

# ホットストリップミルにおける高精度注水制御技術の開発

小田 高士\*・近藤 義孝\*・小西 政治\*・村上 治則\*・末広 正芳\*<sup>2</sup>・藪田 俊樹\*

Development of Accurate Temperature Control in Hot Strip Mill

Takashi ODA, Yoshitaka KONDO, Seiji KONISHI, Hironori MURAKAMI, Masayoshi SUEHIRO and Toshiki YABUTA

**Synopsis :** A temperature control of hot strips on the run-out table due to a proper cooling plays a significant role for controlling their mechanical properties. For high carbon steels, for example, the temperature control is quite difficult because of a remarkable heat development (thermal generation) caused by latent heat of pearlite transformation. To realize required temperature control, a simplified metallurgical online model has been developed which predicts the transformation behavior and the resultant heat development. In this model, history of removed thermal energy during cooling process has been introduced instead of conventional temperature history. As a result, high accuracy has been realized on special steel without any human intervention to cooling control system.

**Key words :** hot rolling ; strip cooling ; high carbon steel ; hot rolled product ; phase transformation.

## 1. 緒言

近年、ホットコイルの材質を制御する手段としての捲取温度制御は、捲取温度のみを目標とする終点制御から、冷却過程における冷速、あるいは温度履歴制御へと発展し、制御技術はさらに高度化しつつある<sup>1)2)</sup>。

八幡熱延工場の冷却制御も稼動当初(1982.4)より、仕上圧延機出側から捲取温度計までの冷却温度履歴曲線を目標とする制御方式を採用し、完全自動での注水作業を実現してきた。ところが、平成2年9月より本格生産を開始した高炭素鋼は、冷却過程で発生する変態潜熱の影響でストリップ温度が上昇し、複雑な温度挙動を呈するため、冷却温度履歴を目標とする従来の制御方式の適用が困難になってきた。

そこで、冷却温度履歴に代わる新たな制御目標として、累積抜熱量を採用する方式を開発し、変態潜熱による温度変動に対応すると同時に、変態挙動をオンラインリアルタイムで演算処理するために、材質予測の冶金モデル<sup>3)</sup>に立脚

した簡易モデルを作成し、実機適用を図った<sup>4)</sup>。その結果、高炭素鋼のように変態潜熱による温度変化の顕著な鋼種に対しても、完全自動での注水作業と高精度の温度制御性が得られたので、以下にその内容を報告する。

## 2. ホットラン注水設備

八幡熱延工場におけるホットラン注水設備の概要をFig. 1, 2に示す。上部下部ともパイラミナー方式を採用しセクション分割は21, 各セクション毎に7本のヘッダーを有する。さらに圧力ヘッドの変動を小さく抑えるために、上部下部にストレージ管を設置した。この管内の水位変動を抑える手段として、冷却中の使用水量の予測をダイナミックに行い、給水ポンプを可変速度制御することで、注水中の水位変動を±20cm以内に保っている<sup>5)</sup>。これにより制御可能単位は各ヘッダーのユニットバルブ毎のON/OFF制御で5°C/ヘッダーを安定的に実現できる。

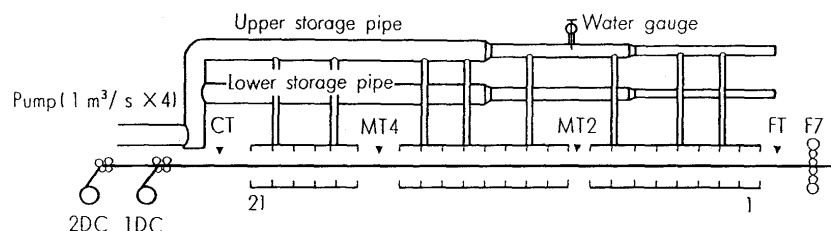


Fig. 1. Run-out cooling equipment.

