

(論文)

高炉吹き抜け予測方法

Method for Predicting Gas Channeling in Blast Furnace



加茂和史*1
Kazufumi KAMO



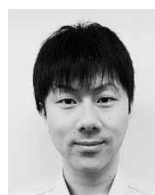
浜元和久*2
Kazuhisa HAMAMOTO



前田知幸*1 (博士(工学))
Dr. Tomoyuki MAEDA



梶崎博司*2 (博士(工学))
Dr. Hiroshi NARAZAKI



焼谷将大*3
Masahiro YAKEYA



田中洋輔*4
Yosuke TANAKA

In order to maintain stable operation of a blast furnace, deviations from the steady state should be quickly detected and corrected. Because internal physical states are difficult to measure directly, experienced operators play a crucial role in integrating information from various sources such as sensors and visual observations so as to recognize, predict, and react to probable anomalies. Overlooking undesirable symptoms or delayed actions possibly leads to the excessive loss of heat, which, in the worst case, can cause the abnormal shutdown of operation. One of the events highly associated with the risk of heat loss is gas channeling, which sets off an alarm signaling to the operator to decrease the flow rate of input hot gas. Gas-channeling is judged to be imminent by the integration of indices designed so as to detect unusual changes in the variations and patterns of sensory data. The precision of our prediction method is evaluated on using actual data.

まえがき＝一貫製鉄所においては、鉄鉱石や副原料、鉄鉱石を事前処理した焼成鉱を高炉炉頂より連続装入し、炉内で還元・溶融・浸炭させ高温の溶銑を連続生産している。高炉内部は高温・高圧・粉じん環境であり、炉内の状態を直接計測することは難しいため、多数のセンサが炉壁に設置されている。これらセンサで取得したデータから炉内状態およびその変化を推定・予測して、適切な操業アクションにつなげることが高炉安定操業にとって重要となる。異常予兆の見逃しや誤判断は、高温ガスによる設備破損のほか、熱供給不足によって炉内の銑鉄が凝固して生産停止につながるリスクがある。高炉は製鉄所の最上流に位置するため、高炉生産が滞ると製鉄所全体に影響が及ぶ。

そのため、高炉の操業を安定に維持させることは重要な課題であり、これまでもさまざまな研究が行われてきた。たとえば、高炉の状態に影響を及ぼす炉内融着体形状の推定¹⁾やAI技術を用いた炉熱制御²⁾など、装入物やセンサ情報から炉況を推定・評価し、安定操業を支援する技術開発が行われてきた。しかし、高炉はさまざまな要因が複雑に絡み合ったプロセスであり、操業においては熟練操業者の総合的判断やスキルに依存する部分が多いことも事実である。

いっぽう、熟練操業者から若手への世代交代も進んでおり、若手操業者の経験不足やスキル不足による異常予兆の見逃しや誤判断も危惧される。そのため、操業者の気づきや判断を支援する技術やツールが求められている。

近年はICTの進歩により、大量のデータを解析して人間の判断やアクションを支援する技術の進展が著し

い。そこで当社は、高炉操業における異常事象の一つである吹き抜けを対象に、操業者に吹き抜け発生リスクの気づきを支援するという観点でデータ解析技術を活用した吹き抜け予測技術の開発に取り組んだ。吹き抜けとは、高炉下部から吹き込まれた熱風が還元ガスとして炉内を上昇する際に、その流れが炉内状態の乱れによって悪くなり（以下、通気不良という）、次第に圧力が上昇して通常よりも高い圧力・温度で炉頂から高炉ガスが排出される事象である。

吹き抜け予測技術についてはこれまでに、圧力の周波数解析³⁾や主成分分析⁴⁾による方法が試みられてきた。しかし、吹き抜けの発生要因は複雑であり、操業者の判断に委ねる部分が残っているのが実情である。

そこで当社では、さまざまなセンサ情報に対して統計処理やパターン分類手法を適用し、吹き抜けリスクと相関の高い複数の特徴量を定義した。さらに、それらを組み合わせることで、吹き抜けリスクの定量的な指標を操業者に提供する操業支援システムとして実用化した。本稿ではその概要と適用結果を報告する。

1. 吹き抜け予測システムの概要

吹き抜けが起きると、炉頂設備を破損させたり、熱損失の増大によって炉熱が低下したりするなどの重大なトラブルにつながる可能性がある。この吹き抜けの予兆現象として還元ガスの通気不良による圧力上昇があり、伊藤らは⁵⁾圧力などの監視データの大小を吹き抜け予測の判定基準としている。しかしながら、圧力上昇はさまざまな要因で起こるため、圧力上昇発生のみを「吹き抜けリスク」とみなすと過検出につながる。また、データ処

