

(論文)

熱延ホットランテーブルにおける巻取温度制御

Coiling Temperature Control at Hot-run Table in Hot Strip Mill



佃 岳洋*1

Takehiro TSUKUDA



白坂貴成*2

Takanari SHIRASAKA



西田吉晴*2(工博)

Dr. Yoshiharu NISHIDA



長谷川裕之*3

Hiroyuki HASEGAWA



小林正宜*4

Masanori KOBAYASHI



土肥広大*5

Kodai DOI

The coiling temperature is a very important factor in determining the mechanical properties of a strip during the cooling process at the run-out table in a hot strip mill, and it is necessary to control the coiling temperature with a high degree of accuracy. This paper states that a 32% decrease of the standard deviation of the coiling temperature has been achieved by applying strict temperature models (difference model) to calculate the temperature distribution in the thickness direction, as well as applying a learning system to ascertain the heat transfer coefficient, which is a boundary condition in water cooling.

まえがき＝近年、ハイテン材をはじめとする高付加価値鋼材の品質や歩留り、生産性を改善するためには、鋼材の材質特性を大きく左右する、巻取温度制御のさらなる高精度化が必要である。当社では、1980年代に冷却設備や冷却制御システムの開発に取り組んでおり¹⁾、また国内外の他社においても当社と同様の取組がなされ、多数の報告がある^{2)~5)}。当社加古川製鉄所熱延工場では、冷却制御のプロコンを更新する際、巻取温度をより高精度に制御することを目的に、巻取温度制御モデルの高精度化を図った。本稿では、薄鋼板を対象とした巻取温度制御モデルの高精度化方法とその適用結果について述べる。

1. 巻取温度制御の概要

巻取温度を制御するために温度予測モデルに基づいて鋼板に対する冷却水量を計算する巻取温度制御 (Coiling Temperature Control, 以下 CTC という) システムが熱延冷却帯 (ホットランテーブル, 以下 HRT という) に導入されている。本章ではまず、HRT の冷却設備の概要を述べ、つぎに CTC に導入されている多数の制御機能やモデル学習機能について述べる。

1.1 冷却設備の概要

図 1 に当社熱延工場における仕上圧延機以降の HRT

上の設備概要を示す。仕上圧延機にて圧延された鋼板は冷却設備にて所定の巻取温度まで冷却された後、コイルで巻取られる。冷却設備には、一つの給水配管から冷却水が供給され、多数の冷却ヘッド群から構成されるバンクが複数設置されている。上部の冷却方式は層流噴流によるラミナ冷却、下部の冷却方式は水噴霧によるスプレー冷却となっている。各ヘッドに設置された注水バルブの開閉 (以下、バルブ開閉パターンという) を任意に設定することによって、各バンクの冷却水量を調節することができる。

また、放射温度計が 4 台 (仕上圧延機出側温度計 (FDT), 中間温度計 (MT1, MT2), 巻取温度計 (CT)) 設置されている。すべての温度計の温度精度は±5℃、応答速度は 200ms である。

1.2 制御・学習機能の概要

図 2 に CTC の基本的な構成図を示す。主な制御機能として、フィードフォワード制御、フィードバック制御、速度外乱補償制御などがある。それらの制御機能とモデル学習機能について以下に述べる。

(1) フィードフォワード制御

鋼板全長を仮想的にある一定長に分割した鋼板 (切板と呼ぶ) に対して、つぎに示す方法に基づいて各バンク

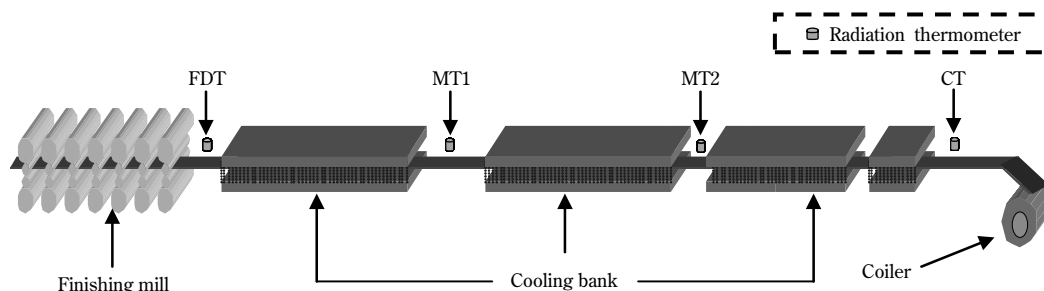


図 1 冷却設備の概要

Fig. 1 Schematic of cooling equipment

*1 技術開発本部 生産システム研究所 (現 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部) *2 技術開発本部 生産システム研究所
*3 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 制御部 *4 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部 *5 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 薄板部