平成6年8月3日受付 平成6年12月2日受理 (Received on Aug. 3, 1994; Accepted on Dec. 2, 1994)

\* 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1 Tobihata-cho Tobata-ku Kitakyushu 804)

\* 2 新日本製鉄(株)技術開発本部 (Technical Development Bureau, Nippon Steel Corp.)

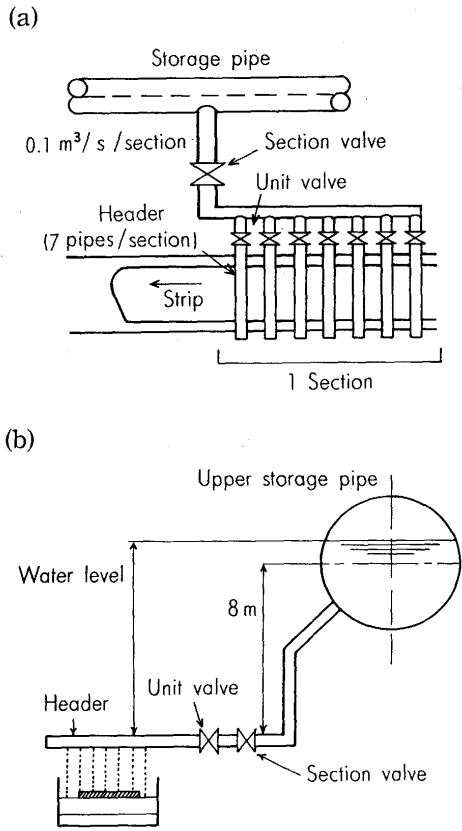


Fig. 2. Detail of cooling equipment. (a) Cooling header layout. (b) Overhead main storage pipe.

### 3. 注水制御システム構成

注水制御のシステム構成をFig. 3に示す。圧延速度の変化に対しても温度ハンチングを防止し、制御系の安定性を確保するという観点から、注水セクション長で分割したストリップ片毎に制御目標（状態変数）を設定した上で、各セクション通過毎にストリップ片の状態変数の実績値を冷却モデルから推定するオブザーバーと、制御目標値と推定値

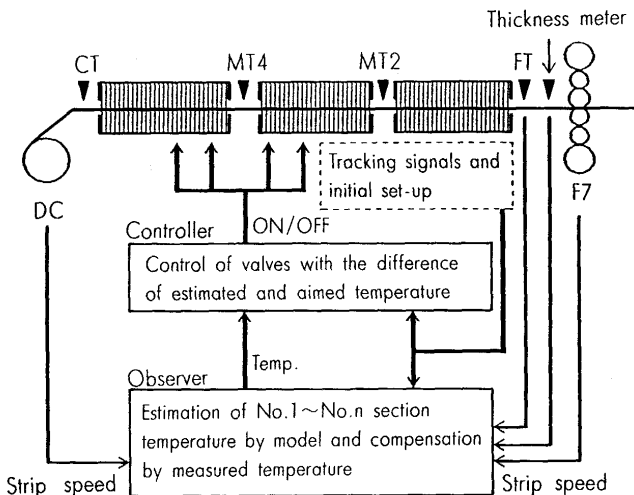


Fig. 3. Strip temperature control system.

の偏差から制御必要量の演算および、出力を行うコントローラーで制御システムを構成した。冷却中のストリップの加減速に対しても制御目標に早く収束させることが可能で、冷却温度履歴の変動を抑えた注水が容易に実現できる利点を有する。制御目標（状態変数）として必要な条件は、任意の冷却条件に対し、一義的に決まる物理量が望ましく、例えば普通鋼の場合、冷却過程のストリップ温度は通常、単調減少する事が期待できるため、制御目標としての状態変数は「ストリップ温度」を採用している。しかし、以下に述べる高炭素鋼のように冷却過程でありながら、変態挙動に伴う発熱でストリップ温度の上昇が観測される鋼種に対しては、単調変化する別の物理量を状態変数として採用する必要がある。