*1 技術開発本部 生産システム研究所 *2 技術開発本部 生産システム研究所 (現 技術開発本部 AI推進プロジェクト部)
*3 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 製銑開発部 *4 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 製銑部

理の観点からは、このような問題は時系列データの変化点検知問題と捉えることもできる。たとえば、データ通信量の変化をもとにインターネットウイルス感染を検知する技術⁶⁾があるが、吹き抜けは非定常状態の中で生じる事象であり、そもそも変動が大きい中での変化検知は容易ではない。しかし、実際の吹き抜け発生時のデータを詳細に調査することにより、圧力の上昇と同時に炉内温度やその空間的な分布も平常時から大きく異なる状態となることが分かった。

そこで、吹き抜けに先行して顕在化するこれらの異常状態に対し、圧力だけでなく多数の温度で表現した通気性指標を導入することによって吹き抜けリスクの指標化を図った。そして今回、この通気性指標が高い期間において圧力が急上昇したタイミングを「減風タイミング」として警報発令する吹き抜け予測システムを開発した。

このような吹き抜け前のデータ挙動から複数の特徴量を算出して吹き抜け発生を予測する方法は過去にも提案されている⁷⁾。しかし、複数の特徴量で予測するためにはそれに対応した複数のパラメータが必要となり、操業状態が変化するときにおおのこのパラメータを調整する必要性が生じる。人手による操業解析によってパラメータを調整することは、長期安定運用の阻害につながる。

そこで今回は、パラメータ調整方法を標準化することによって少ない労力で複数のパラメータを調整できるツールも併せて開発した。

2. 通気性指標の構成と計算方法

本章では吹き抜け予測システムの中核となる通気性指標を構成する特徴量とその計算方法について詳しく述べる。

2.1 通気性指標構成のための特徴量選定

前述したように、吹き抜け現象には圧力上昇に加えて炉内の温度分布も深く関与する。このため、通気性指標を構成する特徴量として以下に説明するSC₁～SC₈を設定した。後述するとおり、最終的にはこれらを組み合わせることによって通気性指標を導出した。

2.1.1 圧力変動

データ解析の結果、吹き抜け発生前には必ず圧力が激しく変動していた。その変動パターンには長時間にわたって継続するものと短時間に集中するものがあった。さらには変動が炉壁全域で発生することが分かった。そこで、これらタイムスコープの異なる現象を圧力計測値の複数の分散値を使って定量化し、それを組み合わせることで圧力変動を定量化した。具体的には、四つの高さ位置について、5分、60分、120分、240分の四つの時間区間、すなわち4高さ×4時間区間=16区間の中で変動が実績から調整した閾値(いきち)を超えた区間数に基づいて式(1)でスコアを計算する。

$$SC_1 = N \left(\sum_h f_1(P_{h,t}(t-5), P_{h,t}(t-60), P_{h,t}(t-120), P_{h,t}(t-240)) \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

SC₁ : 圧力の時間変動特徴量 (以後添え字違いはお

のおこの特徴量を示す

t : 時間 (分)

N : 入力値を0～1の指標値に変換する関数 (詳細は3章に記載)

f₁ : 閾値を超えた入力変数の項目数をカウントし、0項目と1項目は0点、2項目は1点、3項目は2点、4項目は3点とスコア化した値

h : 高炉の高さ (本特徴量では炉上部^{注1)} から炉下部まで四つの高さ)

p_{h,t}(t₁) : 高さhの全圧力の平均値の120分分散値のt₁～t間の時間平均値

2.1.2 周方向の温度分布の均一性

ガス流れが乱れた(偏流化した)場合、図1に、高炉のある断面での温度分布とその重心位置を星印で示した。温度分布が炉の断面内で不均一となり、特定の方向に高温域が広がる。そこで、周方向の温度分布を元に式(2)のように重心座標を計算し、その中心からのずれを通気性指標に取り入れる。このずれを複数の高さで計算したうえで0から1までの実数値に指標化し(指標化方法は後述)、各高さでの指標値の最大値を温度分布評価のスコアとした。

$$SC_2 = \max_h N(f_2(T_{h,d}, n_h, \theta_{h,d}))$$

$$f_2 = \frac{1}{n_h} \sqrt{\left(\sum_{d=1}^{n_h} T_{h,d} \cos \theta_{h,d} \right)^2 + \left(\sum_{d=1}^{n_h} T_{h,d} \sin \theta_{h,d} \right)^2} \dots (2)$$

