



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

プロセス制御技術者 10年目の反省文

Retrospect of My 10 Years as a Process Control Engineer

橋本佳也

Yoshinari Hashimoto

JFEスチール（株）スチール研究所
計測制御研究部
主任研究員

1 はじめに

私は計測制御研究部に所属し、主に製鉄分野のプロセス制御開発に携わっている。近年、自動運転車に象徴されるように自動運転の技術は飛躍的に向上している。その一方で製鉄プロセスの多くはオペレータの経験と勘に頼ったマニュアル操作が未だ行われており、完全な自動制御化には程遠いのが実情である。製鉄プロセスは鉄鋼プロセスにおける他プロセスと比較し、プロセスが巨大な一方でセンサ情報が少ない課題がある。また、高炉に代表されるように熱容量が大きいプロセスでは微粉炭比操作等のアクションの即効性が弱いため、適切なアクション決定が難しい。

よって既存センサ情報を有効活用することでプロセス内部を可視化し、プロセスの状態の将来予測に基づいたアクション量適正化がプロセス自動化に有効と考えられる。このような製鉄分野におけるニーズへの対応技術として、コークス押出性制御¹⁾、フェロコークス乾留炉ヒートパターン制御²⁾、高炉溶銑温度制御^{3,4)}等を開発した。本年では私は入社10年目であり、プレーヤーとして謳歌できる研究者人生の半分以上が過ぎ去った感がある。本稿では前半戦の反省と後半戦に向けた課題について考える。

2 研究開発事例

フェロコークス乾留炉のヒートパターン制御²⁾について紹介する。フェロコークスとは、石炭と粉鉱石をブレンドした高反応性の成型炭であり、高炉における還元材比低減の効果が期待されている。フェロコークスの強度および反応性を確保するための所望の乾留ヒートパターンを保持する制御系を構築することが本研究の目的である。

Fig.1に示すようにフェロコークス乾留炉は炉上部からの原料の投入および炉下部からの原料切出しが連続的に行われ

る向流熱交換プロセスであり、原料の炉内滞在時間は8時間程度である。また、炉の側壁には、上から順に低温羽口、高温羽口、冷却羽口が設置されている。炉内ヒートパターン全体をオンライン制御する必要がある一方で、温度センサの設置位置は限定されている。また、乾留炉に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存在する。そこで本研究では物理モデル計算とセンサ情報とを組み合わせることで炉内全体の温度パターンを可視化するロジックを構築した。

センサ情報と物理モデル計算の融合方法としては、Fig.2に示す粒子フィルターを採用した。複数の未知パラメータ群を仮定した非線形モデルをオンラインで並行して計算する。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により、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、プラントの変化に追従したモデリングが可能となる。このような状態推定手法に基づいたモデル予測制御系をフェロコークス乾留炉に実装

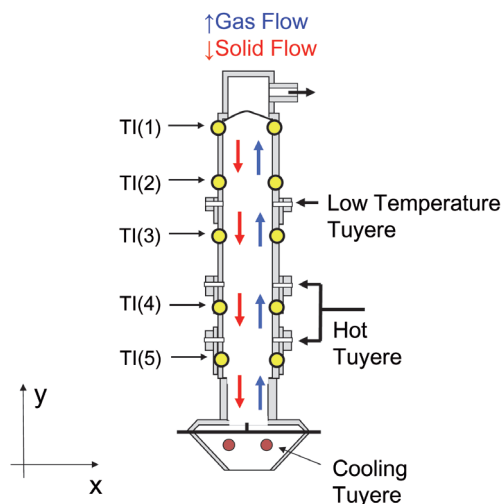


Fig.1 Structure of ferro-coke furnace.

