

# 鋼材の温度計算と加熱炉制御

## ～シミュレーションと最適化の実用化事例紹介～

JFE スチール株式会社

茂森 弘靖

### 1. はじめに

著者らは、自動運転による労働生産性の向上、エネルギー消費量の低減、および、製品品質の向上のため、本稿で議論する連続式加熱炉の自動制御システムを開発した。

本制御の第一の目的は、加熱炉から抽出される鋼材の温度を精度高く制御することである。加熱炉抽出温度の変動により生じる鉄鋼製品の品質ばらつきを低減させるためである。加熱炉の中の鋼材の温度は直接的に計測することが極めて困難であるため、鋼材温度をオンラインシミュレーションにより精度高く計算することが必要となる。鋼材温度は、加熱炉壁から鋼材への熱輻射を基にした温度モデルを用いて計算される。

本制御の第二の目的は、エネルギー消費量を最小化することである。鋼材を目標の抽出温度にするためのヒートパターンは無数にあり、その中から最適なヒートパターンを選択する必要がある。最適解は、加熱炉壁および鋼材の温度とエネルギー消費との関係を表現するモデルを用いて求めている。対象プロセスは非線形であるため、この非線形最適化問題をオンラインで短時間に解く工夫が必要となる。

本講演では、JFE スチールにおいて実用化されている加熱炉制御システム、ならびに、その実機適用結果について解説する。また、S<sup>4</sup> Simulation System ならびに Numerical Optimizer を用いたシミュレーションおよび最適化の適用事例を紹介する。

### 2. システム概要

本稿で議論する加熱炉制御のシステム構成を図1に示す。

本制御システムは、次の2つの制御から構成されるカスケード制御系である。一つは、各々のゾーンの加熱炉壁温度（以下、炉温と呼ぶ）の操作による鋼材温度制御である。もう一つは、燃料流量および空気流量の操作による炉温制御である。

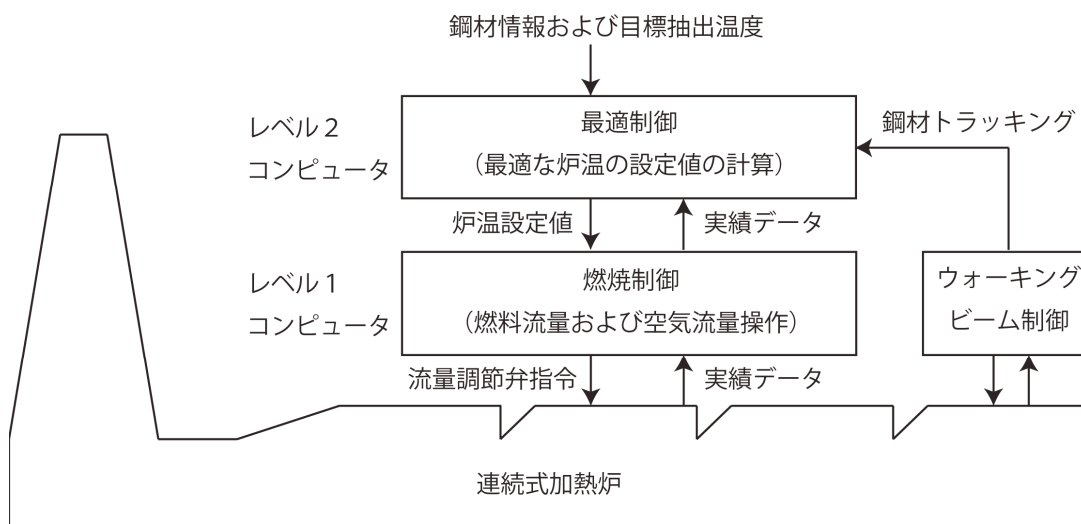


図1 システム構成

レベル2コンピュータでは鋼材を目標の温度まで昇熱し、かつ、エネルギー消費量が最小になる各ゾーンの炉温を計算する。レベル2コンピュータは、レベル1コンピュータに対して、各ゾーンの炉温の設定値を与える。レベル1コンピュータでは、それらの設定値通りになるように、燃料流量および空気流量を操作することにより炉温を制御する。

### 3. 最適制御

レベル2コンピュータの最適制御は、最適な炉温設定値を計算するため、次の4つの機能から構成される。最適制御のブロック図を図2に示す。また、最適な炉温の決定方法の概要図を図3に示す。