ここで、

h : 高炉の高さ (本特徴量では上部の3種の高さ)

d : hの高さでの各センサの通し番号

T_{h,d} : 高さhのd番目の温度センサの計測値

n_h : 高さhでの温度センサの数

θ_{h,d} : 高さhにおいて1番目のセンサを基準としたときのd番目のセンサの角度

2.1.3 炉上部温度の均一性

吹き抜け発生前には炉上部の温度に比べて炉中部の温度が高くなるなど、高さ方向のステープ温度分布が大きく変化する傾向が見られる。このような現象を捉えるために式(3)のような特徴量を定義した。

$$SC_3 = N(T_{h1} - T_{h2}) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

h₁, h₂ : 高炉の高さ (本特徴量では炉上部の二つの高さ)

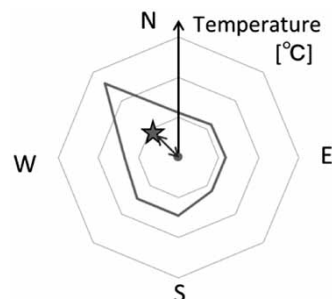


図1 温度の円周方向分布
Fig. 1 Temperature distribution in circumferential direction

脚注1) 本稿では高炉を鉛直方向に三つの部分に分け、上から順に炉上部、炉中部、炉下部として説明している。

T_h : 高さ h での全温度センサ計測値の平均値の
120分間の時間平均値

2.1.4 炉上部温度

吹き抜けの前には炉上部の温度が顕著に高くなる
が多く、炉上部温度が不均一になっていた場合は、さら
に吹き抜けの危険度が増していることが想定される。こ
のため、炉上部温度に加えて「炉上部温度の均一性」の
特徴量も加味した特徴量を定義する。

$$SC_4 = \frac{\sum_h N(T_h) + SC_3}{4} \dots\dots\dots (4)$$

ここで

h : 高炉の高さ (本特徴量では炉上部の3つの高さ)
 T_h : 高さ h の全温度センサの平均値の過去120分間
平均値

2.1.5 炉中部温度

これまでのスコア計算においては主に炉上部の計測温
度を利用した。しかし、炉況悪化時は炉中部の温度も通
常と比べ大きく上昇する傾向があることから、炉中部温
度の上昇を式 (5) で特徴量として捉える。

$$SC_5 = N\left(\max_{(h,d)} Z_{h,d}\right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

h : 高炉の高さ (本特徴量では炉中部の二つの高さ)
 d : h の高さでの各センサの通し番号

$$Z_{h,d} : T_{h,d} \text{ を正規化した温度, } Z_{h,d} = \frac{T_{h,d} - \mu}{\sigma}$$

μ : 一定期間の平均値, σ : 一定期間の標準偏差

2.1.6 鉛直方向の温度差

図2は、縦軸を高炉高さ、横軸を正規化温度として、
過去に発生した吹き抜け前の3時点での値をグラフにし
たものである。吹き抜けが近づくにつれて、高温部位と
低温部位との温度差が顕著になり、温度分布が通常時
から乖離 (かいり) していることが分かる。このときの分
布変化を式 (6) で捉えて特徴量とした。

$$SC_6 = N\left(\max_d \left(\max_h Z_{h,d} - \min_h Z_{h,d}\right)\right) \dots\dots\dots (6)$$

2.1.7 炉頂ガス温度

炉況悪化時には炉頂ガス温度が上昇するため、一定期
間の最大値を特徴量に活用している。

$$SC_7 = N\left(\max_t T_{top}\right) \dots\dots\dots (7)$$

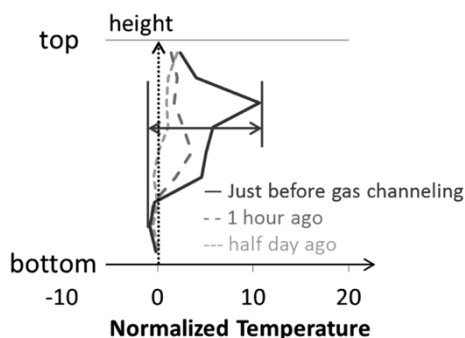


図2 吹き抜け前の温度の鉛直方向分布の実測例
Fig. 2 Temperature distribution along furnace axis just before
channeling

