

© 1988 ISIJ

技術報告

## 熱延における直送圧延対応技術

谷口 勲\*・竹腰 篤尚\*・松本 道湛\*  
山本 正治\*・栗原 健\*・江田 尚智\*

Technology for the Development of Hot Direct Rolling  
in Hot Strip Mill

Isao TANIGUCHI, Atsuhisa TAKEKOSHI, Michikiyo MATSUMOTO,  
Masaharu YAMAMOTO, Ken KURIHARA and Hisatomo EDA

## Synopsis :

In NKK Fukuyama Works, Hot Direct Rolling (HDR) process on No. 5 continuous casting machine and No. 2 hot strip mill is operated for the purpose of the saving of the energy and the materials, and the manpower. In the hot strip mill, the process is maintained by the technology of the prevention of temperature going down such as the heat insulating cover, the induction heater, and the technology of the schedule free rolling and the equalize of the product ability between the continuous casting and the hot strip mill, and the new computer system which controls these. By the achievement about each technology, the large quantities of production by HDR is operated stably, and the effect of the improvement about the quality is obtained.

**Key words :** HDR ; continuous casting machine ; hot strip mill ; heat insulating cover ; induction heater ; schedule free rolling ; computer system.

## 1. 緒 言

福山製鉄所では省エネルギー、省資源、省力化を目的として、第5連铸機と第2熱延を直結したHDR (Hot Direct Rolling) を実施している。

本報告では、HDR 操業を支える要素技術である熱間圧延ライン上の温度確保技術、スケジュールフリー対応技術、連铸-熱延生産性対応技術などに関する設備、及び計算機システムの機能概要と品質制御効果について論ずる。

## 2. 圧延ライン上の温度確保

良好な材質を確保しながらHDRを実施するためには、铸片の高温化に加えてライン上での放熱防止が重要な要素となる。このため、仕上圧延機入側のディレイテーブル上及び連铸機出側の搬送テーブル上に保温効果の高い保温カバーを設置している。また、粗バー幅方向エッジ部の昇温を目的として、仕上圧延機直前に誘導加熱方式の粗バー加熱装置を設置している。

## 2.1 保温カバー

材料の保温をより効果的に行うためには、表面温度の立ち上がり早い材料を圧延材表面側に使用し、その裏面に断熱性の優れた保温材を使用するのが良い。すなわち表面側材料として耐高温酸化性の優れた金属板、その裏側にセラミックファイバーのような熱伝導率の低い保温材を構成することが望ましい。セラミックファイバーのみの構成では、テーブルローラーが外部水冷されている場合にカバー内がウェットな雰囲気になるため、セラミックファイバー自身の吸湿により断熱度が小さくなる。また、キャストブルを用いた場合には、その熱容量が大きいため断熱度は非常に小さくなる。以上により、ディレイテーブル上の保温カバーはTable 1に示す構成としている。その他の特徴は、①上部保温カバーをパスラインに操業限界まで近づけ保温効率をアップした、②下部保温カバーの形状を逆ハの字とすることにより、ローラー抜熱面積の縮小、スケール落下の促進を図つた、③ローラーに水切りワイパーを設置することにより、ローラー冷却水飛散を防止し保温カバーの温度低下を小さくした点である。この保温カバー使用、不使用のおお

昭和62年10月19日受付 (Received Oct. 19, 1987)

\* NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

Table 1. Shape and materials of heat insulator.

Item	Upper heat insulator	Lower heat insulator
Shape of heat insulator		
Materials of heat insulator	Outside: Steel plate Inside: Ceramic fiber (t=50) Stainless thin plate	(Same)

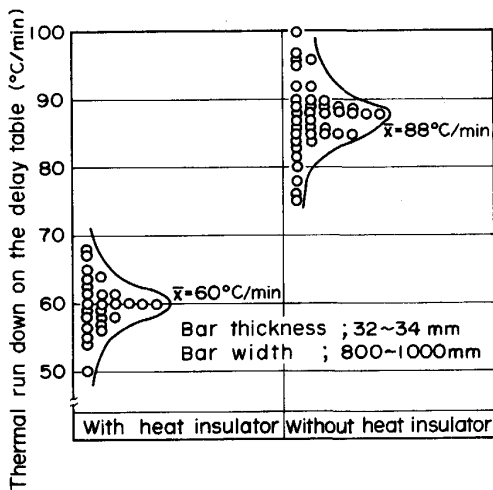


Fig. 1. Effect of heat insulator.