### 4. 高炭素鋼の変態挙動

Fig. 4に炭素含有量が0.5%の高炭素鋼のホットランでの冷却中に観測される中間温度 (MT4), 捲取温度 (CT) の温度実績の一例を示す。仕上圧延終了後に冷却されたストリップは、A<sub>1</sub>以下に過冷された後に変態が始まる。この時変態の進行に伴う潜熱が放出され、これによりストリップ温度は上昇する。その結果、冷却中のストリップ温度はMT4 < CTとなり、中間温度計 (MT2) の位置から捲取温度計の設置位置の間で、変態発熱による温度上昇が認められる。つまり、変態中はあたかも自己発熱したかのようにストリップ温度は上昇し、ホットラン上において注水制御の目標とする温度が結果的に、最大で3箇所 (Fig. 4中のa, b, c点) で発生する。この事は、制御上の状態変数を「ストリップ温度」とした場合、仮に変態終了時点の温度を目標 (c点) にしようとしても、圧延速度の加減速による外乱で変態前 (a点), あるいは変態中の温度 (b点) に引き込まれるか、又はその間で不安定な振動状態に陥る現象が発生することを意味している。従って高炭素鋼の冷却制御には、変態挙動を考慮することが必須となる。この現象は炭素含有量が0.3%をこえるプレーンカーボン系の高炭素鋼で顕著に現れる。

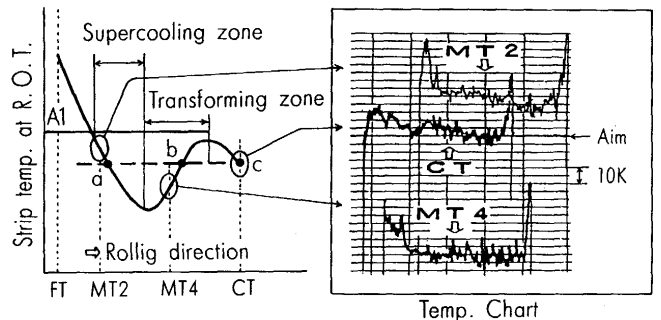


Fig. 4. An example of measured temperature of high carbon steel.

### 5. 温度推定モデル

ホットランテーブルでの冷却中に、一旦過冷されたストリップは、変態潜熱の放出により温度が上昇することから冷却過程での温度推定を行うために、内部発熱項を含むヒートバランスの式(1)より、任意の*i*セクション出側における温度推定モデル式(2)を作成した。

$$C_p h \frac{dT}{dt} - h \dot{q} = -\alpha(T - T_w) \dots\dots\dots (1)$$

$$T_i = T_{i-1} + \frac{h}{\alpha} \dot{q} \left\{ 1 - \text{Exp}\left(\frac{\alpha t}{C_p h}\right) \right\} - (T_{i-1} - T_w) \left\{ 1 - \text{Exp}\left(\frac{\alpha t}{C_p h}\right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の左辺第二項は内部発熱流束である。式(2)の右辺第一項は*i*セクション入側のストリップ温度、第二項は変態発熱による温度上昇分、第三項は冷却による温度降下分を表す。第二項は冷却過程での変態中においてのみ考慮すべきであるため式(2)をオンラインでの制御に使用する場合、変態の開始終了の判定をストリップ片毎に逐次行いながら計算する必要がある。

### 6. 変態モデルの考え方

鋼の変態挙動の定式化は、一般に連続冷却挙動の解析で行うが、すべての鋼種に対し、操業条件すべての範囲を充足するCCT曲線およびTTT曲線を得ることが困難なため、すでに定式化されたモデル<sup>3)</sup>を用い、変態開始、変態進行、変態完了の3つのステージで、実操業上精度を損なわない範囲で、かつオンラインリアルタイムでの計算が可能なレベルまでの簡素化を行った。