ここで、 T_{top} : 炉頂ガス温度

2.1.8 送風圧力

炉頂ガス温度と同様に送風圧力も同様の傾向があるた
め特徴量とした。

$$SC_8 = N\left(\max_t P_{bottom}\right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 P_{bottom} : 送風圧力

2.2 各特徴量の指標化方法

各特徴量を組み合わせるにあたり、特徴量の分布の中
央値からの乖離度合いを表現すべく指標化した。指標化
の方法を図3に示す。図3は、上図に収集したデータの
度数分布、中央図にその累積分布、下図にその分布から
定まるパラメータを用いた指標化関数を示している。図
3のように累積度数の50%値と α % 値を用いて下記
のように指標化を行う。

- 0 ~ 50% : 0 (通常状態とみなす)
- 50% ~ α % : 0 ~ 1 (乖離状態への過渡期とみなす)
- α % ~ 100% : 1 (乖離状態とみなす)

パラメータ α は3章で説明する方法にて決定する。

2.3 気性指標の定義と評価

当社は、各特徴量の組み合わせによって通気性指標を
定義し、3種類の指標候補 (SC_A , SC_B , SC_C) の中から最
良のものを選択するアプローチで開発を進めた。

第1候補の SC_A では、吹き抜け前に圧力変動が大きい
ことに着目して、式 (9) のように「圧力変動」(2.1.1項)
を通気性指標と定義した。

$$SC_A = SC_1 \dots\dots\dots (9)$$

第2候補の SC_B では、 SC_A では検知困難な吹き抜け前
に特徴的に観察される温度パターン (2.1.2項および2.1.3
項) の特徴量を考慮して式 (10) のように通気性指標を
定義した。

$$SC_B = \min(SC_1, SC_2, SC_3) \dots\dots\dots (10)$$

第3候補の SC_C は、 SC_A , SC_B の過検出が多いことを考
慮し、 SC_B が大きいときには判別指標 ($SC_4 \sim SC_8$) の成
立数も評価に加えて、式 (11) のように通気性指標を定
義した。

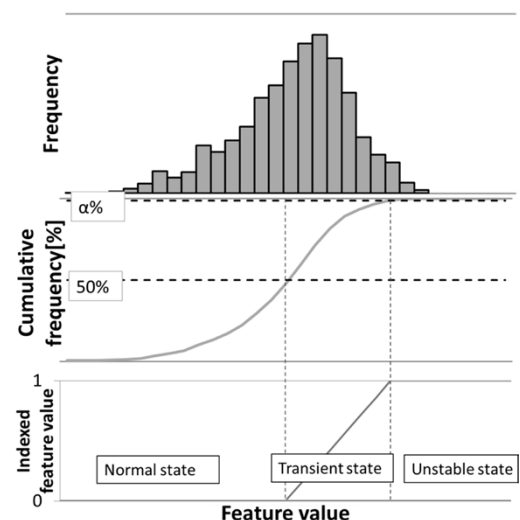


図3 特徴量の度数分布例とその指標化
Fig. 3 Conceptual representation of indexed feature value using
parameter α from cumulative frequency distribution

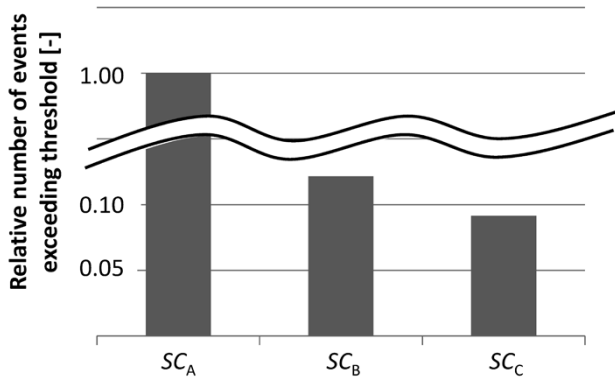


図4 通気性指標 SC_A , SC_B , および SC_C が閾値を超えた回数 (SC_A の回数を1とする)

Fig. 4 Relative number of times of SC_A , SC_B and SC_C beyond threshold (assume number of times of SC_A 1)