#### (1) 鋼材温度計算

本機能は、オンラインでリアルタイムシミュレーションにより加熱炉内の各鋼材の温度を計算する。詳細は第4節で説明する。

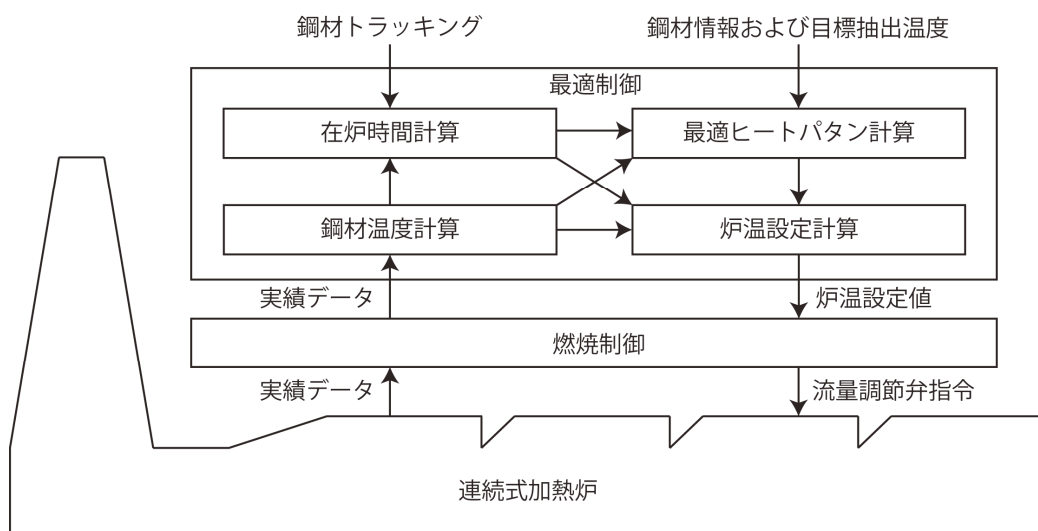


図2 最適制御のブロック図

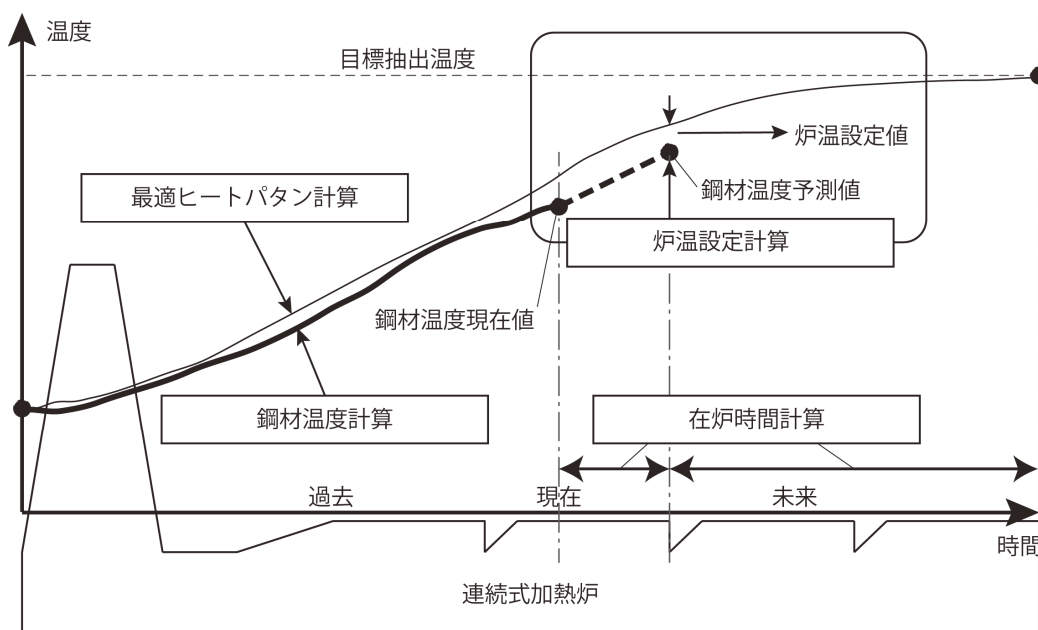


図3 最適な炉温決定方法の概要図

(2) 在炉時間計算

本機能は、加熱炉内鋼材トラッキングデータおよび後工程トラッキング情報に基づき、各鋼材の加熱炉抽出までの時間を推定する。

(3) 最適ヒートパタン計算

本機能は、各鋼材について各ゾーン出口目標鋼材温度を計算する。この計算は全ゾーン合計のエネルギー消費量を最小化するように計算される。詳細は第5節で説明する。

(4) 炉温設定計算

本機能は、最適ヒートパタン計算結果および在炉時間計算結果に基づき、各ゾーンの炉温設定値を計算する。

#### 4. 鋼材温度計算

鋼材の温度は、炉温実績データおよび次に示すモデルを用いて計算される。熱輻射による入熱を伴う3次元有限差分モデルを用いて計算される。炉温から鋼材表面への熱輻射による入熱は次式により表現される。

$$Q = F_w \Phi_{CG} \sigma (T_f^4 - T_s^4)$$

ここで、 $Q$ は熱流束、 $T_f$ は炉温、 $T_s$ は鋼材表面温度、 $\sigma$ は定数、 $\Phi_{CG}$ は鋼材への吸熱の割合を表現する総括熱吸収率、そして、 $F_w$ は鋼材の形状等に応じて計算される形態係数である。製鋼工程で製造される中間製品のスラブ、ブルーム、ビームブランクの形状を図4に示す。これらが本稿で議論する連続式加熱炉の中で昇熱される鋼材である。

図5に鋼材の温度計算領域を示す。これはビームブランクを例にしたものである。これらの計算領域は2つの断面から構成されている。断面Aはスキッド間中央部の断面であり、鋼材表面および中心部の温度分布が計算される。断面Bはそれと垂直の断面であり、主にスキッド部からの抜熱の影響が計算される。

