

(論文)

熱画像解析による連続測温法を適用した高炉溶銑温度予測技術の開発

加茂和史*¹・森居数広*¹・桑名孝汰*¹・檜崎博司*¹ (工学博士)・笠井昭人*² (工学博士)・原 大悟*³

Prediction Technology for Blast Furnace Hot Metal Temperature, Adopting Continuous Measurement and Analysis of Thermal Image at Tap Hole

Kazufumi KAMO・Kazuhiro MORII・Kota KUWANA・Dr. Hiroshi NARAZAKI・Dr. Akito KASAI・Daigo HARA

要旨

高炉操業においては、目標温度範囲の溶銑（ようせん）を計画どおりに安定生産することが常に求められている。近年の主流である大型高炉では、炉の熱容量増大によって溶銑温度変化の時定数も大きくなる。炉熱の変化を見誤り熱調整アクションが遅延すれば重篤な炉況不調を招くこともあり、操炉には適切なタイミングで適正なアクションを行う高度な判断能力が要求される。

当社では、究極の安定操業（冷え込み・吹き抜けゼロ）実現を目的に、炉況（炉熱と炉内通気性）を予測し制御するAI操炉[®]を開発中である。その基盤技術が溶銑温度の予測技術である。本稿では、従前の間欠的な熱電対、および熱画像解析により連続測温する新計測端の両結果を効果的に適用することで、溶銑温度予測の高精度化を達成した内容を報告する。

Abstract

A blast furnace must steadily produce hot metal in a target temperature range as planned. In recent mainstream large blast furnaces, the time constant for the temperature change of hot metal also increases with the increase in the furnace's heat capacity. Inaccurate estimation of the changes of temperature in furnace and delays in heat regulation action can lead to seriously poor furnace conditions. Therefore, furnace operation requires a high level of judgment ability to take the appropriate actions at the right time. Kobe Steel is currently developing AI SOURO to predict and control furnace conditions (temperature and gas permeability in furnace) to achieve ultimately stable operation (without tapping trouble or channeling.) The fundamental technology for this is one for predicting hot metal temperature.

This paper reports on achieving high accuracy in hot metal temperature prediction by effectively applying the results of both conventional intermittent thermocouple measurements and continuous temperature measurements using new measuring equipment based on thermal image analysis.

検索用キーワード

製鉄、製銑、高炉、炉熱予測、放射測温、熱画像解析、プロセス制御、AI操炉[®]

まえがき＝高炉は鉄鉱石とコークスを炉頂から交互に層状に装入し、炉下部の羽口から熱風と微粉炭を吹き込んで鉄鉱石を還元・溶解することで溶銑を製造する、固気向流移動層型の巨大な反応容器である。高炉の安定操業においては、炉況（溶銑温度に代表される炉熱、および炉内を上昇する還元ガスの通気性）の変動を適正範囲に制御することが肝要であるが、炉況制御の重要な役割を担っているのが“操炉”と呼ばれる操業者である。操炉は膨大な計測データに基づいて炉況の変化を予測し、例えば、溶銑温度については管理値範囲内に収まるよう送風温度や送風湿度を調整するなどの熱調整アクションを実行する。反応器として極めて大型化した近代の高炉では、炉の熱容量も増大し、熱調整アクションや炉内反応が溶銑温度の変化として顕在化するまでの時定数も大きくなる。炉熱の変化を見誤り、熱調整アクションが遅延・不足した場合、管理値外への溶銑温度低下やさらに重篤な炉況不調を招く場合もある。そのため、操炉には

高度で正確な判断が要求される。とくに近年、コスト低減やCO₂削減などの環境要因から低コークス比・低還元材比操業が望まれており、炉況の悪化を招きやすい高難度な操業条件のもと適切な操業判断の重要性はより一層高まっている。

このような背景のもと、高炉の安定操業やコークス比低減に寄与すべく、当社では数学モデル・新規計測端・AI技術を融合し、炉況を予測し制御する“AI操炉[®]”の開発に取り組んでいる¹⁾。その基盤となる技術として、溶銑温度の予測技術を開発した。本稿では、以前より溶銑温度を間欠的に測定していた熱電対と新規開発した連続的に測温可能な計測端を組み合わせることで、溶銑温度予測の高精度化を達成した内容を報告する。