のにおけるディレイテーブル上の粗バー温度降下量を Fig. 1 に比較して示す。カバー使用により約 30% の粗バー温度降下量低減が可能となった。熱延においては仕上圧延にて加速圧延を行うため、仕上圧延機出口温度確保の点では一般に材料先端部が最も厳しくなるが、本保温カバーを使用することにより粗バー先端部で約 10°C の温度降下量低減が図れた。

連铸機出側の搬送テーブル上の保温カバーは、材料の滞留時間が短く、カバー内の温度も低い。更に内部水冷ローラーを使用しているため水蒸気の影響もほとんど無いことから立ち上がり特性の最も良い反射型（ステンレスクラッド板の表面にクロムめつきを施したもの）を使用している。

2.2 粗バー加熱装置

加熱装置の設置場所は、材質に大きな影響を与える仕上圧延機出口温度に対して温度残存率の最も良い仕上圧

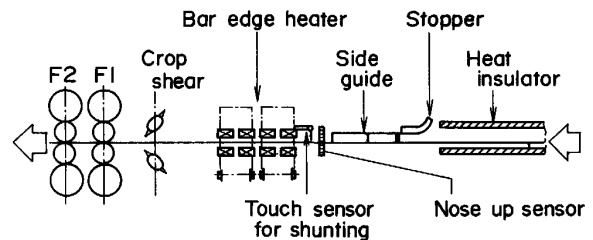


Fig. 2. Layout of bar edge heater.

Table 2. Specification of bar heater.

Item	Specification
Type	Induction heater
Capacity	2 400 kW (2 800 kW max)
Frequency	500~1 000 Hz (Variable)
Heated material	Mild steel (Bar thickness : 22~65 mm) Bar speed : 25~85 mpm)

延機前面とし、圧延ライン上で温度降下の大きい被圧延材幅方向エッジ部の加熱を行っている。Fig. 2 に粗バー加熱装置及び周辺設備のレイアウトを示す。加熱方法には、短時間大加熱を効率よく行うために誘導加熱方式を採用している。Table 2 に粗バー加熱装置の仕様を示す。インダクターコイルと粗バーとの接触によるコイルの損傷を防止するために、加熱装置前面にて粗バーの先端から後端まで全長にわたって反りを測定し、粗バーの形状に合わせて効率よく加熱するように上下コイルのギャップコントロールを行っている。Fig. 3 に磁気特性が熱間鋼に近い冷間材料を用いてライン上で加熱テストを行った場合の、材料幅方向昇熱分布の実測結果を示す（図中の昇熱分布は、加熱時間中の熱間における放射損失分の補正を行っている）が、所定の昇温分布が得られている。また、Table 3 に粗バー加熱装置使用、不使用おのにおける製品コイルエッジ部のフェライト組織の 1

Table 3. Microstructure of steel.

Bar edge heater	Used		Unused	
Coil size	↑1.20mm x W930mm		↑1.20mm x W930mm	
Position	50mm from edge	100mm from edge	50mm from edge	100mm from edge
Microstructure of ferrite				

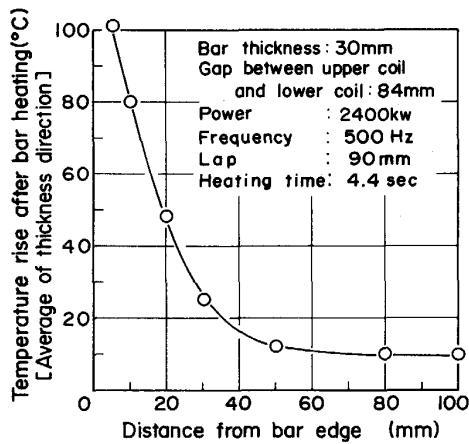


Fig. 3. Temperature rise of bar edge.

例を示す。粗バー加熱装置の使用によりエッジ部の粗大粒が軽減し、大幅な材質改善効果が得られる。

### 3. スケジュールフリー対応

HDR を効果的に実施するためには、鋼種、板厚、板幅などの圧延上の制約を無くす、いわゆるスケジュールフリー圧延の実施が不可欠である。このために仕上圧延機と VSB (バーティカル・スケール・ブレイカー) の改造を実施した。

#### 3.1 仕上圧延機改造

HDR 大量圧延操業下では、同一幅製造を基本とする連鑄機に対して熱延側がそれに対応する必要があり、かつ HDR 材と加熱炉材の切替わり時に発生しうる材料幅ランダム圧延にも対応しなければならない。しかし、同一幅大量圧延や板幅ランダム圧延を行うと仕上ワークロールに偏摩耗が発生し、板プロフィールに悪影響を与えていた。そこで、仕上圧延機の改造を行い、従来より摩耗の大きかった F4~F7 の 4 スタンドに ±200 mm の

Table 4. Specification of WR shift mill.

