

データ同化法によるフェロコークス乾留炉ヒートパターン制御

Online Heat Pattern Control of Ferro-coke Furnace Based on Data Assimilation

橋本 佳也 HASHIMOTO Yoshinari JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副課長)・博士 (情報学)
庵屋敷孝思 ANYASHIKI Takashi JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 (部長)
藤本 英和 FUJIMOTO Hidekazu JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
津田 和呂 TSUDA Kazuro JFE スチール データサイエンスプロジェクト部 主任部員 (部長)

要旨

製鉄業における高温プロセスでは内部状態をリアルタイムに測定することが困難である。そのため、プロセス内部の可視化情報に基づいた制御が有用である。本研究では、データ同化の一手法である粒子フィルタを用いて、二次元非定常モデルと部分的なセンサ情報を融合することで炉内状態を可視化し、ヒートパターンを望ましい状態に制御するシステムを開発した。フェロコークスパイロットプラントにおける検証の結果、制御精度 10°C を達成した。さらに粒子フィルタによる推定ヒートパターンと製品強度の相関解析に基づき操業条件を適正化した結果、製品強度 (Drum Index 150/15 mm, DI¹⁵⁰15) が 0.5 ポイント改善した。

Abstract:

In steel works, direct observation of internal conditions of high temperature processes is difficult. Therefore, automation of such processes based on process visualization is an urgent issue. The authors developed a technique that controls the heat pattern of a shaft furnace by visualizing internal conditions by means of a particle filter, which combines sensor information and a transient two-dimensional model calculation. As a result of the validation test at the ferro-coke pilot plant, control accuracy of 10°C was achieved. Furthermore, the operational condition was adjusted based on the correlation between the estimated heat pattern and the product strength. In consequence, the product strength improved by 0.5 points (Drum Index 150/15 mm, DI¹⁵⁰15).

1. はじめに

製鉄業においては、高炉をはじめとする豎型炉 (シャフト炉) を用いた反応プロセスが数多く存在するが、その内部状態をリアルタイムで測定することは困難な場合が多い。そのため、豎型炉を用いた反応プロセスでは、現在もオペレータの勘と経験に依存したマニュアル操業が行われており、プロセスを可視化することにより、ブラックボックス化した操業から脱却することが望まれている。本稿では、フェロコークス乾留炉における、物理モデルとセンサ情報の融合 (データ同化) による炉内可視化に基づいたヒートパターン制御システムについて紹介する。

フェロコークスは石炭と粉鉱石を 7:3 の比率でブレンドした高反応性の成型炭であり、高炉内において通常のコークスと比較してより低温からコークスガス化反応が生じることから、熱保存帯温度の低下による還元材比の低減効果が

期待されている^{1,2)}。フェロコークス乾留炉は、炉頂部からの原料の投入および炉底部からの製品切出しが連続的に行われる向流熱交換プロセスであり、固体の炉内滞留時間は 10 時間程度である。ヒートパターンには、昇温速度、乾留および冷却に関する制約条件が存在する。例えば、昇温速度が速い方が石炭粒子の流動性が向上し製品の強度向上につながり、また、製品強度と反応性を両立するためには、高温領域での滞留時間を適正範囲におさめなければならない^{2,3)}。

炉内全体のヒートパターンをオンライン制御する必要がある一方、温度センサの設置位置は限定されている。また乾留炉では炉体からの抜熱量や固体比熱といったオンライン測定が困難な未知パラメータが変動するため、従来の固定パラメータによる物理モデル計算では推定誤差が生じてしまう。そこで本研究では、物理モデル計算と部分的なセンサ情報とを組み合わせて炉内状態を可視化し、ヒートパターンを望ましい状態に制御するシステムを構築した⁴⁾。

センサ情報とモデル計算とを融合させるデータ同化の手

法として、本研究では粒子フィルタ⁵⁾を採用した。異なる未知パラメータ群を仮定した複数の非線形モデルをオンラインで並行して計算し、センサからのデータに応じて各モデルの重みを逐次更新することで未知パラメータをオンライン推定する。本アプローチにより、物理的意義付けが明解でプラントの経時変化に対応したオンライン推定が可能となった。