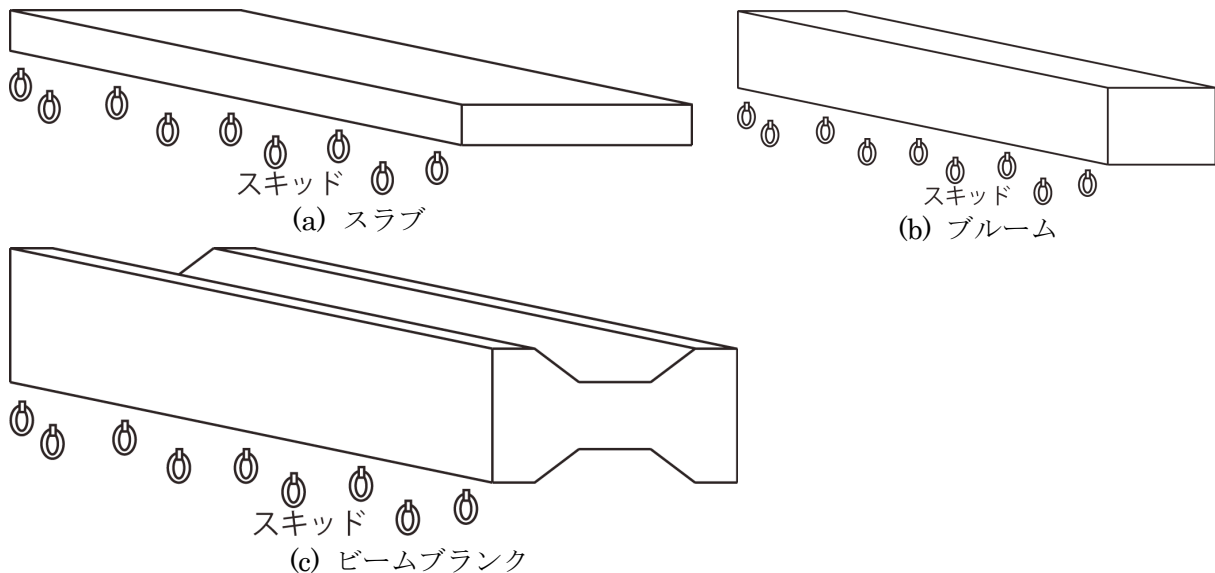


図4 鋼材の形状

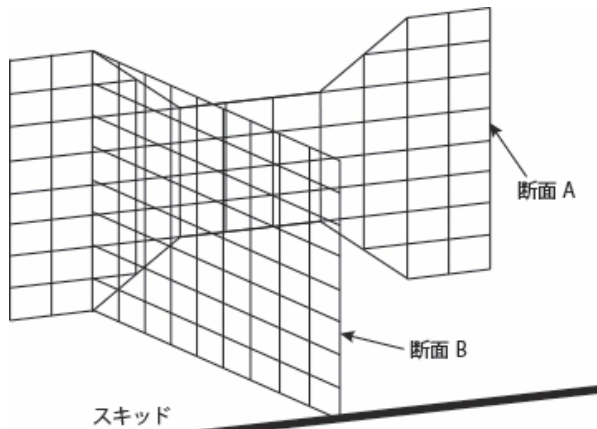


図5 温度計算領域

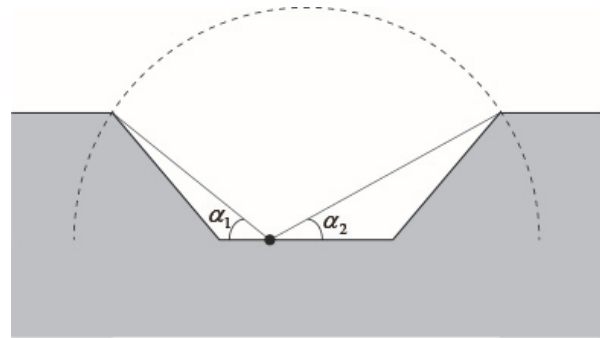


図6 断面 A の凹形状

鋼材温度計算はオンラインリアルタイム処理であるため、計算量を低減する必要がある。そのため、真の3次元差分モデルを用いるのではなく、このように2つの直交する断面を組み合わせた簡易3次元差分モデルを用いて計算している。図6に示すように、断面 A の上下は凹の表面形状をもつため、炉壁からの輻射入熱の一部が遮られる。鋼材表面への入熱の割合は、次式で表現される形態係数  $F_w$  により補正される。

$$F_w = (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) / 2$$

ここで、 $\alpha_1$  および  $\alpha_2$  は、図6の中に示される角度である。

## 5. 最適ヒートパタン計算

連続式加熱炉に装入されるそれぞれの鋼材は一般にサイズが異なり目標抽出温度も異なる。そのため、それぞれの鋼材について与えられた加熱条件に応じてエネルギー消費量が最小となるようなヒートパタンを計算する必要がある。

ヒートパタン計算は以下に示す最適化問題として定式化できる。

