



私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

溶銑温度の完全なる制御を目指して*

Longing for Perfect Control of Hot Metal Temperature

橋本佳也

Yoshinari Hashimoto

JFEスチール（株） 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

1 はじめに

「ヨーセンオンド、セン、ゴヒャク、ジュウ、サンド、デス」。鉄鉱石を還元・溶解して約1500℃の銑鉄（溶銑）を製造する高炉の運転室では、溶銑温度が計測される度にこのような放送が流れる。そして溶銑温度が1470℃ともなるとオペレーターに緊張が走る。というのは溶銑が冷えて炉内で固まるトラブルがひとたび生じると、復旧するまでに時として数ヶ月要するためである。本論文¹⁾は、このような緊迫感のある製銑工場の中で、幾度となく流れる测温値の放送を耳にしつつ、溶銑温度の将来予測を目的として執筆したものである。

なお今回の受賞については、自身の力というよりも、本研究のベースとなった高炉定常モデルを開発されたJFEテクノロジーの澤義孝氏との議論と、社会人博士課程でお世話になった京都大学の加納学教授の懇切丁寧な論文指導とに依ることが大きい。さらに、JFEスチール西日本製鉄所の製銑工場の北村洋平氏、岡本悠揮氏、海瀬達哉氏には、本論文の内容を実用化するにあたり、並々ならぬご支援をいただいたことをこの場をかりて御礼申し上げる。

2 本研究の動機

高炉操業の難しさは、大きな熱容量に起因した長い時定数に由来する。高炉は大型化を追求することで熱効率を向上させたが、その裏腹に制御性は削がれたといえる。溶銑温度を制御するためには、微粉炭比や送風湿分が調整されるが、長い時定数によりアクションの即効性が非常に弱い。そのためオペレーターはアクションの効果が現れないと次から次へと

過剰なアクションを実施してしまいがちである。そして自分たちのシフトが終わる頃、アクションの効果が現れた時には温度が目標値から大きく外れ、次のシフトのオペレーターが対応する、といったことがある。

このような溶銑温度のばらつきを抑制するためには、溶銑温度の将来予測により、「あなた達の実施したアクションは十分効くはずなのでどうか安心してほしい」とオペレーターにお伝えする必要がある。将来予測のために、本研究では炉内の反応や伝熱現象を考慮した物理モデルによるアプローチを採用した。物理モデルを用いれば、このまま何もアクションをしないと、溶銑温度がこうなるという予測が可能である。理論的には無限時間先までの予測が可能である。

昨今、サイバーフィジカルシステム（CPS）、デジタルツインなどのキーワードを目にすることが多い。デジタル空間の中に仮想プラントを作って、リアルタイムに将来のプロセスの状態を予測し、制御に活用するという概念である。本研究もCPSの一種といえる。

3 論文の概要

高炉の物理モデルのオンライン化に関する技術報告は少ない。筆者が想像するに、高炉の物理モデルは反応計算と温度計算が複雑に交絡しており、収束解を安定的に得づらいことが原因の一つと推定される。そしてせっかくオンラインしても、高炉物理モデルにはパラメーターがたくさん存在するので、数か月もするとパラメーターが合わなくなって御蔵入り、という事例が発生していたのではなかろうか。前者の課題については、丹念に計算安定化のための数値計算の手法を

* [今回の対象論文]

橋本佳也, 澤義孝, 加納学: 「Online Prediction of Hot Metal Temperature Using Transient Model and Moving Horizon Estimation」, ISIJ International, Vol.59 (2019), No.9, pp.1534-1544 (第31回澤村論文賞受賞)

試していき解決したのが実情である。本論文は、後者の課題に対処するためのものである。

高炉プロセスでは原料成分やガス流れの変動など様々な外乱が重畳しており、物理モデルの誤差要因を特定するのが非常に困難である。また高谷らも指摘しているように、炉下部での熱交換異常など、未解明な現象も多い²⁾。そのため、パラメーターの調整は場当たりのものとなりがちであるが、本論文では誤差を効果的に打ち消すパラメーターを論理的に選定し、さらに自動的にパラメーターを調整する方法を考案した。

要点を一言でいえば、図1に示す通り、主成分分析とリスト線図を用いて物理モデルの推定誤差は主に還元材比および還元効率の変動で説明可能であることを突き止め、上記の変動要素に係わるパラメーターを過去に遡って逐次修正することで外乱影響を適切にモデル計算に反映可能とし、実用に耐えるリアルタイムでの8時間先予測を実現した、となる。4節