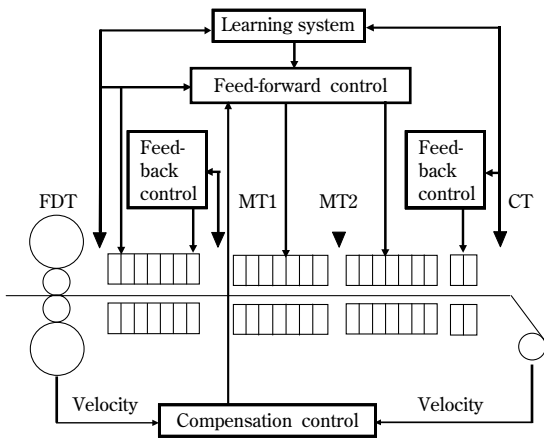


図2 巻取温度制御システムの概要

Fig. 2 Configuration of coiling temperature control system

の注水バルブ開閉本数を決定する。すなわち、仕上圧延機出側の温度、板厚、速度などの実績情報と温度予測モデルを用いて巻取温度（CT値）の予測値を計算し、その予測値と目標値の偏差が最小になるまでバルブ開閉本数を増減させる。CTCの中でフィードフォワード制御は中核機能である。

(2) 初期設定制御

鋼板最先端部に対しては、バルブ開閉の応答遅れの影響のため、フィードフォワード制御が機能しない。そのため、鋼板の最先端部が仕上圧延工程の所定の位置に到達した時点で、別途鋼板最先端部に対する冷却水量を計算する。

(3) フィードバック制御

HRT上での様々な外乱の影響により、(1)で述べたフィードフォワード制御だけでは温度計直下の実績温度と目標温度の間に偏差が生ずる。この偏差を解消するために、リアルタイムで温度計直前のバンクの注水バルブ開閉本数を変更するフィードバック制御を行う。

(4) 速度外乱補償制御

仕上圧延工程では、鋼板長手方向に対して仕上圧延機出側温度を一定に制御するために、オペレータが手動で圧延機速度を変更することがある。その結果、HRT上の鋼板速度が変動するため、フィードフォワード制御で決定した注水バルブ本数をそのまま用いると、巻取温度を目標値に制御することができない。

速度外乱補償制御では、変動した鋼板速度の実績情報を用いてHRT上の鋼材の温度予測を再計算し、この再計算された温度予測に基づいて(1)のフィードフォワード制御で決定した注水バルブ開閉本数を修正する。

(5) モデル学習機能

上記(1)～(4)の各制御機能が正しく機能するためには、そこに内包される温度予測モデルに対して高い精度が要求される。高温の鋼板から冷却水への伝熱形態は、鋼板温度によって非線形に変化する。熱したフライパンに水滴を落としたときなど、日常的に経験することができる現象であり、ライデンフロスト現象と呼ばれる。フライパンが高温のとき、水滴は接触面で瞬時に生じた蒸気によって浮き上がってフライパンとは直接接触しなくなる。一方、フライパンの温度が低いときは、水

滴はフライパン上に広がって速やかに蒸発する。このため、こうした温度域での冷却現象（熱伝達率に反映）は非常に複雑になり、温度予測モデルの精度を経時的に維持するためにはモデルの予測誤差を活用したモデル学習を行う必要がある。具体的には、鋼材の冷却が終了した後、仕上圧延機出側温度や巻取温度、鋼板速度、バルブ開閉パターンなどの実績値を基に温度モデルの予測誤差が計算される。

