鋼板水冷工程の熱伝達係数推定法

杉山 賢司*・上野 博則**

若狭 和式**・土岐 正弘**・赤瀬 裕**

Estimation of Heat Transfer Coefficient at Water-cooling Process of Steel Plates

Kenji SUGIYAMA*, Hironori UENO**,

Kazunori WAKASA**, Masahiro DOKI** and Yutaka AKASE**

In steel manufacturing processes, it is extremely important to control the temperature of products for acquiring required quality. In order to precisely control the temperature of steel plates at water-cooling process after hot-rolling, it is necessary to know correct values for heat transfer coefficients. Those coefficients, however, are functions of cooling conditions such as plate temperature and cooling water flux, and it is usually difficult to calculate them directly from operational data observable on site. In this paper, a new approach is presented to estimate heat transfer coefficients at water-cooling process of steel plates, by combining parameter search with simulated annealing method and heat transfer calculation. Basic evaluation of this approach is conducted by using actual operational data.

Key Words: heat transfer coefficient, estimation, water-cooling, steel plate

1. はじめに

鋼板の製造工程では、所定の材質特性を得るために、熱間圧延プロセスにおける圧延条件や、それに続く水冷プロセスにおける到達温度や冷却速度の正確な制御がきわめて重要である。冷却の正確な制御のためには、鋼板表面と冷却水との間の熱伝達係数を正確に知ることが必要であるが、熱伝達係数は冷却水量密度や板温などの水冷条件の関数であり、実水冷プロセスにおいて、入出側温度などの測定可能な値から直接計算することが難しく、実験室などでさまざまな水冷条件で鋼板を水冷しながら板温を測定して求めることが多い。本論文では、メタヒューリスティクス手法の1種であるシミュレーテッドアニーリング法による探索と鋼板の伝熱計算とを組み合わせ、実水冷プロセスにおいて冷却を行なう鋼板についての温度測定値や水冷条件から、熱伝達係数を推定する試みについて報告する。

2. 対象工程

今回対象としたのは、厚鋼板の熱間圧延後の水冷プロセスであり、オンラインで鋼材の焼き入れを行ない、材質および組織を制御するのが目的である¹⁾。Fig. 1にその概略構成を示す。テーブルロール上を図中で左から右に鋼板を移動させながら、上下両面からスプレー水冷を行ない、冷却水量密度や通板速度を適切な値に設定することで、指定された到達温度まで指定された冷却速度で冷却を行なうことが求められる。プロセス入側と出側には、鋼板の表面温度(以下、板温と呼ぶ)を測定するための温度計が板幅中央位置に設置されているが、プロセス内の板温を測定することは出来ない。水量密度や通板速度などの冷却条件は、個々の鋼板の処理前に設定した後は、処理中にダイナミックに変更することは難しいため、設定された条件で冷却を行なった場合の冷却終了温度を高精度に予測することが、材質組織制御のために不可欠である。

Fig. 1 Configuration of water-cooling process

* 新日本製鐵(株)技術開発本部 富津市新富 20-1

** 新日本製鐵(株)君津製鐵所 君津市君津 1

* Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi, Futtsu

** Kimitsu works, Nippon Steel Corporation, 1 Kimitsu, Kimitsu

(Received September 2, 2005)

(Revised November 14, 2006)

3. 熱伝達係数推定方法

3.1 従来の一般的な手法とその問題点

従来、熱伝達係数を計算するためには、実験室などで、鋼板を水冷しながら板温を測定して求めることが一般的である²⁾。熱伝達係数は一般的に冷却水量密度や板温などの水冷条件の関数であることが知られており、実験室などで計算する場合は、さまざまな水冷条件での測定を行なうことが必要となり、きわめて時間と手間を要する作業となる。さらに、実験室と実製造設備とでは、冷却水量密度や移動速度などの水冷条件や、鋼板のサイズなどが異なる場合が多いこと、鋼板の表面性状(表面粗度や酸化皮膜の付着具合など)によっても熱伝達係数が変化することなどから、実験室で計算した熱伝達係数を用いて実水冷プロセスでの鋼板温度を予測する場合に、温度予測誤差やそのばらつきが大きく、オンラインでのチューニングが必要となる。