1. 従来の溶銑温度予測技術

溶銑温度の予測には現在の炉熱を正確に把握する必要

*¹ 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター *² 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 製鉄開発部 *³ 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 製鉄部

があるが、高炉内部は高温・高圧条件下にあり、炉内を直接計測することは難しい。そのため、計測可能箇所である炉壁や炉頂部などに圧力計や温度計など多数の計測端を設置し、操炉はこれら計測端情報を元に現在の炉況を想定し、数時間先の炉況変化を予測して熱調整アクションを実施している。炉況不調の兆しを見逃し、アクションタイミングやアクション内容を誤判断すると、冷え込み（炉内鉄凝固）による長期の生産停止という最悪の事態を招く場合もある。

このような背景のもと、計測端情報を元にデータ解析技術や数学モデルを活用して溶銑温度を予測・制御するという取り組みが古くから行われてきた。例えば、松田ら²⁾は操業ノウハウをルールベースに組み込んだエキスパートシステムのアプローチにより操炉に近いレベルでの操業判断が可能となると報告している。しかし、高炉固有の特性にシステムを合わせ込んだり、諸元変更や原料性状変化に応じてルールベースの内容を継続的に見直ししたりすることが運用上困難といった課題があった。

近年は、計算機の性能向上や計算手法の進展を背景に、モデルの合わせ込みを自動化ないし効率化することが可能となり、鉄鋼各社においても操業環境の変化に追従可能な適応的な予測や制御の検討など、溶銑温度予測技術の高度化に向けた取り組みが活発化している。例えば、橋本ら³⁾は高炉の非定常二次元モデルを元に、誤差を熱物質収支から考察してパラメータ調整にて補う方法を提案している。また、夏井ら⁴⁾は2変数を制御するPID制御やセンサ情報を追加することでモデル予測制御の高精度化につなげた事例を報告している。

2. 新計測端とAIを融合した溶銑温度予測技術の開発

2.1 溶銑温度予測技術の概要

今回開発した溶銑温度予測技術のコンセプトを、以下の①～③に示す。

- ①データから溶銑温度予測モデルを直接構築するデータ駆動型アプローチも考えられたが、操炉の考え方に沿ったわかりやすさと温度変化原因の説明性を重視し、熱収支に基づく物理モデル的アプローチを採用した。
- ②熱収支に関わる炉内影響因子の変化は時間遅れなどの動特性をともなって溶銑温度に影響をおよぼすため、その関係を過渡応答モデルで表現した。操業実績データを用いて過渡応答モデルのパラメータをAIで逐次オンライン学習することで、諸元変更や炉況変化に追従した予測精度の維持を可能とした⁵⁾。
- ③従来、溶銑温度は浸漬型熱電対を用いて間欠的に測定していたため、予測直前の溶銑温度情報が数十分欠損する時間帯が存在した。過渡応答モデルの学習において過去の溶銑温度はAI予測の教師データであるため、溶銑温度情報の欠損は予測精度の低下につながる。そこで、出銑画像（熱画像）を数秒間隔で撮像し、その輝度情報を短周期で溶銑温度へ換算する技術（連続的な放射测温システム）を開発し⁶⁾、溶銑温度情報欠損にともなう問題点を解決した。

各開発内容について、以下で詳細説明する。

2.2 熱収支モデル

熱原単位変化に着目した熱収支モデルを溶銑温度予測技術のベースとした。熱原単位変化量として、熱調整アクションに起因するもの ΔQ_1 [J]と、炉内反応と炉体への抜熱に起因するもの ΔQ_2 [J]を定義した。

ΔQ_1 と ΔQ_2 の合計を ΔQ [J]とする（式（1））と、溶銑温度の変化量 ΔHMT [K] (Hot Metal Temperature) は式（2）で求めることができる。

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta HMT = \frac{\Delta Q}{W_{HM} \cdot C_p} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 W_{HM} [kg]：炉内残銑量、 C_p [J/(kg・K)]：溶銑の比熱

