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

中 川 繁 政*・橋 久 好*

Highly Accurate Dynamic Control of Strip Cooling Pattern on Run-out Table in Hot Strip Mill

Shigemasa NAKAGAWA* and Hisayoshi TACHIBANA*

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 temperature in the cooling process to regulate the quality of the steel. To realize high temperature accuracy, a new control system for run-out table cooling has been developed. The features of the new control system are as follows: (i) Newly developed feedback control using no vernier banks, which is constructed by using the dynamic control function. (ii) Newly developed dynamic control of cooling pattern, which achieves aimed cooling process during acceleration/deceleration of the strip on the run-out table. This system has been in operation successfully since July 2004 at Kashima Steel Works and improved the accuracy of coiling temperature considerably.

Key Words: hot strip mill, dynamic control, cooling pattern, coiling temperature control, feedback control

1. 緒 言

鉄鋼製造におけるホットストリップミルは、加熱された約 270 mm 厚のスラブと呼ばれる鋼片を圧延ロールで上下に挟んで圧延し、最終的に最小 1.2 mm まで薄くした後に、冷却装置で所定の温度まで冷却し、最後にコイル状に巻き取る設備である。ホットストリップミルにおいて、仕上圧延機出口に設置されているランアウトテーブル (ROT: Run-out Table) における鋼板の冷却は、製品の機械特性を左右する非常に重要な工程である。また、鉄鋼製品の品質に対する顧客要求は、ますます厳しくなっており、鋼板の高品質安定製造、歩留向上の観点から、ホットストリップミルにおける鋼板冷却制御の高精度化が強く求められている。

鋼板の品質を安定させるには、巻取温度を目標温度に高精度に制御することが必要であり、制御精度向上のため各種の取り組みがなされてきた。鋼板冷却制御は、鋼板の温度予測に基づくフィードフォワード制御がベースとなっており¹⁾、ROT 冷却過程における鋼板温度の計算精度を高めるため、冷却過程における熱伝達係数の推定精度を改善する方法が従来より提案されている。たとえば、熱伝達係数の推定に、カルマンフィルタの適用²⁾やニューラルネットワークの適用³⁾が提案されている。また、プレートミルにおける厚鋼板の場合ではあるが、シミュレーテッドアニーリング法を用いる熱伝達係数推定方法も提案されている⁴⁾。

一方、実際のプラント操業においては、鋼板温度計算値と鋼板温度測定値との間の誤差の発生は不可避であるため、実績巻取温度が目標巻取温度に一致するようにフィードバック制御が併せて実施される。このフィードバック制御には、巻取温度計にできるだけ近接した冷却バンクをフィードバック専用の冷却バンク (バーニアバンクと称される) として使用する方法が通常行なわれている^{5)~7)}。

しかしながら、バーニアバンクを用いたフィードバック制御は、ROT 冷却設備の終端の冷却バンクで水冷を行なうため、特に目標巻取温度が遷移沸騰領域にある場合には、安定した冷却が難しく、実機適用が難しいという課題があった。成田ら⁸⁾は、遷移沸騰領域での水冷に関し、熱伝達係数の不安定な領域で巻取温度制御を行なおうとしたとき、見かけ上の制御ゲインが増大し、実質的には制御不安定となり、巻取温度が大きく変動すると指摘している。また、この方式では、巻取温度の制御偏差を解消するアクチュエータ能力を確保するため、あらかじめ冷却バンクの半数を注水状態にしておく必要がある。このため、低温巻取材では、最も冷却不安定なところで水冷を行なうことになり、鋼板先端部の温度外れが大きくなりやすいという問題点もある。

そこで、バーニアバンクを設けずに、鋼板冷却のダイナミック制御を活用して、ROT 冷却装置全体でフィードバック制御を行なう方法を開発した (以下、これを非バーニアバンク方式と称する)。本方法は、ダイナミック制御において、冷却制御モデルが狙う目標値を、巻取温度の制御偏差に基づいて修正する点に特徴がある。

また、加工性と強度の両立など、より優れた機械特性をもった鋼板へのニーズが高まっており、鋼板製造に際しても、ROT

* 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 15, 2008)

(Revised March 9, 2009)