2. 新しい巻取温度制御モデル

鋼板温度は、水冷時に鋼板表面から奪われる熱量と変態によって発生する熱量（変態発熱）に支配される。そのため、温度予測モデルの高精度化を実現するためには、これらの熱量を高精度で予測する必要がある。

上述のように、鋼板と冷却水との間の熱伝達率は鋼板表面温度に対して強い非線形特性を有するため、熱伝達率の予測には差分モデルを用いた鋼板表面温度の計算が必要となる。従来のプロセスコンピュータは計算能力が乏しいため、膨大な計算量を必要とする差分モデルをオンライン制御にそのまま用いることは難しかった。しかしながら、近年、プロセスコンピュータの計算能力が大幅に向上したことを受け、熱伝達率をできる限り高精度に予測すべく、熱伝達率を境界条件とする差分モデルをオンライン制御に導入することを試みた。また、差分モデルをそのままフィードフォワード制御に適用することは困難であるため、計算負荷が小さく、かつ差分モデルと同程度の精度を有する改良型温度予測モデルを新たに開発した。さらに、様々な外乱の影響によって大きく変動する熱伝達率を学習させながら温度予測モデルの精度を維持する機能をシステムに付加した。

つぎに変態発熱について述べる。鋼板は通常、冷却過程においてオーステナイト組織からフェライト組織やパーライト組織などに変化（変態）し、この変態前後の組織の内部エネルギー差に起因する変態発熱と呼ばれる発熱現象が起こる。とくに、高炭素鋼や高合金鋼では変態発熱量が大きいので、変態発熱量を精度良く予測しなければ制御精度が悪化し、鋼板の品質バラツキを引起す。この変態発熱量を予測するには、まずオーステナイト組織からフェライト組織などへの変態率の変化量を精度良く予測する必要があるが、熱間圧延工程においてはその予測は現実的には非常に難しい。そこでこの問題に対して、後述する二つの対策を実施した。

以下、2.1節では差分モデルの概要、2.2節では熱伝達率学習システム、2.3節では計算負荷を低減した改良型の温度予測モデル、そして2.4節では変態発熱現象の対策とその効果について述べる。

2.1 鋼板温度予測モデル（差分モデル）

差分モデルでは、式(1)に示した板厚方向次元熱伝導方程式を差分法で計算する。また、鋼板下面における境界条件は式(2)、上面における境界条件は式(3)で与える。

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\lambda(T(z,t))}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + \frac{q(T(z,t),t)}{c \cdot \rho} \quad \dots(1)$$

$$z=0:\lambda(T(0,t))\cdot\frac{\partial T(0,t)}{\partial z}=\alpha_d(T(0,t),t)\cdot\{T_d(t)-T(0,t)\} \dots (2)$$

$$z=h:\lambda(T(h,t))\cdot\frac{\partial T(h,t)}{\partial z}=\alpha_u(T(h,t),t)\cdot\{T_u(t)-T(h,t)\} \dots (3)$$

ここで、 z ：板厚方向位置 ($z=0$ ：鋼板下面、 $z=h$ ：鋼板上部)、 t ：時間、 T ：鋼板温度、 T_d ：鋼板下面側冷却水温度、 T_u ：鋼板上部側冷却水温度、 c ：鋼板比熱、 ρ ：鋼板密度、 h ：板厚、 λ ：板厚方向の熱伝導率、 q ：変態発熱速度である。

上記の式において、 α は鋼板表面の熱伝達率であり、以下のように冷却条件に応じて与えられる。

$$\alpha_d = \begin{cases} \alpha_\gamma + \alpha_c & (\text{空冷時}) \\ \alpha_\gamma + \alpha_{ws} & (\text{水冷時}) \end{cases} \dots (4)$$

$$\alpha_u = \begin{cases} \alpha_\gamma + \alpha_c & (\text{空冷時}) \\ \alpha_\gamma + \alpha_{wl} & (\text{水冷時}) \end{cases} \dots (5)$$

