熱延冷却帯内の注水環境下における鋼板温度測定手段を用いた巻取温度制御

中 川 繁 政*・橋 久 好*

本 田 達 朗*・植 松 千 尋*

Coiling Temperature Control Using Temperature Measurement Method
for the Hot Rolled Strip in the Water Cooling BanksShigemasa NAKAGAWA*, Hisayoshi TACHIBANA*,
Tatsuro HONDA* and Chihiro UEMATSU*

In the hot strip mill, the quality of the strip greatly depends on the cooling process between the last stand in the finishing mill and the coilers. Therefore, it is important to carefully control the coiling temperature to regulate the mechanical properties of the strip. To realize high accuracy of coiling temperature, a new coiling temperature control using temperature measurement method for the hot rolled strip in the water cooling banks has been developed. The features of the new coiling temperature control are as follows: (i) New feedforward control adjusts ON/OFF switching of cooling headers according to the strip temperature measured in the water cooling banks. (ii) New feedforward control is achieved by dynamic control function. This coiling temperature control has been in operation successfully since 2008 at Kashima Steel Works and improved the accuracy of coiling temperature of high strength steel considerably.

Key Words: coiling temperature control, feedforward control, dynamic control, hot strip mill

1. 緒 言

鉄鋼製造における熱延ミルは、加熱された約 270mm 厚のスラブをロールで上下方向に圧下しながら圧延し、最終的に最小 1.2mm まで薄くした後に、ランアウトテーブル冷却装置で所定の温度（巻取温度という）まで冷却し、最終的にコイル状に巻き取る設備である。熱延ミルにおいて、ランアウトテーブルにおける冷却は、熱延鋼板の機械的特性を左右する重要な工程である。

一方、近年、地球温暖化対策として CO₂ 削減が大きな問題となっており、熱延鋼板についても、軽量化の観点から、高強度で加工性の良い高張力鋼板（ハイテン材）のニーズが増えてきている。

このようなハイテン材に対して、品質安定化の要求はますます厳しくなっており、ハイテン材の製造においても、製品特性に大きな影響を与える巻取温度制御の高精度化が強く求められている。

熱延鋼板の巻取温度制御では、一定間隔で配置される鋼板上の制御点に対する予測巻取温度が目標巻取温度と一致するように、ランアウトテーブル冷却装置の設定計算を行なう方

式が広く用いられている^{1),2)}。この制御方式は、基本的に鋼板温度の予測モデルに基づいたものである。

熱延ハイテン材の製造に際しては、巻取温度が一般材に比較して低く、巻取温度が遷移沸騰領域にあるものも多い。遷移沸騰領域での冷却は、鋼板表面での水冷熱伝達率変化が大きく^{3),4)}、予測モデルの予測精度悪化から、巻取温度の制御精度も一般材に比較すると劣る。

ハイテン材に対する巻取温度制御精度を改善するために、1) 予測モデルの精度向上を図る対策、2) 巻取温度制御偏差に基づくフィードバック制御の向上を図る対策、などが行なわれてきた。前者の対策では、水冷熱伝達率の厳密モデル化が取り組まれてきた⁵⁾。また、後者の対策では、遷移沸騰領域においても巻取温度のフィードバック制御が実機適用できるように、非バーニアバンク方式のフィードバック制御が提案されている²⁾。

しかしながら、上記の 1) の場合には、予測モデルで考慮できない外乱があった場合には、対応ができない。また、2) の方法においては、予測モデルの誤差や外乱が存在する場合にも、巻取温度の制御偏差に基づくフィードバック制御により巻取温度を目標値に制御していくことは可能であるが、鋼板の先端部分に対しては、フィードバック制御を行なうことができないので、先端部分における、温度目標値からの偏差に対しては有効でないという問題点がある。

そこで、著者らは、冷却帯内の注水環境下にある鋼板温度

* 住友金属工業株式会社総合技術研究所 鹿嶋市光 3 番地

* Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Hikari, Kashima

(Received December 1, 2009)

(Revised April 12, 2010)

Fig. 1 Layout of run-out table cooling equipment

Fig. 2 Top and bottom cooling headers

を直接測定する新しい温度測定手段（以下、ファウンテン・パイロメーター）⁶⁾を用いて、その测温情報に基づいて巻取温度をフィードフォワード制御（以下、FF制御）する方法の開発に取り組んだ。冷却途中の鋼板温度を直接測定し、鋼板温度計算モデルに取り込むことで、予測モデルの巻取温度予測誤差の影響を小さくできる。また、開発したFF制御は鋼板先端部から適用することができ、鋼板先端部における、温度目標値からの偏差の低減にも非常に有効である。