本報告では、粒子フィルタによる炉内可視化、ヒートパターン制御のパイロットプラントにおける検証結果およびフェロコークス品質制御への展開について述べる。

2. データ同化による炉内可視化

フェロコークス乾留炉は図1に示すような縦型の構造である。側面にはガス吹込口(羽口)を対向して設置しており、上から順に低温羽口、高温羽口、冷却羽口の三種類である。低温羽口は炉上部の昇温速度を調整する機能を持ち、また、高温羽口は高温領域における滞留時間を確保するためのものである。炉底部には製品の切出装置および冷却羽口が設置されている。炉頂から装入された原料は炉内を降下する過程で高温のガスと熱交換を行い乾留された後、冷却ガスとの熱交換を経て炉外へ排出される。

温度分布を可視化するため、乾留炉内の反応、流動、伝熱を考慮した二次元(図1のx, y方向)の非定常物理モデルを構築した。ガス流れはErgun式⁶⁾に従い、固体流れは垂直降下のみと簡略化した。伝熱現象は、ガスと固体間の熱交換、ガスと設備周辺大気との熱交換、反応熱から構成した。さらに石炭中の揮発分のガス化、および酸化鉄のガス還元炉内反応も考慮した。ガス温度、固体温度を求めするための方程式は式(1)および(2)の通りである。

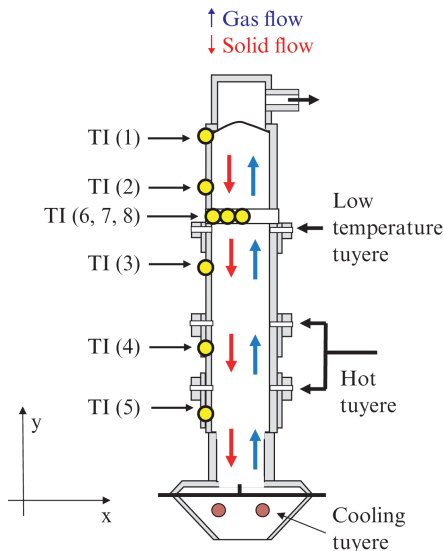


図1 フェロコークス乾留炉の概略
Fig. 1 Structure of ferro-coke furnace

$$\frac{\partial(\rho_g C_{p,g} T_g)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{p,g} u_g T_g)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{p,g} v_g T_g)}{\partial y} = S\alpha(T_s - T_g) + R\Delta H_R \eta_g + h(T_o - T_g) \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_s C_{p,s} T_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s C_{p,s} v_s T_s)}{\partial y} = S\alpha(T_g - T_s) + R\Delta H_R \eta_s \quad \dots (2)$$

ここで添字 s, g, o はそれぞれ固体、ガス、設備周辺の大気を意味する。表1に各変数の意味、単位を示す。

式(1)(2)の炉内現象に関する微分方程式を、有限体積法、完全陰解法によって離散化した。時間ステップ幅は10分とした。以下では離散化された方程式を式(3)および(4)に示す状態方程式(時間ステップ分の温度分布の更新則)の形式で表記する。

$$\mathbf{T}(t+1) = f(\mathbf{T}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{A}(t)) \quad \dots (3)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{T}(t) \quad \dots (4)$$

ここで $\mathbf{T}(t)$ は時間ステップ t における固体とガスの温度分布であり、その要素数は物理モデルの計算メッシュ数の2倍である。また $\mathbf{u}(t)$ は入力変数である各羽口から流入するガス温度およびガス流量を示す。 $\mathbf{A}(t)$ は不確定要素の大きいモデル内の未知パラメータである。本研究では固体比熱 $C_{p,s}$ と炉壁から大気への放熱係数 h の2つを未知パラメータとして設定した。 $\mathbf{y}(t)$ は熱電対位置の温度、行列 \mathbf{C} は温度分布 $\mathbf{T}(t)$ から熱電対位置に対応する要素を取り出す観測行列である。

