
熱間圧延における新巻取温度制御技術の開発

Development of New Coiling Temperature Control System on Hot Strip Mill

八尋 和広(Kazuhiro Yahiro) 山崎 順次郎(Junjiro Yamasaki) 古川 誠博(Masahiro Furukawa) 新井 和夫(Kazuo Arai) 森田 正彦(Masahiko Morita) 小橋 正満(Masamitsu Obashi)

要旨：

水島ホットストリップミルでは、材質の向上を目的に、仕上圧延機以降の冷却制御システムを更新した。新システムは、オンライン変態率センサを利用して構築した変態進行モデルおよび熱伝達係数の温度依存性、板厚方向の温度分布を考慮した板温度変化モデルを有している。これらのモデルを用いることにより、冷却過程での鋼板の板厚方向の温度分布（表面温度、平均温度）および変態率を正確に予測することが可能となった。その結果、巻取温度適中精度の向上および材質の均一化を達成することができた。

Synopsis：

In the hot strip mill at Mizushima Works, a new cooling control system after the finishing mill was developed in order to improve the quality of the material. The system has a transformation progress model tuned to an on-line transformation detector and also a precise temperature model considering dependence of the heat transfer coefficient on temperature and temperature distribution in the depth direction. By using the two models, the changes in surface and mean temperatures of the material, and the transformed fraction in the cooling process are able to be predicted accurately. As the result, the uniformity of material properties have been improved.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of New Coiling Temperature Control System on Hot Strip Mill



八尋 和広
Kazuhiro Yahiro
水島製鉄所 電気・計装
技術室



山崎 順次郎
Junjiro Yamasaki
水島製鉄所 電気・計装
技術室 主任(課長)



占川 誠博
Masahiro Furukawa
水島製鉄所 熱延技術
室



新井 和夫
Kazuo Arai
技術研究本部 計測物
性研究センター 主任
研究員(課長)



森田 正彦
Masahiko Morita
技術研究本部 薄板研
究部 薄板研究室 主任
研究員(課長)



小橋 正満
Masamitsu Obashi
水島製鉄所 エネルギ
ー技術室 主任(課長)

1 緒 言

ホットストリップミルでは、鋼板は仕上圧延後、ランアウトテーブル上にて冷却され、所定の温度(巻取温度)で、巻取機にて巻き取られる。ここでの冷却過程は、鋼板の機械的性質を決定する上で非常に重要であり、十分な巻取温度精度を確保するために、従来から計算機による巻取温度制御が行われてきた。

水島製鉄所ホットストリップミルにおいても、1977年から計算機による巻取温度制御を導入して品質向上に寄与してきた¹⁾。しかしながら、製品品種の多様化に伴う制御範囲の拡大、製品品質の均一化ニーズの高まりから、より一層の制御精度の向上と品質の向上が必要不可欠となってきた。また、冷却過程での伝熱・冶金現象は複雑であり、従来の制御システムでは、その現象の複雑さが外乱となり制御精度には限界があった。

そこで、巻取温度制御システムを一新し、機能および精度の向上を図った。本システムの開発では、伝熱現象、冶金現象を再現でき

要旨

水島ホットストリップミルでは、材質の向上を目的に、仕上圧延機以降の冷却制御システムを更新した。新システムは、オンライン変態率センサを利用して構築した変態進行モデルおよび熱伝達係数の温度依存性、板厚方向の温度分布を考慮した板温度変化モデルを有している。これらのモデルを用いることにより、冷却過程での鋼板の板厚方向の温度分布(表面温度、平均温度)および変態率を正確に予測することが可能となった。その結果、巻取温度適中精度の向上および材質の均一化を達成することができた。

Synopsis:

In the hot strip mill at Mizushima Works, a new cooling control system after the finishing mill was developed in order to improve the quality of the material. The system has a transformation progress model tuned to an on-line transformation detector and also a precise temperature model considering dependence of the heat transfer coefficient on temperature and temperature distribution in the depth direction. By using the two models, the changes in surface and mean temperatures of the material, and the transformed fraction in the cooling process are able to be predicted accurately. As the result, the uniformity of material properties have been improved.