2.3 溶銑温度予測モデルの学習

溶銑温度を求める際の逐次オンライン学習法について、その考え方を説明する。

上記の熱原単位変化量は、時間遅れなど動特性をもって溶銑温度変化に影響をおよぼす。各熱原単位変化量の溶銑温度への影響度合いは定性的・経験的には知られているものの、現在の炉況に合わせて溶銑温度を精度良く予測するには、とくに直近の過去データに合わせた過渡応答モデルのパラメータ逐次最適化が重要となる。そこで過渡応答曲線を図1に示すシグモイド関数で表現し、下記三つのパラメータ θ [-] (θ_1 ：影響係数、 θ_2 ：遅れ時間、 θ_3 ：過渡時間)を定義し、逐次最適化した。

今回は、過去1日強の実績データを用いて、10分間隔で学習し、将来5時間の溶銑温度を予測した。操炉が日常的に実施する送風温度変更や送風湿度変更などの熱調整アクションが溶銑温度変化に反映されるまでには2～3時間を要するが、これら至近での熱調整アクション影響を含め5時間先の溶銑温度予測があれば、操炉判断を十分に支援可能であると考えた。

図2を用いて、溶銑温度の予測スキームを説明する。各時刻での熱原単位変化量 ΔQ_1 と ΔQ_2 は、おのおのがシ

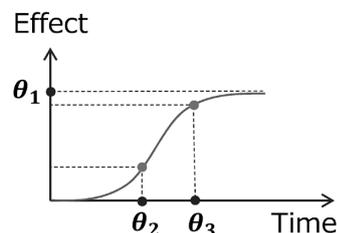


図1 過渡応答モデルにおけるパラメータ θ
Fig.1 Parameter θ of transient response model

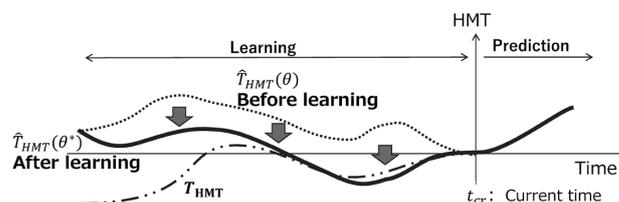


図2 t_{cr} における溶銑温度の予測スキーム
Fig.2 HMT prediction scheme at t_{cr}

グモイド状の過渡応答モデルの入力値として溶銑温度変化 ΔHMT に反映される。熱原単位変化量の影響分を、過去 τ 時間分の学習期間および将来5時間にわたって合計することで、時間軸に沿った ΔHMT が計算できる。これに予測時刻 t_{cr} での溶銑温度を加味することで、学習および予測期間の推定溶銑温度 $\hat{T}_{HMT}(\theta)$ が算出される。なお、 $\hat{T}_{HMT}(\theta)$ は、各熱影響因子の過渡応答モデルのパラメータ $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ に依存する。そこで、過去 τ 時間分の推定溶銑温度 $\hat{T}_{HMT}(\theta)$ と実績溶銑温度 T_{HMT} について式(3)の計算値が最小になるようにパラメータ $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を逐次更新する。

$$\int_{t_{cr-\tau}}^{t_{cr}} w(t) (T_{HMT} - \hat{T}_{HMT}(\theta))^2 dt \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 t_{cr} は予測時刻、 T_{HMT} は実績溶銑温度である。 $w(t)$ は誤差重みで、直近の一致精度を重視するという考え方にもとづき、過去に遡って値を小さくしている。そして、式(3)が最小となる時のパラメータ θ^* を用いて計算された5時間先までの溶銑温度 $\hat{T}_{HMT}(\theta^*)$ を予測結果とする。

パラメータ更新のための学習期間は、学習に十分なデータを得るという観点とともに、オンラインでの計算時間を考慮して決定した。いっぽうで、その期間内で操業データの変化が小さい場合、学習期間の特定データに過剰適合し、適正なパラメータが学習できない事例が散見された。そこで、①評価関数に従来値からの変化幅の制約項を追加する、②各パラメータ値の範囲にあらかじめ制約条件を設ける、などの解析上の工夫を実施した。

