

高炭素鋼の変態予測モデルの開発とその実機への適用

A Mathematical Model for Predicting Transformation of High Carbon Steel During Cooling and Its Application to On-line Temperature Control in Hot Strip Mill

末 広 正 芳^{*⁽¹⁾} 小 田 高 士^{*⁽²⁾} 瀬 沼 武 秀^{*⁽³⁾} 小 西 政 治^{*⁽⁴⁾}
Masayoshi SUEHIRO Takashi ODA Takehide SENUMA Seiji KONISHI

抄 録

連続熱延工程の冷却工程における高炭素鋼の温度コントロール精度の向上を図る目的で、高炭素鋼の冷却中の変態進行を予測するモデルを開発した。このモデルを変態潜熱の発生を考慮した温度計算モデルに取り入れることで、ホットランテーブル上での高精度の鋼板温度変化の計算を可能とした。更に、このモデルを実機の注水制御システムに導入し高炭素鋼の冷却制御性を飛躍的に向上させ、完全自動での注水作業を実現した。

Abstract

A mathematical model to calculate the transformation of high carbon steel during cooling has been developed, aiming at improving the controllability of temperature of steel on the run-out table of hot strip mill. Coupled with a heat conduction equation taking the latent heat evolution into account, the model enables the calculation of steel temperature with great accuracy. The introduction of the model into the cooling control system of the hot strip mill improves the controllability of the temperature. As a result, high accuracy of temperature control is realized without any human intervention to the cooling control system.

1. 緒 言

炭素を0.3%以上含有する高炭素鋼板では、高温のオーステナイト状態から冷却すると変態潜熱の発生による温度上昇がみられる。この温度上昇は実機での温度制御を困難とするだけでなく、材質ばらつきの原因ともなる。例えば実機において巻取温度をコントロールする際に、冷却水の注水量を増加すると巻取温度が低下していくのが普通であるが、高炭素鋼では注水量の増加に伴い巻取温度が上昇するという通常とは逆の現象が生じることがある。このような状況に対応した確かな温度制御を行うには、今までの巻取温度制御システムとは異なる新しい注水制御システムを構築しなければならない。そのためには、まず冷却中の温度履歴をできる限り正確に予測できる温度推定モデルを開発する必要がある。温度上昇の原因が変態に伴う潜熱の発生であることから、この温度計算精度の向上には冷却中に起こる変態を高精度で予測することが重要となる。

著者らは以前に低炭素鋼の変態を予測するモデルを開発した¹⁾。低炭素鋼では冷却中にみられる変態はフェライトが主体となることから、このモデルではオーステナイトからフェライトへの変態を主体に開発した。ところが高炭素鋼ではパーライト変態が主体となることから、このパーライトの変態進行を高精度で計算するモデルの開発が必要となる。このような観点からオーステナイトからパーライトへの変態をより詳細に検討し、その進行を予測するモデルの開発

を進め、実機で起こる現象のオフラインでの予測を行ってきた²⁾。また、実機のオンラインコントロールへの適用に関しても検討を進め、実機での完全自動注水制御システムの開発を行った³⁾。本報告では、高炭素鋼の変態予測モデルの開発とその実機への適用に関するこれまでの研究成果を総括的に報告する。

2. 変態予測モデル

2.1 基本式

オーステナイトから他の相への変態がオーステナイト粒界で核生成し、その後この変態が核生成・成長で進行する際の変態進行挙動を表す式として、核生成速度及び成長速度が時間に依存しないという仮定のもとでCahn⁴⁾は、次の式を導いた。

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

ここでIは核生成速度、Gは成長速度、Sは単位体積あたりの核生成サイトの面積である。この式を変態速度 dX/dt の形で表し更に時間の項を消去すると

$$\frac{dX}{dt} = 4\left(\frac{\pi}{3}\right)^{1/4} (IS)^{1/4} (G)^{3/4} \left(\ln \frac{1}{1-X}\right)^{3/4} (1-X) \quad \dots\dots(2)$$

が得られる。この式は変態が核生成・成長で進行する場合を表し、変態の進行に対し加算則が成り立つ場合に適用できる。核生成サイトすべてが新しい相に覆われた状態では変態は成長だけで進む(サ