にて上記についてももう一歩踏み込んだ説明をする。

4 推定誤差要因の解析とパラメーター自動調整

ガス利用率、溶銑温度などの主要プロセス変数の物理モデルの誤差を主成分分析した結果、図2に示すパターンを得た。たとえば青実線に示す第1主成分については、還元材比がモデル計算上、実高炉よりも何らかの理由（後述）により高まり、それによりモデル上はCOガスが大量に発生するので、ガス利用率（炉頂ガス成分の $\text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$ 割合）は低めに外れ、加えて、熱源が実態よりも多くなるので溶銑温度も高めに外れる、という解釈である。

上記の考察をリスト線図³⁾に焼き直したのが、図3である。図3 (a) の実線に示すように、モデル上は実高炉と比較して

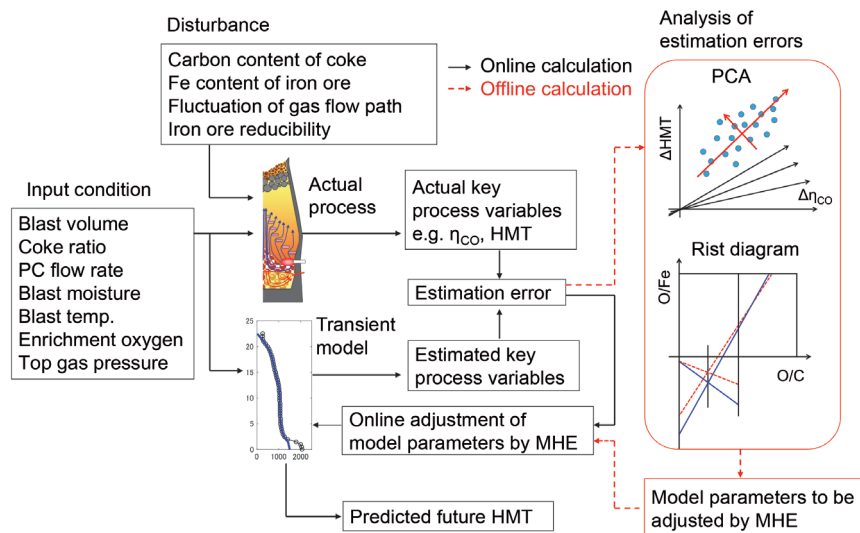


図1 高炉物理モデルと Moving horizon estimation を用いた溶銑温度の将来予測¹⁾ (Online version in color.)

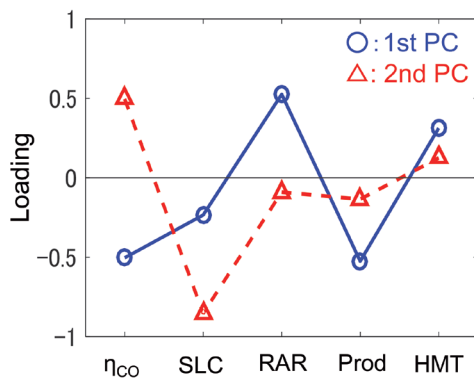


図2 主要プロセス変数の推定誤差の主成分分析結果。 η_{CO} はガス利用率、SLCはソリューションロスカーボン、RARは還元材比、Prodは造銑速度、HMTは溶銑温度を意味する¹⁾ (Online version in color.)

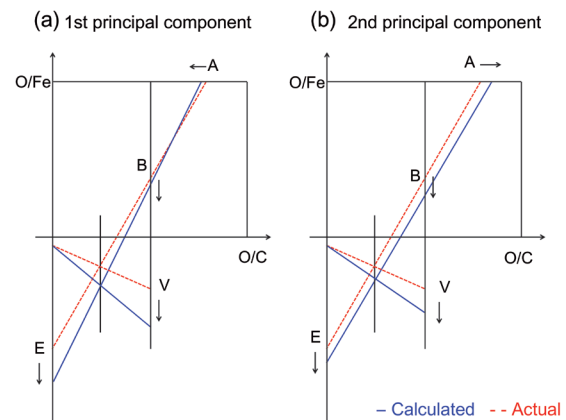


図3 リスト線図を用いた推定誤差の主成分分析結果の解釈¹⁾ (Online version in color.)