	WR shift mill	Conventional mill
1 Stands	F4~F7	—
2 Shift stroke	±200 mm	—
3 Shift power	Hydraulic	—
4 Shift speed	5.40 mm/s	—
5 Accuracy of shift set	±3 mm	—
6 Bending force	0~233 t/chock	25~95 t/chock
7 Work roll diameter	650~756 φ	700~809 φ
8 Back up roll diameter	1370~1570 φ	1370~1570 φ
9 Work roll barrel length	1830 mm	1780 mm
10 Work roll total length	5190 mm	4030 mm

ロングストロークのワークロールシフトを設置した。改造の概要を Table 4 に示す。このワークロールシフトの使用により、ロール摩耗、サーマルクラウンが平滑化され、エッジピーク、ビルドアップなどの板プロフィール不良は皆無となった。Table 5 に同一幅大量圧延時のワークロール摩耗、板プロフィール改善例を示す。この効果により、同一幅圧延量は従来の 2~3 倍まで拡大でき、サイクルトン数も最大で約 2 倍拡大することが可能となった。

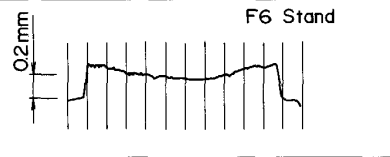

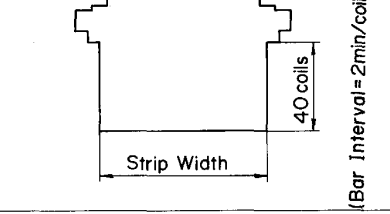
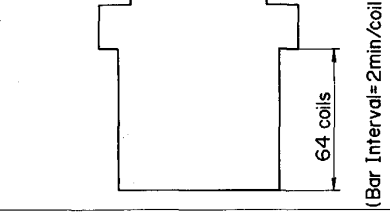
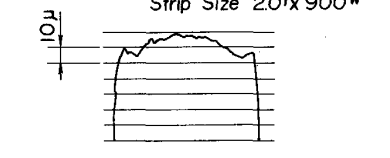
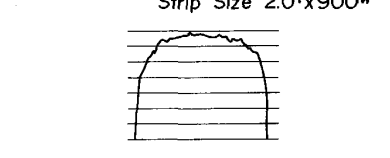
#### 3.2 VSB 改造

連鑄機の同一幅製造に対して、熱延側での幅調整能力向上を図るために VSB の多パス化(バックパス圧延化)を行い、幅調整能力を従来の 100 mm から 150 mm に拡大した。また、幅圧下量の増加に伴う材料先後端部の幅変動増加の対策として、VSB を油圧圧下に改造しショートストローク制御を行っている。

### 4. 連鑄-熱延生産性対応

HDR を大量に、かつ安定して実施するためには、連鑄機と熱延の生産能力をいかに合致させるかが重要な要素となる。Fig. 4 に 220 mm 厚スラブにおける第 5 連鑄機と第 2 熱延の生産能力の関係を示す。第 2 熱延の生産能力を阻害することなく HDR を実施するために、第 5

Table 5. Example of improvement of the roll wear and thickness profile after rolling the strips with same width.

	Without Shift	With Shift
Roll Profile		
Rolling Schedule		
Strip Profile (Last Coil)		

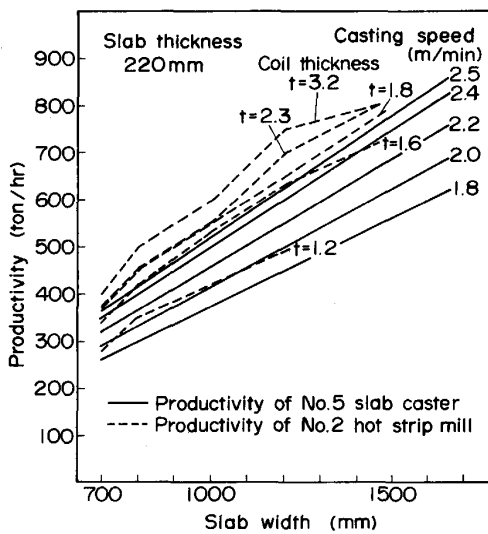


Fig. 4. Productivity of CC and HOT.