- (1) 決定変数： 各ゾーンの炉温
- (2) 目的関数： 全ゾーンの燃料流量の合計
- (3) 不等式制約条件：
  - a. 加熱炉抽出時の断面 A の平均温度は目標抽出温度以上
  - b. 加熱炉抽出時の断面 A の中心温度は目標中心温度以上
  - c. 各ゾーンの炉温は、設備制約の耐熱温度以下
- (4) 等式制約条件：
  - a. 各ゾーンの炉温と鋼材温度との関係を表現する温度モデル
  - b. 各ゾーンの燃料流量と炉温との関係を表現する熱バランスモデル

等式制約条件のうち、前者の温度モデルは第4節で議論した。後者の熱バランスモデルの概要を図7に示す。このモデルは、各ゾーンの入熱と出熱のバランスを表現したものである。入熱は燃料の燃焼熱と空気の顕熱の和に等しく、出熱は鋼材の吸熱、炉壁からの熱損失、次ゾーンへ流れる排ガスにより出る熱移動の和に等しい。

上記の温度モデルと熱バランスモデルは非線形の数式で表現される。最適ヒートパタン計算はオンラインリアルタイム処理であり、上記の非線形最適化問題を直接的に解くには計算量が大きすぎるので、決定変数の値の近傍で線形化して繰り返し計算を行う逐次線形計画法によりヒートパタンを求めるようにした。

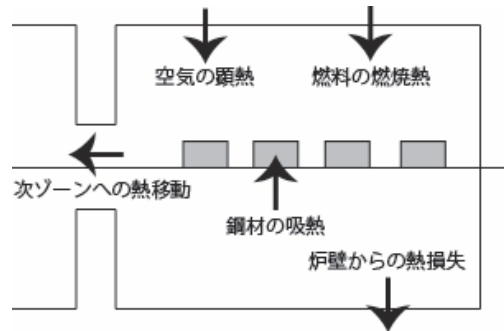


図7 熱バランスモデルの概要

温度 [%] (摂氏 0°Cを 0% 基準抽出温度を 100% として無次元化)