本稿では、今回開発したファウンテン・パイロメーターを用いた巻取温度制御、および、鹿島製鉄所熱延ミルにおける実機適用結果について報告する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では、まず本稿で対象とする熱延ミルのランアウトテーブル冷却設備について述べる。第3章では、従来の巻取温度制御の概要について紹介し、その問題点を述べる。第4章では、第3章の問題点を解決するための方法として、新しく開発したファウンテン・パイロメーターを用いたFF制御について述べる。第5章では、本手法の有効性を実機適用例にて示す。

なお、本稿では、目標巻取温度が550°C未満のものを低温巻取材と呼ぶこととする。

2. 対象冷却設備

Fig. 1に対象とする熱延ミルのランアウトテーブル冷却設備の概要を示す。仕上圧延機で熱間圧延された鋼板は、ランアウトテーブル冷却設備にて目標巻取温度まで冷却された後、巻取機で巻き取られる。

Fig. 2に示すように、ランアウトテーブル冷却装置は多数の冷却ヘッダーから構成され、冷却ヘッダーには制御バルブ（開閉バルブ）が取り付けられており、巻取温度制御モデルの指令によりバルブが開閉される。近接冷却が6バンク構成、遠方冷却が10バンク構成であり、各バンクは鋼板の上面側

を冷却する上バンクと下面側を冷却する下バンクからなる。

また、仕上圧延機の出口には仕上出口温度計 (FT)，近接冷却バンクと遠方冷却バンクの間に中間温度計 (IT)，巻取機前には巻取温度計 (CT) が設置されており、鋼板の全長に渡って幅方向中央部の表面温度が测温される。また、近接冷却バンク内および遠方冷却バンク内に新しく開発したファウンテン・パイロメーター FP11~14, FP21, FP22 が設置されている。なお、本稿では、FT, IT, CT, FP11~14, FP21, FP22 の記号は、温度計そのもの、あるいは、これらの温度計位置における鋼板温度を意味するものとする。また、温度計位置における鋼板温度を意味する場合、必要に応じて実績値または計算値を意味する添字を付けることとする。

3. 従来の巻取温度制御とその問題点

熱延ミルにおける巻取温度制御の目的は、巻取温度計位置での鋼板温度を全長に渡って目標温度に制御することで、所定の機械的特性を備えた鋼板を造り込むことである。巻取温度制御の基本動作は、冷却過程における鋼板温度計算モデルを用いて巻取温度を予測し、この予測巻取温度が目標巻取温度と一致するように冷却装置の設定計算を時々刻々行なうものである。

以下に、その概要を簡単に記す²⁾。

3.1 鋼板温度計算モデル

ランアウトテーブル上の冷却過程における鋼板温度は、(1)式に示す板厚方向1次元熱伝導方程式により表わされる。

$$c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで、 T : 鋼板温度, x : 板厚方向位置, t : 時間, c : 比熱, ρ : 密度, λ : 熱伝導率。

鋼板の上面, 下面における境界条件は、水冷熱流束, 対流熱流束, 輻射熱流束より以下のように与える。

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h/2} = q_{wu} + q_c + q_r \quad (2)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-h/2} = -(q_{wd} + q_c + q_r) \quad (3)$$

ここで、 h : 板厚, q_w : 水冷熱流束, q_c : 対流熱流束, q_r : 輻射熱流束, u : 上面を表わす添え字, d : 下面を表わす添え字。

(2) 式, (3) 式の水冷・対流・輻射の熱流束は、つぎのようにモデル化した。

$$q_{wu} = aW_u^b V^e \{1 - c(T_w - T_{w0})\} z_{ui} \quad (4)$$

$$q_{wd} = fW_d^g \{1 - c(T_w - T_{w0})\} z_{di} \quad (5)$$

$$q_c = H_a(T_s - T_a) \quad (6)$$

$$q_r = \sigma \epsilon \left\{ \left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (7)$$

ここで、 H_a : 対流熱伝達係数, T_s : 鋼板の表面温度, T_a : 雰囲気温度, σ : ステファン・ボルツマン定数, ϵ : 鋼板の放射率, W_u, W_d : 上面および下面の水量密度, T_w : 水温, T_{w0} :

水温基準値, V : 鋼板速度, z_{ui}, z_{di} : 上面および下面の冷却能補正係数, i : 冷却バンク番号. a, b, c, e, f, g : 係数.

なお, q_{wu}, q_{wd} は, それぞれ上面, 下面の水冷却熱流束を表わすが, 通常, これらは冷却試験結果などに基づいて決定されるもので, (4) 式や (5) 式の形式に限定されるものではない. 実際, 水冷却熱流束あるいは水冷却熱伝達率の具体的な関数形については, 各種の提案式が使用されている^{5), 7)~9)}.