連铸機は現状、最高 2.7 m/min、平均で 2.2 m/min の 铸造速度で操業を行っている。また、熱延側では薄物材 圧延時に生産能率が連铸機に対して小さくなるケースが 発生するので、仕上圧延時の加速率を大きくした高加速 圧延を実施し、圧延ピッチの短縮を図っている。また、 高加速圧延時の仕上出口温度上昇に対応するために、 F1-2 スタンド間、F2-3 スタンド間に仕上スタンド間 冷却装置を増設している。

### 5. HDR 時の加熱炉保熱

熱延の生産能力を確保するためには連铸機のタン

ディッシュ交換時等の休止時に、熱延側は従来プロセス である加熱炉材の圧延を行い稼働率の向上を図る必要が ある。現状、熱延生産量の約 5 割を HDR 材、残りを加 熱炉材に配分している。加熱炉は、HDR 実施中は保熱 状態で待機しており、HDR 材と加熱炉材の構成に合わ せて保熱-昇熱-加熱の繰返し操業を行う。このため、保 昇熱によるロスが増加し加熱炉の燃料原単位を悪化させ る。このロスを低減するために加熱炉の改造を行った。 保熱対応として「加熱炉シール性の強化」、「炉体断熱の 強化」、「バーナーの高ターンダウン化」を実施している。 また、省電力対策として燃焼用空気ブロワーの回転数制 御を実施している。更に、最も熱ロスの大きい排ガスに よる損失熱を効率よく回収するために 4 パス型高効率レ キュペレーターを採用し、保熱-昇熱-加熱のあらゆる排 ガス負荷に対応可能なように、2 パス、4 パス切換えが 可能な形としている。また、燃焼制御の最適化のために 各帯閉ループ方式の自動燃焼制御 (O<sub>2</sub> 制御) を実施し ている。これらの実施により、加熱炉の燃料原単位は常 温から 1250°C の加熱において 34×10<sup>3</sup> kcal/t の低減が 可能となった。燃焼用空気ブロワーについても 1.5 kWh/t の省電力効果が得られている。そして、HDR 材 と加熱炉材の混成操業下においても良好な燃焼制御が可 能となり、保熱時のロス低減に大きく寄与している。