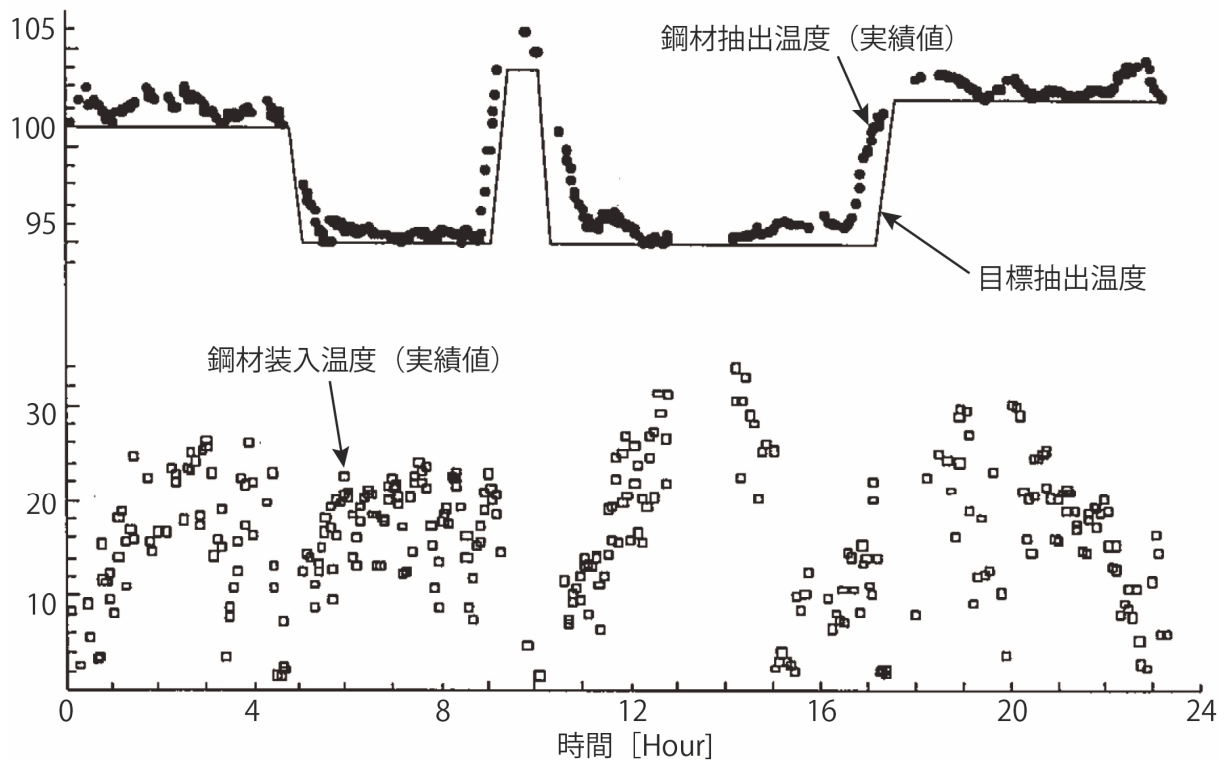


図8 実機適用制御結果

## 6. 実機適用結果

JFE スチールのある連続式加熱炉へ適用した結果について説明する。図8はある時期の 24 時間の制御結果である。鋼材の装入温度はばらつきが大きいですが、目標抽出温度に対してうまく追従するように鋼材の抽出温度を制御できていることがわかる。本制御により過加熱量 (= 鋼材抽出温度 - 目標抽出温度) は、本制御適用前と比べて約 20% 低減した。また、エネルギー消費量を最小化するようにヒートパタンを計算できるようになったので、本制御適用前と比べてエネルギー消費量が約 5% 低減した。

## 6. おわりに

本稿では、連続式加熱炉の加熱炉制御システムについて解説した。また、シミュレーションおよび最適化の実用化事例を紹介した。本システムは労働生産性の向上、エネルギー消費量の低減、および、製品品質の向上等に貢献している。