粒子フィルタのアルゴリズムは下記の Step 1~5 で構成される。部分的なセンサ情報とモデル計算を融合し、パラメータのオンライン逐次同定を行うことで、従来の固定パラメータによる方法と比べて高精度な推定が可能になった。アル

表1 二次元非定常モデルの変数
Table 1 Variables in transient 2D model

Symbol	Notes	Unit
C_p	Specific heat	J/kg/K
h	Heat-loss coefficient	J/m ³ /s
R	Reaction rate	kg/m ³ /s
S	Specific surface area	m ² /m ³ -bed
T	Temperature	K
u_g	Mass velocity of gas (horizontal)	kg/m ² /s
v_g	Mass velocity of gas (vertical)	kg/m ² /s
v_s	Velocity of solid (vertical)	m/s
α	Heat exchange coefficient	J/m ² /s
ΔH_R	Reaction heat	J/kg
η	Reaction heat distribution ratio	-
ρ	Density	kg/m ³

ゴリズムの概要を図2に示す。

Step 1: 異なる未知パラメータを仮定した物理モデルを N 個用意する。本研究では $N=25$ とした。また各モデルの重み w を式 (5) により初期化する。

$$w_i = 1/N \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで添字 i は各モデルのインデックスを意味する。

Step 2: 状態方程式を用いて各モデルの温度分布をパラレルに計算する。

$$\mathbf{T}_i(t+1) = f(\mathbf{T}_i(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{A}_i(t)) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}\mathbf{T}_i(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

Step 3: 熱電対温度の実績値 $\mathbf{y}_{act}(t)$ との合致度に応じた尤度 $\theta_i(t)$ を算出する。

$$\theta_i(t) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{y}_i(t) - \mathbf{y}_{act}(t)|^2}{\sigma^2}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで σ^2 は推定二乗誤差の全モデルの平均値である。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{|\mathbf{y}_i(t) - \mathbf{y}_{act}(t)|^2}{N} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Step 4: ベイズの定理に基づき、各モデルの重みを更新する。全モデルの重みの合計は1となるように規格化する。

$$w_i(t) \propto w_i(t-1)\theta_i(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\sum_i w_i(t) = 1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

データ同化の出力である温度分布およびパラメータの推定値は全モデルの重み付き平均により算出する。

$$\mathbf{T}_a(t) = \sum_i w_i(t) \cdot \mathbf{T}_i(t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\mathbf{A}_a(t) = \sum_i w_i(t) \cdot \mathbf{A}_i(t) \quad \dots\dots\dots (13)$$

Step 5: 各モデルの重みに比例した確率でモデルのコピーを生成する。同一のパラメータを有するモデルが複数存在することを防止するため各モデルの未知パラメータに若干の摂動を加える。その後、時間ステップを更新し、Step 2に戻る。

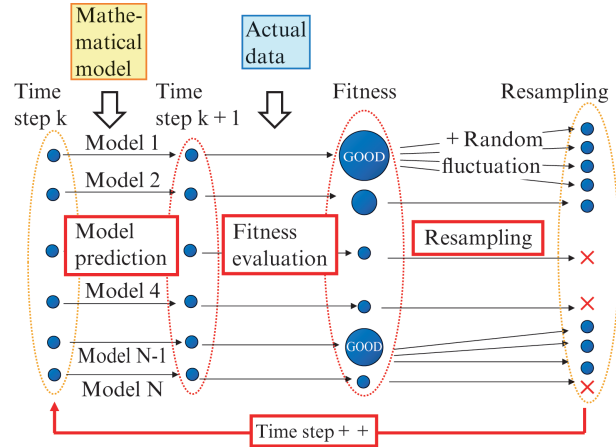


図2 粒子フィルタのアルゴリズム

Fig. 2 Algorithm of particle filter

3. パイロットプラントにおける検証結果

前章で述べた粒子フィルタを用いたヒートパターン可視化システムを、パイロットプラントの運転室に実装した。図1に示した炉内壁の5つ (TI (1) ~TI (5)) の熱電対のうち、TI (2)以外の4つをモデルとの同化に用い、TI (2)については検証用として利用し、同化には用いなかった。