Fig. 1 Layout of run-out table in Kashima hot strip mill

上の温度降下履歴を精密に制御することが、近年ますます求められるようになってきている。温度降下履歴を制御する1つの方法として、ROT上の中間温度に対する目標値を設定し、中間温度計以降での空冷時間および巻取温度を制御する方法がある⁶⁾。この方法では、鋼板速度が変化すると中間温度計位置までの到達時間が変化することになり、金属組織に与える影響の大きい変態終了までの時間軸上の温度降下履歴を一定にするには、鋼板速度を一定に保つなどの操業上の制約がある。

そこで、鋼板速度の大幅な加減速や仕上圧延機出側での冷却開始温度の変動に対しても、水冷停止温度、中間空冷時間が一定に保たれ、かつ、巻取温度も高精度に制御できるダイナミック冷却履歴制御を開発した。

本稿では、鹿島製鉄所のホットストリップミル向けに開発した鋼板冷却のダイナミック制御と、その制御機能を活用した非バーニアバンク方式の巻取温度フィードバック制御およびダイナミック冷却履歴制御について報告する。

2. ホットストリップミルの鋼板冷却設備

Fig. 1に鹿島製鉄所のホットストリップミルの仕上圧延機から巻取機までの設備概略を示す。仕上圧延機で熱間圧延された鋼板は、多数の冷却装置から構成されるROT冷却設備にて目標温度まで冷却された後、巻取機で巻き取られる。

冷却装置は多数の冷却ヘッダーから構成されるが、冷却ヘッダーには制御バルブ（ON/OFFバルブ）が取り付けられており、プロセス制御用計算機の指令によりこのバルブを開閉操作することができる。なお、バルブは全部で348個設置されており、ON（注水）/OFF（無注水）動作のみ可能で、流量の調整はできない。また、制御バルブに対応させて、ROT上の区間を133個のバルブセクションに分割している。

また、1つの給水配管から冷却水を供給される冷却ヘッダー群をバンクと呼ぶ構成単位で表わす。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。

各冷却バンクへの冷却水の供給は、近接冷却バンクは給水ポンプから直接供給され、遠方冷却バンクについては高架水槽を経由して供給される。近接冷却バンクの最大冷却水量は約13000 m³/h、遠方冷却バンクは約16000 m³/hであり、全体では約29000 m³/hである。

また、仕上圧延機の出口には仕上出口温度計（FT）、ROT冷却設備の途中に中間温度計（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

Fig. 2 Boundary condition of strip surface

の上面温度を測定することができる。

3. 冷却過程における鋼板温度計算モデル

ROT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⁶⁾。

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

ここで、 T : 鋼板温度 (°C), x : 板厚方向位置 (m), t : 時間 (s), c : 比熱 (J/kg°C), ρ : 密度 (kg/m³), λ : 熱伝導率 (W/m°C)。

鋼板の上面および下面における境界条件は、以下のように与えられる。

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

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

ここで、 h : 板厚 (m), q_{wu}, q_{wd} : 上面および下面の水冷熱流束 (W/m²), q_c : 対流熱流束 (W/m²), q_r : 輻射熱流束 (W/m²)。

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

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

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

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

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

ここで、 H_a : 対流熱伝達係数 (W/m²°C), T_s : 鋼板表面温度 (°C), T_a : 雰囲気温度 (°C), σ : ステファンボルツマン定数, ϵ : 放射率 (-), W_u, W_d : 上面および下面の水量密度 (m³/m²s), T_w : 冷却水温 (°C), V : 鋼板速度 (m/s), 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, $a \sim g$: 係数。

なお、熱流束の算出に用いるパラメータは、鋼種・鋼板寸法・温度条件などにより冷却特性が異なるため、数十種類のパラメータ群を用意しておき、条件に応じて設定する。

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。なお、鋼板の比熱、熱伝導率につ

Fig. 3 Comparison between calculated and measured temperatures ($N = 334$, strip thickness: 3~5 mm)

いては、鋼種に対応した物性値テーブルを用意しておき、温度に応じてこれを参照する。

また、ROT上の鋼板温度変化の予測を行なうためには、鋼板温度計算モデルに対して、個別の境界条件を与える区間（以下、ゾーンと記す）を設定する必要がある。温度計算精度を上げるためには、ゾーン長をできるだけ短縮するほうが望ましいが、プロセス制御用計算機の演算負荷や冷却バンクの構成を勘案し、ROT全体を46ゾーンに分割した。