鋼板温度の予測計算は, (1) 式を有限差分法にてオンラインで解くことにより行なう.

3.2 巻取温度制御の制御機能

巻取温度制御は, 鋼板がランアウトテーブル冷却装置に入る前に冷却ヘッダーの開閉をあらかじめ設定するプリセット制御と, 鋼板がランアウトテーブル冷却装置に入った後に仕上出口温度や鋼板速度などの変動に応じて冷却ヘッダーの開閉を操作するダイナミック制御から構成される.

プリセット制御は, 鋼板の先端部に対する注水冷却ヘッダーの選択を行なうもので, 主な設定計算は, 以下のとおりである.

- 1) 注水冷却ヘッダーを初期設定する
- 2) 通板速度設定から各冷却バンクの通過予測時間を計算する
- 3) 鋼板の仕上板厚, 化学成分値, 予測仕上出口温度をもとに先に記載の鋼板温度計算モデルを用いて巻取温度を予測する
- 4) 予測巻取温度と目標巻取温度の偏差に基づいて, あらかじめ定めた制御バルブ操作の優先順 (以下, バルブ操作優先順) に従い注水冷却ヘッダーを増減する
- 5) 増減された注水冷却ヘッダーの選択に基づいて, 再び鋼板の巻取温度を予測計算し, 予測巻取温度と目標巻取温度の偏差が所定範囲に収まっていなければ再度, 4), 5) を繰り返す
- 6) 最終的に決定された注水冷却ヘッダーの選択を出力する

ダイナミック制御は, 仕上出口温度の変動や鋼板速度の変動に起因する長手方向の温度変動を制御するものであり, 長手方向に一定長間隔でサンプリングしたトラッキング点 (以下, 制御点) に対して, 鋼板温度計算モデルにより巻取温度の予測を行ない, 予測巻取温度が目標巻取温度と一致するように注水冷却ヘッダーの増減を行なう.

制御点は, ダイナミック制御モデルの起動とともに仕上出口温度計直下に生成され, 鋼板の進行とともに移動するが, 制御点の位置の変化はダイナミック制御モデルにおいて時々刻々追跡される.

制御点温度計算は, 制御点が生成された時点で取り込んだ仕上出口温度実績を初期温度として, ダイナミック制御の起動ごとに制御点の位置と冷却装置の設定状況から現時点の制御点の温度 (現在計算温度) を計算する. また, 冷却装置の設定計算を行なう目的から, ランアウトテーブル上の複数の制御点が, 現在の冷却装置設定のもとで, 巻取温度計に到達する時点の温度を予測計算する (Fig. 3).

3.3 制御点に対する冷却装置設定計算

予測巻取温度と目標巻取温度に差がある場合, 予測巻取温度が目標温度に一致するために必要な冷却装置の操作設定を

Fig. 3 Prediction of coiling temperature

各制御点について算出する. 鋼板表面の熱流束は, 上下面の平均熱流束として考え, (8) 式の熱伝達係数 H を用いて表わす. なお, 表面温度 T_s についても上下面の平均値とする.

$$H(T_s - T_w) = \frac{q_{wu} + q_{wd}}{2} + q_c + q_r \quad (8)$$

現時点での冷却装置設定を基準に考え, 新たに N 個の制御バルブをバルブ操作優先順に従って ON (=バルブ開で注水) または OFF (=バルブ閉で注水停止) にする場合の冷却能力 $K(N)$ を (9) 式のように考える²⁾.

$$K(N) = \sum_{j=1}^N \frac{2H_{v(j)}}{cph} t_{s(v(j))} \quad (9)$$

ここで, $v(j)$: バルブ操作優先順に従い j 番目に操作する制御バルブの番号, $s(v(j))$: 制御バルブ $v(j)$ が属するバルブセクションの番号, $H_{v(j)}$: 制御バルブ $v(j)$ のバルブ ON 時熱伝達係数, $t_{s(v(j))}$: バルブセクション $s(v(j))$ の通過時間, である. なお, $H_{v(j)}$, $t_{s(v(j))}$ は前述の制御点温度計算で算出した値を使用する.