ここで、 α_γ ：輻射熱伝達率、 α_c ：強制対流熱伝達率、 α_{ws} ：スプレー冷却の熱伝達率、 α_{wl} ：ラミナ冷却の熱伝達率である。

2.2 熱伝達率学習システム

2.2.1 熱伝達率学習の必要性

熱伝達率は鋼板表面温度だけではなく、鋼板表面の性状（鋼板表面に発生するスケールの影響や鋼板の形状乱れなど）や冷却水の流量、気温などの影響によっても大きく変動するため、温度予測モデルの精度を維持するためには、熱伝達率を学習することが不可欠である。しかし、実際の冷却現象は熱伝達率が鋼板表面温度に対して強い非線形特性を示すにもかかわらず、従来は、単に温度降下量の予測誤差を平滑化して学習係数を算出する線形手法にとどまっていたため¹⁾、温度予測モデルの精度を高く維持するには限界があった。そこで、今回、非線形最適化計算を活用した熱伝達率学習システムを開発した。次項に学習システムを概説する。

2.2.2 熱伝達率学習システムのアルゴリズム

ラミナ冷却やスプレー冷却による熱伝達率は、鋼板表面温度、冷却水の温度、冷却水の流量密度などに対して非線形特性を有している。この特性を明らかにすべく、熱伝達率モデルの表現方法を式(6)に基づく非線形関数 f とゲイン G の積とした。

$$\alpha = f(T, T_w, W) \times (G) \dots (6)$$

ここで、 T ：鋼板表面温度、 T_w ：冷却水の温度、 W ：冷却水の流量である。

式(6)中のゲイン G により、HRTの環境で生じる様々な予測不可能な不規則外乱の影響を補償する。図3に示したフローチャートに基づき、学習システムのアルゴリズムを説明する。鋼板の冷却完了後、FDT値、CT値、鋼板速度、バルブ開閉パターンなどの実績データと初期ゲインの値を用い、境界条件として式(6)の熱伝達率モデルで表現される差分モデルに基づいて仕上圧延機出側温度から巻取温度までの温度降下計算を行い、巻取温度の予測値 (CT_p) を計算する。つづいて、巻取温度の予測誤差 (実績値 (CT_A) と予測値の偏差) とあらかじめ定めておいた閾 (いき) 値の比較を行い、予測誤差の値が閾値以下となるまでゲインの値を繰返し修正し、温度

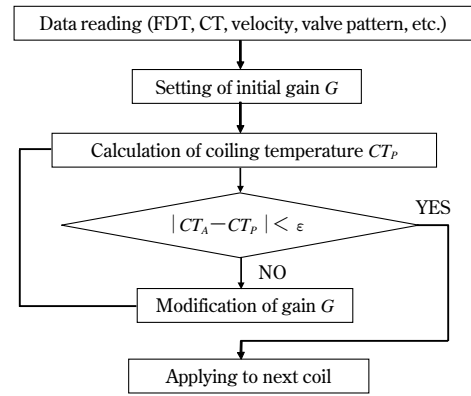


図3 学習アルゴリズムのフロー
Fig. 3 Flow diagram of learning system algorithm

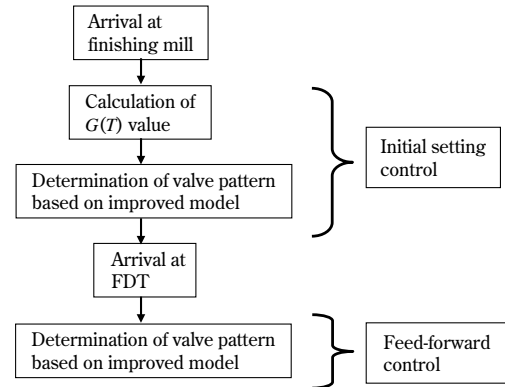


図4 計算負荷低減のフロー
Fig. 4 Flow diagram of reducing calculation load

降下計算を行う。この収束計算により求められるゲインの値を指数平滑法などの処理を経て更新し、その更新された値を各制御機能に内包されている温度予測モデルにおける熱伝達率モデルのゲインとして与え、次鋼材に対してこのゲインを用いた温度予測モデルに基づき、バルブ開閉パターンを計算する。