### 6. HDR のための計算機システムと制御概要

#### 6.1 計算機システム構成

第 2 熱延では、HDR の効果を最大限に発揮するため、

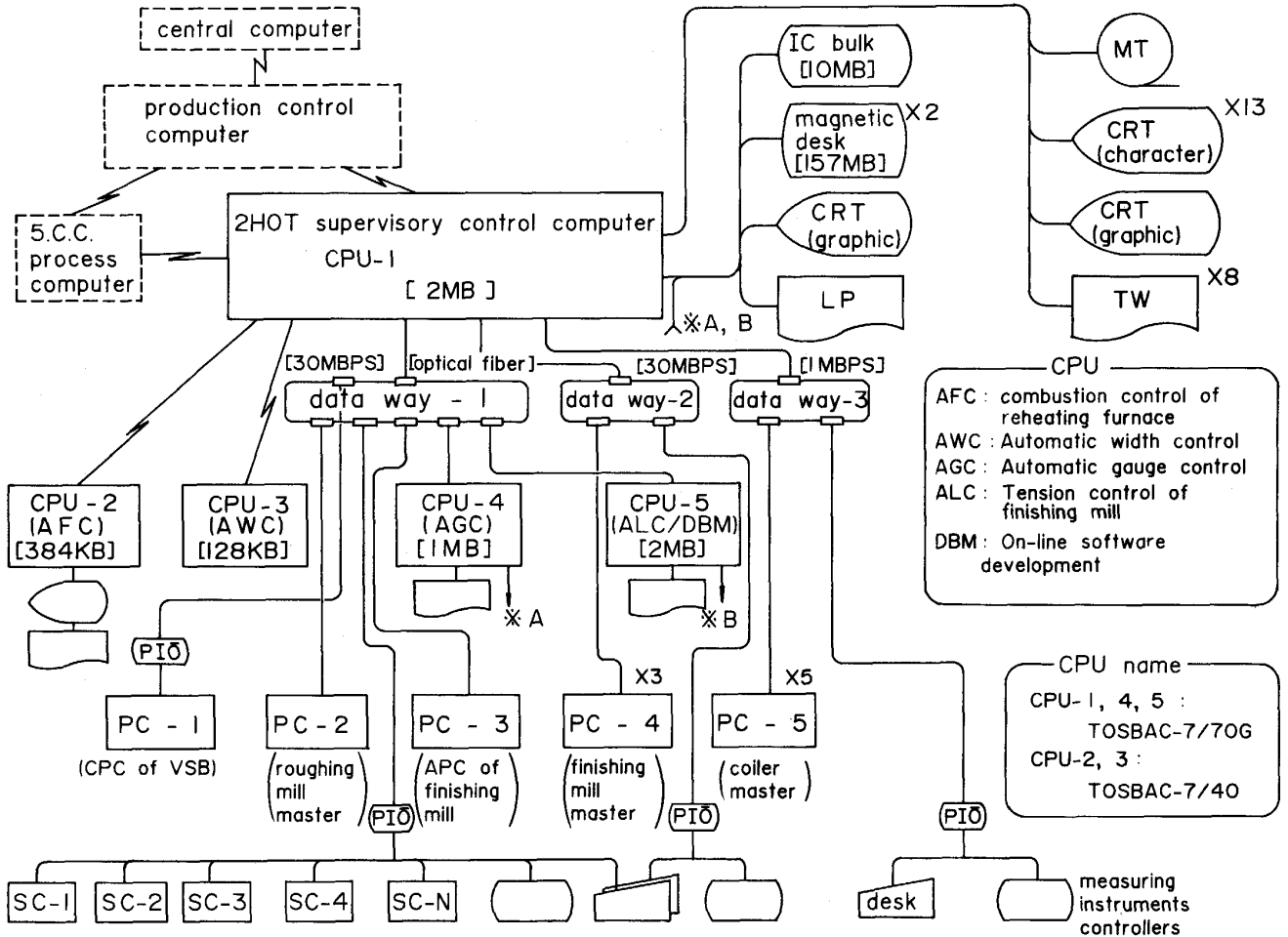


Fig. 5. Configuration of process control computer system in Fukuyama No. 2 hot strip mill.

ミルラインの改造とあわせて、計算機システムの全面更新を実施した。システム構成は Fig. 5 に示すとおりで以下の特徴をもっている。

(1) 総括計算機 (SCC) は、システムの簡素化およびデータ移動量の最小化をはかるため、全ラインを1台で管理する設計とし、下に機能別にミニコン、プログラマブルコントローラ (PC)、シーケンサを配置した。

(2) プロセス入出力データは、機能分散および伝送速度を考慮し、3系統のデータウェイ経由とし、また複数の計算機からクロスコール可能とした。

(3) システム異常による HDR 機会損失防止という観点から、ソフトウェア開発能率および信頼性向上が必須となる。そこで Fig. 5 の CPU-5 は仕上張力制御とオンラインソフトウェア開発機能とを切り換えて使用でき、総括計算機との完全同期運転を可能とした。

6・2 計算機システム機能概要

本システムは、加熱炉装入側、第5連鋳機直結テーブルから、粗、仕上圧延機、コイラーおよびコンベアーまでのライン操業管理、圧延機制御、自動運転などを一元

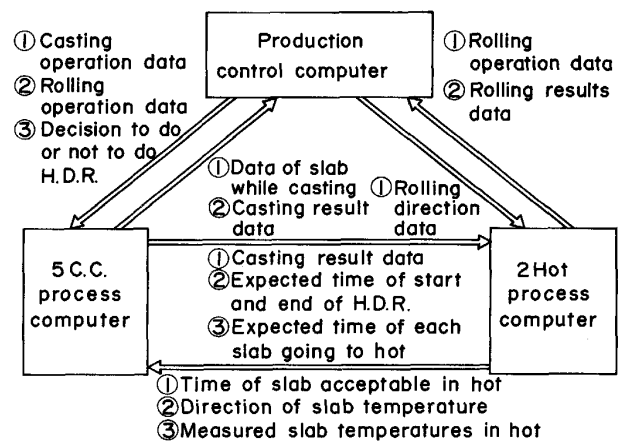


Fig. 6. Data communication of the computer system.