まず同化用の熱電対による検証結果について述べる。図3の赤太線が実績値、青実線が同化ありの推定値、黒破線が同化なしの推定値 (未知パラメータを固定した1つのモデルでの計算をオフラインで実施) である。縦軸の値は目標値からの温度差を示している。推定誤差の指標として、根乗平均誤差 (RMSE) の値を同図の上に示す。図3の上4段について、同化ありのケースでは同化なしのケースと比較して推定誤差を平均で50%以上低減できた。

次に検証用の熱電対による結果を述べる。図3の最下段に示す検証用熱電対についても、データ同化により推定誤差を40%低減できた。また、図1に示した内部温度 (TI (6) ~TI (8)) の推定結果を図4に示す。なお、内部温度の実績値は間欠的に挿入する水平ゾンデにより得られたものである。内部温度についても推定誤差を30%低減できた。このように、データ同化の入力として用いていない検証用熱電対での推定誤差が低減したことから、パラメータ推定の際に生じがちな過適合 (オーバーフィッティング) の問題は生じていないと言える。

また未知パラメータである固体比熱と放熱係数の推定結果を図5に示す。放熱係数の変動要因としては、炉壁と原料との接触状態や、炉内ガスの偏流等が考えられる。また固体比熱の変動要因としては、石炭銘柄等の変化による乾留熱量の変化が考えられる。