つぎに, 現在の冷却装置設定状況をもとにした予測巻取温度 CT_{cal} と目標巻取温度 CT_{aim} に差がある場合を考える. この場合, 予測巻取温度 CT_{cal} を目標巻取温度 CT_{aim} に一致させるのに必要な冷却能力の修正量 ΔK は,

$$\Delta K = \ln CT_{cal} - \ln CT_{aim} = \ln \left(\frac{CT_{cal}}{CT_{aim}} \right) \quad (10)$$

で表わされる. したがって, 予測巻取温度 CT_{cal} を目標巻取温度 CT_{aim} に一致させるのに必要なバルブ操作数 N は,

$$K(N) \div |\Delta K| \quad (11)$$

Fig. 4 Result of feedback control

となる条件から求める。なお、 $\Delta K > 0$ の場合、 N は ON にするバルブ操作数、 $\Delta K < 0$ の場合、 N は OFF にするバルブ操作数である。

N が決まれば、バルブ操作優先順に従い N 個のバルブを操作することで、制御点に対する冷却装置設定が求められる。

以上の機能によって、鋼板温度計算モデルが算出した予測巻取温度が目標巻取温度と一致するように冷却装置を制御する。ダイナミック制御は、この動作をランアウトテーブル上のすべての制御点に対して時々刻々実施する。

3.4 従来の巻取温度制御における問題点

巻取温度制御は、先に記したように巻取温度予測計算に基づく予測制御が基本である。この制御方式が有効に機能するには、鋼板温度計算モデルの予測精度が高いことが前提となる。

しかしながら、ハイテン材の目標巻取温度は遷移沸騰領域にあるのが一般的であり、遷移沸騰領域においては、冷却条件や表面性状あるいは鋼板形状などの要因で水冷却伝達率が大きく変動するため、巻取温度の予測精度が悪く、巻取温度が目標温度の許容管理範囲から外れること（以下、温度外れ）による歩留低下が問題となっていた。

ハイテン材などの低温巻取材の温度外れを低減するため、著者らは非バーニアバンク方式の巻取温度フィードバック制御²⁾を開発して、実機適用してきた。この方法は、巻取温度制御偏差をダイナミック制御の巻取温度目標値にフィードバックするものなので、Fig. 4 に示すように鋼板の先端部分における、温度目標値からの偏差に対しては、対応できないという問題点があった。

また、冷却過程における各種の温度外乱が発生した場合でも、冷却途中で鋼板温度を測温することができないので、温度外乱に速やかに対応することができなかった。

さらにまた、冬期の冷却水温低下時には、巻取温度の予測精度が悪化して、巻取温度制御精度が低迷し、特にハイテン材などの低温巻取材で温度外れ材の増加をもたらしていた。

以上のように、従来の巻取温度制御では、ハイテン材などの低温巻取材に対して、十分な制御精度を保証することができなかった。

Fig. 5 Fountain pyrometer

4. 冷却帯内鋼板温度計を用いた FF 制御

前章で説明したダイナミック制御は、巻取温度予測に基づいて、その予測値が目標温度と一致するように冷却装置をダイナミックに調整するものであるが、各種の外乱や物性値の誤差などが影響し、鋼板の計算温度と実績温度が一致しない場合も発生する。計算温度と実績温度の誤差が大きい場合には、そのままダイナミック制御を行なっても、実績巻取温度は目標値にならない。

そこで、注水環境下にある鋼板温度が直接測温できるファウンテン・パイロメーター⁶⁾を冷却バンクに設置するとともに、遠方冷却バンク内のファウンテン・パイロメーターを用いた FF 制御を新たに開発し、巻取温度制御精度の改善を行なった。特に、ハイテン材などの低温巻取材に対しては、歩留向上、品質安定化の観点から、巻取温度の精度改善ニーズが強くあり、今回開発した方法は、ハイテン材の精度向上に非常に有効な制御手法である。

4.1 冷却帯内の注水環境下における鋼板温度測定手段

冷却バンク内の注水環境下においても鋼板温度が高精度に測温可能な温度計ファウンテン・パイロメーターが本田らにより開発された。Fig. 5 にファウンテン・パイロメーターの構造を、Table 1 にその主仕様を示す。

冷却装置内では、大量の冷却水の水滴などにより熱放射光が散乱、吸収されるため、通常の放射温度計では鋼板の熱放射光を安定的に検出することが難しい。そこで、バージ水により熱放射光の光路を安定化させ、錯乱する熱放射光を捉えるとともに、水の透過率の高い波長の熱放射光を選択的に検出することで、熱放射光の吸収に対処している。

ファウンテン・パイロメーターには近接バンク用の FP1 と遠方バンク用の FP2 の 2 種類あり、FP1 の検出波長は $\sim 0.83\mu\text{m}$ 、FP2 の検出波長は $1.1\mu\text{m}$ である。FP1 は近接バンク内に 4 ヶ所 (FP11, FP12, FP13, FP14)、FP2 は遠方バンク内の 2 ヶ所 (FP21, FP22) に設置している。

ファウンテン・パイロメーターによる温度測定状況の一例を Fig. 6 に示す。従来、注水環境下にある冷却バンク内での鋼板温度を直接知ることはできなかったが、ファウンテン・パイロメーターにより鋼板温度が直接測温できるようになり、