*⁽¹⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員

*⁽²⁾ 八幡製鐵所 薄板部 熱延技術室 室長

*⁽³⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員

*⁽⁴⁾ 八幡製鐵所 薄板部 熱延技術室 掛長

イト・サチュレーション)が、この場合の変態進行は次の式で表される。

$$\frac{dX}{dt} = 2SG(1-X) \quad \dots\dots(3)$$

これらの式を用いることで任意の冷却過程に対する変態進行の計算を容易に行うことができる。ただし、これらの式は理論的に導かれたものであり実際の適用にあたっては実験係数を用いる必要がある。表1にフェライト、パーライト、ベイナイト変態の計算に用いられる式及びそれぞれの変態に対し求めた係数を示す^{1,2)}。フェライト変態では核生成・成長機構及びサイト・サチュレーション機構の両方を用い、パーライト変態に対しては核生成・成長機構のみを、ベイナイト変態に対してはサイト・サチュレーション機構のみを用いる。この表に示されるように、フェライト及びベイナイトの成長速度としては、Zener-Hillertの式⁵⁻⁷⁾を用いており、パーライトの成長速度としてはオーステナイト中の固溶炭素の体拡散律則⁸⁾による式を用いた。なお、フェライト、ベイナイトの係数は0.1mass%C-1mass%Mn-0.5mass%Si鋼を用い、またパーライトの係数は0.5mass%C鋼を用いて決定した。

2.2 冷却中の変態進行の計算方法

前述の式を用いた冷却過程での変態の計算は次のように行う。冷却中の鋼板温度がAe₃温度に達したところでオーステナイトからフェライトへの変態の計算を開始する。このときのAe₃温度は熱力学データ⁹⁾を用いパラ平衡条件のもとで計算する。オーステナイトからフェライトへの変態はオーステナイト中の固溶炭素の拡散に支配されており、変態の進行にともないオーステナイト中へ固溶炭素が濃化していく。この濃化はここではオーステナイト中の平均固溶炭素の濃化として

$$C_\gamma = (C_0 - X_F C_\alpha) / (1 - X_F) \quad \dots\dots(4)$$

により計算する。ここでC₀は鋼材の含有炭素量、C_αはフェライト中の固溶炭素量、X_Fはフェライトに変態した体積分率を表す。

パーライト変態は、通常オーステナイト中の固溶炭素量が平衡状態図において、A₁温度以下に外挿したA_{cm}線に達したときに開始す

ると仮定される。ところが、実際の挙動はこの仮定とは異なる。図1は恒温変態実験を行った際の変態温度とフェライト体積分率を示す。前述の仮定では変態温度とフェライト分率の関係は実線のようになるのに対し実測は記号で示す挙動をとる。この結果からパーライト変態の開始条件として点線で示される条件を用いた。このように、パーライト変態の開始条件が低温側でA_{cm}線からずれる原因としては、フェライト変態中のフェライト/オーステナイト界面のオーステナイト側の固溶炭素量が局所平衡によりA_{cm}線の炭素量より増加することが考えられる。

ベイナイト変態開始条件はT₀温度¹⁰⁾と関連して議論されることが多いが未だに明確とはなっていない。ここでは実験から求めたベイナイト変態開始温度を化学成分を変数として定式化し用いた¹⁾。

3. 熱間加工モデルとの結合

鋼の変態挙動は熱間加工の影響を強く受ける。これは変態の核生成サイトとなる変態前のオーステナイト粒のサイズ変化や変形帯の導入、核生成速度や成長速度に影響を与える転位密度の変化などによる。ここでは熱間加工の影響は滲漕らにより開発された熱間加工変化予測モデル¹¹⁾と結合することで考慮した。このモデルでは加工により導入されるひずみは転位密度に換算して取り扱われる。そこ

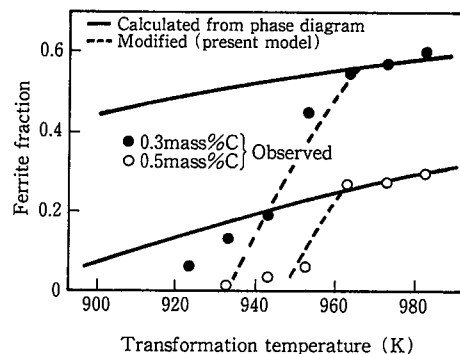


図1 変態温度とフェライト分率の関係(測定値及び計算値)