実水冷プロセスにおいて、冷却を行なう鋼板についての実測データやプロセス条件から、直接熱伝達係数を計算することが出来れば、上記の実験室と実プロセスの相違による誤差は解消出来る。ところが、前述のように、熱伝達係数は鋼板表面温度や冷却水量密度などの水冷条件の関数であり、鋼板を冷却する過程でその値が変化する。したがって、時々刻々板温を計測することが一般に不可能な実水冷プロセスで、出側温度だけから熱伝達係数を精度良く計算することは困難であった。

3.2 本報告の手法

本報告では、実水冷プロセスにおいて冷却を行なう鋼板についての実測データやプロセス条件から、オンラインで熱伝達係数を正確に推定する方法を提案する。これは、シミュレーテッドアニーリング法による熱伝達係数パラメータ探索と、そのパラメータを用いた鋼板の伝熱計算を組み合わせ、温度計算誤差が十分小さくなるまで、収束計算を行なう手法である。このようにして得られた熱伝達係数を用いることで、所定の冷却速度で、所定の温度まで、精度良く鋼板を冷却することを可能とすることが目的である。

1) 全体計算フロー

Fig. 2 に、本手法における熱伝達係数推定方法の構成を示す。なお、熱伝達係数は水冷条件の関数であり、さまざまな形が提案されているが、推定のしやすさを考えて構成が簡単な以下の(1)式の関数を用いた²⁾。

$$\log(\alpha) = A + B \cdot \log(W) + C \cdot T_s \quad (1)$$

ただし； α は熱伝達係数

W は水量密度

Fig. 2 Flow of calculation algorithm

T_s は鋼板表面温度

A, B, C は推定すべきパラメータである。

まず、3) にて詳細に説明するシミュレーテッドアニーリング法にて計算を行なう際の計算条件を入力する(①)。あわせて、水冷される鋼板の実績データ、具体的には、鋼板の板厚、板幅、冷却水の水量密度、水温、水冷前(水冷プロセス入側)の板温、水冷後(水冷プロセス出側)の板温、水冷を行なう時間を入力する。つぎに、推定すべき上記パラメータ A, B, C の初期値を入力する(②)。つぎに、入力した計算条件と熱伝達係数パラメータ A, B, C の初期値を用いて、一般的な伝熱計算方法³⁾により水冷後の板温を計算する(③)。伝熱計算の詳細は次項2)にて説明する。前記水冷プロセス出側板温の計算値と出側板温の実績値との差を温度計算誤差として求め(④)、シミュレーテッドアニーリング法により熱伝達係数パラメータ A, B, C の値を修正する(⑤)。ここで、(1)式のパラメータ A, B, C の値として、板温 200 度で区間を2つに分けて、別個の値をそれぞれ割り当てることで、核沸騰領域(200 度以下)とそれ以外の領域(膜沸騰領域および遷移沸騰領域；200 度以上)について⁴⁾、より精度の高いパラメータフィッティングを可能としている。

2) 伝熱計算

差分法による伝熱計算を用いる。まず、(1)式の各値のうち、水量密度は水冷プロセス全体を通して既知であり、水冷開始時の板温も既知である。したがって、これら2つの値と、熱伝達係数パラメータ A, B, C の初期値を用いて、(1)式から、水冷開始時の熱伝達係数を計算することが出来る。つぎに、前記熱伝達係数と、水冷開始時の板温、および鋼板の板厚、板幅、冷却水の水温から、伝熱計算によって水冷開始後短時間(ここでは0.1秒とした)経過した時点の板温を計算する。このように計算した板温と既知の水量密度を用いて、熱伝達係数の前記短時間経過時点での値を、(1)式から再び計算する。このように短時間刻みで次々に板温と熱伝達係数を計算していくことで、水冷プロセス出側の板温を計算することが可能である。