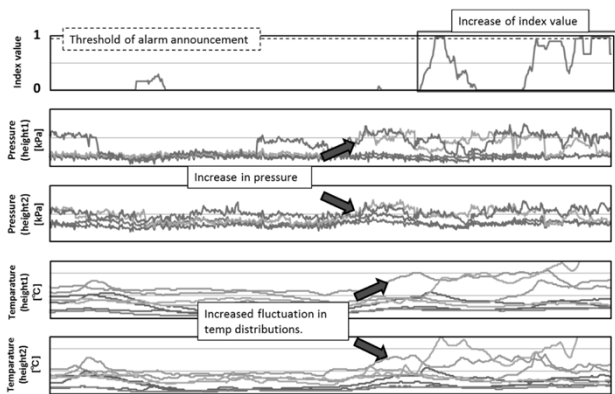


図5 炉況悪化時の指標値推移

Fig. 5 Transition of index value in deterioration of furnace conditions

$$SC_C = \begin{cases} SC_B & (SC_B < 0.8) \\ \frac{SC_B - 0.8}{2} + 0.8 & (SC_B \geq 0.8 \cap K < T_k) \\ 0.9 \sim 1 (K \text{で決定}) & (SC_B \geq 0.8 \cap K \geq T_k) \end{cases} \dots (11)$$

ここで、 K は $SC_4 \sim SC_8$ の成立数、 T_k はその閾値である。各スコアを指標化するためのパラメータを調整しているため、これらのパラメータは操業変化ごとに調整する必要はなく、あらかじめ固定値として与えておく。

3種類の通気性指標 SC_A , SC_B , SC_C の性能を1年間の実操業データで評価したところ、いずれの指標も全ての大規模吹き抜け^{注2)}を検知できることを確認した。そのうえで、図4に示すとおり閾値超えの回数は SC_C が最少となり、過検知を最も抑制できることが分かった。このことから、吹き抜けリスクを表す指標としては SC_C が最も適切なことが分かった。図5は通気性指標 (Index value) と高炉シャフト部の圧力と温度推移を表したチャート図である。圧力と温度は同じ高さに複数のセンサを配置しているため、チャート図でも複数の圧力と温度を一つのグラフに掲載した。図5より、圧力変動が増加して温度分布も崩れるにつれて、それを捉えて通気性指標が大きくなっていることが分かる。通気性指標の変化が圧力や温度の変化に比べて遅れているのは、通気性指標は圧力や温度の一時的な変動ではなく持続的な変動を検知しているためである。この通気性指標が増大する期間は、原料の質の悪化や残銹の上昇などが発生してお

り、炉況悪化を表現できていることも確認できた。

3. パラメータ調整手法

本章では、2.2節の指標化に用いたパラメータ α の調整手法について述べる。高炉で使用する原料の性状や焼成鉱の配合条件などが大幅に変化し、母集団であるデータセットおよびそこから求められる度数分布が大きく変化した場合については、適切にパラメータ調整を行うことが、炉況定量化の精度維持の観点から重要である。そこで、対象とする特徴量の度数分布を常時監視し、変化があればパラメータ α の調整を一律に実施することとした。パラメータは、吹き抜け発生を含む過去一定期間の事例を用いて分布計算したうえで、大規模吹き抜けを見逃さないよう、また過検出の最小化を実現するよう最適な値に調整する。