上記の鋼板温度計算モデルを用い、仕上出口温度計実績値を初期温度として計算した中間温度計算値と巻取温度計算値の計算精度の一例をFig. 3に示す。中間温度の計算精度は $\sigma = 7.2^\circ\text{C}$ 、巻取温度の計算精度は $\sigma = 10.1^\circ\text{C}$ であり、広範囲に渡り高精度な温度計算が可能である。なお、従来はプロセス制御用計算機の演算能力に限界があったため、オンライン制御中に有限差分法を用いてリアルタイムに解を求めることは困難であり、上下面対称などの仮定を設けた上で、近似的な温度予測用の数式モデルを用いていた⁶⁾。

4. 鋼板冷却のダイナミック制御

ホットストリップミルにおける鋼板冷却制御の目的は、巻取温度計位置で鋼板長手方向の温度を目標温度に制御することで、所定の機械特性を備えた鋼板を造り込むことである。鋼板冷却制御の基本的な動作は、前章の鋼板温度計算モデルを用いて鋼板の巻取温度を予測し、この予測温度が目標温度と一致するように冷却装置を操作するものである。

仕上圧延機で圧延された鋼板は、加熱炉内での焼きむらに起因するスキッドマークなど長手方向温度変動をもち、圧延速度の加減速を伴いながら高速でROTを通過するが、操作する冷却装置は広範囲（約170m）に分布しているため、巻取温度の制御には鋼板と冷却装置の位置関係を正確に把握し、各時点の状況に適した冷却装置の設定を時々刻々行なうことが求められる。このため、鋼板上に複数の仮想的な制御点を設け、制御点の位置を正確にトラッキングしつつ、各制御点の温度予測計算を行ない、この結果に基づき冷却装置の設定を行なう。この制御方法は冷却装置の設定を連続的に行なう

Fig. 4 Tracking of sampling points

Fig. 5 Prediction of coiling temperature

ことから、ダイナミック制御と呼んでいる（注1）。

4.1 制御点トラッキング

ダイナミック制御では、鋼板を等間隔に分割し、各部位に仮想的な制御点を設ける。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、各制御点の生成および位置の変化を追跡するのが、制御点トラッキングの役割である（Fig. 4）。なお、制御点の間隔は一定長で、鋼板の最高速度に応じて約4m～16mで設定している。

4.2 制御点温度計算

制御点の温度計算は、制御点が生成されたタイミングで取り込んだ仕上出口温度実績値を初期温度として、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、ROT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鋼板温度を予測計算する（Fig. 5）。

4.3 制御点に対する冷却装置設定計算

制御点が巻取温度計に到達する時点の予測温度から冷却装置設定計算を行なう方法について説明する。この設定計算は、演算回数が多いため、以下の簡略式を用いて演算を行なう。

まず、(4)～(7)式より上下面の平均熱流束を(8)式のように熱伝達係数 H で表わし、また表面温度 T_s についても上下面の平均値とする。

（注1）これに対し、冷却装置の初期設定を行なう制御をプリセット制御と呼ぶ。

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

また、厚み方向温度分布を無視して鋼板の初期温度を T_0 とすると、時間 t 後の厚み方向平均温度 T_m は (9) 式のように表わされる。

$$T_m = \exp\left(-\frac{2H}{cph}t\right)(T_0 - T_w) + T_w \quad (9)$$

これより、

$$\ln \frac{T_m - T_w}{T_0 - T_w} = -\frac{2H}{cph}t \quad (10)$$

となる。ここで、

$$\ln \frac{T_m - T_w}{T_0 - T_w} \approx \ln \frac{T_m}{T_0} \quad (11)$$

と近似すれば、つぎの式を得る。

$$\ln T_0 - \ln T_m = \frac{2H}{cph}t \quad (12)$$

(12) 式の右辺の $(2H/cph)t$ は、時間 t 間で鋼板温度を T_0 から T_m まで冷却するのに必要な冷却能力を表わしている。

そこで、現在の冷却装置設定を基準に考え、そこから新たに N 個の制御バルブをバルブ操作優先順に従って ON または OFF にする場合の冷却能力 $K(N)$ をつぎのように考える。

$$K(N) = \sum_{j=1}^N \frac{2H_{v(j)}^*}{cph} t_{s(v(j))}^* \quad (13)$$

ここで、 $v(j)$: バルブ操作優先順に従ってこの後 j 番目に操作するバルブ番号、 $s(v(j))$: $v(j)$ が属するバルブセクション番号、 $H_{v(j)}^*$: $v(j)$ 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。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。