的に行うものであり、機能設計にあたっては、特に HDR 化にともなう物流・工程運用機能への柔軟な対応と、HDR 材、加熱炉材混在下での品質制御精度の向上に重点をおいた。

6・2・1 鋳造・圧延進捗同期管理

HDR 化にともなう casting・圧延の同期化のため、生産管理用計算機、第5連鑄計算機との伝送はリアルタイム性が要求される。Fig. 6 に計算機間の主要伝送項目を示す。

圧延指示は、圧延サイクル決定後、生産管理用計算機から伝送され、スラブ鑄造完了後、第5連鑄計算機から鑄造実績が伝送された時点で修正される。この鑄造実績はスラブ一枚単位に伝送され、実際のスラブ情報(寸法、温度、成分等)が確定する。また第5連鑄機側にて圧延不可能と判断された場合や、第5連鑄機側でスラブ抽出し順変更が発生した場合も、この鑄造実績により圧延はフレキシブルに対応できるシステムとなっている。

HDR を含む物流・工程管理以外に、品質情報(厚さ、幅、温度等)、圧延実績(圧下開度、圧延荷重、主機電流等)をリアルタイムに生産管理用計算機経由でセンター計算機へ伝送しており、端末装置を利用して、オフライン解析可能となっている。この品質管理システムにより長期間にわたる品質制御能力の評価、各種モデル式の精度アップのための解析などが容易に実施可能である。

次に圧延スケジュール管理は、各種圧延能率によりスラブ一本ごとの圧延ピッチを決定する従来のミルベisingに加え、HDR 材鑄造予定と圧延予定のマッチングをはかるため、サイクル単位の管理も行っている。Fig. 7 にその基本思想を示す。まず、サイクル内スラブを加熱炉材グループと HDR 材グループに分け、次に後続 HDR 材グループの圧延開始時刻を確保するように至近の加熱炉材グループのスラブ抽出ピッチを調整する方式をとっている。抽出ピッチの調整は、加熱炉材グループの先頭が次抽出となつた時、加熱炉能率、仕上圧延間隔を対話式で操作することにより行われる。また、HDR 材リジェクトによる圧延順変更が生じ、従来の圧延指示

書の圧延順が最終とならない場合を考慮し、CRT による最終圧延順ガイダンスを行つている。さらに、連鑄・圧延間の同期が大きくはずれ、圧延スケジュール管理ができない場合は、稼働率確保のため HDR 材と加熱炉材の圧延順変更を可能としている。

6.2.2 スケジュールフリー圧延対応品質制御技術

HDR にともなうスケジュールフリー化に対応するためには、板厚、板幅、板温度等の品質制御精度の向上が必須となる。本システムではその一環として油圧 AGC の導入、仕上設定制御のレベルアップおよび VSB ショートストローク制御を実施した。以下にそれぞれの制御機能の概要と効果を紹介する。

(1)自動板厚制御

AGC はデジタル化により油圧圧下の性能を損なわないよう、制御周期は 10 ms としている。制御方式は高精度のゲージメーター方式であり、制御ゲインは総括計算機よりスラブ諸元等を考慮した最適値が伝送される。新 AGC により鋼板中央部板厚精度は、バー内変動(max-min)で  $\bar{x}=37 \mu\text{m}$ ,  $\sigma=15 \mu\text{m}$  を達成し、従来制御に比べ 48% ( $\bar{x}$  で  $34 \mu\text{m}$ ) 改善された。

また本システムではロール偏芯除去制御も導入した。従来問題であつたキスロールでの準備作業が不要で、偏芯波形の経時変化にも対応できる相関フィルター方式を採用することにより、荷重変動を従来の約 33% に低減することができた。

(2)仕上設定制御

板厚精度向上およびワークロール摩耗分散を目的として今回開発した仕上設定計算の概略を Fig. 8 に示す。主なモデルについて以下に特徴を述べる。

(a)スタンド間鋼板温度予測モデル

HDR 材と加熱炉材は板内温度分布が異なるため、平均温度の変化を計算する従来のモデルでは両者を精度良

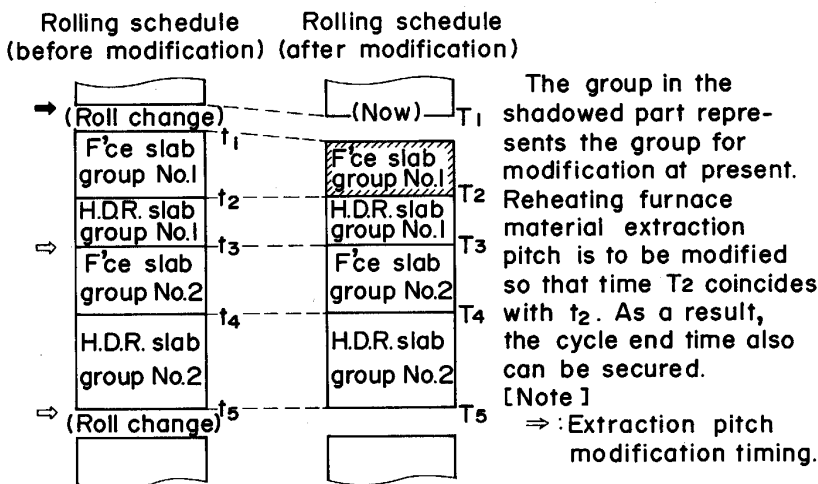


Fig. 7. Concept of rolling schedule control.