以上の検証により、粒子フィルタロジックによる温度分布の推定精度の向上が確認できた。

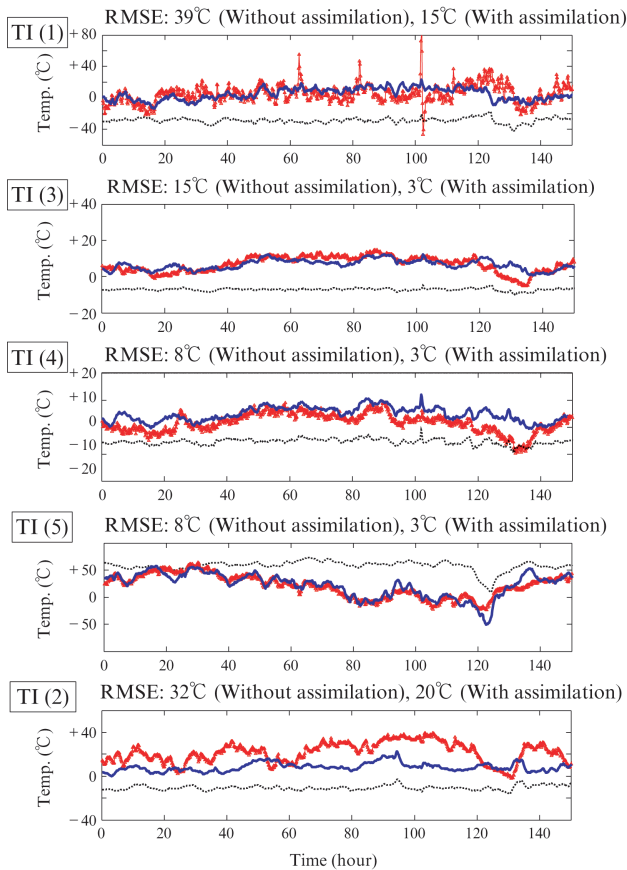


図3 炉内壁温度の推定結果

Fig. 3 Estimation result of surface temperature

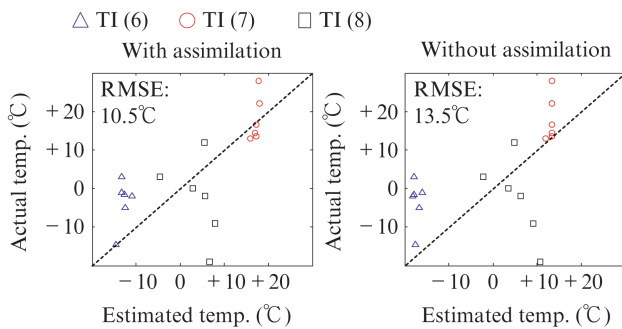


図4 炉内部温度の推定結果

Fig. 4 Estimation result of internal temperature

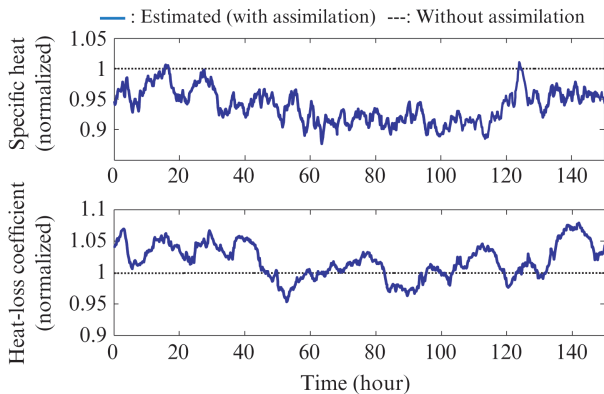


図5 未知パラメータの推定結果

Fig. 5 Estimation result of unknown paramters

4. ヒートパターン制御系の構築

次に、データ同化により可視化されたヒートパターンを望ましい状態に保持するための制御システムを開発した。制御アルゴリズムは次の3ステップから構成される。まず現在の入力変数を保持したと仮定して将来のヒートパターンを予測し、次に操作変数を変化させた際のステップ応答を計算し、最後に操作変数の最適操作量を決定する。制御周期は10分とした。以下に、高温羽口および冷却羽口の流量を操作変数として、炉頂のガス温度、炉底部から排出される製品温度、および内部温度を制御変数とした制御アルゴリズムと実機での検証結果について述べる。

まず、現在の入力変数が将来も継続すると仮定した際の将来の制御変数を式 (14)、(15) に基づいて予測する。

$$\mathbf{T}(t+k+1) = f(\mathbf{T}(t+k), \mathbf{u}(t), \mathbf{A}(t)) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\mathbf{z}(t+k) = \mathbf{HT}(t+k) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで t は現在の時間ステップであり、8時間先までの将来予測を行うため、 k は0から48の値とする。 $\mathbf{z}(t)$ は制御変数を表し、 \mathbf{H} は推定温度分布から制御変数を取り出す行列を表す。予測の初期条件として、式 (12) および (13) により推定されたヒートパターンおよび推定パラメータを用いた。

$$\mathbf{T}(t) = \mathbf{T}_a(t) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\mathbf{A}(t) = \mathbf{A}_a(t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

このようにして計算された制御変数 (炉頂ガス温度、製品温度、内部温度) の推移を自由応答 $\mathbf{z}_f(t) = [\mathbf{z}_f^1(t), \mathbf{z}_f^2(t), \mathbf{z}_f^3(t)]^T$ と表す。

次に操作変数変更時のステップ応答の計算を行う。フェロコークス乾留炉におけるステップ応答は、運転条件および未知パラメータに大きく依存する。この非線形性に対応するため、ステップ応答を以下の手順で制御周期ごとに更新する。各操作変数を単位量だけ増加した場合の制御変数を予測する。高温羽口流量を ΔF だけ増加させた際の制御変数の応答を $\mathbf{z}_1(t)$ 、冷却羽口流量を ΔF だけ増加させた際の応答を $\mathbf{z}_2(t)$ と置くと、操作変数 i ($=1, 2$) に対する制御変数 j ($=1, 2, 3$) のステップ応答は次式で計算される。

$$S_i^j(t+k|t) = (\mathbf{z}_i^j(t+k) - \mathbf{z}_i^j(t+k)) / \Delta F \quad \dots\dots\dots (18)$$