つぎに、現在の冷却装置設定状況 (バルブ操作優先順に従って ON になっている制御バルブ数を $P(\geq 0)$ とする) をもとにした巻取温度予測値 CT_{cal} と巻取温度目標値 CT_{aim} (モデル目標値: ダイナミック制御にて制御モデルが狙う巻取温度の目標値のこと) に差がある場合を考える。この場合、巻取温度予測値 CT_{cal} を巻取温度目標値 CT_{aim} に一致させるために必要な冷却能力の修正量 ΔK は、

$$\Delta K = \ln CT_{cal} - \ln CT_{aim} \quad (14)$$

で表わされる。したがって、巻取温度予測値 CT_{cal} を巻取温度目標値 CT_{aim} に一致させるのに必要な制御バルブ操作数 N は、 $|\Delta K| \div K(N)$ 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。なお、この設定計算は簡略式による誤差があるため、巻取温度の予測値と目標値の差が十分小さくなるまで、 $P \leftarrow P \pm N$ として、冷却装置設定計算と巻取温度予測計算を繰り返す。

Fig. 6 Schematic diagram of dynamic control model

Fig. 7 Conventional feedback control

4.4 機能構成

ダイナミック制御は、Fig. 6 に示すように、制御点トラッキング機能、各制御点の温度計算機能、冷却装置設定機能から構成される。冷却装置設定機能は、各制御点の冷却装置設定を、冷却装置ごとの設定値に平滑処理するとともに、バルブの応答遅れ補償を行なうものである。

制御モデルの基本的な動作は、巻取温度計算値が目標温度と一致するように冷却装置を操作することであるが、ダイナミック制御モデルはこの動作を鋼板上のすべての制御点に対して時々刻々実施する。

5. 巻取温度フィードバック制御

前述のダイナミック制御は、鋼板温度の予測計算結果に基づいた制御を行なうため、予測誤差に起因する制御偏差の発生は避けられない。鋼板温度計算モデルの高精度化には限界があるため、巻取温度の制御偏差を低減する手段として、巻取温度計の実績値に基づくフィードバック制御が導入されている。

5.1 従来フィードバック制御の問題点

従来から行なわれているフィードバック制御方法^{5)~7)}は、Fig. 7 に示すように冷却装置の最後段にフィードバック専用のバーニアバンクを設け、あらかじめこのバーニアバンクの半分を使って冷却しておき、目標値と実績値の偏差に応じて注水量を調整するものである。

この方式は、むだ時間を短くし、フィードバック制御の応答性を向上させるためには優れた構成になっているが、ROT冷却装置の最後段でフィードバック制御を行なうことになる。このため、高張力鋼板などの低温巻取材に対しては、安定し

Fig. 8 Boiling curve

Fig. 9 New improved feedback control

て冷却することが難しい遷移沸騰領域 (Fig. 8) で、バーニアバンクの半数を使ってあらかじめ冷却することになる。このため、冷却が不安定となり、鋼板の先端部分の巻取温度がばらつくとともに、熱流束が大きく変化する遷移沸騰領域で注水量のフィードバック動作を行なうことで、逆に制御精度の悪化を招くことがしばしば発生した。

5.2 非バーニアバンク方式のフィードバック制御

そこで、バーニアバンクを設けずに、ダイナミック制御における巻取温度目標値 (モデル目標値) CT_{aim} を制御偏差に基づき、比例積分動作にて修正するフィードバック制御方法を開発した (Fig. 9)。

$$CT_{aim}(t) = CT_{target} + \Delta CT_{adapt} + \Delta CT_{FB}(t) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta CT_{FB}(t) = & K_P(CT_{target} - CT_{act}(t)) \\ & + K_I \int_0^t (CT_{target} - CT_{act}(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 CT_{target} : 目標巻取温度、 ΔCT_{adapt} : 鋼板冷却後の学習制御による補正量、 ΔCT_{FB} : フィードバック制御による巻取温度モデル目標値の補正量、 CT_{act} : 巻取温度実績値、 K_P : 比例ゲイン、 K_I : 積分ゲイン。