2.4 出銑画像を用いた溶銑温度の連続的放射測温システム

本研究における溶銑温度の予測精度向上のポイントは、熱画像解析による放射測温技術によって従来の熱電対測温の欠損期間、とくに直近の予測時点に至るまでの溶銑温度の値を補完し、欠損なく溶銑温度の値を考慮できるようにした点にある。熱電対による測温は出銑孔から一定距離離れた場所で行われるため、溶銑が出銑孔から計測点まで移動する間に温度低下するが、とくに出銑初期は溶銑が流れる樋(とい)が冷えていることもあり、溶銑温度が低めに計測されやすく、炉熱を正確には反映していないこともありうる。いっぽう、放射測温では出銑直後に(樋を流れる前に)測温するため、計測点までの温度低下影響を受け難い利点も有している。

今回開発した放射測温方法の概要を図3に、放射測温を用いた溶銑温度の計算フローを図4に示す。①高炉出銑孔から数m/sで吐出される溶銑・溶さいの混相噴流(以降、出銑さい流)を高速カメラ(図3(a))で撮像する。②撮影された画像において、出銑さい流が明瞭な所定サイズの領域を解析対象として抽出(図3(b))する。出銑さい流の熱画像は高温溶融状態にある溶銑と溶さいの放射率の差により、溶銑は暗く、溶さいは明るいマール模様を呈する。③対象領域内の輝度分布を求め(図5)、最も暗く映る箇所が最も確からしく溶銑の輝度を示すものと仮定し、最小輝度を抽出する。この輝度値から式(4)に示す放射測温の原理を用いて溶銑温度 T_{HMT} を算出する。

$$T_{HMT} = a \left(\frac{C_2}{\lambda \ln(c/V)} - 273.15 \right) + b \dots\dots\dots (4)$$

ここに

λ : 観測波長 [m]

V : 観測画像輝度 [-]

C : 第一放射定数に基づく係数 (= 5.0×10^7) [-]

C_2 : 第二放射定数 (=0.014) [K·m]

a, b : 温度換算係数 [-]

本技術を実機適用した場合、レンズの汚れやカメラ向きの変化などによって温度換算係数 a, b を変更する必要がある。④そこで、間欠的な熱電対温度測定時点において、過去一定点数の熱電対温度を用いて、熱電対温度と放射測温値の誤差が小さくなるよう温度換算係数をオンラインで逐次較正する。なお、次の熱電対温度が計測されるまではこの時点で較正した温度換算係数を用いる(④')。⑤それらの温度換算係数を用いて、逐次温度を算出する。

実際の測定場所は実機の出銑孔近くであり、溶銑などの高温溶融物からの輻射(ふくしゃ)熱や飛散物・粉じんなどが存在し、過酷な環境下にある。汎用的なカメラを設置した場合には輻射熱を受けてカメラ本体の温度上昇による故障や、粉じんなどがレンズに付着する光学障害によって、数日程度で出銑画像が取得できなくなる場合もある。本研究では、独自のカメラ冷却機能や飛散

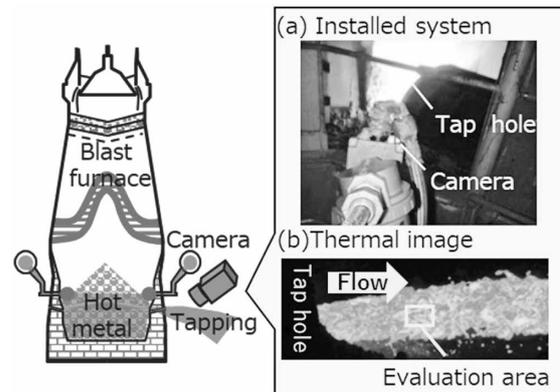


図3 出銑熱画像を用いた放射測温方法の概要
Fig.3 Outline of radiation measurement of HMT using thermal image at tap hole

