼材温度 (°C)

なお Fig. 4 に示すように、目標抽出温度と残り炉時間を満たすヒートパターンの中から、スキッドマーク量の制限条件を満足するような、最も低温側のパターンが各帯毎に選択されそのパターンの各帯出口における温度が各帯出口目標温度として決定される。

2.2.2 粗圧延鋼板温度モデル

抽出温度と粗ミル出側温度を種々の圧延条件下で対応づけるために、粗圧延時の鋼板温度モデルを開発した。本モデルは、

① 板厚方向平均温度を取扱った加熱炉出側から粗ミル出側までの鋼板温度モデル

② 粗ミル出側での表面温度と板厚方向平均温度の関係を表す復熱モデル

から成っている。両モデルを以下に示す。

(1) 鋼板温度モデル式

ロールバイト内での温度降下

$$T_m - T_{m0} = a_1 \Delta T_c + a_2 \Delta T_w + a_3 \Delta T_f \quad \dots\dots\dots(5)$$

空冷

$$\left(\frac{1000}{T_m + 273} \right)^3 - \left(\frac{1000}{T_{m0} + 273} \right)^3 = \frac{t_a}{10^4} \times \left\{ \frac{(a_4 E_m + a_5 \alpha_{conv})}{H} + a_6 + a_7 H \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

水冷

$$T_m - T_{m0} = \frac{a_8 a_1 (T_{m0} - T_w) t_w}{H} \quad \dots\dots\dots(7)$$

T_m : 平均鋼板温度 (°C)

T_{m0} : 初期平均鋼板温度 (°C)

ΔT_c : ロールへの熱伝達 (°C)

ΔT_w : 加工発熱 (°C)

ΔT_f : 摩擦発熱 (°C)

t_a : 空冷時間 (s)

t_w : 水冷時間 (s)

E_m : 放射率

α_{conv} : 対流熱伝達率 (kcal/m²·h·°C)

a_1 : デスケ・クーラント熱伝達率 (kcal/m²·h·°C)

H : 板厚 (mm)

a_i : 係数

(2) 復熱モデル式

$$T_{s0} - T_m = T_m - \frac{H}{6\lambda} \{ E_m \sigma \{ (T_m + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \} + \alpha_{conv} (T_m - T_a) \} \times 1 / \{ 1 + \left(\frac{H}{6\lambda} \right) \{ 4 \sigma (T_m + 273)^3 + \alpha_{conv} \} \} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$T_s = T_{s0} - (A + B T_{s0}) \exp \{ -B(t-2) \} \quad \dots\dots\dots(9)$$

T_s : 鋼材表面温度 (°C)

T_{s0} : 準定常鋼材表面温度 (°C)

λ : 鋼材の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (kcal/m²·h·k⁴)
 T_a : 大気温度 (°C)
 t : 最終粗ミルオンから粗ミル出側温度計オンまでの時間 (s)
 A, B : 粗圧延時間によって決まる定数

Fig. 5 に復熱モデルの考え方を示す。(8)式において、準定常鋼材表面温度 T_{so} は、復熱完了後の鋼板の板厚方向平均温度と表面温度との関係が、復熱過程においても成立つと仮定した場合の温度であり、(9)式はこの温度の計算値と、復熱過程の表面温度実測値との関係を回帰により得たものである。

2.3 圧延ピッチ制御システム

圧延ピッチ制御は、最短ミルピッチを考慮した加熱炉燃焼制御で設定される加熱ピッチとライン上の材料の進み具合によって決まるピッチに基づき、エキストラクターへの抽出指令により行われる。この制御を自動運転で行っている。