るモデルの開発およびプロセスの変化に適應できる学習制御技術の開発を重点課題とした。

本報では、新巻取温度制御にかかわる主要機能を中心に、制御システムの全容と温度制御の核となる各制御モデルの概要および新システム導入の効果について報告する。

2 設備概要

当工場冷却設備の配置を Fig. 1 に、冷却設備の仕様を Table 1 に示す。ランアウトテーブルでの冷却過程を細かく制御するために

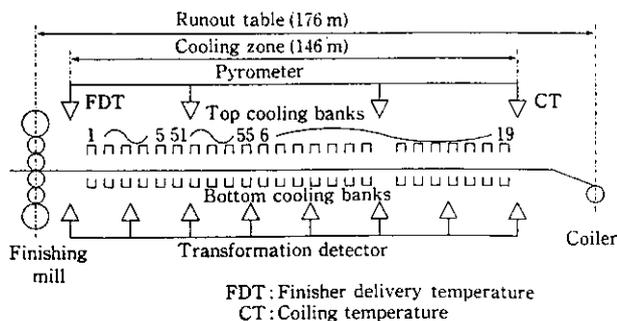


Fig. 1 General layout of strip cooling devices on runout table

* 平成元年10月16日原稿受付

Table 1 Specifications of cooling device at runout table

Spray form	Top	No. 1~19 No. 51~55	Pipe laminar Slit laminar
	Bottom		Flat spray
Number of cooling control units	Top	No. 1~19 No. 51~55	63 16
	Bottom		50
Pumping capacity			282 m ³ /min
Cooling tower capacity			35 m ³ /min, 45°C→32°C
Number of cooling control zone			24

Table 2 Comparison between new and conventional coiling temperature control systems

Terms	New system	Conventional system
Dependence of heat transfer coefficient on temperature	Considered	Neglected
Radiation of latent heat of transformation	Considered	Neglected
Calculation of temperature	All section at runout table	Only FDT and CT
Temperature distribution in depth direction	Considered	Neglected

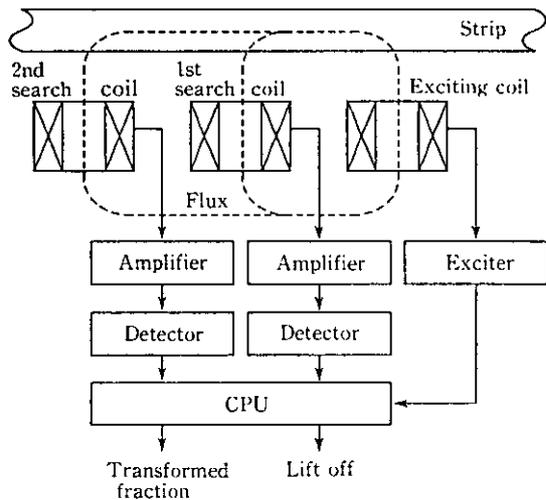


Fig. 2 Block diagram of the sensor for transformation measurement

水冷ゾーンを24の水冷バンクに分割し、各バンク内の複数個の制御ユニット（3万弁）を開閉して注水制御を行う。上部冷却設備のうち、第1~19バンクはパイプラミナーであり、第51~55バンクは冷却能力が高く、かつ、板幅方向均一冷却が可能なスリットラミナーである²⁾。また第1~4バンクは流量調節機能を有している。変態率センサーはランアウトテーブル上に8個設置してある。変態率センサーの測定原理を Fig. 2 に示す³⁾。変態率センサーは、励磁コイルと二つの検出コイルからなり、励磁コイルから発せられる交流磁束によって検出コイルに誘起される電圧が、磁界内に存在する被測定鋼の γ/α 変態に伴う比透磁率および電気伝導度の変化に対応して変化する現象を利用した電磁誘導法センサーである。二つの検出コイルを用いるのは、両者間の距離依存性の違いから、センサーと被測定鋼板間の距離を検出し補正するためである。

3 新巻取温度制御システム

3.1 システムの開発思想

ランアウトテーブル上を走行するストリップの伝熱は、鋼板内部の物理現象と鋼板外部の物理現象に依存する。鋼板内部の現象としては、鋼板厚さ方向の熱伝導、変態発熱および相分率 (α 相, γ 相) や温度の変化による物性値 (比熱・熱伝導率) の変化がある。また、鋼板外部の現象としては、水冷時の対流伝熱および空冷時の放射、対流による伝熱がある。

鋼板の冷却制御を精度よく実現するためには、上述の物理現象による伝熱量を可能な限り精度よく把握して冷却量を決定しなければならない。従来の巻取温度制御では、これらの物理現象の一部をテーブル化あるいは回帰式化によって代表されることでその影響を考慮してきた。新巻取温度制御システムでは、このような物理現象をより厳密に考慮することで、温度制御誤差を極小化することをめざした。

Table 2 に従来システムと新システムとで大きく異なる項目の比較を示す。新システムでは、巻取温度制御精度の向上のみならず、ランアウトテーブル上での鋼板の冷却過程の高精度な制御を実現することを考慮して、以下の項目に重点を置きシステム設計を行った。

- (1) ランアウトテーブル内の各制御バンク位置での伝熱現象を正確に把握するために、巻取温度のみでなく、各制御バンクごとの温度・変態率を予測計算する。
- (2) 温度予測精度を向上させるために、熱伝達係数の温度依存性、鋼板の変態進行と変態発熱および鋼板厚さ方向温度分布を考慮した温度モデル式を開発、導入する。
- (3) 水冷バンク能力の経時変化を的確に把握するために、逐次最小二乗法による冷却バンク能力学習方式を開発、導入する。