2.3 改良型温度予測モデル

2.3.1 計算負荷の低減方法

フィードフォワード制御において、バルブ開閉操作パターンの決定を行う場合、温度モデルの繰返し計算を行う。このため、差分モデルをそのまま利用すると計算量が膨大となり、所定の制御周期内に計算を終えることができない。そこで、制御周期内にバルブ開閉操作の最適パターン計算を完了でき、差分モデルと同程度の精度を確保する温度予測モデルを開発した。図4にそのフロー図を示す。

フィードフォワード制御と比較して計算時間に余裕がある初期設定制御において、差分モデル、質点系モデルそれぞれのモデルに基づいてFDTからCTまでの区間にて温度降下計算を行う。その計算結果を基に仕上圧延機出側温度から巻取温度までである一定の温度領域 (例えば50℃) ごとに、差分モデルと質点系モデルの温度降下量の比 $G(T)$ を計算する。この $G(T)$ を用い、式(7)で定義する改良型温度予測モデルに対して鋼板最先端部のバルブ開閉パターンを計算する。

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot h} [(\alpha_u + \alpha_d) \cdot \{T_w - T(t)\} \cdot G(T) + h \cdot q] \dots (7)$$

ここで、 T_w ：冷却水温であり、他の諸変数は2.1節で示したものと同一である。

つぎに、鋼板最前端部が仕上圧延機出側温度計に到達してから動作するフィードフォワード制御においても、初期設定制御のときと同様に式(7)に基づき、制御周期ごとにすべての切板のバルブ開閉パターンを計算する。なお、すべての切板に対し、 $G(T)$ の値は同じ値を用いる。

改良型温度予測モデルは質点系モデルと本質的に同じ構造であるため、計算負荷は差分モデルと比較して劇的に小さく、短時間計算が要求されるフィードフォワード制御に適用することが可能となった。

2.3.2 改良型温度予測モデルの精度

ある冷却条件において、差分モデル、質点系モデル、および改良型モデルに基づいて計算した仕上圧延機出側温度から巻取温度までのそれぞれの鋼板温度履歴を図5に示す。差分モデルで計算した巻取温度と質点系モデルで計算した巻取温度の偏差は約100℃ある一方、差分モデルと改良型モデルの巻取温度の偏差は約3℃である。なお、他の冷却条件においても同等の結果が得られている。このように、精度が良い差分モデルによる温度降下量の値を積極的に活用することにより、差分モデルと同程度の精度が確保できることに加え、オンライン制御に適用可能な温度予測モデルの開発に成功した。

2.4 変態発熱を考慮した温度制御

2.4.1 変態発熱を考慮した温度予測モデル項の適正化

変態発熱量が大きい高炭素鋼など一部の鋼種に対し、一次元熱伝導方程式(式(1))の一つの要素である変態発熱速度 q と変態開始温度の二つの項を過去に蓄積した十分な実績データを用いて適正化した。以下、適正化方法を簡単に記す。評価関数 J は、式(8)に示す中間温度(MTI)における予測誤差と巻取温度(CT)における予測誤差の二乗和とし、 J が最小となる変態発熱速度 q と変態開始温度を鋼種ごとに決定した。

$$J = (MTI_p - MTI_A)^2 + (CT_p - CT_A)^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 MTI_p ：MTIの予測温度、 MTI_A ：MTIの実績温度、 CT_p ：CTの予測温度、 CT_A ：CTの実績温度である。

その結果、図6に示すように、高炭素鋼では中間温度(MTI)の平均誤差が10~50℃程度改善した。

2.4.2 変態発熱を考慮したフィードバック制御の活用

一部の鋼種においては、中間温度の実績値がそれより下流の巻取りまでの間の変態率変化量(オーステナイト組織からフェライト組織やパーライト組織への変化量)に影響を及ぼし、巻取温度の制御精度の悪化を引起こす要因となっていた。この問題に対して、図7に示す中間温度(MTI)を用いたフィードバック制御が非常に有効に働き、中間温度が一定に制御されて巻取温度の制御精度の向上を実現した。

発生する変態発熱量が多い代表的な高合金鋼に対する中間温度(MTI)によるフィードバック制御の例を示す。鋼板先端部50mにおける中間温度(MTI)の誤差標準偏差は8.7℃から3.0℃に低減し(図8)、その結果、巻取温度の誤差標準偏差が15.2℃から11.2℃に改善された(図9)。