表1 変態モデルで使用される式及び係数

Transformation	Basic equation of transformation rate	Factor corresponding to nucleation rate and growth rate	Coefficient
Ferrite	nucleation and growth $\frac{dX}{dt} = 4.046(k_1 S I G^3)^{1/4} \left(\ln \frac{1}{1-X}\right)^{3/4} (1-X)$	$1 = T^{-1/2} D \cdot \exp\left(-\frac{k_3}{RT \Delta G_v^2}\right)$	$k_1 = 17476$ $k_2 = 8.933 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{21100}{T}\right)$ $k_3 = 0.957 \times 10^8 \text{ (J}^3/\text{mol}^3)$ $S = 6/d_\gamma^4$
	site saturation $\frac{dX}{dt} = k_2 \frac{6}{d_\gamma} G(1-X)$	$G^* = \frac{1}{2r} D \frac{C_{\gamma\alpha} - C_\gamma}{C_\gamma - C_\alpha}$	
Pearlite	nucleation and growth	$1 = T^{-1/2} D \cdot \exp\left(-\frac{k_4}{RT \Delta T^2}\right)$ $G = \Delta T \cdot D \cdot (C_{\gamma\alpha} - C_{\gamma\beta})$	$k_1 = 2.01 \times 10^{13}$ $k_4 = 2.27 \times 10^9 \text{ (J}^3/\text{mol}^3)$ $S = 6/d_\gamma$
Bainite	site saturation	$G^* = \frac{1}{2r} D \frac{C_{\gamma\alpha} - C_\gamma}{C_\gamma - C_\alpha}$	$k_2 = 6.816 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{3431.5}{T}\right)$

(Note) d_γ: austenite grain size(cm), D: diffusion coefficient of carbon in γ(cm²/s)
 C_γ: carbon content in γ C_α: carbon content in α
 C_{γ_α}: carbon content in γ at γ/α boundary
 C_{γ_{cem}}: carbon content in γ at γ/cem boundary
 ΔT: undercooling below Ae₁
 G*: Zener-Hillert equation (the value was calculated with the method by Kaufman et al.)
 r: radius of curvature of advancing phase
 γ: austenite, α: ferrite, cem: cementite

で、ここではこのモデルで計算されるオーステナイト粒径と転位密度から求まる有効オーステナイト粒径¹²⁾を用いることで、変態モデルと熱間加工モデルを結合している。これにより、連続熱間圧延(以下熱延と略す)工程のように冷却前に加工が加わるようなプロセスでの冷却中の変態進行の予測精度の向上を図っている。

4. 冷却中の鋼板温度の計算方法

高炭素鋼では冷却中に変態潜熱が発生することによる鋼板温度の上昇がみられる。このような鋼板温度変化を予測するために、変態潜熱の発生を考慮した2次元熱伝導方程式を用い、温度変化を計算した。この熱伝導方程式は次のように表される。

$$\mu C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{Q} \quad \dots(5)$$

ここで μ は鋼の密度、 λ は熱伝導度、 C_p は比熱を表す。ただしこの比熱は通常の比熱ではなく磁気潜熱を考慮しないときの比熱を表す。 \dot{Q} は変態にともなう潜熱の発生を表すが、これは式(6)を用い計算した。

$$\dot{Q} = \mu \left[q_i \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (q_m X) \right] \quad \dots(6)$$

ここで X は変態率、 q_i 、 q_m はそれぞれ格子変態に伴う潜熱、磁気潜熱を表す。ここで用いた q_i の値は16.7J/gであり、 q_m は図2に示される値である。なお、式(5)を用いた温度計算には2次元有限要素法を用いた。

5. オフラインでの適用

5.1 ホットランテーブル上での鋼板温度の予測

図3に本モデルで0.5mass% C鋼のホットラン上での温度変化及び変態挙動を計算した結果を示す。温度変化のグラフには実機での温度実測値も示してある。実測値でみられる冷却中の温度上昇が計算でも予測されており計算と実測がよく一致していることが分かる。また、この温度上昇が変態潜熱の発生による現象であることが変態進行挙動と温度変化の比較から理解できる。この結果は、本モデルによりホットランテーブル上での最適冷却方法の検討がオフライン

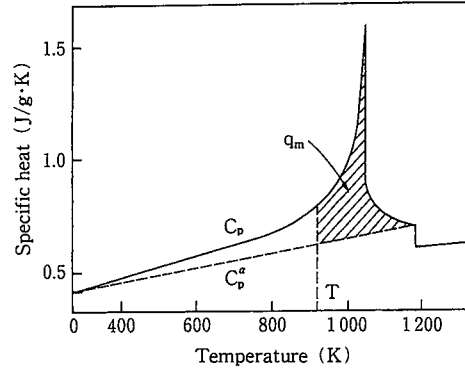


図2 鋼材の比熱(q_m : 磁気変態の潜熱)