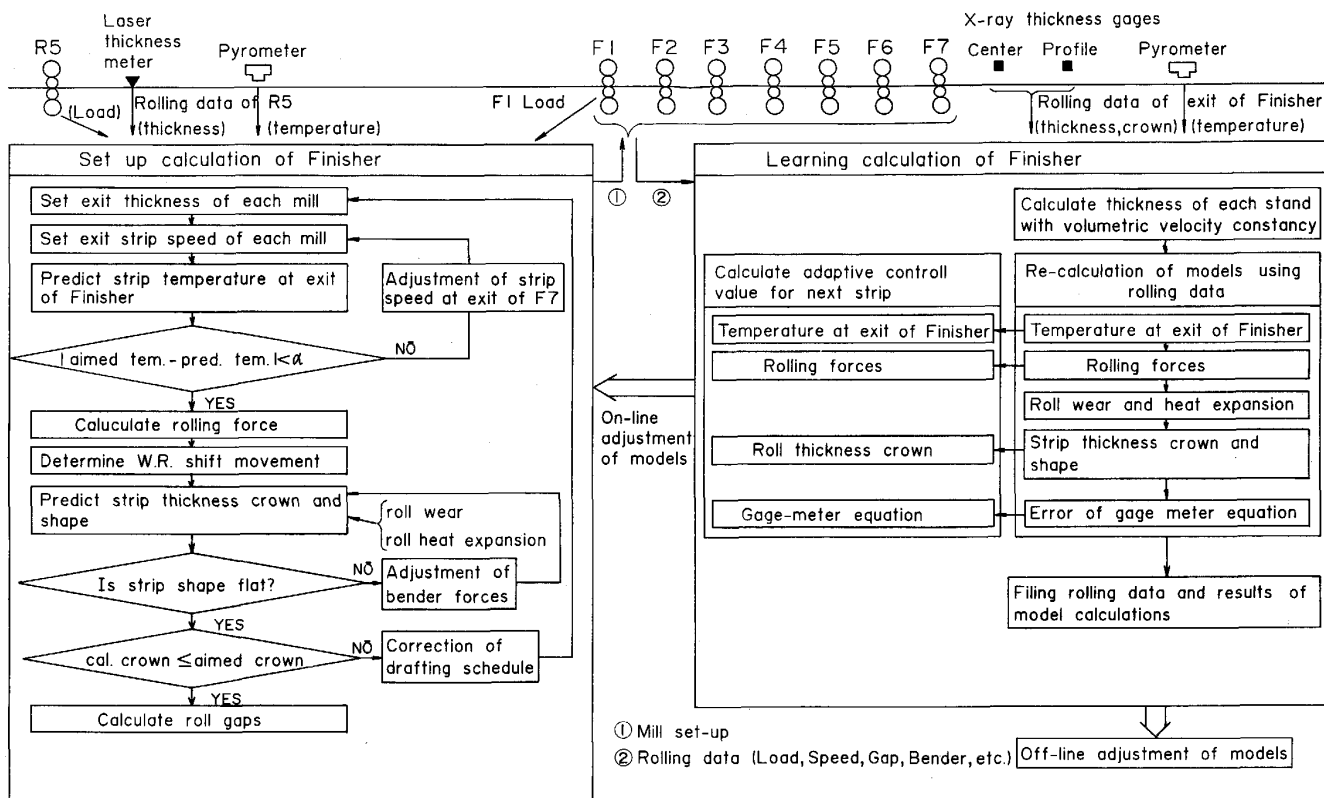


Fig. 8. Configuration of finisher set-up model.