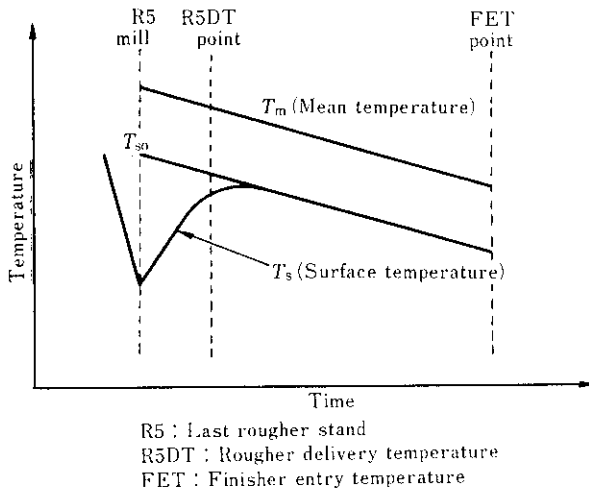


Fig. 5 Sheet bar temperature model at the exit of roughing train

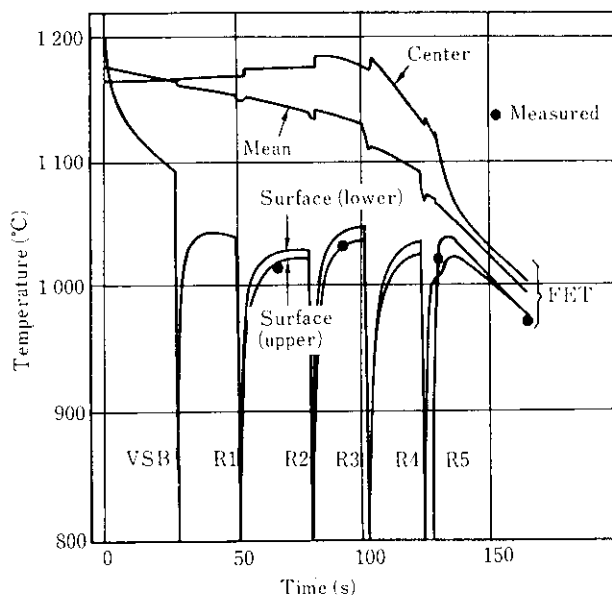


Fig. 6 An example of calculated temperature of slab and sheet bar by strict differential model

ミル側から規制される最短ミルピッチを加熱炉装入時に精度よく設定することは、加熱炉制御精度上および圧延能率向上のために重要である。鋼板の仕上圧延時間、すなわち、仕上圧延速度は、圧延ピッチに大きな影響を与える。また、仕上圧延速度は、目標仕上圧延温度と粗ミル出側温度とにより決定される。したがって炉内部留中に、加熱炉抽出温度と粗圧延温度降下量から粗ミル出側温度を予測して、最短ミルピッチが設定される。

さらに、圧延ピッチ制御は、材料の衝突防止、設定変更時間などを考慮してジョギング機能も有している。

2.4 ダイレクトデジタル制御

制御系のリフレッシュおよびミルベisingのレベルアップを目指し、電気制御系中枢部のダイレクトデジタル制御化を実施した。対象は、加熱炉計装、仕上ミル入側ディレーテーブル、仕上ミル速度主幹、ホットランテーブル、コイラーである。

3. 操業結果

3.1 加熱炉燃焼制御

3.1.1 粗圧延鋼板温度モデル精度

(1) 鋼板温度モデル

Fig. 6 に、差分モデルによる鋼板温度推移の計算例を示す。図中実線は平均温度、中心温度および表面温度の推移を表し、黒丸は表面温度実測値を表している。表面温度の計算値と実測値との対応を Fig. 7 に示す。各条件、すなわち、R 1 と R 2 の中間温度、R 2 と R 3 の中間温度、粗ミル出側温度、仕上ミル入側温度、で対比させた結果、全体での精度は標準偏差 σ で 9.1°C であった。

また、Fig. 8 には、差分モデル解と本システムで使用している簡易化モデル解との対応を示す。両者の差は、各粗ミル出側で $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内である。

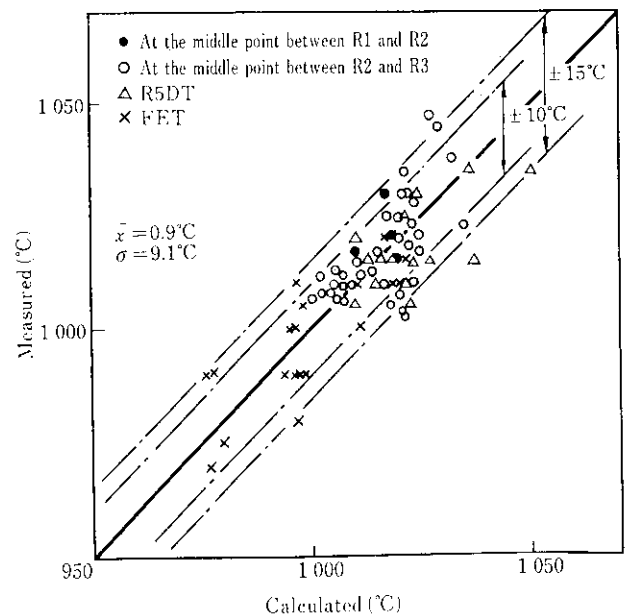


Fig. 7 Comparison of surface temperature between calculated value and measured value by differential model