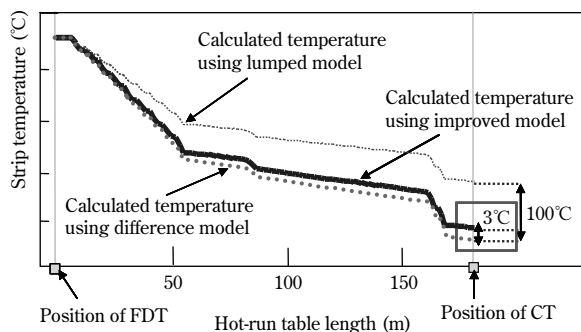


図5 温度履歴の比較
Fig. 5 Comparison of temperature histories

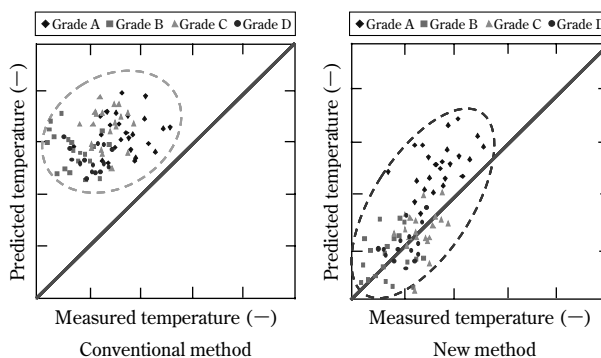


図6 中間温度(MTI)の温度予測精度
Fig. 6 Prediction accuracy of temperature models in MTI

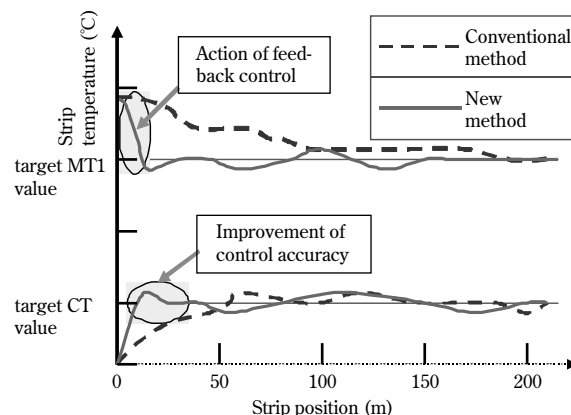


図7 中間温度(MTI)安定化による巻取温度制御精度向上模式図
Fig. 7 Schematic of improving accuracy of coiling temperature control by stabilizing MTI temperatures