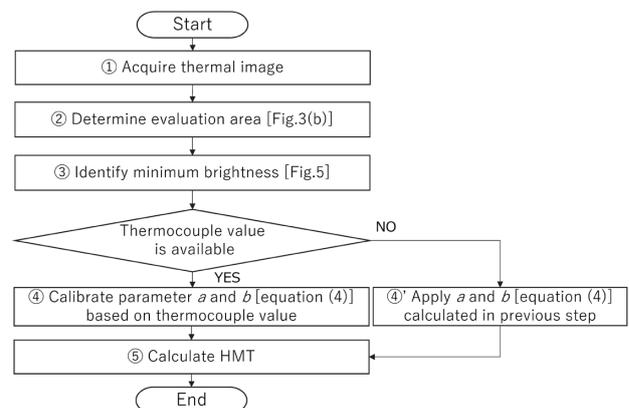


図4 放射測温を用いた溶銑温度の計算フロー
Fig.4 Flowchart of calculating HMT with radiation measurement

物・粉じんを吹き飛ばすエアパージ機能など機構上の工夫により、半年以上メンテナンスフリーで良好な熱画像を取得可能な安定測温を実現した。

また、計測上の代表的な外乱としては熱画像への煙の映り込みがある。煙が発生すると輝度が低く計測されるため、測温誤差が生じる。そこで、煙発生時には溶銑部輝度の時間変動が大きくなる現象を利用し、煙の有無を常時判定して煙画像を除去するなどの信号処理上の工夫によっても測定の安定性を担保している。

図6に放射測温結果の一例を示す。放射測温と熱電対測温との温度差の標準偏差は10℃以下で良い一致を示しており、また熱電対が測温できていない時間帯も連続的に測温できている。

2.5 溶銑温度予測における放射測温システムの活用

放射測温システムの活用方法に関して、図7を用いて説明する。放射測温値 T_{Rad} が必要とされるのは、熱電対による溶銑温度情報が欠損する t_{last} (熱電対の最終計測時刻) から t_{cr} (予測時刻) までの時間帯である。そこで、直近の熱電対計測時点以降の欠損期間 $[t_{last}, t_{cr}]$ を放射測温値で補完するスキームを構築した。この欠損期間において、放射測温値 T_{Rad} を取得できたか否かに応じて二つの方法(方法1, 方法2)を使い分けて予測を行った。

放射測温値が取得できた場合(方法1, 図7(a))は、最終の熱電対測温結果 $T_{Thr}(t_{last})$ に対して放射測温値 T_{Rad} の変化と同等の変化が生じると仮定し、現時点 t_{cr} までの溶銑温度を推算した。このようにして現時点までの学習期間 $[t_{cr}-\tau, t_{cr}]$ の溶銑温度情報を得たうえでパラメータ学習を行った。

画像計測上の問題により放射測温値が取得できなかった場合(方法2, 図7(b))は、欠損期間の溶銑温度を下記I~IVの手順で推定し、パラメータ学習を行った。そのスキームを図8に示す。