また、鋼板の各部分の温度を厳密に計算しようとする、鋼板の厚み、幅、長さについての3次元の伝熱計算を行なう必要があるが、ここでは、高速に計算を行なうことを目的としていること、水冷条件は長さ方向では基本的に一定であり、長さ方向の温度変化が厚み方向や幅方向に比較して小さいので、厚み方向と幅方向の2次元での伝熱計算を行なっている。そして板幅中央位置の値を実測値と比較する。

3) シミュレーテッドアニーリング法計算フロー

シミュレーテッドアニーリング法は、一般の局所探索法では評価値が極値に落ち込んでしまい、最適値に収束しないことが生じる欠点を補うために考案されたメタヒューリスティクス手法の1つであり、金属などの焼鈍工程で温度が低下する過程での原子の動きとそのエネルギー状態を模擬した手法である⁵⁾。「焼鈍」過程での温度(探索アルゴリズム上での仮想的な温度なので、以降、本論文では仮に仮想温度

(imaginary temperature)と呼ぶ)が高い時ほど、また、パラメータ変化による評価値の悪化度が小さいほど、評価値を悪化させるパラメータ変更の受け入れ確率が高く、仮想温度が下がるにつれて受け入れ確率を低くする。これによって、極値に陥った場合でも、仮想温度が高い間はそこから抜け出し、仮想温度が下がるにつれて、評価値の良いパラメータに収束することが期待される。

局所探索法の欠点を改善したメタヒューリスティクス手法としては、シミュレーテッドアニーリング法以外にも、遺伝的アルゴリズム、タブーサーチ法など、いくつかの手法が存在するが、最適化手法としての性能は、適用する問題の性格、計算パラメータの選定等に依存するため、各手法の優劣評価は簡単ではない。本報告では、オンラインでの熱伝達係数推定を目的としており、アルゴリズムが単純であることと、試行錯誤的な計算パラメータ選定の手間が少ないことが必要であることから、一般的評価として、アルゴリズムが比較的単純であり、パラメータ選定に対して比較的ロバストな挙動を示すとされる⁹⁾シミュレーテッドアニーリング法を採用した。

シミュレーテッドアニーリング法は、組み合わせ最適化問題の解法として広く用いられるだけでなく、未知パラメータ推定の手法としても用いられるが^{6),7)}、熱伝達係数の推定に用いられた例はない。

Fig. 3 に、シミュレーテッドアニーリング法によって熱伝達係数を推定する手順を示す。まず、計算条件(仮想温度を変化させる場合の、初期仮想温度、最終仮想温度、仮想温度の変化幅、ループ終了条件(同じ仮想温度での計算繰り返し回数))と、パラメータ A, B, C の初期値、およびその最大変化幅を入力する。仮想温度の変化幅については、一定比率(たとえば前回仮想温度の 0.95 倍とする)で下げる。つぎに、各パラメータ A, B, C の値を少し変化させる(②)。前記計算したパラメータ A, B, C と(1)式によって計算される熱伝達係数によって、水冷後の板温を計算し、実績出側板温との計算誤差(評価関数値)を求める(③)。つぎに、行なったパ

ラメータ変更を採用するかどうかを以下のように決定する(④)。

- ・板温計算誤差がパラメータ変更後に小さくなった場合には確率 1 で採用
- ・板温計算誤差がパラメータ変更後に大きくなった場合には確率 $\text{Exp}(-\Delta/t)$ で採用

ここで、 Δ はパラメータ変更後の板温計算誤差からパラメータ変更前の板温計算誤差を引いた値であり、 t は仮想温度である。あらかじめ定めた繰り返し回数になるまで以上のステップを繰り返し(⑤；パラメータ変更が採用された試行の回数を数える)、その中で温度計算誤差が最小のパラメータ A, B, C を、その仮想温度での確定パラメータとして選択し、つぎの仮想温度におけるパラメータ初期値としてセットする(⑥)。つぎに、仮想温度を 1 ステップ下げる(⑦)。ここで仮想温度が最終仮想温度になっていなければ(⑧)②に戻り、⑦までの手順を繰り返す。最終仮想温度に到達した時点で手順を終了し、その時のパラメータ A, B, C を推定結果とする。