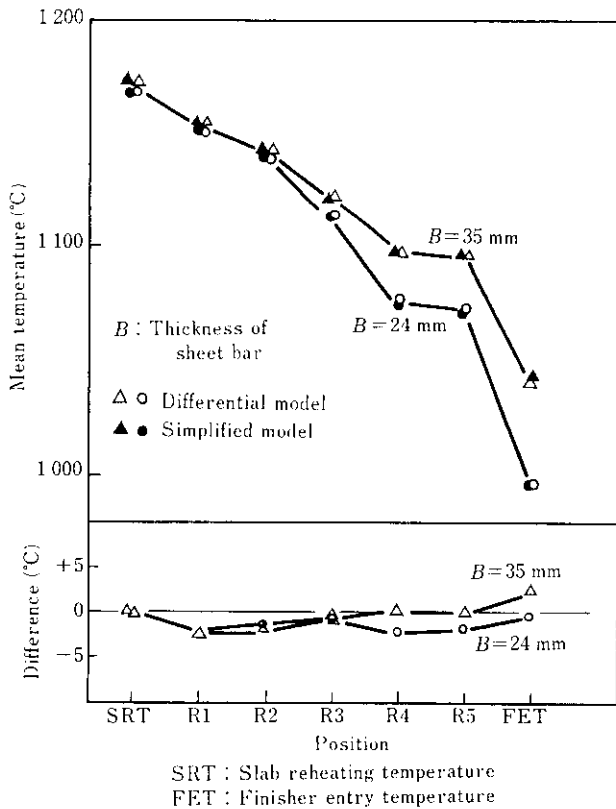


Fig. 8 Comparison of calculated mean temperature between differential model and simplified model

(2) 復熱モデル

Fig. 9 に粗最終スタンド出側温度についての復熱過程の差分モデルと簡易化モデル解との対応を示す。精度は、 $\sigma = 1.3^\circ\text{C}$ であった。

(3) 総合精度

Fig. 10 に加熱炉抽出から粗ミル出側までの温度降下量と加熱炉抽出温度の関係について計算値と実測値との対応を示

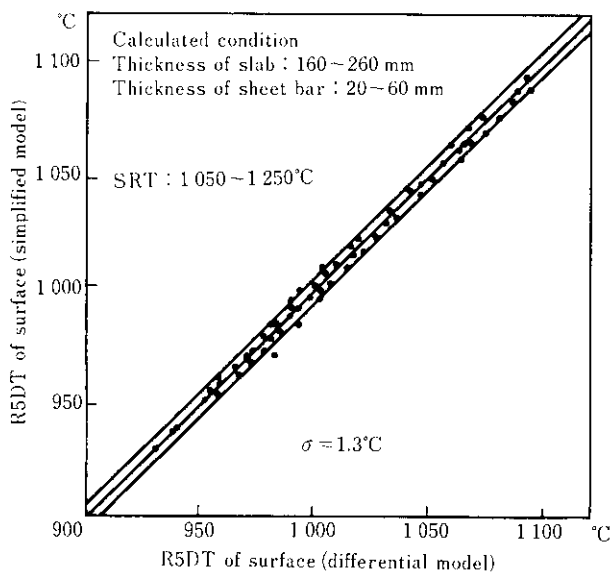


Fig. 9 Comparison of calculated surface temperature of sheet bar between simplified model and differential model

す。抽出温度ならびに粗ミル出側板厚の影響をよく表しておりこのモデルの実用性が確認された。

3・1・2 燃焼制御精度

加熱炉装入時の実測温度を考慮し、その後炉内の鋼材温度モデルを用いて抽出温度を計算し、さらに粗圧延鋼板温度モデルにより粗ミル出側温度を計算した結果と実測値との対応を Fig. 11 に示す。モデルの総合精度が $\sigma = 12^\circ\text{C}$ であり十分にオンラインで使用可能であることが確認された。

また、Fig. 12 には、制御結果例を示す。本図は、目標の粗ミル出側温度に実績温度を対比したものであるが、目標温度、装入温度および鋼材厚が、複雑に変化しているにもかかわらず、その差は約 20°C 以内に収まっており十分に目標値に追従している。