3.2 システム、機能の構成

Fig. 3 に、巻取温度制御システムのシステム構成を示す。C/C (Central Computer) が生産計画と製造実績管理を担当し、O/C (On-line Computer) は運用支援を担当している。P/C (Process Computer) は、SCC 1 (Supervisory Control Computer 1), SCC 2, FEP 2

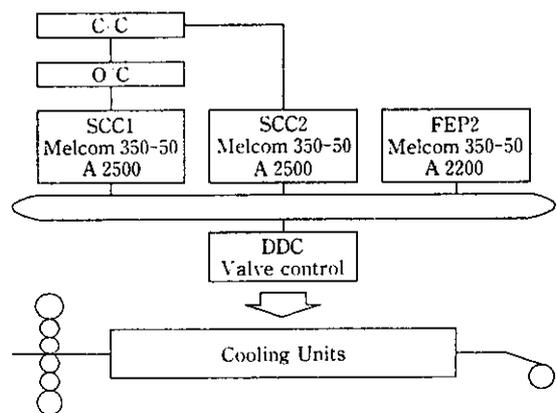


Fig. 3 System configuration of the cooling control system

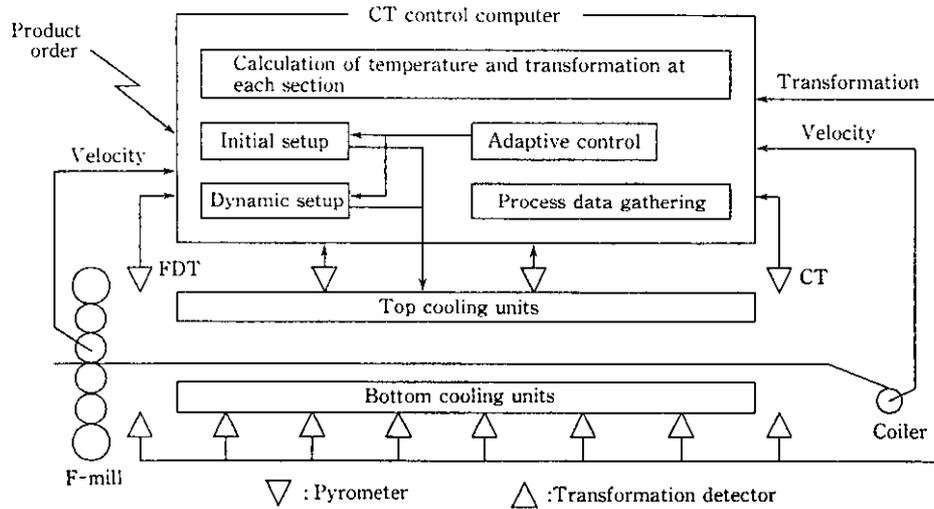


Fig. 4 Conceptual diagram of cooling control

(Front End Processor 2) により構成される。SCC 1 は統括計算機として巻取温度命令情報を FEP 2 に伝送し、SCC 2 は品質管理計算機として FEP 2 からの実績情報を C/C に伝送する。FEP 2 は、巻取温度命令情報に従って、鋼板の仕上圧延直後から巻取完了までの間、必要な冷却量の計算を行い、冷却能力を調節する。また、FEP 2 では品質管理および解析のためのデータ収集も行う。

Fig 4 には、巻取温度制御を行う FEP 2 内の機能構成を示す。本システムは、以下の四つの主要機能より構成される。

(1) 温度予測計算機能

非定常一次元熱伝導方程式の解析解と変態進行・発熱モデルを組み合わせた温度モデル式を用いて、各制御セクションごとの温度と変態率の予測計算を行う。これらの予測計算結果は、ダイナミック設定計算および学習計算により冷却制御に反映される。

(2) 初期設定機能

鋼板ごとに与えられる冷却条件を満足するように、鋼板先端部の必要冷却量を温度モデルを用いて求め、冷却設備の初期設定を行う。初期設定は、鋼板先端部が仕上圧延機内に達した時点に実施する。

(3) ダイナミック設定機能

鋼板が一定長さ進行するたびに、FDT、速度等の変動を考慮しつつ温度モデルに基づいて必要冷却量を求め、それに従い冷却設備をダイナミックに設定する。

(4) 学習機能

冷却実績からモデルにて算出した巻取温度および放射温度計での実測巻取温度に、逐次最小二乗法を適用し、空冷量および各冷却バンクの冷却能力を学習する。

3.3 巻取温度制御方法

巻取温度制御では、上位計算機から、Fig. 5 に示すような目標冷却曲線を受け取り、これに従って各ゾーン入側および出側目標温度を算出し、Fig. 6 に示す計算方式により注水量を求め制御を行う。Fig. 6 は、初期設定およびダイナミック設定時の設定計算方式の概要を示したものである。与えられた冷却条件を満足する注水ユニット数を仮定し、温度モデルによる温度計算を実施し計算巻取温度を求める。計算巻取温度と命令巻取温度の差が一定値 ϵ 以下になるまで注水ユニット数を変更し、設定注水ユニット数を決定する。