Table 1 Specification of fountain pyrometers

Type	FP1	FP2
Wavelength	$\sim 0.83\mu\text{m}$	$1.1\mu\text{m}$
Temperature	$500 \sim 1200^\circ\text{C}$	$360 \sim 800^\circ\text{C}$
Responsiveness	10ms	20ms
Setting position	before IT	between IT and CT
Notation	FP11,FP12 FP13,FP14	FP21 FP22

Fig. 6 Strip temperatures measured by fountain pyrometers and comparison between calculated and measured temperatures

仕上出口温度変化・圧延速度変化・冷却水量増減などに応じて、冷却過程の鋼板温度がどのように変化するのが直接的に把握できるようになった。

近接冷却バンクおよび遠方冷却バンクにファウンテン・パイロメーターを複数箇所設置することにより、従来に比較して、温度実績データが多点的に渡って利用できるため、鋼板温度計算モデルのパラメータ調整も、より高精度に行なえるようになった。

Fig. 6の右側に、3.1節で説明した鋼板温度計算モデルを用い、仕上出口温度実績値を初期温度として計算した鋼板温度の温度降下計算結果および温度測定結果 (FT, FP11~FP14, IT, FP21, FP22, CT) の対比を示す。本例では、先端部、中央部、尾端部とも、鋼板温度計算値が、冷却過程の各位置における温度計測定値とさきわめてよく一致していることがわかる。

Fig. 6の例では、鋼板温度計算モデルによる巻取温度予測の精度が高いので、従来の巻取温度制御でも問題はないが、低温巻取材では、水冷熱流束が急変する遷移沸騰領域で冷却を行なうことになるため、鋼板温度計算モデルの温度予測精

Fig. 7 Feedforward control using fountain pyrometers **Fig. 8** Comparison of the accuracy of prediction of CT

度が悪化し、結果的に従来の巻取温度制御では、低温巻取材の制御精度が低迷していた。特に、目標巻取温度の低いハイテン材では顕著であり、ハイテン材の温度外れ低減が製造現場の大きな課題であった。そこで、特にハイテン材での温度外れを低減するために、ファウンテン・パイロメーターによる測温結果を活用する新しい制御方法を考案した。

4.2 冷却帯内鋼板温度計を用いたFF制御方法

本制御方法は、前章で説明したダイナミック制御機能に、ファウンテン・パイロメーターの測温結果をリアルタイムに取り込み、ファウンテン・パイロメーターによるFF制御を多段階に適用して、巻取温度制御精度の向上を図るものである。

Fig. 7(a)に従来のIT-CT間のダイナミック制御の概念図を示す。この場合、IT-CT間では、従来型の放射温度計による実績中間温度を用いて、巻取温度を予測し、この予測巻取温度が目標巻取温度と一致するように冷却装置の設定計算が行なわれる。しかしながら、ダイナミック制御は制御区間出側の温度予測値が目標に一致するように冷却装置を制御する構造であるため、巻取温度の予測誤差の分だけ制御偏差が生じることになる。

巻取温度が高い一般材では温度予測誤差は小さいので、従来の制御方法でも問題はないが、低温巻取材では温度予測誤差が大きく、従来方法では限界があった。

そこで、Fig. 7(b)に示すように、IT-CT間のファウンテン・パイロメーターの測温結果を取り込み、FP21-CT間およびFP22-CT間でファウンテン・パイロメーターの測温結果に基づくFF制御を2段階に渡って実施するようにした。

ファウンテン・パイロメーターの測温結果に基づくFF制御では、ファウンテン・パイロメーターの測定値を起点に巻取温度を予測し直すため、巻取温度の予測精度が向上する（なお、実際にはノイズ対策もあり、後述するように測定値と計算値との平滑処理した値を起点としている）。そして、この予測値が目標巻取温度に近づくようにFF制御区間内の冷却装置の調整を行なう。

Fig. 9 Schematic diagram of feedforward control using fountain pyrometers

Fig. 10 Schematic diagram of smoothing process for IT, FP21 and FP22

Fig. 8 に、IT 実績温度を起点に計算した巻取温度予測精度 (Case1) と、FP21 実績温度を起点に計算した巻取温度予測精度 (Case2) の比較を示す。予測誤差の標準偏差 σ に関して、Case1 の場合は 13.6°C 、Case2 の場合は 8.8°C で、Case2 では予測温度のばらつきが Case1 に比較して約 35% 小さくなっている。これより、巻取温度の予測精度を上げるには、遠方バンク内で鋼板温度を直接測温することがきわめて有効であることがわかる。

実機の制御機能構成を Fig. 9 に示す。ファウンテン・パイロメーター設置により、FP21-CT 間および FP22-CT 間に新たに制御機能を構築し、以下では、この制御機能をファウンテン・パイロメーターを用いた FF 制御と呼ぶ。