し、温度ばらつきの低減効果を確認した。

さらに、推定されたヒートパターンの情報をフェロコークスの品質制御に適用することを考えた。推定ヒートパターンと製品強度との相関解析を実施した結果、Fig.3 (a) に示すように高温領域における滞留時間と製品強度の間に負の相関が生じるという新知見が得られた。通常の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、鉬石が還元される際に周囲のコークスを消費し欠陥が生じるため、過度な乾留は強度低下につながると思われる。

以上の相関解析結果に基づき、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、Fig.3 (b) に示すように高温領域の滞留時間を短縮させることで製品強度を向上させることを提案した。実炉試験の結果、製品強度 (Drum Index 150/15 mm) が0.5 point 上昇した。このように単なる制御系構築に留まらず、操業設計にまで踏み込んでプ

ロセスと関った点が本事例における成功体験となっている。

3 前半戦の反省

本節では上記の事例を含めたこれまでの研究開発において苦労した点について述べる。まず、いかにしてオペレータに納得して使用してもらえるシステムに仕上げるか、である。オペレータは長年の経験から担当プロセスの運転技術に強烈な自負を抱いている。彼らの視点からすれば、自動化システムは自分の仕事を奪う可能性のある「敵」であり、心の壁を突破する必要があった。信頼関係を構築するため、毎日プラントに通うのは勿論のこと、アンケート形式の試験から得られた意見はシステムの仕様に反映させる、ガイダンスを順守した結果としてトラブルが生じた場合は現場に駆けつけ頭を下げて再発防止策に努める、といった努力を重ねた。オペレータの多くは高効率操業(攻め)と安全余裕(守り)のトレ

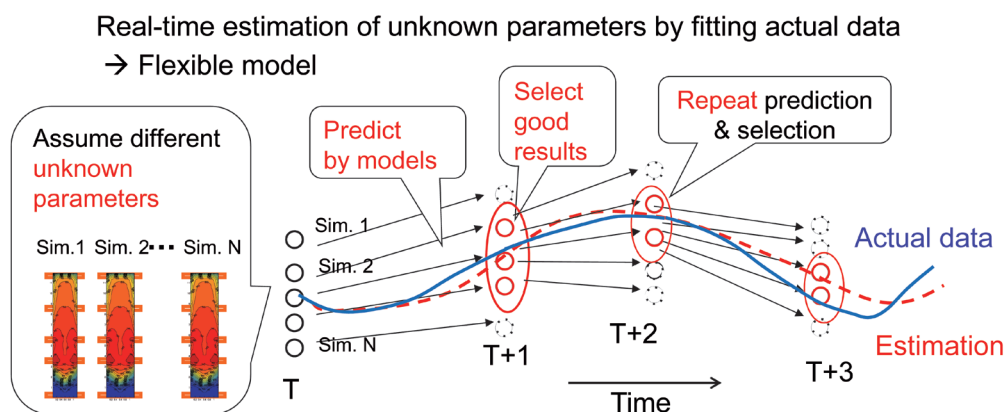


Fig.2 Concept of particle filter.

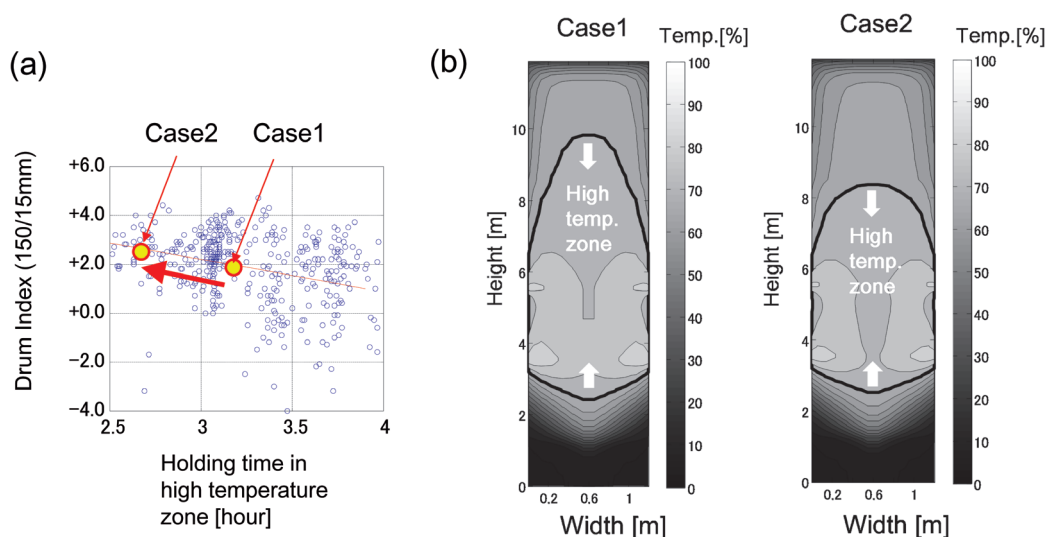


Fig.3 Improvement of ferro-coke strength through heat pattern optimization.