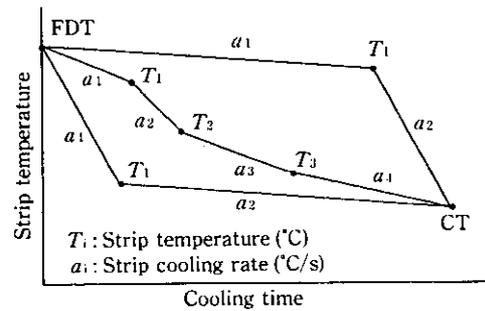


Fig. 5 Strip cooling patterns on runout table

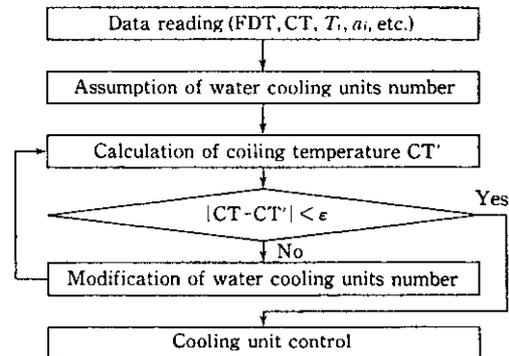


Fig. 6 Flow diagram of set-up calculation for cooling units

3.4 制御モデル

3.4.1 板温度変化モデル

板温度変化モデルでは、鋼板温度をリアルタイムに計算でき、かつ変態現象予測のための平均温度、冷却中の熱伝達率を見積もるための表面温度の算出ができる必要がある。

一般に、鋼板内の温度分布は次式で表される⁴⁾。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H \dots\dots\dots (1)$$

鋼板表面: $-k(\partial T/\partial x) = \alpha(T - T_L)$

鋼板中心: $-k(\partial T/\partial x) = 0$

ここで、
 c : 比熱 (kcal/kg·°C)
 ρ : 密度 (kg/m³)
 T : 鋼板温度 (°C)
 t : 冷却時間 (h)
 x : 板厚方向の位置 (m)
 k : 熱伝導率 (kcal/m·h·°C)
 H : 変態発熱量 (kcal/m³·h)
 α : 熱伝達係数 (kcal/m²·h·°C)
 T_L : 冷媒温度 (°C)

著者らは、高精度なオンライン温度モデルとして非定常一次元熱伝導方程式 (1式) の解析解を採用することにした。しかしながら、従来の解析解は鋼板厚さ方向の温度分布が計算可能なものの、級数表式であることとパラメータ求解に収束計算が必要なことから、オンラインリアルタイムモデルとして適用しにくいものであった。そこで解析解を、級数と演算と収束計算を全く含まない代数表式の形に誘導することを試みた。その結果、平均温度を次式で表すことができた⁹⁾。

$$\bar{T}' = (\bar{T} - T_L) \exp\left\{-\frac{4a}{d^2} \cdot X_1^2 \cdot t\right\} + T_L \quad (2)$$

\bar{T}, \bar{T}' : 冷却前後の鋼板平均温度 (°C)
 d : 鋼板の厚さ (m)
 a : 温度伝導率 (m²/h)

パラメータ X_1 は次の超越方程式の根として与えられる。

$$B_1 = 2X_1 \tan X_1 \quad (3)$$

B_1 : ビオ数 (= $\alpha \cdot d/k$)

式 (3) の代数表式として次式を誘導した。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \{p[1 - \sqrt{1 - 15B_1/(2Mp^2)}]\}^{1/2} \\ p &= \{B_1(M+5) + 30\}/4M \\ M &= f(B_1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

平均温度を計算後、平均温度位置計算式と材料内部温度から表面温度への変換式により表面温度を計算し、続いて鋼板内温度分布を計算する。

平均温度位置計算式は熱量中立点=平均温度位置の定義により、材料内部温度から表面温度への変換式は熱量不変の原理とフーリエの法則により、それぞれ式 (5), (6) のごとく誘導した。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\beta} &= (1+A^{-1}) \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{0.5+A^{-1}}{(1+A^{-1})^2}} \right\} \\ A &= B_1(1 - T_L/T_S)/2 \\ \bar{\beta} &= 2\bar{x}/d \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$T_B/T_S = 1 + A(1 - \beta) \quad (6)$$

\bar{x} : 平均温度の位置 (m)
 $\bar{\beta}$: 平均温度位置係数
 T_S : 鋼板表面温度 (°C)
 T_B : 鋼板内温度 (°C)
 β : 鋼板内位置係数