ファウンテン・パイロメーターを用いた FF 制御は、ファウンテン・パイロメーターの測温値を起点に制御区間内の鋼板温度予測を実施しているが、実際には、測定ノイズなども考慮し、以下の平滑処理を行なっている (Fig. 10)。

$$FP21'_{cal} = G_{21}FP21_{act} + (1 - G_{21})FP21_{cal} \quad (12)$$

$$FP22'_{cal} = G_{22}FP22_{act} + (1 - G_{22})FP22_{cal} \quad (13)$$

ファウンテン・パイロメーターを用いた FF 制御では、平滑処理した値 $FP21'_{cal}$ 、 $FP22'_{cal}$ を起点として、冷却装置の設定計算を行なう。実機適用している平滑係数を Table 2 に示す。鋼板温度が低下するに従って鋼板表面に起因する局所的で高周波の温度変動が現われやすくなり、下流側の平滑係数を小さくしている。なお、中間温度計測温値にも同様の処理を行なっている。

ファウンテン・パイロメーターを用いた FF 制御によるバルブ ON/OFF 設定について説明する。

Table 2 Smoothing gain

Smoothing gain	Value
G_{21}	0.3 ~ 0.5
G_{22}	0.2 ~ 0.4

ここでは、FP21 を起点に計算した巻取温度予測値 CT_{cal} が目標巻取温度 CT_{aim} の許容範囲よりも外れた場合を想定し、 CT_{cal} が CT_{aim} と一致するために必要な冷却装置のバルブ操作数 N_{FF21} の算出方法を説明する。なお、ここでは、制御点 P の時刻 t における起点 X からの巻取温度予測値を $CT_{cal}(P; t; X)$ と表わす。また、制御点 P は FP21-FP22 間にあるとし、目標温度の許容範囲を $\varepsilon (= 3^{\circ}\text{C})$ とする。

(A1) $CT_{cal}(P; t; FP21) \geq CT_{aim} + \varepsilon$ の場合

OFF から ON にするバルブ操作数 N_{FF21} を次式から求める。

$$N_{FF21} = \arg \min_N \left| \sum_{j=1}^N \frac{2H_{v(j)}}{cph} t_{s(v(j))} - \ln \frac{CT_{cal}(P; t; FP21)}{CT_{aim}} \right| \quad (14)$$

(A2) $CT_{cal}(P; t; FP21) \leq CT_{aim} - \varepsilon$ の場合

ON から OFF にするバルブ操作数 N_{FF21} を次式から求める。

$$N_{FF21} = \arg \min_N \left| \sum_{j=1}^N \frac{2H_{v(j)}}{cph} t_{s(v(j))} - \ln \frac{CT_{aim}}{CT_{cal}(P; t; FP21)} \right| \quad (15)$$

(A3) $|CT_{cal}(P; t; FP21) - CT_{aim}| < \varepsilon$ の場合

$$N_{FF21} = 0 \quad (16)$$

上記 (A1) ~ (A3) にて求めたバルブ操作数 N_{FF21} 個だけ、バルブ操作優先順に従って制御バルブを操作する。

FP22 を用いた FF 制御の場合も同様に、FP22-CT 間にある制御点 P に対して、バルブ操作数 N_{FF22} を以下のように求める。

(B1) $CT_{cal}(P; t; FP22) \geq CT_{aim} + \varepsilon$ の場合

OFF から ON にするバルブ操作数 N_{FF22} を次式から求める。

$$N_{FF22} = \arg \min_N \left| \sum_{j=1}^N \frac{2H_{v(j)}}{cph} t_{s(v(j))} - \ln \frac{CT_{cal}(P; t; FP22)}{CT_{aim}} \right| \quad (17)$$

(B2) $CT_{cal}(P; t; FP22) \leq CT_{aim} - \varepsilon$ の場合

ON から OFF にするバルブ操作数 N_{FF22} を次式から求める。

$$N_{FF22} = \arg \min_N \left| \sum_{j=1}^N \frac{2H_{v(j)}}{cph} t_{s(v(j))} - \ln \frac{CT_{aim}}{CT_{cal}(P; t; FP22)} \right| \quad (18)$$

(B3) $|CT_{cal}(P; t; FP22) - CT_{aim}| < \varepsilon$ の場合

Fig. 11 Result of new feedforward control using fountain pyrometers (In the case of temperature disturbance)

$$N_{FF22} = 0 \quad (19)$$

上記 (B1) ~ (B3) にて求めたバルブ操作数 N_{FF22} 個だけ、バルブ操作優先順に従って制御バルブを操作する。

上記の説明では、特定の制御点 P について記したが、実際にはランアウトテーブル上には複数の制御点 P_k が存在するため、それぞれの制御点に対するバルブ操作指令を編集処理して、バルブコントローラに指令を送信している²⁾。