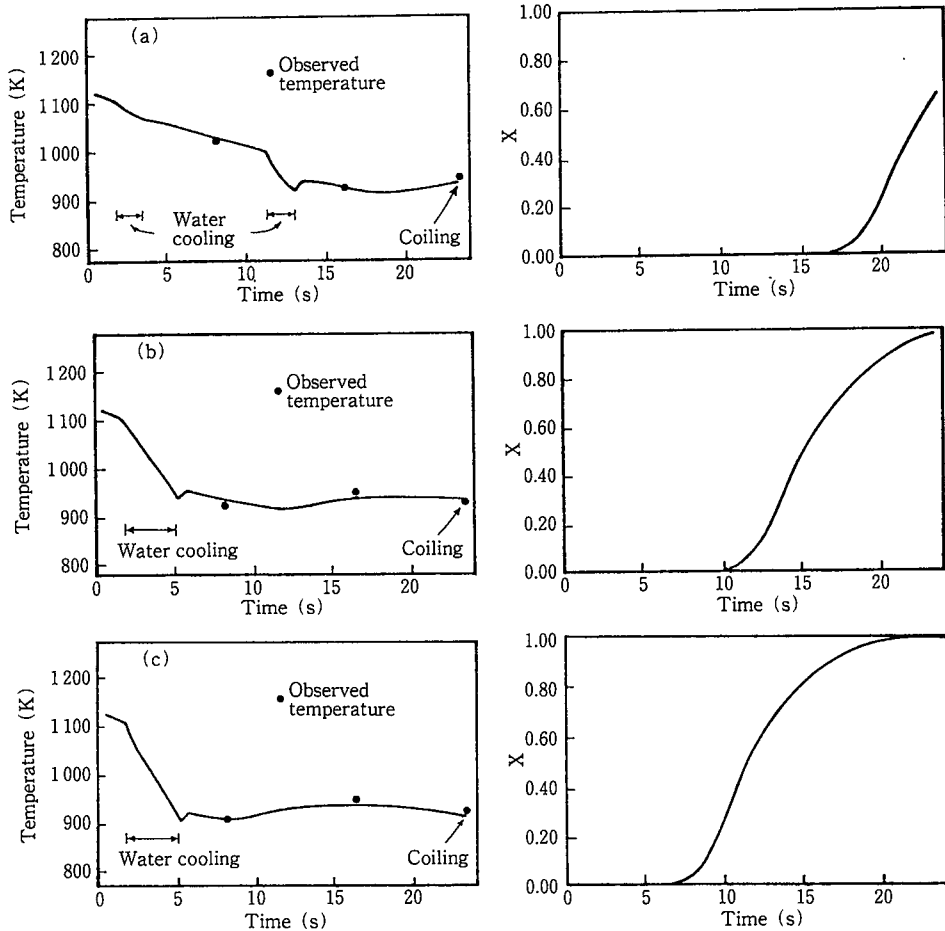


図3 0.5mass% C鋼のホットランテーブル上での鋼板温度変化と変態挙動

で検討可能であることを示唆する。

5.2 生産性向上に関する検討

連続熱延工程で生産性を向上するには通板速度を増加することが必要である。図4は仕上温度が1123K、巻取温度が873Kで巻取前に変態が95%以上完了するという条件を満足するように水冷中の熱伝達係数1670kJ/m²hKのもとで冷却曲線を計算した結果である。一方、図5は水冷時の熱伝達係数を5020kJ/m²hKとしたときの冷却曲線であるが、これらの図からわかるように熱伝達係数を1670から5020kJ/m²hKに増加させることでホットランテーブル上の通過時間を約12秒から5秒まで短縮することができる。ところがこの場合には冷却中に過冷された際の温度がベイナイト変態開始温度（この鋼種では約823K）以下の800K程度まで低下し、品質を劣化させるベイナイトが生成する危険性が生じる。この危険性は図6に示すように水冷する領域を分割することで避けられる。図6ではホットランテーブル上の通過時間は、図5とあまり変わらないが最冷点の温度が823K以上であり、ベイナイト変態が開始することはない。

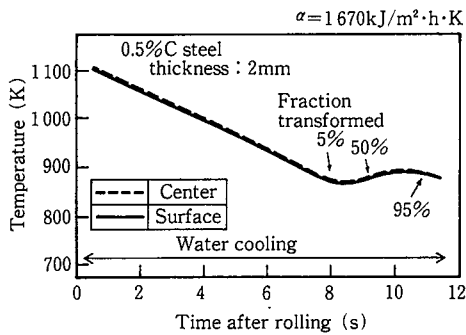


図4 0.5mass% C鋼のホットランテーブル上での鋼板温度変化

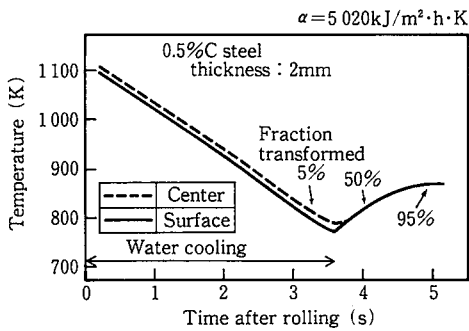


図5 0.5mass% C鋼のホットランテーブル上での鋼板温度変化 (図4より冷却能を強化した場合)