#### 6・1 変態開始決定モデル

変態開始温度はストリップ冷却速度により変化するため、仕上圧延後の冷却履歴より決定する場合、一般にTTT曲線を用いたScheil<sup>6)</sup>の手法が使われる。しかし、オンラインでの処理の簡易性およびモデル調整の柔軟性の点から以下の方式を採用した。まず、鋼種毎に作成したCCT曲線から、冷却速度に対応した変態開始温度を求めた。Fig. 5にCCT曲線より求めた冷却速度とγ→α変態開始温度の関係の一例を示す。実操業での冷却速度は、ホットランテーブル上の各セクションで変化するので各ストリップ片に対し変態開始温度を決定するための平均冷却速度を求めるために仕上圧延終了後から各セクション通過毎に式(3)で計算される冷却速度を、式(4)で示す指数平滑法を用い平均化する。そして、こうして求まる平均冷却速度に対応した変態開始温度と当該ストリップ片の温度を逐次比較しながら、ストリップ片の温度が変態開始温度に到達した時点で変態開始とする。

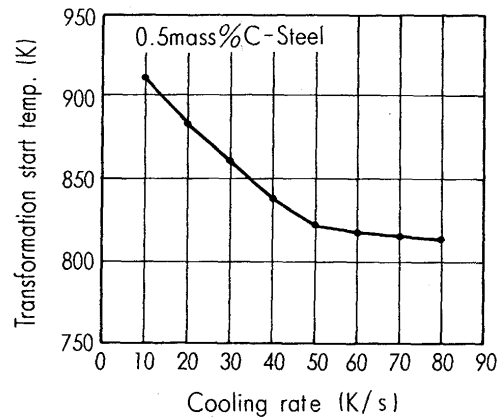


Fig. 5. Relation between cooling rate and start temp. of pearlite transformation.

$$CR_i = (T_{i-1} - T_i) / t_i \dots\dots\dots (3)$$

$$CR_{av} = k \cdot CR_i + (1 - k) CR_{i-1} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $T_{i-1}$ 、 $T_i$ は*i*セクション入出側のストリップ温度、 $t_i$ は*i*セクションの通過時間、 $k$ は指数平滑係数である。Kの値は経験的には0.15~0.20が適しているようであり、これは各セクションの冷却速度( $CR_i$ )を通過時間( $t_i$ )で荷重平均した値に近い数値を示す。

#### 6・2 変態進行速度決定モデル

変態中の潜熱放出にともなう発熱速度 $\dot{q}$ は、一般に式(5)で示す格子変換に伴う潜熱 $q_l$ と磁気潜熱 $q_m$ の和として求まる。

$$\dot{q} = \rho \left[ q_l \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (q_m x) \right] \dots\dots\dots (5)$$

$\rho$ は密度、 $x$ は変態率を表し、 $q_m$ はFig. 6に示す比熱の実験値より式(6)によって計算することができる。

$$q_m = \int_T^{1183} (C_p - C_p^a) dT \dots\dots\dots (6)$$

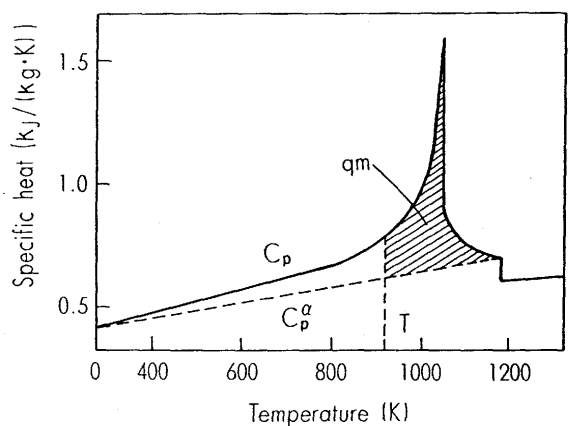


Fig. 6. Specific heat and latent heat of magnetic transformation of steel.