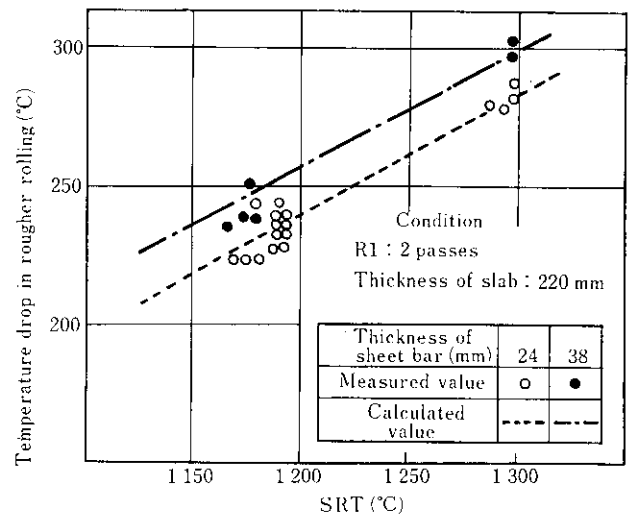


Fig. 10 Relation between SRT and temperature drop in rougher rolling

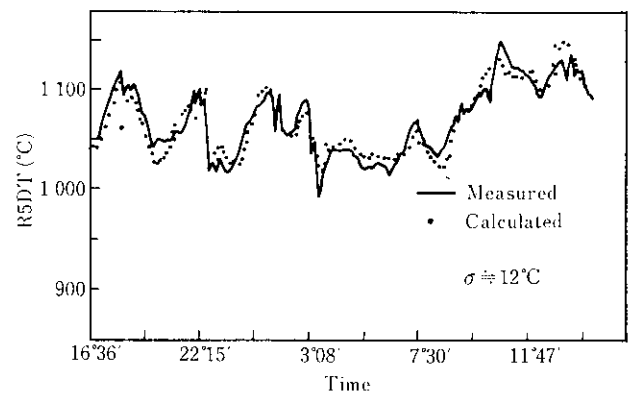


Fig. 11 Comparison of rougher delivery temperature (R5DS) between measured and calculated values

3・2 圧延ピッチ制御

2・3 節で述べたように、ミル側から規制される最短ミルピ

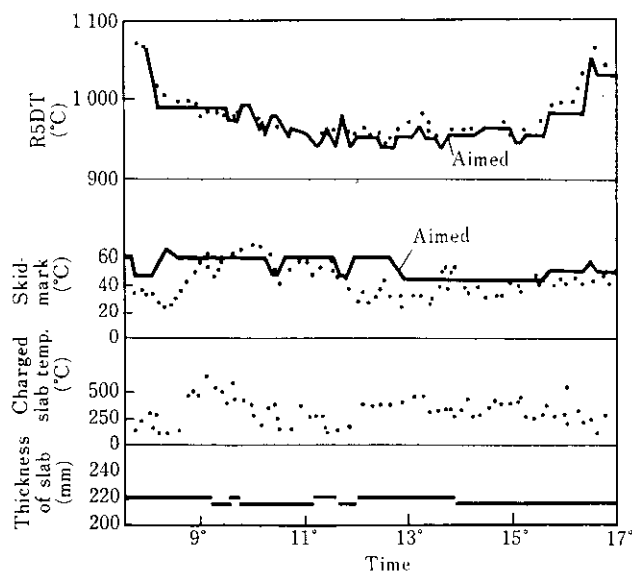


Fig. 12 An example of operational data of slab temperature by computer control

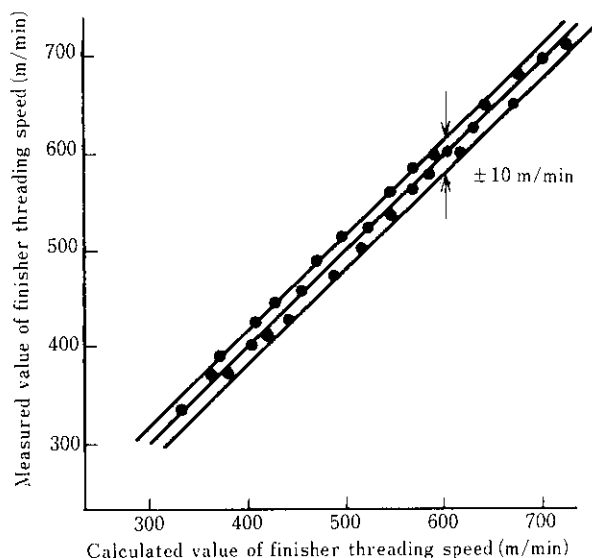


Fig. 13 Comparison of calculated and measured finisher threading speeds

Table 2 Improved item

No.	Item	Original	New
1	Crop cut length ($\sqrt{v}$)	7.0 mm	3.2 mm
2	Setting up time of finisher rolling speed	12 s	5 s
3	Accelerated and decelerated rate at run-out table	75 m/min·s	110 m/min·s
4	Drift check	Yes	No
5	Looper response (height)	0.8 rad/s	2.5 rad/s