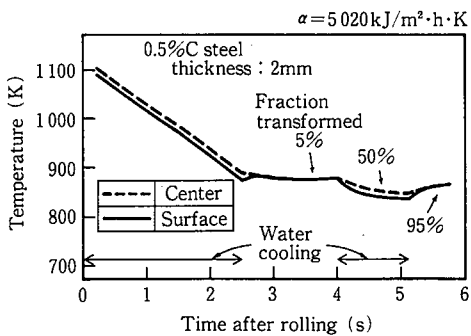


図6 0.5mass% C鋼のホットランテーブル上での鋼板温度変化 (図5の冷却ゾーンを分割した場合)

このように本モデルを用いることで、高生産性を達成するための適切な冷却パターンの検討を行うことが可能となる。

5.3 仕上げ温度の影響

連続熱延工程で仕上げ温度が変動すると、冷却条件が一定の場合巻取温度の変動につながる。高炭素鋼の材料特性はほぼ巻取温度と対応することから、仕上げ温度の変動は材料特性の変動につながる。言い換えれば、均一な特性を得るためには仕上げ温度が変動した場合にも巻取温度を一定に保つことが必要となる。図7、8はこの点に関する検討を行った結果を示す。図7は一定冷却条件で仕上げ温度が変化したときの冷却曲線を表し、図8は冷却能力を変化させ仕上げ温度の変動を補正し巻取温度を一定とした際の冷却曲線である。これらの計算結果から分かるように、このモデルにより仕上げ温度の変動を補正するような冷却条件の検討が可能である。

6. オンラインでの適用

6.1 ホットラン注水設備と注水制御システム

八幡製鐵所 熱間圧延工場におけるホットラン注水設備の概要を図9、10に示す。上部下部ともパイプライン方式を採用しセクション分割は21、各セクションごとに7本のヘッダーを有する。更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

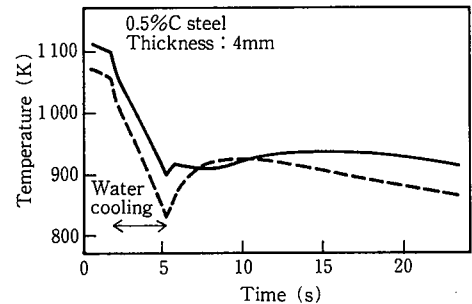


図7 圧延仕上げ温度が異なる場合のホットランテーブル上での鋼板温度変化

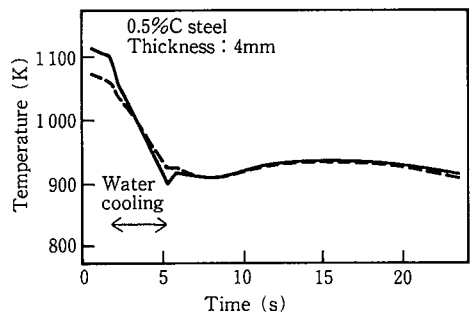


図8 圧延仕上げ温度が異なる場合のホットランテーブル上での鋼板温度変化 (巻取温度を一定とするため冷却能を調整した場合)

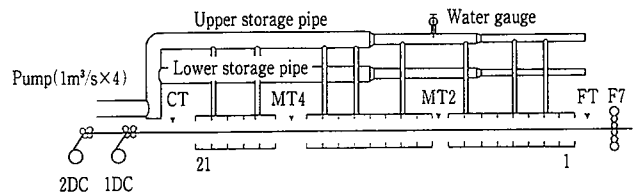


図9 ホットランテーブル冷却設備全体図

してある。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¹³⁾。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ごとのON/OFF制御で5°C/ヘッダーを安定的に実現できる。

図11は注水制御のシステム構成を示す。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ごとに制御目標(状態変数)を設定した。そのうえで、各セクション通過ごと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の偏差から制御必要量の演算及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速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い。例えば普通鋼の場合冷却過程のストリップ温度は通常、単調減少することが期待できるため、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、前述したように高炭素鋼では冷却中に変態潜熱の発生による温度上昇がみられる。つまり鋼板温度は単調変化をしない。したがって、高炭素鋼では単調変化をする別の量を状態変数として採用する必要がある。