ここで、 $T$ は変態完了温度、 $C_p^a$ は磁気比熱を無視した比熱である。実操業で取りうる冷却速度の変化範囲であれば、Fig.14(a)に示すように変態中に観測されるストリップ温度の変化幅は大きくないため、 $q_m$ は鋼種毎に一定とみなし、式(5)、(6)を式(7)で表す。

$$\dot{q} = \rho \cdot (q_1 + q_m) \cdot \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)の右辺に示す変態進行速度 ( $dx/dt$ ) は、 $A_1$ 変態点以下の任意の温度毎に、Fig.7に示すように鋼種毎に求めたTTT曲線より求める。ここでCCT曲線でなくTTT曲線を採用した理由は、高炭素鋼の変態中に観測されるストリップ温度の変化幅は小さくなくほぼ一定と見なす方が妥当であると考えられるからである。(Fig.14(a))。冷却中の各温度における単位時間当たりの変態率の変化すなわち変態進行速度 ( $dx/dt$ ) は、変態開始から終了までの所要時間の逆数を取り、平均値で表現した。Fig.8に変態中のストリップ

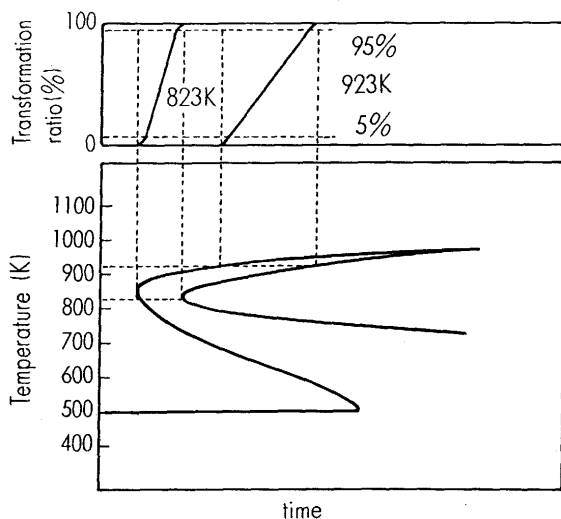


Fig. 7. An example of definition of transformation ratio.

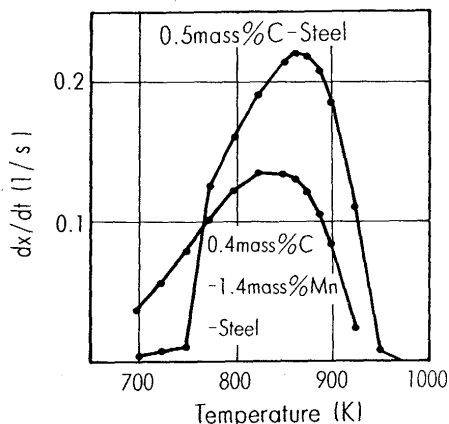


Fig. 8. Relation between strip temperature and transformation ratio.

温度と平均変態進行速度 ( $dx/dt$ ) の一例を示す。

6・3 変態完了決定モデル

変態を開始して以降、各セクションにおける変態率 $x$ の総和が1.0となった時点で変態が完了する。すなわち、式(8)において $X=1.0$ をもって変態完了とする。

$$X = \int_0^t \frac{dx}{dt} dt \dots\dots\dots (8)$$

7. 制御目標の考え方

高炭素鋼の注水制御に用いる制御目標 (状態変数) としては、任意の冷却条件に対し、一義的に決まる物理量が望ましいことから「ストリップ温度」に代わる制御目標として式(9)で示す単位体積当たりの冷却熱流束の時間積分値、すなわち累積抜熱量 $E$ を採用した。