還元材比を意味する線分AEの傾きが大きくなるので、ガス利用率を示すA点は左へ、溶銑温度を含む炉下部の顕熱を示すV点は下へ移動する、と解釈が可能である。このように実高炉とモデルの挙動の解離が見られた際にリスト線図の思い浮かべると、誤差要因の理解がしやすい。図2に示した2つの主成分は、図3 (a) と (b) のように、リスト線図の線分AEの回転と平行移動とに対応しているのである。

では上記で述べた還元材比の誤差を発生させた「何らかの理由」とは何だろうか。一意には決められないが、鉄源中の鉄の含有量の分析誤差やコークスの水分率の誤差により、実質的なコークス比が設定値から外れてしまったことが原因の候補として考えられる。実際、炉頂コークス比に補正係数を乗じて感度解析すると、図2の実線と極めて類似した図4の青丸付きの実線のパターンを得た。このように推定誤差の主成分に対応したパラメーターを選定することで、誤差を効果

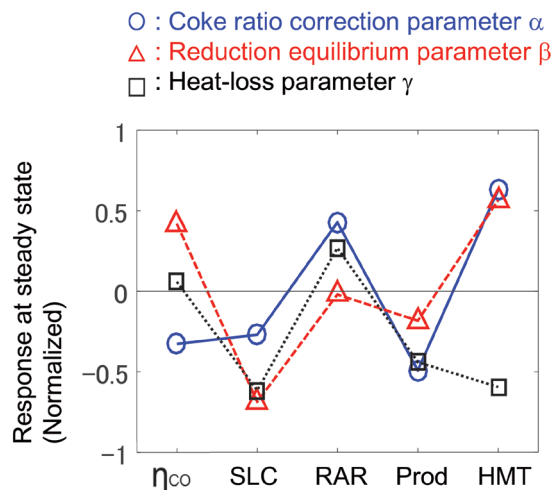


図4 物理モデルによるパラメーターの感度解析結果¹⁾ (Online version in color.)

的に打ち消すパラメーターを選定した。

さらにパラメーターを修正する際にも高炉の長い時定数が障壁となる。たとえば現時点のガス利用率や溶銑温度の誤差は、どの時点のコークス比のズレに起因したものであろうか？少なくとも、溶銑温度については炉頂で原料を装入してから溶銑として排出されるまでに8時間程度要することから、8時間以上前と考えるのが妥当である。したがって、パラメーターを修正するためには、過去に遡って修正しなければならない。このような考え方に基づき、図5に示す通り、moving horizon estimation (MHE)⁴⁾ と呼ばれる、過去の所定区間の主要プロセス変数の誤差を低減するように、過去のパラメーターを逐次修正する手法を採用した。本手法によりパラメーター調整の自動化が可能となり、物理モデルをオンラインして4年程度経過しているが、オンライン化した当初の精度を維持している。

近年、データ同化とよばれるモデル計算とセンサ情報とを融合することによる状態推定の手法が脚光を浴びており、材料分野でも活用が進んでいる⁵⁾。本研究も物理モデルとセンサ情報を融合させたという意味で、データ同化の一手法と位置付けられる。粒子フィルターやアンサンブルカルマンフィルターなどの複数の物理モデルを並列させて計算する手法もあるが、高炉物理モデルのように計算負荷の高いモデルを用いる場合は並列計算の必要がないMHEが有用である。

5 実操業での運用結果

さて、このような物理モデルに基づいた将来予測による操業ガイダンスシステムを実際に高炉の運転室に実装した⁶⁾。15分毎に現在の操業条件を取り込み、将来の溶銑温度が目標

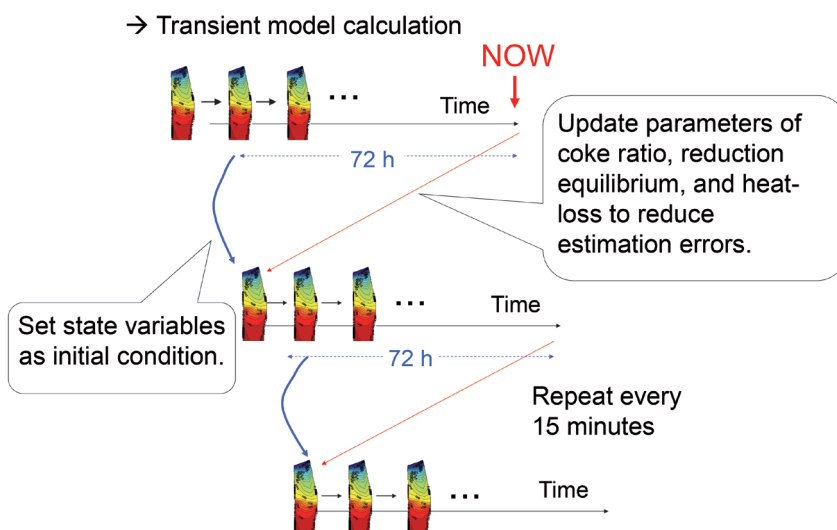
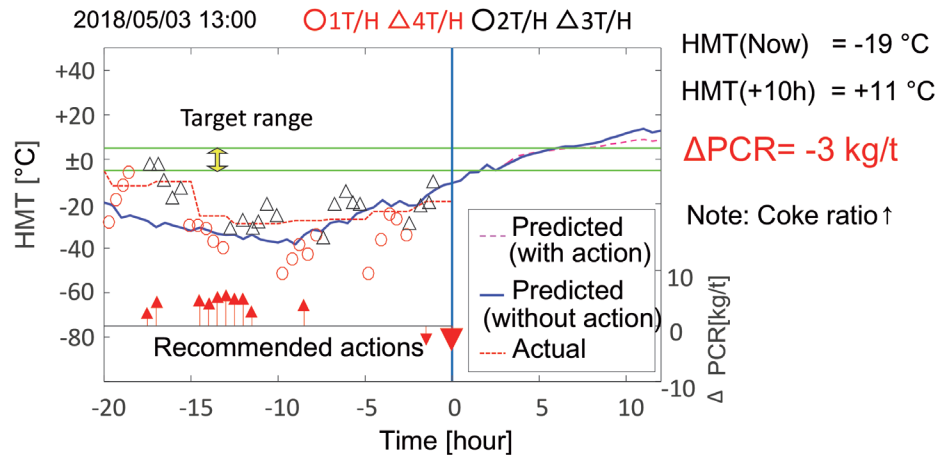