そこで高炭素鋼では次の式で示す単位体積あたりの冷却熱流速の時間積分値、すなわち累積抜熱量Eを採用した。

$$E = \frac{1}{h} \int_0^t \alpha (T - T_w) dt \quad \dots\dots(7)$$

ここでhは板厚を表し、αは熱伝達係数、T_wは冷却水温度を表す。これをiセクションにおける抜熱量E_iを用いて表すと式(8)、(9)となる。

$$E_i = \frac{1}{h} \alpha_i (T_i - T_w) t_i \quad \dots\dots(8)$$

$$E = \sum E_i \quad \dots\dots(9)$$

図12にホットランテーブル上での鋼板温度変化、変態進行、及び累積抜熱量の変化の計算値を示すが、変態潜熱の発生により鋼板温度が上昇する場合でも累積抜熱量Eは単調に変化することが分かる。したがって、巻取時の累積抜熱量を制御目標とすることで、セットアップ時の注水条件を変態の完了あるいは未完了とすることが容易にできる。なお、図12の計算は前述の計算法ではなく、次に述べるオンライン用の変態進行計算モデル及び温度推定モデルを用い計算したものである。

6.2 オンライン用変態モデル及び温度推定モデル

オンラインではリアルタイム計算が必要となるため前述した変態モデルに替わり、実操業上精度を損なわない範囲で簡素化したモデルを用いた。

この簡素化したモデルは(1)変態開始を計算するモデル、(2)変態進行を計算するモデル、(3)変態完了を計算するモデルからなる。変態開始は図13に示すような冷却速度と変態開始温度の関係から決定した。この冷却速度と変態開始温度の関係は、一部の代表的鋼種ではCCT曲線を作成し冷却速度に応じた変態開始温度を求め、他の鋼種では実測を行わず前述した変態予測モデルから変態率が5%に達する温度を変態開始温度として求めた。ただし、前述のモデルで計算するには熱間圧延条件を入力する必要があるが、この条件としては鋼種ごとの狙い値を用いた。変態進行を計算するモデルでは変態進行速度が必要になるが、これに関しては温度ごとに変態開始(5%)から変態終了(95%)までの平均変態速度として求めた。この値も一部の代表的鋼種ではTTT曲線を実測することで求めたが、他の鋼種では前述した変態予測モデルを用い計算により求めた。図14には0.5