ただし、冷却初期、鋼板中心温度が未降下の状態にあるときの過渡的な場合の鋼板内温度分布は別途計算式を持っている。

式 (2), (4)~(6) からなる解析代数表式温度モデル計算の精度は、差分計算と幅広い条件 (板厚 1~32 mm, 熱伝達係数 75~750 kcal/m²·h·°C, 冷却時間 0.5~30 s) での比較において、0~2°C 以内の小さな偏差にあり、実用上十分な高精度であった。

3.4.2 水冷熱伝達係数モデル

水冷ゾーンの冷却能は各種要因の影響を受ける。本モデル式では以下に示す要因を取り込み水冷熱伝達係数の算出を行っている。

(1) 鋼板表面温度

- (2) ノズル形状 (パイプライン、スリットライン、スプレー)
- (3) 水量密度
- (4) 水温

式 (3) でビオ数の算出に用いる熱伝達係数は次の式で表現される。

$$\alpha = A + B \exp[C \cdot (T_S - D)^2] \quad (7)$$

A, B, C, D : 係数

ただし、パイプライン部の熱伝達係数を基準にして、他ノズル、水量密度、水温に対して相対的な係数を持ち、上式で算出される熱伝達係数の補正を行っている⁹⁾。

3.4.3 空冷熱伝達係数モデル

ランアウトテーブル上を走行する鋼板の空冷中の冷却要因には、放射、対流およびロールへの接触熱伝導がある。このうち、放射に関しては、従来から式 (8) で示すステファン-ボルツマンの法則が適用されてきた⁷⁾。

$$q_{rad} = \epsilon \sigma [(T_S + 273)^4 - (T_{air} + 273)^4] \quad (8)$$

ここで、 T_{air} : 気温 (°C)
 σ : ステファンボルツマン定数 (kcal/m²·h·k⁴)
 ϵ : 放射率

q_{rad} : 放射による熱流束 (kcal/m²·h)

また、対流およびロールへの接触熱伝導に関しては、ニュートンの冷却の法則を適用できる⁷⁾。

$$q_{conv} = \alpha_{conv}(T_S - T_{air}) \quad (9)$$

α_{conv} : 対流熱伝達係数 (kcal/m²·h·°C)

q_{conv} : 対流による熱流束 (kcal/m²·h)

結局、式 (3) に用いる熱伝達係数の空冷時の値は次式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &= (q_{rad} + q_{conv}) / (T_S - T_{air}) \\ &= \epsilon \sigma [(T_S + 273)^4 - (T_{air} + 273)^4] / (T_S - T_{air}) + \alpha_{conv} \end{aligned} \quad (10)$$

式 (10) をオンライン用モデル式として使用するには、 ϵ および α_{conv} を与えなければならない。 ϵ については、短波長 (3.8 μ m) の放射温度計での実測の結果、0.6~0.85 の値をとることが知られている⁸⁾。また、 α_{conv} に関しては、自然対流乱流領域で 7~15 kcal/m²·h·°C の値をとるとされている^{9,10)}。実際には、 α_{conv} としてロールと鋼板の接触熱伝導による熱伝達係数も考慮しなければならない。そこで、無注水圧延の実績から α を求め、それを満足する ϵ と α_{conv} の値を式 (10) から決定した。

3.4.4 変態速度モデル

鋼の相変態の速度式は、よく知られているように Johnson と Mehl¹¹⁾ および Avrami¹²⁾ によって提案されており、変態率を X とし、変態核が核生成速度 I_n で均一生成し、成長速度 G で球状に成長するとした場合、式 (11) で表される。

$$X = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} I_n G^3 t^4\right) \quad (11)$$

I_n および G は、鋼の化学成分、仕上げ圧延後の r 粒径、 r 粒中の歪エネルギーなどによって影響を受ける因子であり、また変態温度と時間の経過 t によっても変化する。したがって、式 (11) は次のように一般化される。

$$X = 1 - \exp(-kt^n) \quad (12)$$

k および n は化学成分や r 粒の熱力学的状態等によって定まる定数である。変態速度を厳密に記述するためには、これらについて物理的意義を明確にしたモデル化が必要となるが、この面での研究¹³⁾ はまだ端緒にすぎないばかりである。本報での変態速度モデルを構築するにあたっての考え方は、基本的に式 (12) に従っており、オン

ライン使用上の観点から短時間の計算を可能とすることを優先し、 k, n に関する数式化は簡便で実際的である実測データから統計的に求める手法を採用した。

式 (13) に本報における変態速度モデルの基本式を示す。

$$X = 1 - \exp[-K(t/t_{50})^n] \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 t_{50} は仕上圧延機出側から変態率が50%に達するまでの時間であり、式 (13) は $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態率が50%の時に t_{50} の点を通り、指数が n の値を持つ Johnson-Mehl-Avrami の式に相当する。式中の t_{50} および n は上述のように、化学成分や γ 粒の熱力学的状態等の変態特性に影響するパラメータである。これらのパラメータの設定にあたっては、著者らが開発したオンライン変態率センサーをランアウトテーブル上の8箇所を設置し、実機圧延材で測定した変態率と化学成分および熱延データを統計処理することにより求めた。