図5 Moving horizon estimation (MHE) の概略 (Online version in color.)

図6 操業ガイダンスの一例⁶⁾ (Online version in color.)

範囲から外れると予測された場合は、目標範囲に収めるための推奨アクションを出力する。図6に示す局面では、今後溶銑温度が目標範囲から高めに外れるため、足元の溶銑温度は目標範囲下限よりも低い、微粉炭比(PCR)を下げることを推奨している。ようやく熱が回復しつつある中で熱を落とすアクションはやりたくないというのが通常の操業感覚であるが、目標範囲に到達してから下げたのではもはや手遅れなのである。

試験運用の結果、少々は予想していたが、実装した当初はオペレーターから不満が噴出した。オペレーターは自身の操業技術に対して強烈的な自負を抱いており、感覚に合致しない推奨アクションはなかなか採用しない傾向にある。しかし、彼らと会話をしてみても納得した。確かに本システムによりオペレーターよりも先手を打ってアクションを実施できる場合もあるが、突発的な原料降下速度の変動など、物理モデルでは表現が困難な現象には太刀打ちができていないのである。そのため、MHEを用いても物理モデルのみでは、常にオペレーターを凌駕するアクションを提示し続けることは困難であった。現状は別途構築した統計モデルと併用するなどして物理モデルの長所は残しつつ操業に活用している。色々な人に助けを借りながらVer.100を超える改良を重ね、JFEスチールの全8高炉にオンライン化は完了し、溶銑温度のばらつき低減効果を発現している⁶⁾。

残課題としては、そもそもの物理モデルの表現能力の向上と、上記のように突発的な事象に対応したデータ同化の手法の開発であろう。筆者の場合は物理モデル単独でのアプローチを貫くことはできなかったが、物理モデルのみで完全な予測を実現できる方が現れてくれることを期待している。

6 むすび ～永遠不滅の存在証明～

昨今CO₂低減の社会的要請により、2050年には高炉が日本から消えるかもしれない、などというニュースを目にすることがある。しかしながら、たとえ高炉がなくなったとしても、製鉄業そのものは存続するし、電気炉に投入する直接還元鉄を製造するシャフト炉は100年後も存在し続けることであろう。原理的には固体とガスとの間の酸素交換を伴うシャフト炉全般に対して、主成分分析とリスト線図により物理モデルの誤差要因を特定し、過去に遡って物理モデル中のパラメーターを自動調整するという本論文の考え方は適用できると思われる。激変の製鉄業の中で、本論文の片鱗が生き続けることを願うばかりである。

参考文献

- 1) Y.Hashimoto, Y.Sawa and M.Kano: ISIJ Int., 59 (2019), 1534.
- 2) 高谷幸司: 鉄と鋼, 81 (1995), 1031.
- 3) 小野陽一: 鉄と鋼, 79 (1993), N618.
- 4) T.Otsuka: Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, 35 (1999), 1253.
- 5) 長尾大道: ふえらむ, 26 (2021), 517.
- 6) Y.Hashimoto, Y.Okamoto, T.Kaise, Y.Sawa and M.Kano: ISIJ Int., 59 (2019), 1573.

(2021年9月21日受付)