く計算することができない。そのため、今回板厚方向温度分布を求められる温度降下式を導入した。温度降下は(1)、(2)式で示される板厚方向一次元熱伝導方程式<sup>1)</sup>を仕上入側より順次解くことで求めている。

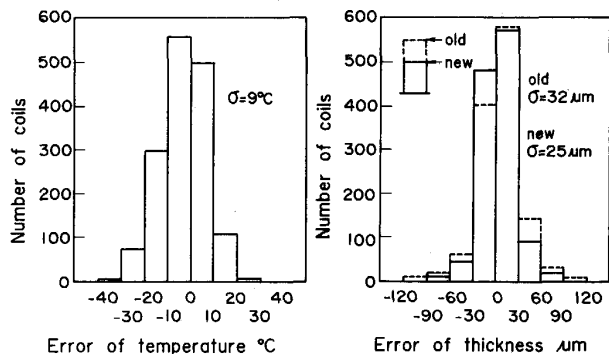
$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=\frac{h}{2}} = \pm q \quad (\text{境界条件}) \dots\dots\dots (2)$$

$a$ : 温度伝導率  $\lambda$ : 熱伝導率  $q$ : 鋼板表面の熱流束  
 $h$ : 板厚  $\theta(x, t)$ : 鋼板温度 ( $x$ : 板厚方向位置,  $t$ : 時間)

これらの板厚方向温度分布のうち、表面温度は通板速度決定に、平均温度は圧延荷重予測に用いている。また、加熱炉材とHDR材の温度降下の違いは、R5出側板厚方向温度分布を調整することにより補正している。温度予測モデルの計算精度はFig. 9(a)に示すとおり良好である。

仕上設定計算を使用した、圧下および速度の自動使用率は95%に達し、プリセットの精度を表す鋼板トップ部板厚精度はFig. 9(b)に示すとおり標準偏差で従来に比べ22%改善された。



(a) Accuracy of finishing temperature (Predicted-observed)  
 (b) Accuracy of thickness at the top of the strip (1.14 t ~ 12.00 t)

Fig. 9. Accuracy of models.

(b)ワークロールシフト量設定モデル

ワークロールシフトのパターンは、基本的にはワークロール摩耗が放物線状に分散されるよう決定され、サイクルトップ時に1サイクル分の計算を行う。現在パターンは6種類あり、操業に合わせて使い分けている。また、低クラウン目標材に対しては、ワークロールベンダーの効果を最大限に出すために、板幅余裕を考慮した最大シフト量設定を行うことができる。

(3)粗板幅制御

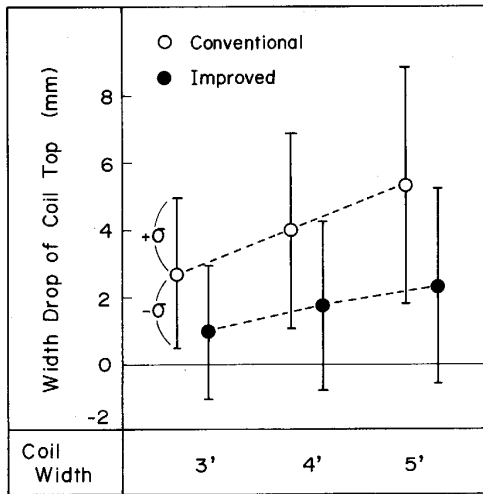


Fig. 10. Average width drop of coil top.

板幅スケジューリングフリー化に対応した板幅圧下のため、VSB ショートストローク制御を導入した。その特徴を以下に示す。

(a) ショートストローク速度を 60 mm/s と高速化したため、材料の先後端トラッキングは高精度なものが要求される。そこで本システムではレーザー方式 HMD を VSB の直前に設置し、材料検出精度  $\pm 10$  mm 以下を達成した。

(b) ショートストロークパターンは 9 点の折線データから構成され、鋼板の目標板厚、板幅、幅圧下量、材料強度などをもとに SCC 計算機にて計算される。

(c) 第 5 連鑄機の幅替え時に発生するテーパースラブに対してスラブミドル部を逆テーパ状に圧下する機能をもっている。

本ショートストローク制御及び VSB 強圧下型のパススケジュールにより、先端幅落ちは Fig. 10 に示すように大きく改善された。

## 7. 結 言

以上、福山製鉄所の第 5 連鑄機-第 2 熱延 HDR プロセスを支える熱延の要素技術について述べた。これら一連の設備改造、及びこれらをサポートする新計算機制御システムの導入により HDR の大量安定製造が可能となり、更に品質制御精度においても格段の向上が得られた。

今後、スケジューリングフリー化の推進、及び各種制御モデルのレベルアップを図り、HDR 量、質のいつそのの拡大を行っていく。

## 文 献

- 1) 田中重雄: 三菱重工技報, 2 (1965) 2, p. 48