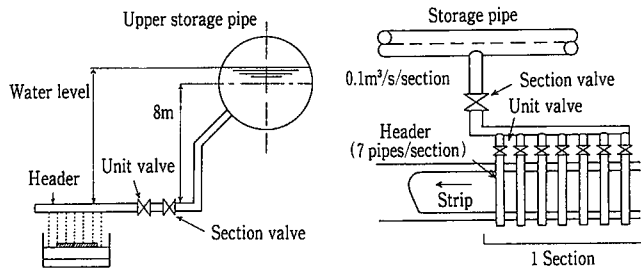


図10 冷却設備詳細

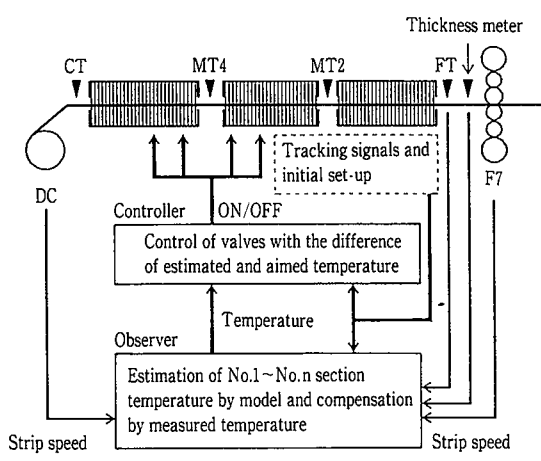


図11 注水制御システム

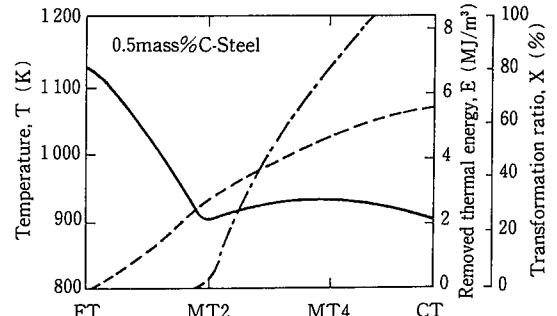


図12 冷却中の鋼板温度履歴と累積抜熱量

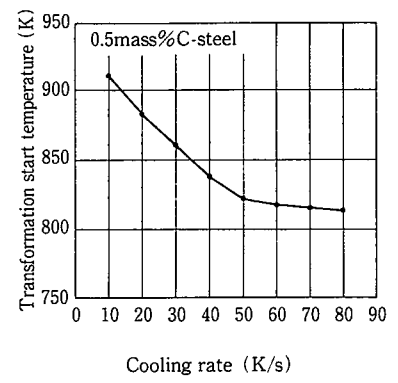


図13 冷却速度と変態開始温度の関係

mass%鋼及び0.4mass%C-1.4mass%Mn 鋼の変態速度と温度との関係を示す。変態終了は累積変態分率が1.0となった時点とした。

冷却中の温度計算は前述した2次元熱伝導方程式ではなく、オンラインでの計算により適した式(10), (11)を用いた。

$$C_p \mu h \frac{dT}{dt} - h \dot{Q} = -\alpha (T - T_w) \quad \dots\dots(10)$$

$$T_i = T_{i-1} + \frac{h}{\alpha} \dot{Q} \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{C_p \mu h}\right) \right) - (T_{i-1} - T_w) \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{C_p \mu h}\right) \right) \quad \dots\dots(11)$$

6.3 オンライン制御システム

前述のオンライン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。図15に本システムの機能構成を示す。セットアップ時に、各冷却セクションごと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、更に巻取温度(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の適合性を判定するだけに留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、仕上圧延温度等が変動しても高い精度で目標巻取温度に

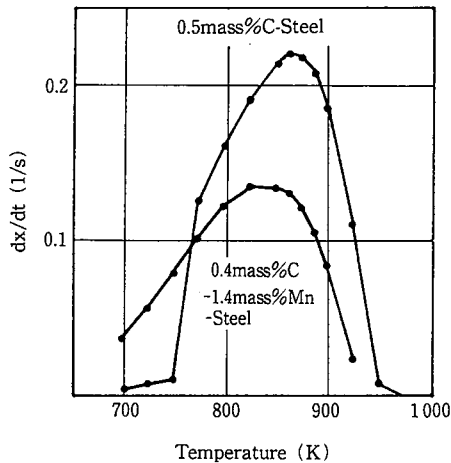


図14 変態温度と平均変態速度の関係

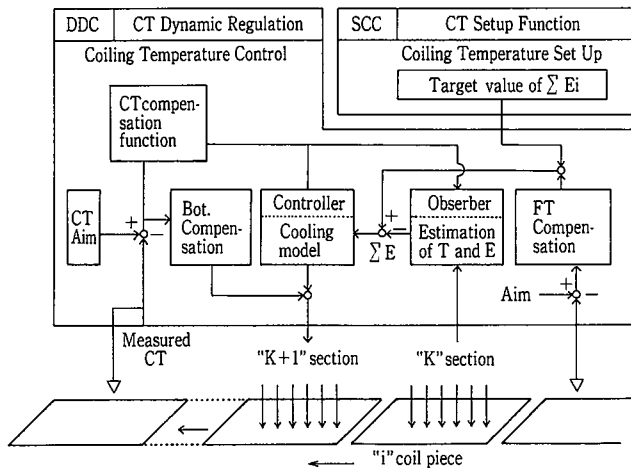


図15 高炭素鋼用オンライン注水制御システム

制御することが可能となった。

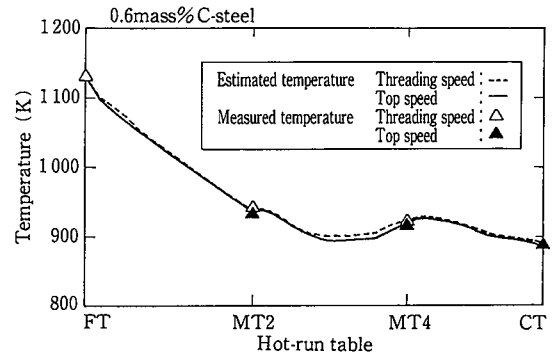
6.4 オンラインでの適用結果

図16にこのモデルを用いオンラインでの温度計算を行った結果を示す。図中には中間温度計(MT2, MT4)及び巻取温度計での温度計測結果も示すが、計測結果と計算結果は良い一致を示す。