ッチを精度良く設定するためには、仕上圧延時間の予測と仕上ミル通板速度の予測精度が重要となる。Fig. 13に、仕上通板速度の予測値と実績値の対応を示す。結果は、 ± 10 m/min 以内におさまっており、この結果から仕上ミル通板速度を決定する際

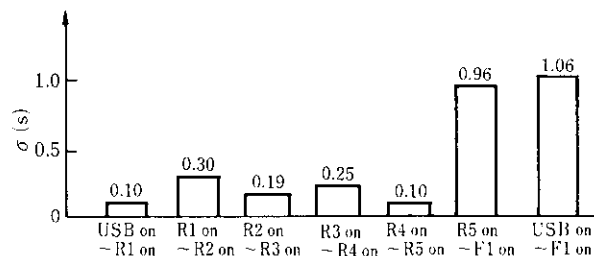


Fig. 14 Slab tracking time accuracy at mill line (Calculated value - Measured value)

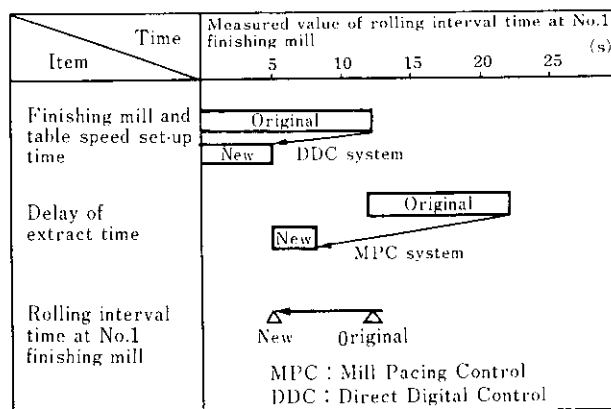


Fig. 15 Comparison of rolling interval time at No.1 finishing mill between original and new by measured values

に用いられる粗ミル出側温度および仕上ミル入側温度が精度良く予測されていることがわかる。また、Fig. 14には、圧延ラインにおけるスラブ搬送時間の計算予測精度を示すが、VSB (Vertical scale breaker) オンから F1ミルオンまでで $\sigma=1.06$ sであり、抽出タイミングのばらつきの減少に貢献している。

3.3 ダイレクトデジタル制御

本改造により、Table 2に示すように、信頼性、精度、応答性は大幅にレベルアップした。

また、本改造と前項の圧延ピッチ制御のオンライン化にともない、Fig. 15に示す効果を得た。本図は、ミルおよびテーブル速度設定時間と抽出タイミングのばらつきを、F1ミルインターバル換算値で比較したものであるが、本改造の実施により速度設定替え時間が平均12秒から5秒に短縮され、かつ、圧延ピッチ制御のオンライン化により、抽出タイミング遅れ時間が10秒から3秒に短縮され、その結果、F1ミルインターバルは仕上速度設定替時で、従来の12秒から5秒まで短縮可能となった。

4. 結 言

水島製鉄所熱間圧延工場において開発した最適操業システムの概要と操業結果について述べた。本システムの開発において

- (1) 鋼板の粗ミル出側温度は、目標値の激しい変化に対して約20°C以内でよく対応している。
- (2) 鋼材・鋼板温度のモデルの計算精度は、 σ =約12°Cである
- (3) 圧延ピッチ制御、ダイレクトデジタル制御の導入により、F1ミルインターバルは仕上速度設定替時に12秒から5秒に

まで短縮可能となった。
などの結果が得られた。

今後、さらに多品種・高品質化が要求される中で、いっそう
操業システムの向上を図っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 清水, 武田, 梅本:「水島製鉄所熱延工場の概要」, 川崎製鉄技報, 5 (1973) 2, 4
- 2) 三芳, 三宅, 篠原:「高負荷型連続鋼片加熱炉の廃熱回収の強化」, 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 137-147
- 3) 三芳, 三宅, 高木, 篠原, 堀田, 小橋:「連続式加熱炉における廃熱回収強化による省エネルギー」, 鉄と鋼, 68 (1982) 8, S 1186
- 4) 三宅, 藤原, 高木, 小高, 山田, 川崎:「ホットスキッド型ブッシャーがスキッドシフト効果」, 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 364
- 5) 近藤, 小西, 高木, 伊藤, 豊川, 仲田:「熱間圧延シャーの剪断能力の増強」, 鉄と鋼, 69 (1983) 9, S 1070
- 6) 小橋:「熱平衡を考慮した連続加熱炉の伝熱計算」, 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 275