I. 期間 $[t_{cr}-\tau, t_{last}]$ における熱電対測温結果を入手す

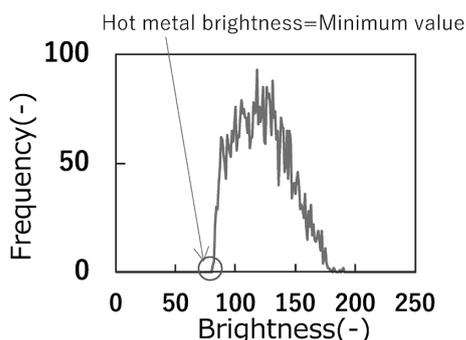


図5 溶銑代表輝度の決定方法
Fig.5 How to determine hot metal brightness

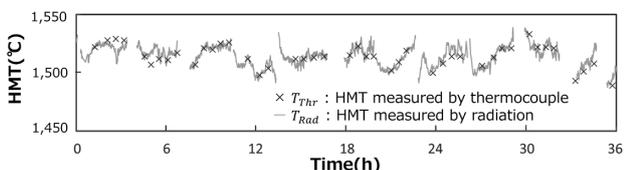


図6 溶銑温度計測値の比較
Fig.6 Comparison of hot metal temperatures

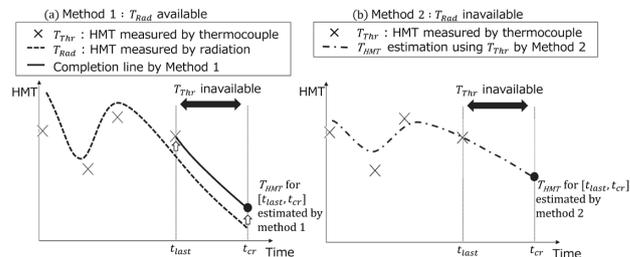


図7 方法1と方法2による $[t_{last}, t_{cr}]$ での T_{HMT} の推定
Fig.7 Method 1 and 2 estimation of T_{HMT} for $[t_{last}, t_{cr}]$

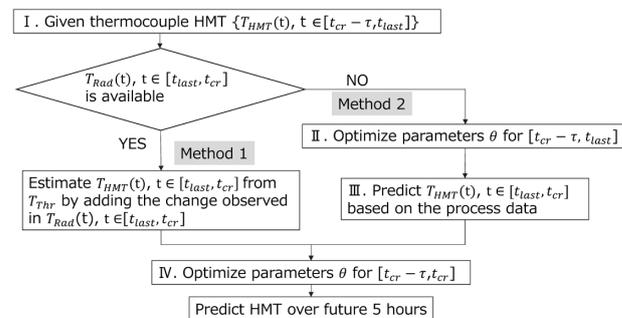


図8 溶銑温度予測スキーム
Fig.8 HMT prediction scheme

る。

- II. 上記温度を元に最適化計算を行い、過渡応答モデルのパラメータ θ を最適化する。
- III. 熱電対の欠損期間 $[t_{last}, t_{cr}]$ では、IIで求めたパラメータ θ による過渡応答モデルとその間の熱原単位変化量を用いて溶銑温度を推定する。
- IV. IIIにより全学習期間 $[t_{cr}-\tau, t_{cr}]$ に必要な溶銑温度を求めたうえで、改めて過渡応答モデルの学習を行い、将来5時間先の溶銑温度を予測する。

3. 実機適用結果

方法2で5時間先の溶銑温度を予測した結果を図9に示す。①予測時刻 t_{cr} で、モデルは将来5時間にかけて溶銑温度HMTの管理下限以下への低下を予測している。②操炉が同タイミング以降で複数回の送風温度BT (Blast Temperature) の上昇アクションを実施することで、③溶銑温度の実測値は管理範囲内に維持することができた。

次に、熱電対の欠損期間 $[t_{last}, t_{cr}]$ が約5時間と長い事例で、2種類の予測結果を比較して図10に示す。欠損期間における方法2での溶銑温度変化を見ると、 t_{last} 直前でのBT上昇アクションを反映して溶銑温度が上昇した後に、他の炉内影響因子 ΔQ_2 の影響で温度低下している。方法1の放射測温した溶銑温度も、上昇後に低下する同様の傾向を示しているが、予測時刻 t_{cr} では方法1の方が方法2よりも低い温度となっている。①その結果、5時間先の溶銑温度予測は、方法1の方が管理範囲から大きく乖離(かいり)した低い値を示している。②予測タイミングの後に操炉が溶銑温度を上昇させる送風温度BT上昇アクションを複数回取ったため、③実際の溶銑温度は管理範囲内に回復した。②の大幅なアクション実績と

③の炉熱変化の結果から、溶銑温度は予測タイミング時点で比較的大きな低下傾向にあったことが分かる。より低い温度予測をし得た放射测温値による補完方法（方法1）がより安全側での予測ができたと言えるが、これは新規開発した放射测温計により熱電対温度欠損期間での大きな温度低下を検知できた成果である。いっぽう、方法2による溶銑温度予測についても操炉に対して適正アクションを促すことを図9で確認できており、放射测温値が適用できない場合は方法1の有効なバックアップスキームとなりうる。