$$E = \frac{1}{h} \int_0^t \alpha (T - T_w) dt \dots\dots\dots (9)$$

これを $i$ セクションにおける抜熱量 $E_i$ であらわすと式(10)、(11)となる。

$$E_i = \frac{1}{h} \alpha_i \cdot (T_i - T_w) \cdot t_i \dots\dots\dots (10)$$

$$E = \sum E_i \dots\dots\dots (11)$$

Fig.9に仕上圧延終了温度(FT)から捲取温度(CT)までのホットランテーブル上の温度履歴と累積抜熱量 $E$ の関係を示す。ストリップ温度は、 $A_1$ 以下に過冷され降下した後、変態により上昇し、変態完了とともに再度降下に転じる。一方、累積抜熱量は変態発熱の影響を受けず単調に増加することがわかる。また、捲取温度(CT)における累積抜熱量を制御目標にすることで、セットアップ時の注水条件を決定する際に、変態の完了、未完了のコントロールが容易にできることもわかった。

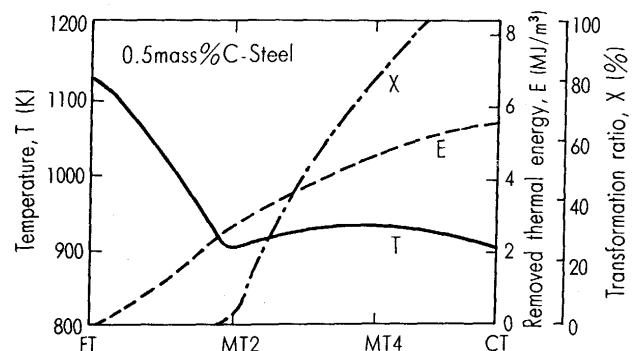


Fig. 9. History of temperature and accumulated removed thermal energy.

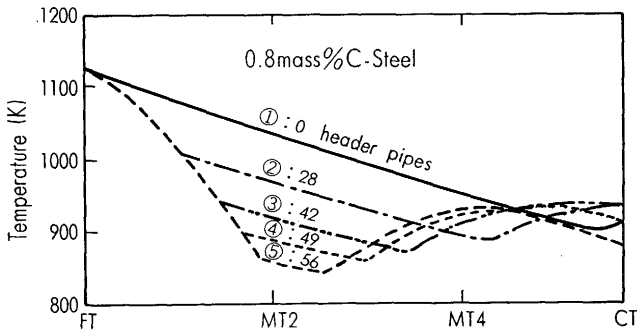


Fig. 10. Relation between cooling intensity and temperature history.

### 8. モデル特性

Fig.10はホットランテーブル上におけるストリップ温度履歴と注水量の関係を示す。圧延速度を一定にした上で、注水量を①から③へと増加させると、逆に捲取温度(CT)は上昇してしまうという操業上の現象も良く説明できる。

### 9. 高炭素鋼を対象としたオンライン制御システム

前述の注水制御システムに高炭素鋼を対象とする制御システムを付加し、自動化を図った。Fig.11にシステムの機能構成を示す。セットアップ時に各冷却セクション毎の累積抜熱量の目標値を決定する初期設定機能と、目標との偏差を注水量に変換する機能、圧延中の圧延終了温度(FT)の変化にあわせ目標とする累積抜熱量をリアルタイムで修正する機能、さらに捲取温度(CT)の目標値と実績値の誤差をもとにモデル内の熱伝達係数をフィードバックで修正する機能で構成した。高炭素鋼の場合、中間温度(MT2, MT4)では変態の進行状態を判定することが困難なため、中間温度計の実績値は変態開始温度、変態速度等の制御用物性値