最後に操作変数の最適操作量を求める。二次計画法を用いて、式 (19) の評価関数 J を式 (20) の制約条件下で最小化するように操作変数の操作量 ΔF_1 、 ΔF_2 を求めた。

$$J = \sum_{k=1}^{48} \sum_{j=1}^2 (z_p^j(t+k) - z_r^j)^2 + \sum_{i=1}^2 b_i (\Delta F_i)^2 \dots\dots\dots (19)$$

$$z_p^3(t+k) \geq z_L^3 \dots\dots\dots (20)$$

ここで z_r は制御変数の目標値、 z_L は制御変数の下限値を示す。 $z_p(t) = [z_p^1(t), z_p^2(t), z_p^3(t)]^T$ は操作変数を変更した際の制御変数の予測値であり、式(21)のように自由応答とステップ応答の線形結合と近似した。

$$z_p^j(t+k) = z_r^j(t+k) + \sum_{i=1}^2 S_i^j(t+k|t) \Delta F_i \quad (j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (21)$$

以上の制御アルゴリズムをパイロットプラントに実装し、ガイダンス形式で操業試験を行った結果を図6に示す。1段目～3段目が制御変数、4段目および5段目は操作変数、最下段は生産速度を示す。操作変数についてはガイダンス値と実績値をプロットしている。図中の8 hour から32 hour までの期間は制御システムの出力に従い操作変数を変化させた。

ガイダンス試験期間中、19 hour 時点において生産速度が増加した。これに伴い炉頂温度の低下と製品温度の上昇が予測され、高温羽口流量と冷却羽口流量を増加させるガイ

ダンスが出力された。本ガイダンスにしたがい羽口流量を操作した結果、内部温度の下限制約を順守しつつ、炉頂温度と製品温度を目標値±10℃の範囲に保持することができた。

5. 推定ヒートパターンと製品品質との相関

本ロジックによるヒートパターン可視化の利用方法として、良好な製品品質を担保するためのヒートパターン制御が考えられる。そこで、可視化されたヒートパターンと製品強度との相関解析をおこない、製品強度を決定する因子を調査した。

図7に示すように、炉内を垂直方向に4分割し、各領域について原料が炉内を降下する過程の計算温度履歴を算出した。このように、時間的なパターンを算出することで、原料降下速度（生産速度）の異なるデータを同じ尺度で比較可能となる。また、上記の4つの各領域についてヒートパターンの特徴量を算出し、その平均値と製品強度との相関を調査した。