3.4.5 変態潜熱モデル

フェライト (F) - パーライト (P) 相鋼において、一般に $\gamma \rightarrow F + P$ の変態潜熱 q_T は、F 相率 X_F および $\gamma \rightarrow F$ の変態潜熱 q_f 、 $\gamma \rightarrow P$ の変態潜熱 q_p が与えられれば次式で算出できる。

$$q_T = X_F q_f + (1 - X_F) q_p \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 X_F は、含有炭素量 C 、共析炭素量 C_0 および F 相中への炭素固溶限 C_F が与えられれば算出できる。合金元素 Y_i の添加による C_F の変化を無視し、 C_0 を Fig. 7 のデータ¹⁴⁾ で定式化すると、 X_F は次式により求めることができる。

$$X_F = (C_0 - C) / (C_0 - C_F) \dots\dots\dots (15)$$

$$C_F \leq C \leq C_0$$

$$C_0 = C_0^* + \sum_{i=1}^n (a_i \cdot A_{Y_i}^3 + b_i A_{Y_i}^2 + c_i A_{Y_i})$$

ここで、 C_0^* は Fe-C2 元合金の共析炭素含有率であり、 A_{Y_i} は合金元素 Y_i の添加量である、 C_F, a_i, b_i, c_i は係数として与える。

同様に、 $\gamma \rightarrow F$ の変態潜熱 q_f は次式で与えることができる。

$$q_f = q_f^* + \sum_{i=1}^n (d_i A_{Y_i}^3 + e_i A_{Y_i}^2 + f_i A_{Y_i}) \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 q_f^*, d_i, e_i, f_i は係数として Fig. 7 の文献データ¹⁴⁾ から求めた。 $\gamma \rightarrow P$ 変態潜熱 q_p は、P 相中の Fe₃C 容積率 $X_{P/C}$ と $\gamma \rightarrow Fe_3C$ 変態潜熱 q_c^* を与えれば、次式で表現できる。

$$q_p = q_c^* X_{P/C} + (1 - X_{P/C}) q_f \dots\dots\dots (17)$$

式 (14) ~ (17) によって基本的な変態潜熱量を求め、実測データ

との差を補正して制御用の値を決定した。

3.4.6 学習制御モデル

冷却設備などの経時変化を補正することを目的として、モデル計算値と実績値とを対比して次コイル以降の制御に反映させる学習制御を行っている。

学習制御の方法としては、制御の結果生じた誤差を代表的な一つの要因に集約して学習する方法と、誤差を各種の誤差要因に分離して学習する方法とが考えられる。前者の場合、各種の誤差要因が一つの学習係数にて代表されるため学習係数が安定しないことから、後者の方式を採用した。

本システムでは、誤差要因を水冷バンクごとに分類して学習することとし、ランアウトテーブルでの温度降下量を次式で表した。

$$FDT - CT = \sum_{i=1}^N C_{W_i} \cdot \Delta T_{W_i} + C_A \sum_{i=1}^N \Delta T_{A_i} \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 C_{W_i} : i バンクの学習係数、 C_A : 空冷学習係数、 ΔT_{W_i} : i バンクの水冷温度降下量、 ΔT_{A_i} : i バンクの空冷温度降下量である。

式 (18) を書き直すと次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} Y_i &= \Phi_i^T \theta_i \\ Y_i &= [FDT - CT]_i \\ \Phi_i &= [\Delta T_{W_1}, \Delta T_{W_2}, \dots, \Delta T_{W_N}, \sum_{i=1}^N \Delta T_{A_i}]^T \\ \theta_i &= [G_{W_1}, C_{W_2}, \dots, C_{W_N}, C_A]^T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

添字 i は、 i 番目にサンプリングしたデータであることを意味し、添字 T は、転置行列を意味している。また、FDT, CT は温度計実測値により定義する。

式 (19) に逐次最小二乗法¹⁵⁾ を適用すると、学習係数 $\hat{\theta}_i$ は下式によって、オンライン同定される。

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \hat{\theta}_{i-1} + \Gamma_i (Y_i - \Phi_i^T \hat{\theta}_{i-1}) \\ \Gamma_i &= P_{i-1} \Phi_i / (1 + \Phi_i^T P_{i-1} \Phi_i) \\ P_i &= P_{i-1} - P_{i-1} \Phi_i (1 + \Phi_i^T P_{i-1} \Phi_i)^{-1} \Phi_i^T P_{i-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