この方式では、制御偏差に対して操作できる冷却バンクが必ずしも巻取温度計に近い位置にあるとは限らないため、従来方法に比べむだ時間が長くなる点はあるが、ダイナミック制御を通して冷却装置の操作を行なうため、あらかじめ最後段で冷却を実施する必要がなく、最も温度精度要求の厳しい高張力鋼板などの低温巻取材に対しても安定的にフィードバック制御を行なうことができる。さらに、制御偏差に対する操作量制限もないといった利点を有する。

ダイナミック制御におけるモデル目標値をステップ状に変更

Fig. 10 Result of step response

Fig. 11 Time constant and delay obtained from simulation results of step response

した場合の巻取温度計算値の応答を Fig. 10 に示す。Fig. 10 からわかるように、巻取温度のダイナミック制御系が、下記のむだ時間 + 1 次遅れ系として近似できることがわかる。

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_D s} e^{-Ls} \quad (17)$$

各種条件において、ダイナミック制御のモデル目標値変更に関する数値実験を行なった結果、むだ時間 L と時定数 T_D について、Fig. 11 の結果を得た。なお、操作する冷却バンクは操業条件によって異なり、むだ時間が変化することになるため、むだ時間が比較的大きなデータを選定した。Fig. 11 より、むだ時間 L は、

$$L = L_1 - L_2 V \quad (18)$$

と概ね鋼板速度 V で整理でき、時定数 T_D はほぼ一定 ($T_D = 2$) で変化しないことがわかった。

そこで、モデル目標値を修正するフィードバック制御の制御ゲインは、ステップ状目標値変化に対する行過ぎなしの場合の調整則⁹⁾に従い、

$$K_P = \frac{0.35 T_D}{K(L_1 - L_2 V)} \quad (19)$$

$$K_I = \frac{0.3}{K(L_1 - L_2 V)} \quad (20)$$

のように鋼板速度 V に応じて決定するようにした。ここで、 $L_1 = 7.8457$, $L_2 = 0.204$, $K = 1$ である。

提案したフィードバック制御の実機適用例を Fig. 12 に示す。目標巻取温度 560°C の例であるが、先端部の実績巻取温度が低目に外れたため、フィードバック制御によってモデル目標値が高目方向に修正され、ダイナミック制御がモデル目標値の高目修正に応じて冷却水量を低下させている。これよ

Fig. 12 Result of proposed feedback control

り、先端部の低目外れが徐々に修正され、中央部以降では目標巻取温度に制御できていることがわかる。

6. ダイナミック冷却履歴制御

鋼板の冷却制御においては、鋼板の金属組織を積極的に制御し、より優れた機械特性をもった製品を製造するため、巻取温度だけでなく ROT 上の温度降下履歴を制御することも求められている^{6), 10)}。

Fig. 13 に冷却履歴制御¹⁰⁾の概念を示す。通常の巻取温度だけを制御する方法では、必ずしも必要な金属組織を得ることができないが、冷却履歴制御では、必要な金属組織が得られるような温度降下履歴を辿ることができるように、巻取温度だけでなく水冷停止温度と中間空冷時間も制御する。

住友金属工業 (株) のホットストリップミルにおいては、従来から冷却履歴制御¹⁰⁾に取り組んできたが、プロセス制御用計算機の演算能力の問題で、制御周期を通常の巻取温度制御に比べて長くし、温度予測計算や冷却装置設定を簡略化するなど、精度面を犠牲にせざるを得なかった。

今回、冷却制御システムの更新によって十分な演算能力を得るとともに、鋼板温度計算モデルの高精度化もあいまって、鋼板速度の大幅な加減速があっても、鋼板の温度降下履歴を高精度に制御できるダイナミック冷却履歴制御を開発した。

6.1 制御方法

ホットストリップミルの仕上圧延では、通常、加速圧延を行なうため、ROT 冷却中に鋼板速度が変化する。そのため、速度変化に対して仕上出口から中間空冷終了までの温度降下履歴が変化しないように冷却装置を適切に制御する必要がある。

ダイナミック冷却履歴制御は、前章のダイナミック制御を活用し、仕上出口温度の変動や鋼板速度の加減速に対しても、Fig. 14 に示すように各制御点の温度降下履歴を所定のパターンに保ち、かつ、巻取温度を目標温度に制御するものである。以下では、 j 番目のバルブセクションの終端位置を L_j と表わし、また、バルブセクション通過時間を t_j で表わす。