このパラメータ調整手法を図6に示したフローチャートのように標準化した。本繰り返し処理を自動的に行うツールを開発し、パラメータ調整を容易にした。

図7は二つの異なるデータセットから得られた度数

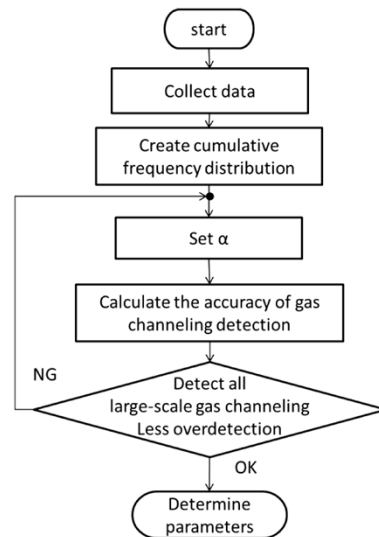


図6 パラメータ α の調整方法

Fig. 6 Adjustment method of parameter α

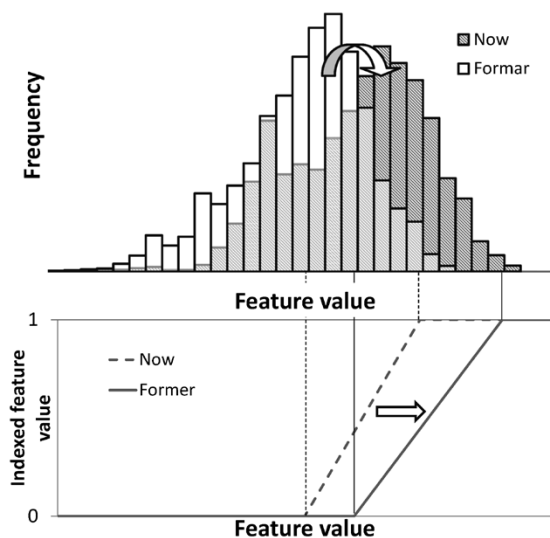


図7 特徴量の度数分布変化と指標化方法

Fig. 7 Change of frequency distribution of feature values and method of indexing

脚注2) 減風率30%以上の吹き抜けを大規模と定義した。

分布（上図）とパラメータ α を用いて決定した指標化関数（下図）を示している。図7のように、度数分布が変化したときは指標化関数が増加し、高炉操作条件の変化に合わせた通気性指標を計算することができる。

4. 吹き抜け予測システムの評価

開発した通気性指標とパラメータ調整手法をもとに、吹き抜け予測の標準を策定した。すなわち、吹き抜け予防アクションを行うにあたり、下記二つの条件（減風条件）が同時に満たされたときに減風を指示することとした。

- ①指標値が閾値を超える
- ②炉上部の最大圧力が閾値を超える

具体例として、過去に吹き抜けが起きたときの指標値と炉上部圧力の推移を図8に示す。吹き抜け前に減風条件に達しており、本技術を適用すれば事前に減風して吹き抜けを防止できたことが分かる。

本技術の精度評価として、パラメータ調整に用いてい

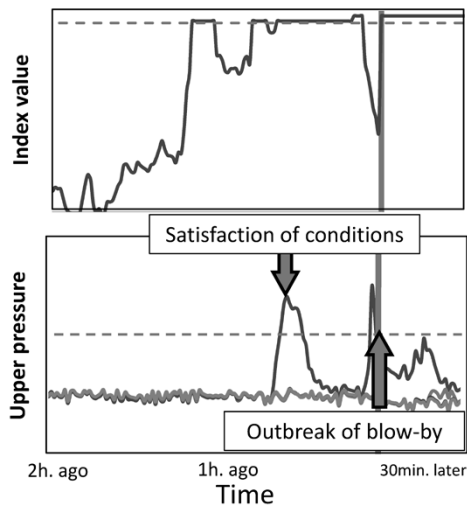


図8 吹き抜け前の通気性指標と圧力の推移

Fig. 8 Transition of index value and pressure before gas channeling

ない期間のデータを対象に、減風条件に達したときに過検出はないか、大規模吹き抜けの未検出はないか、という二つの観点で評価した。1年半のデータで減風条件に達したタイミングを調査すると、9割以上の事例で吹き抜けが発生していた。残る1割の事例でも吹き抜けは起きなかったものの、操業部門の評価にて吹き抜けが起きてもおかしくないほど炉況が悪い事例であり、過検出とはいえない事例であった。また、大規模吹き抜けについては全て事前に減風条件を満たしており、正しく予測できていることが分かった。

以上の精度評価を踏まえ、現在では実操業において本システムが活用され、減風タイミングの指示を行っている。

むすび = 高炉の異常状態である吹き抜けについて、背景事象である炉況悪化の定量化と炉内圧力によるタイミング検知による吹き抜け予測技術を開発した。

本手法により高い精度で吹き抜けの予測が可能となり、実機活用を進めている。また、他のプロセスにおいても、通気性悪化状態の推定は操業者に依存している部分が多いのが実情であり、本技術を適用することによって客観的な情報のみで異常状態を予測することが可能になると考えている。

参考文献

- 1) 加瀬正司ほか. 鉄と鋼. 1980, Vol.13, p.148.
- 2) 青木太一ほか. CAMP-ISIJ. 1991, Vol.4, p.1340.
- 3) 山本修一ほか. CAMP-ISIJ. 1996, Vol.9, p.904.
- 4) JFEスチール株式会社. 高炉の操業方法. 特開2017-128805. 2017-7-27.
- 5) 伊藤雅浩ほか. 計測自動制御学会産業論文集. 2009, Vol.8, No.10, p.82-89.
- 6) 山西健司. データマイニングによる異常検知. 共立出版, 2009, p.45.
- 7) 山本亮二ほか. 鉄と鋼. 1986, Vol.10, p.1545-1551.