ドオフを常に勘案し次の一手を決定している。このようなオペレータの思考を数理的に表現することが納得性を高めるカギの一つと考えている。このように根気よく誠実に対応すれば、システム改善のヒントから操業の裏技まで何でも教えてもらえる良好な関係を築くことができることが多い。また、システムの予測が当り参考になるとオペレータから評価してもらえる時が、努力が報われる瞬間である。

また、プロセスのモデリングについても相当にこだわった。原理的には将来予測が完璧であれば、制御系の出力に間違いはないはずだからである。まず、マクロな熱物質収支の観点から妥当な挙動をするようにモデルを作成することが、説得力を高める上で非常に重要である。オペレータの操作により、プロセスデータの多くでは操作変数と制御変数の間には本来の相関と逆方向の相関が生じている。たとえば高炉操業において、燃料である微粉炭流量を増加させると溶銑温度は上昇するため、両者には正相関が生じることが予想されるが、実際は溶銑温度が低下したため微粉炭流量を上げるといふ人の操作が反映された負の相関となっている。よって操作変数と制御変数との相関ではなく、ソリューションロスカーボンと溶銑温度のように人の操作影響が介在しない、操業「結果」同士の相関をモデルにより再現し、マクロな熱物質収支から予測される定性的な方向と合致させることが、現象をモデルで再現できたと主張する上で重要と考えている。次に、実現象に近づけるためにモデルをチューニングする上での問題は、調整パラメータの候補が多すぎることである。たとえば、還元反応速度の変化を説明するにも、反応速度係数で説明すべきか、平衡定数で説明すべきか、の任意性がある。炉頂ガス温度の変化を説明するにも、熱交換速度で説明すべきか、原料水分の変化で説明すべきか、の任意性が残る。このように類似した効果を有するモデルパラメータや境界条件の変化を実プロセスデータにより分離するのは困難であり、プロセスの専門家を巻き込んで議論し、物理的に妥当な仮定を設ける点に腐心した。

4 後半戦に向けた課題

製銑プロセスは製鉄所の上流に位置し、重大トラブルを発生させれば製鉄所全体が麻痺してしまう。このような重要なプロセスを自動制御系に完全に委ねるのは今後も困難であると考えられる。また、モデルだけでは説明困難な現象も存在すること、同じプロセスであっても操業ルールは製鉄所ごとに異なり、かつ原料事情やプロセス改修とともに変化することから、人ならではの判断能力を援用し、人の操業ルールを適応的に学習するシステムの必要性を痛感している。一方で、これまでの製鉄所のガイダンスシステムは人に操作量の推奨値を提示するものであり、強制力の弱いものであった。いかにシステムが正しい場合の順守率を高めつつ、人と協調するシステムを構築するかが課題である。

この問いに10年後には明確に回答したい。自動車メーカー各社が鎬を削っている領域と考えられる。異分野の知恵を取り入れつつ、日々汗をかいているオペレータへの敬意を忘れずに後半戦を戦っていく所存である。

最後に、鉄鋼協会の活動の中で関わった大学の先生や鉄鋼他社の方々、成果がなかなか上がらない中で温かく見守ってくださる研究所の上司に感謝します。

参考文献

- 1) Y.Hashimoto, K.Tsuda, S.Akiyama and M.Honma : ISIJ Int., 54 (2014), 2623.
- 2) Y.Hashimoto, K.Tsuda, T.Anyashiki and H.Fujimoto : ISIJ Int., 57 (2017), 131.
- 3) Y.Hashimoto, Y.Sawa, Y.Kitamura, T.Nishino and M.Kano : ISIJ Int., submitted.
- 4) Y.Hashimoto, Y.Kitamura, T.Ohashi, Y.Sawa and M.Kano : Control Engineering Practice, submitted.