5. 実機適用結果

5.1 制御実施例

実機制御例を Fig. 11 に示す。この例は、板厚 4.26mm で目標巻取温度が 450°C の材料に対して、中間温度計 (IT) 通過後に温度外乱が発生した例で、鋼板の先端部分から鋼板全長の約 1/7 から約 1/4 にかけて約 30°C の急激な温度低下が FP21 にて検出されたものである。この急激な温度変化に対して、FP21 を用いた FF 制御 (FP21 を起点に計算した巻取温度予測値が目標温度の許容範囲に入るようにバルブ操作数を算出) が働き、結果的に FP21 ~ CT 間の冷却バンクの冷却水量が FF 制御により約 600 m³/hr 減ぜられたことで、外乱による温度変動が CT では抑制されている。なお、巻取温度の制御精度は、実績巻取温度が目標巻取温度に対して ±20°C 以内に入った鋼板の長さの比率 (以下、巻取温度 ±20°C 長さ適中率) で表わし、本例の巻取温度 ±20°C 長さ適中率は 100% である。

比較として、FF 制御を行なわなかった場合 (従来制御) の例 (板厚 4.26mm, 目標巻取温度 450°C) を Fig. 12 に示す。従来制御では、FF 制御を行わないので、FP21 で検出された温度変動がそのまま CT の温度変動となっている。

また、Fig. 13 は板厚 5.91mm, 目標巻取温度 520°C で圧延速度が一定の場合の実機制御例である。本例は、加速圧延による水量変化がなく、FF 制御による冷却水量変化状況がわかりやすい例である。なお、FP21, FP22 の平滑係数は、

Fig. 12 Result of conventional control (In the case of temperature disturbance)

それぞれ $G_{21}=0.5, G_{22}=0.2$ としている。

FT-IT 間の冷却水量は鋼板の全長に渡って変化がないが、これは近接冷却バンクのバルブ操作優先順が低く設定されているためである。冷却水量が一定なので、実績中間温度は実績仕上出口温度と同様の変動を示している。

また、IT-FP21 間の冷却水量については、実績中間温度の先端部および尾端部における温度変動に対応した操作が行なわれている。この際、鋼板温度予測計算モデルによる FP21 位置における鋼板温度 (図中の Calculated FP21) は、鋼板の先端から尾端にかけて概ね一定となるように予測計算がなされている。しかしながら、実際に FP21 で測温された鋼板温度 (図中の Actual FP21) は、鋼板温度予測計算モデルで予測された温度 (図中の Calculated FP21) より、中央部の一部を除いて約 30~40°C 高い状況にあり、このため FP21 を用いた FF 制御により、FT21 ~ CT 間の冷却水量の調整が行なわれ、実績巻取温度がほぼ全長に渡って目標値に制御されていることがわかる (巻取温度 ±20°C 長さ適中率は 98.8%)。

FF 制御を行なわなかった場合の冷却水量をシミュレーション計算で求めた結果を図中に併記しているが、両者の差をみれば、FP21 による FF 制御により、先端部 ~ 100m 位置の間および 200m 位置 ~ 尾端部の間では FF 動作で約 2 倍の冷却水量に修正することで、巻取温度を目標温度の 520°C に制御できていることがわかる。

なお、本例において IT がほぼ一定であるにもかかわらず、FP21 で温度変動が出ているのは、多様な添加元素を含む鋼種にみられる相変態による発熱の影響などが推定原因として考えられる。

以上のように、注水環境下にある鋼板温度をファウンテン・パイロメーターで直接測温し、提案手法による FF 制御を行えば、外乱などによる温度変化にも即応でき、また、鋼板先端部における、温度目標値からの偏差の低減にも非常に効果があることを実機適用結果にて確認した。

Fig. 13 Result of new feedforward control using fountain pyrometers (Comparison with conventional control)

Table 3 Improvement of the accuracy of coiling temperature by developed control

Hot coils	Improved percentage of strip length within $\pm 20^{\circ}\text{C}$
High strength 440MPa steel	5.8%
590MPa	9.7%
Lower temperature coiling steel	6.4%