なお、本報告の計算を行なうプログラムについては、シミュレーテッドアニーリング法による最適化計算、伝熱計算とも、オンライン計算機での利用を考慮し、C 言語により自作したものを用いた。

4. 推定結果

4.1 推定計算の例

計算条件は以下のとおりである。

〈対象材と温度〉

対象材：造船用厚板

冷却開始、終了温度：764 度、216 度

〈計算条件〉

初期仮想温度、最終仮想温度=1000 度、1 度

仮想温度更新パラメータ=0.95

ループ終了条件=30

パラメータ A 初期値、最大変化幅=2.5, 0.1

パラメータ B 初期値、最大変化幅=0.6, 0.04

パラメータ C 初期値、最大変化幅=-0.0016, 0.0001

初期仮想温度、最終仮想温度、仮想温度更新パラメータ、ループ終了条件等の計算パラメータは、適用する問題に応じて、ある程度試行錯誤的に調整する必要があるが、ここでは以下の方針でその選定を行なった⁵⁾。

- ・初期仮想温度

問題ごとに適切な値が大きく異なり、直接その値を決めるのは難しい。ここでは、適切な値についての一般的な判断をより行ないやすい値として、探索の初期の段階で、生成した解の中で受理されるものの割合(p_{init} と呼ぶ)を取り上げ、それを 0.98 という大きめの値とした。これは、評価関数値を悪化させる変更を広く許容して探索範囲を広げ、初期解依存性を極力小さくするためである。そして、初期仮想温度を変えながら何度か計算を反復し、 p_{init} が 0.98 程度になる切り

Fig. 3 Flow of simulated annealing calculation

の良い値として、初期仮想温度を 1000 度に選定した。

・仮想温度更新パラメータおよびループ終了条件

最適解への収束性を改善するには、仮想温度を下げる速度を十分遅くする(すなわち仮想温度更新パラメータを十分 1.0 に近い値にする)必要があるが、その分計算所要時間も大きくなる。これは、ループ終了条件を大きくする場合も同様であり、この 2 つのパラメータは密接に関係している。そこで、仮想温度更新パラメータとしては、よく用いられる 0.95 という値に固定し、ループ終了条件を 1 から徐々に大きくしながら計算を試行し、最適解(板温計算誤差が 5 度以内とした)に安定して収束する値として、ループ終了条件を 30 に選定した。

・最終仮想温度

仮想温度を下げながら収束計算を行ない、収束が十分に進むと、評価関数値を小さくするような熱伝達係数パラメータの更新は起こりにくくなる。ここでは、10 回の連続した試行でそのような更新が 1 度も起こらないことを、収束が十分

進んだことのおよその目安とし、そのような収束状態に達する値として最終仮想温度を 1 度に選定した。

パラメータ A, B, C の初期値については、参考文献 2) に記載された値をもとに何枚かの鋼板について試行的な計算を行なった結果から、切りの良い値として決定した。また、最小変化幅については、探索範囲の広さや、収束計算末期の収束のスムーズさを考えて試行錯誤的に選定を行ない、初期値より 1 桁程度小さな値として選定した。

収束計算の過程の 1 例を Fig. 4 に示す。横軸は計算ステップである。

また、ここで求めた熱伝達係数によって計算した板温の変化のようすの 1 例を Fig. 5 に示す。横軸は水冷プロセス入

Fig. 4 Example of estimation calculation

Fig. 5 Example of plate temperature calculation

(a) By new method ($\sigma=26.1\text{ C}$)

(b) By conventional method ($\sigma=29.1\text{ C}$)