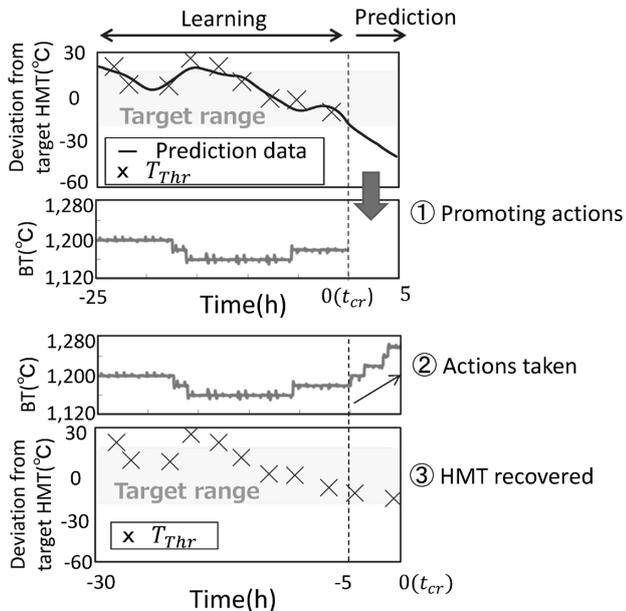


図9 方法2による予測と操業結果

Fig.9 HMT prediction by Method 2 and operational results

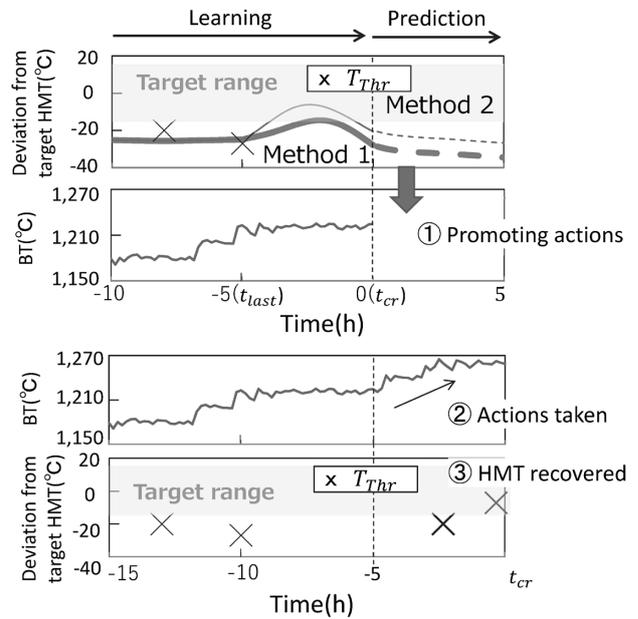


図10 方法1と方法2の予測比較と操業結果

Fig.10 Comparison of Method 1&2 predictions and operational results

むすび= 本稿では溶銑温度予測技術の開発について報告した。熱収支を考慮した過渡応答モデルのパラメータをAIによって逐次最適化し、さらに入力情報として熱電対温度と放射测温値を適切に組み合わせることで高精度な溶銑温度予測が可能となった。今後は、本予測技術を応用した制御技術を開発し、さらに通気性を含めた炉況制御を行うAI操炉[®]の実現を目指す。

参考文献

- 1) 神戸製鋼所, 「AIによる高炉の炉熱予測システム」の運用開始及び「AI操炉[®]」構想について. https://www.kobelco.co.jp/releases/1205231_15541.html, (参照2023-12-13).
- 2) 松田浩一ほか, システム制御情報学会論文誌(ファジィ推論を用いた大規模分布系変動予測とその高炉炉熱予測制御への応用), 1991, Vol.4, No.2, p.86-94.
- 3) 橋本佳也ほか, 日本鉄鋼協会第178回秋季講演大会概要, Vol.32, 2019-9-11/13, 日本鉄鋼協会, 2019, p.608.
- 4) 夏井琢哉ほか, 日本鉄鋼協会第186回秋季講演大会概要, Vol.36, 2023-9-20/22, 日本鉄鋼協会, 2023, p.444.
- 5) 加茂和史ほか, 日本鉄鋼協会第180回秋季講演大会概要, Vol.33, 2020-9-16/18, 日本鉄鋼協会, 2020, p.90.
- 6) 迫田尚和ほか, R&D神戸製鋼技報, 2023, Vol.72, No.2, p.48-52.