5.2 制御精度

ファウンテン・パイロメーターを用いたFF制御は、ハイテン材を中心とした目標巻取温度 550°C 未満の低温巻取材を対象に重点的に適用している。

Table 3 に、ファウンテン・パイロメーターを用いたFF制御適用による巻取温度制御の精度改善状況を示す。数値は、対象とする材料における、新制御の導入前後における巻取温度 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 長さ適中率の平均値の差である。ファウンテン・パイロメーターを用いたFF制御の導入により、440MPa 級ハイテン材の巻取温度 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 長さ適中率は 5.8% 向上し、590MPa 級ハイテン材については 9.8% 向上し、また低温巻取材全体では 6.4% 向上した。従来、590MPa 級ハイテン材については特に制御精度が悪く、温度外れによる歩留低下が問題となっていたが、新制御により一般材と同等の制御精度を達成し、歩留改善に寄与した。

また、従来は冬期の水温低下時に巻取温度予測精度が低下して制御精度が大幅に悪化していたが、ファウンテン・パイロメーターを用いたFF制御の導入後は、水温低下の状況下においても冷却途中で鋼板温度を直接測温した結果に基づき注水冷却ヘッダーのFF調整が行なえるようになり、Fig. 14 に示すように冬期の水温低下時においても制御精度が高精度に維持できるようになった。

6. 結 言

本稿では、冷却バンク内の注水環境下にて鋼板温度を直接

Fig. 14 Trend graph of accuracy of CT and water temperature (590MPa High strength steel)

測温可能なファウンテン・パイロメーターを用いた巻取温度制御について報告した。冷却途中で鋼板温度を直接測温し、この測温値を用いて温度予測計算を行なうことで、より高精度な巻取温度予測が可能となった。また、ファウンテン・パイロメーターの測温値に基づいて、注水冷却ヘッダー数を調節するFF制御手法を開発した。従来、鋼板先端部における、温度目標値からの偏差を低減する有効な方法がなかったが、本手法は先端部に対しても有効であり、また、温度外乱に対しても即応できる利点を有する。開発した制御は、2008 年より鹿島製鉄所熱延ミルで実機適用を開始し、品質・歩留面において大きな成果を上げている。

参 考 文 献

- 1) 高橋亮一：鉄鋼業における制御，コロナ社（2002）
- 2) 中川，橋：ホットストリップミルにおける鋼板の高精度ダイナミック冷却履歴制御，計測自動制御学会論文集，**45-4**，233/240（2009）
- 3) 今成，藤山：熱間薄板圧延における巻取り温度制御，電学論D，**125-12**，1105/1112（2005）
- 4) 成田，加藤，秋山，大和田，見崎，寺本：緩冷却を用いた高精度巻取温度制御，CAMP-ISIJ，**7**，431/434（1994）
- 5) 三原，菊地，井出，山本：熱間圧延における巻取温度制御技術，電気学会金属産業研究会予稿集，**97-11**，17/21（1997）
- 6) T. Honda, S. Nakagawa, C. Uematsu, H. Tachibana, Y. Buei and K. Sakagami: Newly Developed Fountain Pyrometer for a Running Hot Strip in the Cooling Banks of a Hot Strip Mill, ICCAS-SICE2009 Proceedings CD-ROM, 2774/2777, Fukuoka (2009)
- 7) 杉山，上野，若狭，土岐，赤瀬：鋼板水冷工程の熱伝達係数推定法，計測自動制御学会論文集，**43-3**，234/238（2007）
- 8) 日本鉄鋼協会編：鋼材の強制冷却，日本鉄鋼協会（1978）
- 9) 笠松，時高，渡辺，小田桐：熱延巻取温度制御システムの改善，CAMP-ISIJ，**7**，427/430（1994）

[著者紹介]

中 川 繁 政 (正会員)

1985年京都大学工学部数理工学科卒業。87年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年住友金属工業(株)に入社。鉄鋼圧延プロセスの制御技術の研究開発に従事。92年、2008年計測自動制御学会技術賞を受賞。日本鉄鋼協会の会員。

橘 久 好

1983年尼崎市立尼崎高等学校普通科卒業。同年住友金属工業(株)に入社。90年産業技術短期大学電気工学科卒業。鉄鋼圧延プロセスの制御技術の研究開発に従事。2008年計測自動制御学会産業応用部門技術賞を受賞。日本鉄鋼協会の会員。

本 田 達 朗 (正会員)

1983年神戸大学工学部計測工学科卒業。85年神戸大学大学院工学研究科計測工学専攻修士課程修了。同年住友金属工業(株)に入社。鉄鋼におけるプロセス計測技術の研究開発に従事。2005年日本鉄鋼協会計測・制御・システム研究賞を受賞。2009年日本鉄鋼協会第142回制御技術部会最優秀講演賞を受賞。日本鉄鋼協会の会員。

植 松 千 尋

1975年愛媛県立松山工業高等学校卒業。同年住友金属工業(株)に入社。88年産業技術短期大学電気工学科卒業。温度計測技術の研究開発に従事。日本鉄鋼協会の会員。