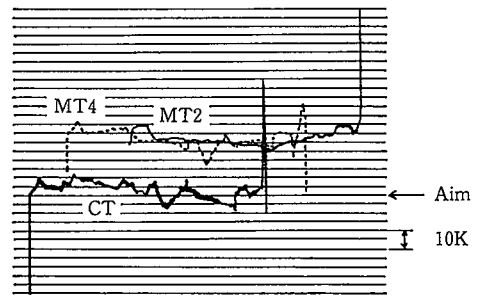
図17はホットランテーブル上の中間温度(MT4)と巻取温度(CT)における推定値と実績値の比較を示す。変態発熱現象を考慮した結果、温度推定の精度はほぼ±20°C以内に入ることが確認できた。また鋼板全長にわたる温度的中率は図18に示すように±30°Cに対し96%以上を達成することができた。

7. 結 言

高炭素鋼の冷却中の変態進行を計算するモデルを開発し、連続熱延工程のホットランテーブル上での変態進行及び鋼板温度変化の予測に適用した。その結果高炭素鋼でみられる冷却中の変態潜熱の発生にともなう温度上昇が再現でき、また、計算鋼板温度は実機での実測値と良く一致することがわかった。したがって、このモデルを用いオフライン計算機シミュレーションを行うことで、実機での冷却条件の最適化を図ることが可能であると考えられる。



(a) 加速圧延前後の温度制御実績



(b) 全長温度実績
図16 温度制御実績

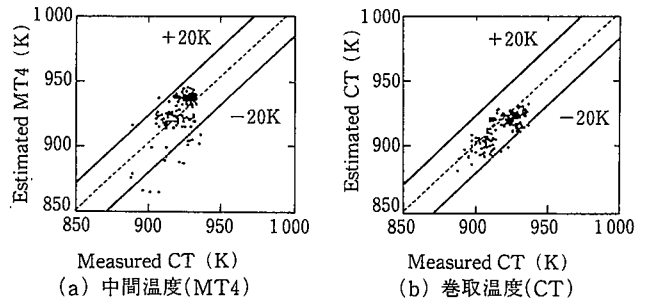


図17 温度推定精度

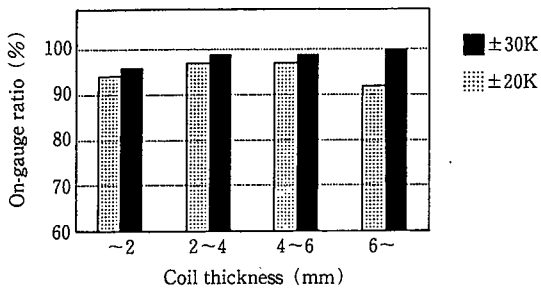


図18 温度的中率

参照文献

- 1) 末広正芳, 瀬沼武秀, 矢田浩, 松村義一, 有吉敏彦: 鉄と鋼. 73, p.1026 (1987)
- 2) Suehiro, M., Senuma, T., Yada, H., Sato, K.: ISIJ Int. 32, p.433 (1992)
- 3) 小田高士, 近藤義孝, 小西政治, 村上治則, 末広正芳, 藪田俊樹: 鉄と鋼. 81, p.191 (1995)
- 4) Cahn, J. W.: Acta Metall. 4, p.449 (1956)
- 5) Zener, C.: Trans. AIME. 167, p.550 (1946)
- 6) Hillert, M.: Jernkontrets Ann. 141, p.757 (1957)
- 7) Kaufman, L., Radcliffe, S. V., Cohen, M.: Decomposition of Austenite by Diffusional Processes. Zackay, V. F., Aaronson, H.I., eds. New York, Interscience Publishers, 1962, p.313
- 8) Hillert, M.: Decomposition of Austenite by Diffusional Processes. Zackay, V.F., Aaronson, H.I., eds. New York, Interscience Publishers, 1962, p.197
- 9) Uhrenius, B.: Hardenability Concepts with Applications to Steel. Doane, D. V., Kirkaldy, J.S., eds. TMS-AIME. 1978, p.28
- 10) Bhadeshia, H.K.D.H.: Acta Metall. 29, p.1117 (1981)
- 11) 瀬沼武秀, 矢田浩, 松村義一, 二村忠: 鉄と鋼. 70, p.2112 (1984)
- 12) Suehiro, M., Sato, K., Tsukano, Y., Yada, H., Senuma, T., Matsumura, Y.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn. 27, p.439 (1987)
- 13) 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, p. 359 (1992)

このモデルを簡素化し実機オンライン注水制御システムに導入した。その際、実機での制御指標となる状態変数をこれまでの鋼板温度から累積抜熱量に変更することで、圧延速度、仕上圧延温度の変化に対して追従性の良い制御を可能とした。その結果、高炭素鋼の冷却制御性は飛躍的に向上し、完全な自動注水作業が実現できた。