式 (20) で求めた学習係数を用いて式 (18) の冷却バンクごとの能力係数を補正することで、モデル精度を常に高精度な状態にしておくことが可能である。

また、他の要因に関しては、必要に応じてオフラインでデータの統計処理を実施して値を修正している。

4 システムの評価

4.1 制御モデルの評価

システム稼働状態での温度モデル精度を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は計算温度と実績温度を比較したものであり、 $1\sigma = 10.9^\circ C$ の精度を得ている。また、温度予測計算の例を Fig. 9 に示す。Fig. 9 は、水冷および空冷による鋼板の温度と変態率の変化を示しており、測定値とよく一致している。このように3.4章で述べた各モデルを組み合わせた制御モデルによって、冷却過程における鋼板の表面温度と平均温度および変態率の変化を高精度に予測することが可能となった。

4.2 制御結果の評価

新巻取温度制御を実機に適用した結果を Fig. 10 および 11 に示す。Fig. 10 は、新旧制御システムによる巻取温度制御結果の比較を示す。従来の制御に比較して巻取温度が均一に制御されている。Fig. 11 は、 $\pm 20^\circ C$ の巻取温度的中率 (目標温度 $\pm 20^\circ C$ 以内に入

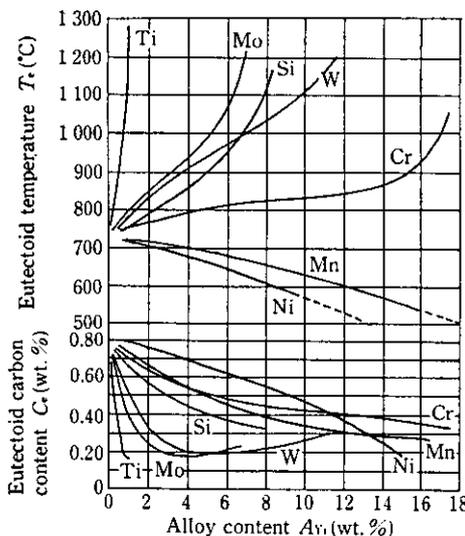


Fig. 7 Influence of alloy content on eutectoid temperature and carbon content¹⁴⁾

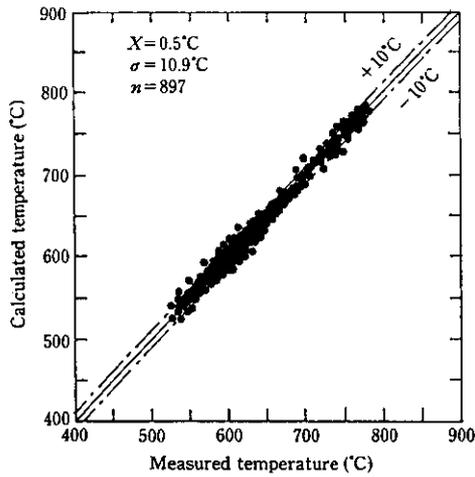


Fig. 8 Relation between measured coiling temperature and calculated coiling temperature

る長さ比率)の推移を示しており、90.0%から97.8%へと大きく向上した。

4.3 製品材質の評価

システム導入に伴う製品材質向上の一例を Fig. 12 に示す。Fig. 12 は、0.15% C-0.75% Mn 鋼における機械的性質のバラツキを新システム導入前を100%として評価している。TS (引張強さ)、YP (降伏点)、El (伸び)ともに材質バラツキを約15%低減し、製品材質を均一化させることができた。

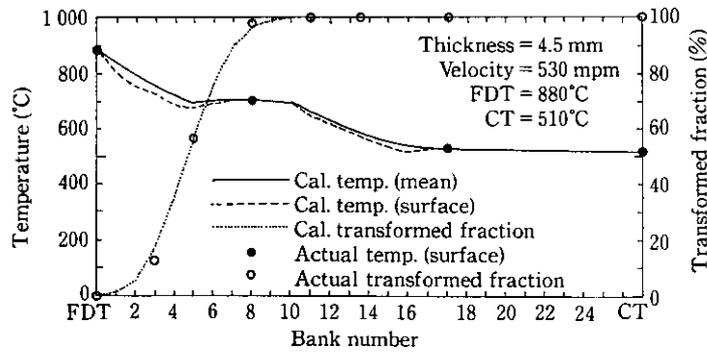


Fig. 9 Example of process model calculation of cooling zone

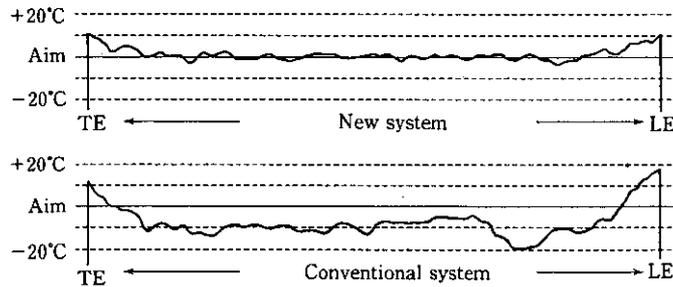


Fig. 10 Example of coiling temperature control (thickness=2.5 mm)