(A) Calculation errors for all products

(B) Calculation errors for various products

Fig. 6 Estimation of calculation errors

り口からの距離であり、一部で板温が上昇しているのは、水冷を行わない部分での復熱によるものである。

4.2 推定誤差の評価

6,458枚の鋼板について、本手法による熱伝達係数推定結果を用いて計算した板温の実績温度との誤差を、冷却水の水温に対してプロットした散布図を、誤差の標準偏差値(σ)と共に Fig. 6(A)(a)に示す。これは鋼種混在で全鋼種について計算した結果である。用いた計算条件は、4.1に示したものと同一である。また、この時に得られた熱伝達係数は、 $A=2.71$, $B=0.59$, $C=-0.0018$ であった。従来用いられている熱伝達係数(実験室での測定から求めたもの)により、同じ鋼板について計算した板温誤差を Fig. 6(A)(b)に示す。熱伝達係数は、 $A=2.67$, $B=0.64$, $C=-0.0020$ である。計算誤差は本手法による場合と同程度であり、本手法によって、従来、実験室での測定を含め手間と時間をかけて求めている熱伝達係数を、短時間で同等の精度で計算出来ることが示された。Fig. 6(B)は、同じ対象材に対して、本手法によって鋼種ごとに個別に計算した場合の計算誤差の標準偏差値であり、(A)と比べて誤差が小さくなっているのがわかる。従来の推定手法では非常に手間と時間がかかるため、鋼種ごとに個別に計算することは困難であったが、本手法を用いることで、実操業データを用いた解析が1条件当たり5分程度(Pentium-IV, 2.4 GHz パソコン使用時)で可能となり、鋼種ごとの精度良い推定を実用的に行なうことが出来るようになった。

5. おわりに

本論文では、鋼板の水冷プロセスにおける、鋼板表面と冷却水との間の熱伝達係数を、メタヒューリスティクス手法による探索と伝熱計算とを組み合わせ、実プロセスデータから推定する手法について報告した。本手法により、実操業データを用いた解析が実用的な時間で可能となり、鋼種ごとの熱伝達係数の精度良い推定が出来るようになった。

今後はさらに多数の鋼板について解析を行ない、推定精度向上を目指す。

参考文献

- 1) (社)日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧 第3版Ⅲ(1), 24/31, 丸善(1980)
- 2) (社)日本鉄鋼協会編：鋼材の強制冷却 第1編, 15, 日本鉄鋼協会(1978)
- 3) (社)日本鉄鋼協会編：連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法, 68, 日本鉄鋼協会(1970)
- 4) 日本機械学会編：沸騰熱伝達と冷却, 12/13, 日本工業出版

(1989)

- 5) 柳浦, 茨木：組合せ最適化—メタ戦略を中心として—, 97/102, 朝倉書店(2001)
- 6) 大湯, 田ノ上：心室興奮伝搬モデルを基礎とした心磁図逆問題解析, 電気学会論文誌 A, 116-A-8, 698/704 (1996)
- 7) 大海, 池田, 茅根, 葛西：磁界源位置推定におけるシステムパラメータの影響—平面型グラジオメータシステムにおいて—, 電子情報通信学会論文誌 D-II, J 76-D-II-3, 755/764 (1993)

[著者紹介]

杉山 賢司 (正会員)

1978年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社、現在に至る。この間、83~85年ロンドン大学在籍。鉄鋼プロセスの制御、解析、生産スケジューリング等の研究開発に従事。電気学会、スケジューリング学会会員(PhD)。

上野 博 則

1996年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社、現在に至る。鉄鋼プロセスの設備ならびに操業についての企画・開発に従事。

若狭 和 式

1993年九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社、現在に至る。鉄鋼プロセスの設備・操業技術開発、圧延工程の操業技術改善に従事。

土 岐 正 弘

1974年新日本製鐵(株)入社。78年鉄鋼短期大学機械工学科卒業。鉄鋼プロセスの開発・企画に従事。

赤 瀬 裕

1987年九州大学工学部生産機械工学科卒業。同年新日本製鐵(株)入社、現在に至る。鉄鋼プロセスの設備・操業技術開発に従事。