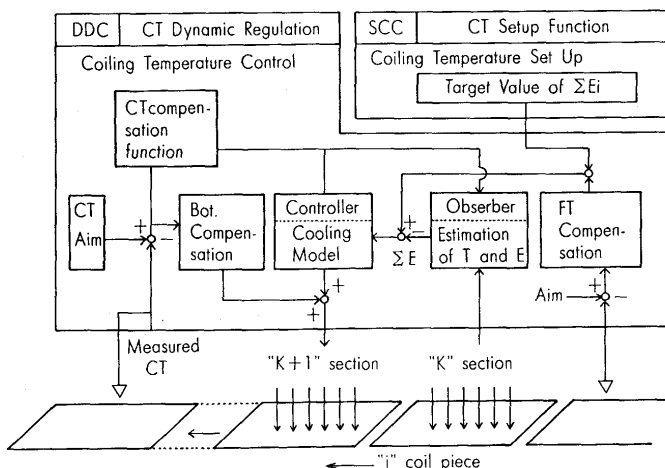


Fig. 11. Cooling system for high carbon steel.

の適合性を判定するだけにとどめオンラインの制御には用いない。この制御システムにより圧延速度、仕上終了温度などが変動しても、高い精度で目標温度を実現する制御が可能となった。

### 10. オンライン適用結果

セットアップ時のストリップ温度推定精度を評価するため、ホットランテーブル上の中間温度(MT4)と捲取温度(CT)における推定値と実績の比較を行った。その結果をFig.12の(a), (b)に示す。変態発熱現象を考慮した結果、温度推定精度はほぼ±20°C以内に入ることが確認できた。またストリップ全長にわたる温度適中率はFig.13に示すように±30°Cに対し、96%以上が達成できた。

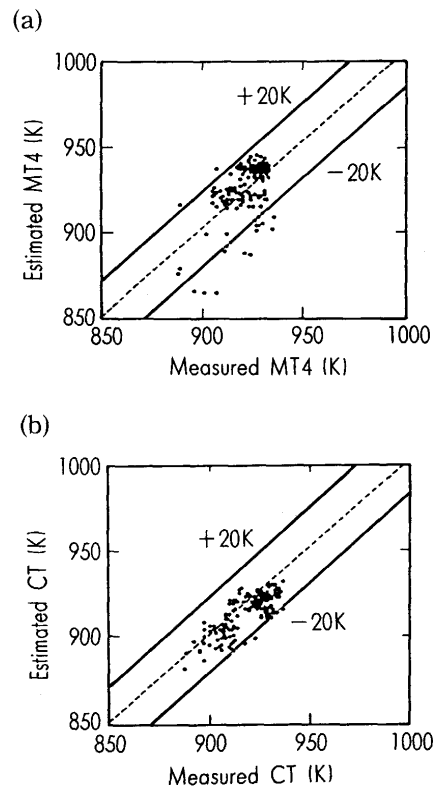


Fig. 12. Prediction accuracy of strip temperature. (a) Accuracy for MT4. (b) Accuracy for CT.

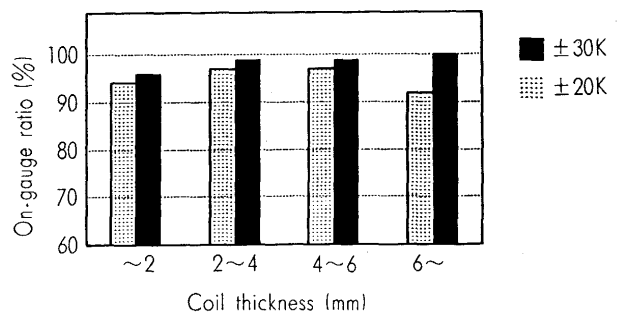


Fig. 13. On-gauge ratio of coiling temperature.