(2018年4月19日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

京都大学 大学院情報学研究科 システム科学専攻 教授

加納 学

高 炉には近寄るな。製造プロセスを対象としたデータ解析や制御の研究開発を行う際に、底なし沼に落ちてしまわないために、これまでの数少ない経験から見出した標語がこれのはずでした。君子危うきに近寄らず、です。そのような私のところに橋本佳也氏が来られて、高炉の安定操業を実現するためのガイダンスシステムを開発したいと言われ、社会人博士学生として研究室に在籍されることになりました。2017年4月のことです。

あの複雑な高炉を相手に実用に耐えるガイダンスシステムを短期間で構築できるだろうか。そのような心配もありましたが、杞憂でした。製鉄分野のプロセス制御技術開発に10年間従事されてきた橋本氏は、高炉操業支援に適した物理モデルを構築するだけの知識と能力を持ち、同時に高度な制御技術にも精通しておられました。それは今回紹介されたフェロコークス乾留炉のヒートパターン制御における成果からもわかります。限られたセンサ情報を活かすために物理モデルを構築し、粒子フィルタによる状態推定に基づくモデル予測制御系を実装し、温度ばらつきの低減を成し遂げられています。物理

モデルの利用が、データ上の見せかけの相関や変動に惑わされることなく、装置特性の変化に追従し、運転員に納得して使用してもらえるシステムの構築に繋がっています。この物理モデルへの拘りと制御技術に関する知識が、現在取り組まれている高炉操業ガイダンスシステムの開発にも活かされています。

ビッグデータが脚光を浴びようになり、うちのデータは昔からビッグですがと思いながらも、データを活用して何らかの成果をあげるよう求められている製造現場も多いと思います。サイバー・フィジカル・システムでは、高速かつ大量に収集されるデータを解析することで、生産性の向上など様々な利益を享受することが目論まれています。データさえあれば何でもできると捉えられがちですが、製造設備や製品に関する専門知識とデータ解析とをうまく併用することで、困難な課題であっても成功確率を高めることができます。橋本氏には、自身の強みを活かして、技術者として益々活躍されることを期待します。現在の課題への回答を聞かせていただける10年後を楽しみにしています。

Department Process optimisation Iron and Steel Making,
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf, Germany.

Dr. Thorsten Hauck

“**T**he blast furnace tells you everything, you just have to understand” – that was a memorable conclusion Prof. Nightingale from Australia told me a long time ago. When I met Mr. Hashimoto in 2015 during a common research project in Düsseldorf covering several weeks I realised quick, that he was one of very few people who spoke the blast furnaces language which – to my conviction – is the most difficult of all languages.

Trying to understand the blast furnace means dealing with all fields of engineering at the same time: Mixed flow of solids, liquids and gases including uncountable aspects of chemistry and metallurgy, and these are just the physical aspects. So, the language of the blast furnace in fact is not one language, but corresponds to hundreds of languages, mixed and spoken at the same time.

A lot of information is available at the blast furnace, yet just a drop in the bucket of what is relevant to control the heat pattern of a blast furnace. The available information is spatiotemporally distributed and mostly prone to several kinds of error sources, and finally, describing just hints on the real process conditions which need to be understood. The best proof is that, despite centuries of intensive and brilliant research work and despite everybody is talking about digitalisation and industry 4.0, the blast furnaces are still operated mainly basing on manual control.

So, how can Mr. Hashimoto dare to give it another try? He can and he definitively knows what he is talking about because he is able to understand the heterogeneous sources of information, from sophisticated theoretical knowledge down to deep practical know-how. And furthermore, he is able to handle and combine all the different tools needed to achieve significant progress in the automation of the blast furnaces heat pattern: Starting from the collection and conclusion of the heuristic know-how of the individual operators, going on with the exploitation of data analyses and statistical methods and finally the application of analytical models.

Solving the theoretical part of the task is not enough to achieve any practical benefit. An even more difficult task provides the human-machine interface: Any theoretical tool controlling the blast furnace, how brilliant it may be, will have significant shortages under special conditions which sooner or later occur in any blast furnace plant. Both, deep acceptance and understanding must be created at the operators, to effectively use the system in practice, but also to realize and decide in which situations it may have to be overruled. However, Mr. Hashimoto is well aware of all this and I am looking forward to him being successful with the unique task he selected.