その結果、図8に示すとおり、温度が75%以上となる高温領域での滞在時間と製品強度の間に負の相関が生じていることが判明した。図中の赤線は最小二乗法による回帰線

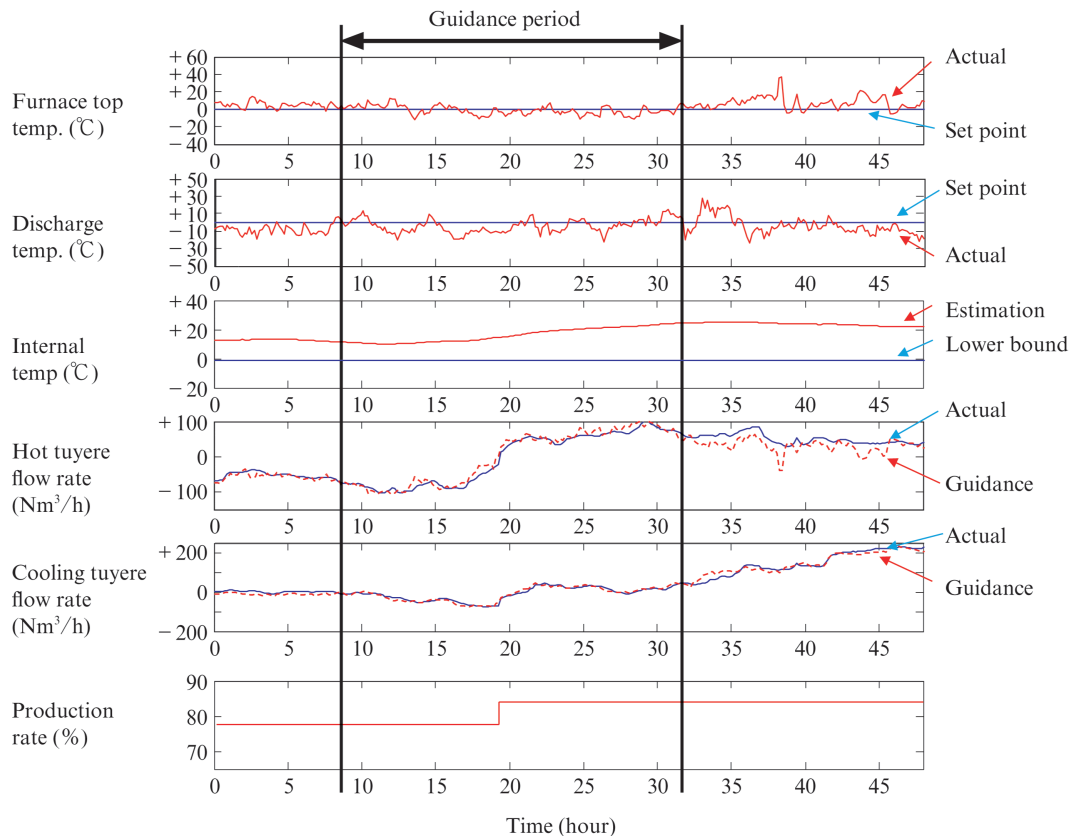


図6 パイロットプラントでのヒートパターン制御試験結果
Fig. 6 Experimental result of heat pattern control at pilot plant

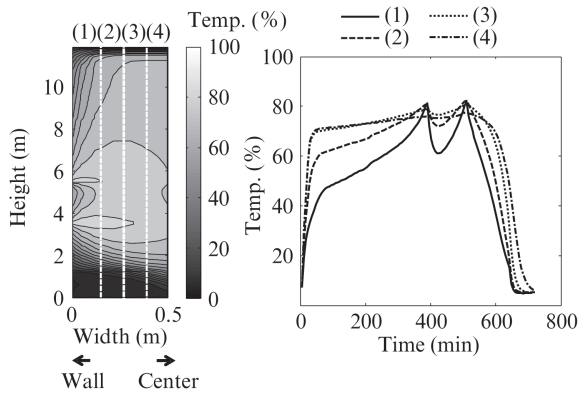


図7 フェロコークスの温度履歴
Fig. 7 Temperature history of ferro-coke

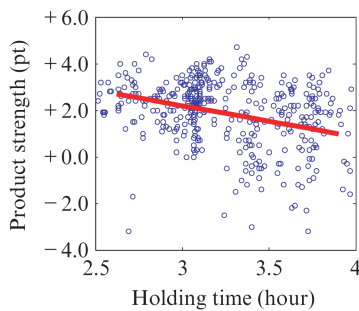


図8 高温領域の滞在時間とフェロコークス強度の相関
Fig. 8 Correlation between holding time in high temperature zone and ferro-coke strength

である。通常の室炉コークスの場合は、乾留時間を延長するほど炭素骨格がグラファイト構造に近づくため強度が高まるが、フェロコークスの場合は、鉱石が還元される際に周囲のコークスを消費し気孔が生じるため、過度な乾留は強度低下につながると考えられる。

以上の相関解析結果をもとに、従来の操業では積極的に活用されていなかった低温羽口からのガス吹込みのシミュレーションを行った。表2のシミュレーション条件下での定常状態における計算温度分布を図9に示す。低温羽口の流量を増加させ高温羽口の流量を低下させることにより、フェロコークスの高温領域の滞在時間を短縮させることができ、製品強度向上が期待できると考えた。