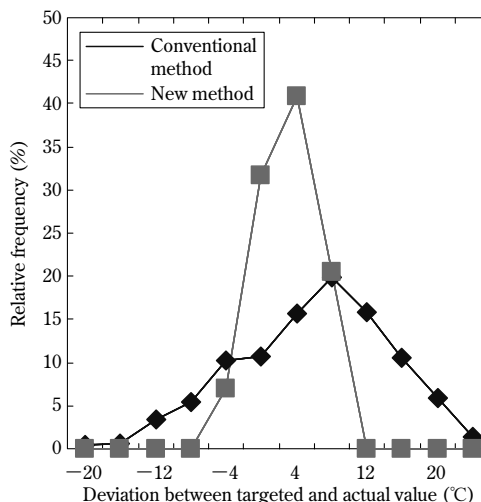


図8 鋼板先端50m部の中間温度(MTI)制御精度
Fig. 8 Accuracy of controlling MTI in strip top 50m

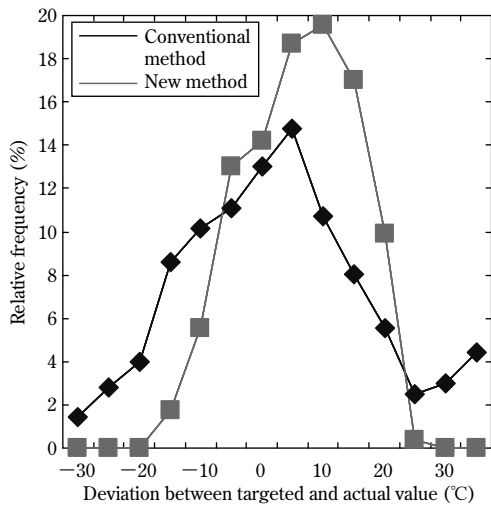


図9 鋼板先端50m部の巻取温度制御精度
Fig. 9 Accuracy of controlling CT in strip top 50m

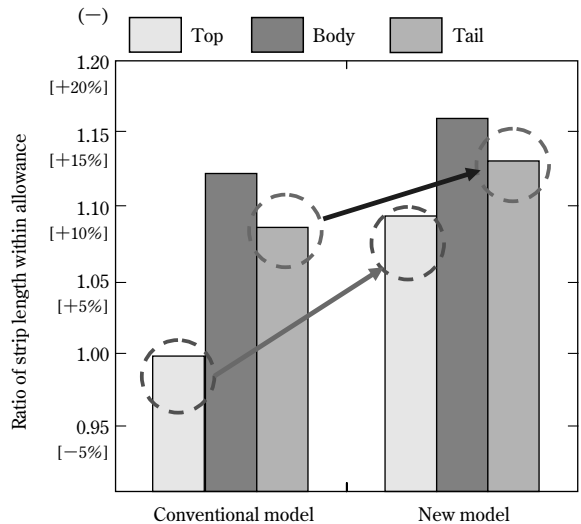


図11 巻取温度公差的中率の比較
Fig.11 Hitting ratio of coiling temperature allowance

3. 実機適用結果

図10に示すように、新しい巻取温度制御モデルを適用することによって巻取温度の誤差標準偏差が14.5°Cから9.9°Cに改善され、従来の制御モデルと比較して、誤差標準偏差が約32%低減した。

また、従来の制御モデルと今回開発した新しい制御モデルの鋼板の先端部、中間部、後端部それぞれに対する巻取温度の公差的中率を図11に示す(図11では、従来制御モデルの先端部の公差的中率の値を1として規格化した)。図11より、とくに先端部および後端部に対する公差的中率が大幅に改善されていることがわかる。

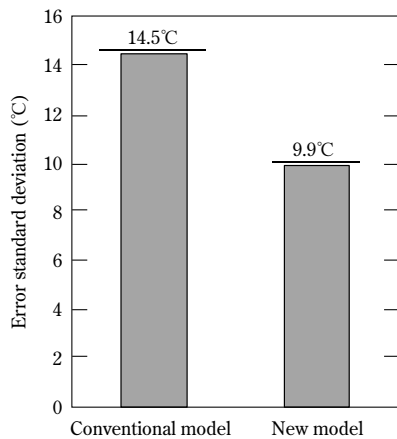


図10 巻取温度誤差標準偏差の比較
Fig.10 Comparison of standard deviation of coiling temperature errors

むすび＝加古川製鉄所熱延工場においては、新しい巻取温度制御システムが2006年12月に稼動を始めた。巻取温度の誤差標準偏差が約32%低減し、高付加価値鋼板を中心に鋼板の品質や歩留り、生産性の向上に大きく貢献した。

参考文献

- 1) 井上尚和ほか：熱延製品の冷却制御技術，R&D 神戸製鋼技報，Vol.42, No.4 (1992)，pp.75-78.
- 2) 橘 久好ほか：熱延ランアウトテーブルにおける冷却制御技術，CAMP-ISIJ, Vol.22, (2009)，pp.374-377.
- 3) McNutt P. et al. : 2006 STEEL ROLLING Proceedings, Session4, Run-out-table cooling models for high cooling rate products.
- 4) Luinburg A. W. et al. : 44th MWSP Conference Proceedings, Successful implementation of a physical on-line model for coiling temperature control in CORUS' Hot Strip Mill #2 at IJmuiden, Vol.XL, (2002).
- 5) Kazuhiro YAHIRO et al. : Development of Coiling Temperature Control System on Hot Strip Mill, KAWASAKI STEEL TECHNICAL REPORT, No.24, (1991)，pp.32-40.