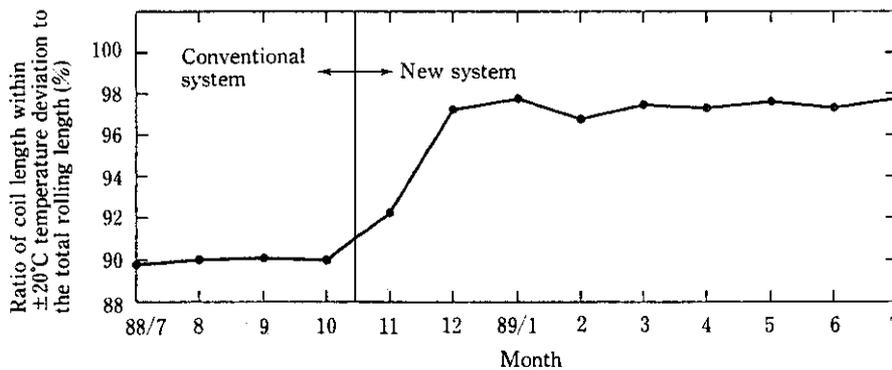


Fig. 11 Accuracy of coiling temperature

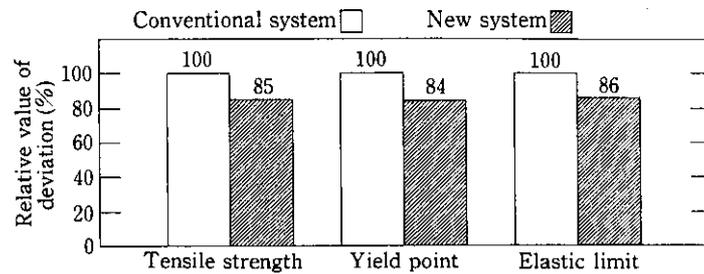


Fig. 12 Improvement of the accuracy of mechanical property (0.15%C-0.75%Mn steel)

5 結 言

水島製鉄所ホットストリップミル製品の品質向上を目的として、仕上圧延機以降の冷却制御システムの更新を実施した。本システムは1988年11月より本格稼働を開始した。その特徴は以下のとおりである。

- (1) 冷却制御を行うための制御モデル式の見直しを行い、板厚方向の温度分布、熱伝達係数の温度依存性、変態の進行および変態発熱を考慮した温度モデル式を開発した。
- (2) 新開発の温度モデルを冷却制御に適用して $\sigma=10.9^{\circ}\text{C}$ の精度での温度予測を実現した。

- (3) 温度予測計算を実施することにより、巻取温度のみでなく各制御セクションで、高精度な制御を実現することができた。
- (4) 逐次最小二乗法を適用することで、各バンクごとの冷却能力の学習を可能とし、バンク能力の経時変化を定量化することができた。
- (5) $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 巻取温度的中率が90.0%から97.8%へと大幅に向上した。また、製品材質のバラツキがTS, YP, EIについてそれぞれ約15%低減した。

以上のような特徴を持つ冷却制御システムの開発により、安定かつ高精度な巻取温度制御が実現できた。また、製品品質の向上および省力等の成果もあがっている。

参 考 文 献

- 1) 三宅祐史, 西出輝幸, 守谷正一, 池泳孝雄, 井上利夫, 高木 清: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 1, 58-69
- 2) 宮口雅史, 井上利夫, 浜田圭一, 鹿目光助, 直井孝之, 中野貞則: 鉄と鋼, 72 (1986) 4, S338
- 3) 森田正彦, 橋口耕一, 岡野 忍, 橋本 修, 西田 稔: 鉄と鋼, 71 (1985) 13, S1089
- 4) 横堀 進, 久我 修: 「基礎伝熱工学」, 260-286, [丸善(株)]
- 5) 新井和夫: 鉄と鋼, 72 (1987) 5, S384
- 6) 日本鉄鋼協会共同研究会熱経済技術部会: 「鉄鋼製造プロセスにおける冷却技術」, 137-148, [日本鉄鋼協会]
- 7) J. P. ホールマン: 「伝熱工学(上)」, 11-14 [丸善(株)]
- 8) 福高善己, 岩村忠昭: 材料とプロセス, 1 (1988), 1587
- 9) 小門純一: 塑性と加工, 11, (1970) 118, 816-824
- 10) 日本鉄鋼協会特別報告書 No. 29, 「鋼材の強制冷却」, 96, [日本鉄鋼協会]
- 11) W. A. Johnson and R. F. Mehl: *Trans, AIME*, 135 (1939), 416
- 12) M. Avrami: *J. Chem. Phys.*, 7 (1939), 1103
- 13) 梅本 実, 田村今男: 材料とプロセス, 2 (1989) 3, 688
- 14) E. C. Bain: "Function of alloying Element in Steel", ASM (1940)
- 15) 相良節夫, 秋月影雄, 中溝高好, 片山 徹: 「システム同定」, 116-118, [計測自動制御学会]