最初に、仕上出口温度計直下で生成された制御点に対する

Fig. 13 Schematic diagram of cooling pattern control

Fig. 14 Cooling pattern control at accelerated rolling

冷却装置設定計算方法を示す。

[Step 1] 水冷停止位置の決定

鋼板の仕上出口温度実績値 FT_{act} を初期温度として、鋼板速度の今後の予測パターンをもとに、冷却装置の最大冷却能力で水冷したときの鋼板温度予測計算を行なう。この温度降下計算結果から、鋼板温度が目標水冷停止温度 $T1_{aim}$ になる ROT 上の位置 POS_{T1} を求める。これより、 POS_{T1} に最も近いバルブセクションの終端位置 L_{j^*} を求め、これを水冷停止位置 POS_{T1}^* とする。すなわち、

$$j^* = \arg \min_j |POS_{T1} - L_j| \quad (21)$$

$$POS_{T1}^* = L_{j^*} \quad (22)$$

制御点の冷却装置設定としては、水冷停止位置 POS_{T1}^* までの間は、制御バルブを ON にする。

[Step 2] 中間空冷停止位置の決定

水冷停止位置 POS_{T1}^* からの目標中間空冷時間 t_{AC} が確保可能な、中間空冷停止位置 POS_{AC}^* を以下のように決定する。

$$m^* = \min \left\{ m; \sum_{k=j^*+1}^m t_k \geq t_{AC} \right\} \quad (23)$$

$$POS_{AC}^* = L_{m^*} \quad (24)$$

制御点の冷却装置設定としては、水冷停止位置 POS_{T1}^* から POS_{AC}^* までの間は、制御バルブを OFF にする。

[Step 3] 中間空冷停止位置以降の冷却装置設定

中間空冷停止位置 POS_{AC}^* 以降の冷却装置を用い、巻取温度予測値 CT_{cal} が巻取温度目標値 CT_{aim} に一致するような冷却装置設定を4.3節に記載の方法で算出する。また、5.2節で説明した巻取温度フィードバック制御を併用する。

仕上出口温度計直下の制御点以外の制御点については、制御点の位置に応じて、以下に行なう。

(1) 中間空冷前の水冷中の制御点

[Step 1] 当該制御点の現在計算温度 T_{cal} を初期温度として、鋼板速度の今後の予測パターンをもとに、冷却装置の最大冷却能力で水冷したときの鋼板温度予測計算を行なう。この温度降下計算結果から、鋼板温度が目標水冷停止温度 $T1_{aim}$ になるROT上の位置 POS_{T1} を求める。これより、 POS_{T1} に最も近いバルブセクションの終端位置 L_j^* を求め、これを水冷停止位置 POS_{T1}^* とする。制御点の冷却装置設定としては、制御点の現在位置から水冷停止位置 POS_{T1}^* までの間は、制御バルブをONにする。[Step 2], [Step 3] は上記と同じ。

(2) 中間空冷中の制御点

[Step 2] 当該制御点の現在位置から制御点が属するバルブセクション番号 p を求める。また、制御点が水冷停止位置 POS_{T1}^* を通過した後、現時点までの中間空冷時間実績値 $t_{AC,act}$ を求める。当該制御点に対して、目標中間空冷時間 t_{AC} が確保される中間空冷停止位置 POS_{AC}^* を以下のように決定する。

$$m^* = \min \left\{ m; \sum_{k=p}^m t_k \geq t_{AC} - t_{AC,act} \right\} \quad (25)$$

$$POS_{AC}^* = L_{m^*} \quad (26)$$

制御点の冷却装置設定としては、制御点の現在位置から POS_{AC}^* までの間は、制御バルブをOFFにする。[Step 3] は上記と同じ。

(3) 中間空冷以降の制御点

[Step 3] 当該制御点の現在位置以降の冷却装置を用い、巻取温度予測値 CT_{cal} が巻取温度目標値 CT_{aim} に一致するような冷却装置設定を4.3節に記載の方法で算出する。また、5.2節で説明した巻取温度フィードバック制御を併用する。

6.2 制御実施例

実機制御例をFig. 15に示す。Fig. 15は、各制御点の仕上出口温度実績値、巻取温度実績値、および、その間の温度降下履歴を示したもので、(a)は通常の巻取温度制御、(b)がダイナミック冷却履歴制御を行なったものである（目標巻取温度はともに 600°C ）。冷却履歴制御では、目標水冷停止温度 800°C 、目標中間空冷時間 4s 以上としている。