本シミュレーションに基づき、表2のCase2の条件で操業を行った結果、製品強度 (Drum Index 150/15 mm, DI¹⁵⁰15) が0.5ポイント上昇した⁴⁾。

製品品質に関わるヒートパターン特徴量を特定し品質改善につながる知見が得られたことは、本アプローチの有効性を裏付けるものである。

6. おわりに

本研究では、粒子フィルタを用いて二次元非定常モデル

表2 フェロコークス炉の操業シミュレーション条件
Table 2 Operational condition of ferro-coke furnace

	Case1 (base)	Case2
Low temp. tuyere	50 Nm ³ /h	300 Nm ³ /h
Hot tuyere	2 050 Nm ³ /h	1 920 Nm ³ /h
Cooling tuyere	2 400 Nm ³ /h	2 400 Nm ³ /h
Holding time in high temperature zone	3.2 h	2.5 h

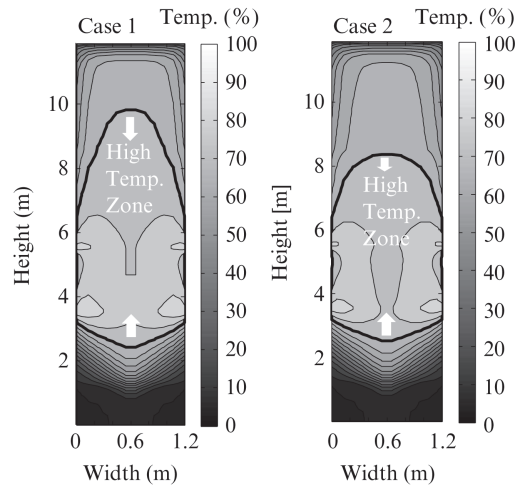


図9 定常状態での温度分布シミュレーション結果
Fig. 9 Steady-state simulation result of temperature distribution

と部分的なセンサ情報を融合することでフェロコークス炉の内部状態を可視化し、ヒートパターンを望ましい状態に制御するシステムを開発した。パイロットプラントでの検証の結果、制御精度10℃を達成した。さらに推定ヒートパターンと製品強度の相関解析に基づき操業条件を適正化した結果、製品強度 (Drum Index 150/15 mm, DI¹⁵⁰15) が0.5ポイント改善した。

本研究はNEDO「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス要素技術開発事業」の一環として行われたものであることを記し、関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 野村誠治, 寺島英俊, 佐藤英二, 内藤誠章. 高反応性フェロコークス製造技術の基礎検討. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 12, p. 849-856.
- 2) 山本哲也, 佐藤健, 藤本英和, 庵屋敦孝思, 深田喜代志, 佐藤道貴, 武田幹治, 有山達郎. フェロコークスの反応挙動と高炉内評価. 鉄と鋼. 2011, vol. 97, no. 10, p. 501-509.
- 3) 安藤誠, 岩井祐樹, 藤本英和, 佐藤健, 橋本佳也, 庵屋敦孝思, 佐藤道貴. フェロコークス乾留炉数値熱流体シミュレーションの開発. 鉄と鋼. 2018, vol. 104, no. 10, p. 543-550.
- 4) Hashimoto, Y.; Tsuda, K.; Anyashiki, T.; Fujimoto, H. Online heat pattern control of a shaft furnace based on a real-time visualization by particle filter. ISIJ Int.. 2017, vol. 57, no. 1, p. 131-138.
- 5) Rawlings, J. B.; Bakshi, B. R. Particle filtering and moving horizon estimation. Computers and Chemical Engineering. 2006, vol. 30, issue10-12, p. 1529-1541.

- 6) Ergun, S. Fluid flow through packed columns. Chem. Eng. Prog. 1952, vol. 48, p. 89-94.



橋本 佳也



庵屋敷孝思



藤本 英和



津田 和呂