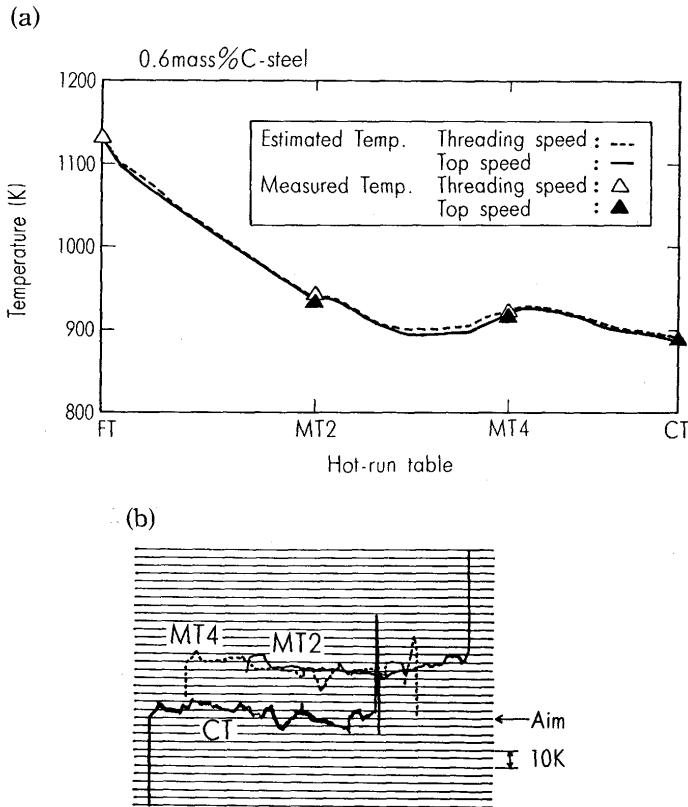


Fig. 14. Strip temperature under accelerated rollig speed at hot-run table. (a) Temperature history. (b) Measured strip temperature.

また、実操業における温度履歴の推定結果と、中間温度計での計測結果をFig.14に示す。圧延速度の加速前後においても良好な制御結果が得られた。

## 11. 結言

高炭素鋼は熱延でのホットラン冷却時に、変態に伴う発熱が顕著である。変態発熱を考慮した冷却モデルの開発に際し、内部発熱項を含むヒートバランスの式を用い、この中に含まれる発熱項は変態中のみ有効とするために、変態挙動の判定を①変態開始、②変態進行、③変態終了の三段階に分けて行った。また、注水セクション毎の制御目標を変態発熱量を考慮した累積抜熱量に変更することにより、圧延速度の変化、あるいは仕上圧延終了温度の変化に対して追随性の良い制御が可能となることが分かった。これにより、高炭素鋼の冷却制御性が飛躍的に向上し、完全自動での注水作業が実現できた。

### 記号

- $\alpha$  : 熱伝達係数 ( $W/m^2K$ )
- $\rho$  : ストリップ密度 ( $kg/m^3$ )
- $C$  : ストリップ比熱 ( $J/kg \cdot K$ )
- $h$  : ストリップ厚 (m)
- $T$  : ストリップ温度 (K)
- $T_{i-1}$  :  $i$ セクション入側ストリップ温度 (K)
- $T_i$  :  $i$ セクション出側ストリップ温度 (K)
- $T_w$  : 冷却水温度 (K)
- $t$  :  $i$ セクション通過時間 (s)
- $\dot{q}$  : 変態発熱速度 ( $W/m^3$ )

### 文献

- 1) 小西政治, 河原敏彦, 久保利吉, 大島有三, 菊間敏夫: 鉄と鋼, **70** (1984), p.S1106
- 2) 久保利吉, 大島有三, 小西政治, 河原敏彦, 小笠原昭宣, 菊間敏夫: 鉄と鋼, **70** (1984), p.S1107
- 3) 矢田 浩, 瀬沼武秀: 日本金属学会報, **29-6** (1990), p.430
- 4) 近藤義孝, 小田高士, 小西政治, 村上治則, 末広正芳: 材料とプロセス, **2** (1993), p.310
- 5) 近藤義孝, 小西政治, 真鍋晃治, 河原敏彦, 村上治則: 材料とプロセス, **2** (1992), p.359
- 6) E.Scheil: Arch. Eisenhüttenw., **8** (1935)12, p.565