ダイナミック冷却履歴制御により、所定の温度降下履歴が得られ、各制御点 ($N = 74$) の水冷停止温度精度は $\bar{x} = 796.6^\circ\text{C}$, $\sigma = 2.7^\circ\text{C}$ 、中間空冷時間は $\bar{x} = 4.4\text{s}$ （全制御点で 4s 以上確保）、巻取温度精度は $\bar{x} = 596.3^\circ\text{C}$, $\sigma = 5.3^\circ\text{C}$ ($\pm 20^\circ\text{C}$ 長さ適中率 100%) であり、高精度な冷却履歴制御が実現できている。また、Fig. 16に冷却履歴制御実施材の鋼板温度、鋼板速度および制御バルブのON/OFF状態を示す。鋼板速

(a) Coiling temperature control (b) Cooling pattern control

Fig. 15 Comparison of cooling pattern control with conventional coiling temperature control (strip thickness 3.7 mm)

Fig. 16 Result of variable water cooling banks by cooling pattern control (strip thickness 3.7 mm)

度は、先端部の 10.8 m/s から最高速度の 15.4 m/s まで加速（第1加速率 0.13 m/s^2 、第2加速率 0.41 m/s^2 ）され、また尾端部で急激に減速（減速率 0.85 m/s^2 ）されているが、ダイナミック冷却履歴制御によって、水冷停止温度・中間空冷時間・巻取温度が一定に保たれるよう、速度変化に応じて、第1段の水冷部長さが変化し、同時に、中間空冷時間を確保するよう第2段の水冷部の開始位置および終了位置が適切に調整されていることがわかる。

7. 制御精度

Fig. 17に、巻取温度の $\pm 20^\circ\text{C}$ 長さ適中率の比較を示す。

Fig. 17 Accuracy of coiling temperature

新しく開発した冷却制御モデルの適用により、巻取温度の適中率は、従来に比較して5.5%向上し96.1%となった。また、適中率の向上により、巻取温度の温度外れ材が大幅に低減した。

8. 結 言

本稿では、鹿島製鉄所のホットストリップミル向けに開発した鋼板冷却のダイナミック制御と、その制御機能を活用した非バーニアバンク方式の巻取温度フィードバック制御およびダイナミック冷却履歴制御について報告した。ダイナミック冷却履歴制御により、鋼板速度の大幅な加減速に際しても、鋼板の温度降下履歴を高精度に制御することが可能となった。開発した制御システムは、2004年7月から実プラントで稼働しており、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) F. Hollander: Design and control for advanced runout table processing, *Iron and Steel Engineer*, **48**-3, 81/92 (1971)
- 2) 福島, 辻, 西尾: カルマンフィルターを用いた高精度巻取温度制御, 鉄と鋼, **72**-4, S337 (1986)
- 3) 竹森, 古川, 早川, 藤井: ニューラルネットワークを用いた熱延捲取温度制御の開発, *CAMP-ISIJ*, **4**, 1386 (1991)
- 4) 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)
- 5) E.N. Hinrichsen: Hot strip mill runout table cooling — A system view of control, operation, and equipment, *Iron and Steel Engineer*, **53**-10, 29/34 (1976)
- 6) R. Takahashi, K. Oshima, T. Nunokawa and H. Tachibana: Computer Control of Hot Strip Coiling Temperature with Curtain Wall Cooling Apparatus, *Process Control in the Steel Industry*, Preprint, 455/468, Sep.11/12 (1986)
- 7) 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)
- 8) 成田, 秋山, 大和田, 堀, 寺本: 緩冷却ノズルの開発 (緩冷却を用いた高精度巻取温度制御 第2報), *CAMP-ISIJ*, **6**, 1442 (1993)
- 9) K.L. Chien, J.A. Hrones and J.B. Reswick: On the automatic control of generalized passive systems, *Trans. ASME*, **74**, 175/185 (1952)
- 10) 大島, 橘, 永田, 小松原, 尼崎, 石橋: 熱延ランアウトテーブル冷却制御技術の開発, *CAMP-ISIJ*, **7**, 416/419 (1994)
- 11) 高橋亮一: 鉄鋼業における制御, コロナ社 (2002)

[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。冷却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。