

高炉操業データの3次元画像情報化と独立成分分析による操業監視

伊藤雅浩*・松崎眞六*・内田健康**・大貝晴俊***

Process Observation by 3-Dimensional Visualizing and Independent Component Analysis of Blast Furnace Process Data

Masahiro ITO*, Shinroku MATSUZAKI*, Kenko UCHIDA** and Harutoshi OGAI***

Abstract : In the pig-ironmaking process, factors that cause operation malfunctions have increased with both the enlargement of the blast furnace and the increasing use of low quality ore. Therefore, a development of systems for an operation support is demanded. Authors have developed the 3-Dimensional visualizing system of blast furnace process data working with the measuring instrument system network 1 sec cycle. In this paper, the technique of building the 3-Dimensional image is reported. And for the purpose of developing the on-line watching technique at the blast furnace operating condition, the new approach with Independent Component Analysis (ICA) for the image made of blast furnace process data is also reported. The effectiveness of this approach has confirmed with the real process data examination.

Key Words : 3-Dimensional, image, independent component, ICA, blast furnace

1. 緒言

鉄鋼業における高炉は、1970年代の解体調査で融着帯などの炉内構造が初めて確認され^[1]、その現象論的解明が大きく進展し、1980年代以降、炉内物理現象を記述する数学モデルの開発^[2-5]や統計学、知識工学の操炉システムへの応用^[6]などによって定量的な炉内解析技術や省力化を実現する操業技術が確立されてきた。

しかし、近年、生産性向上を目的とした炉容積の拡大や銅ステープの採用、低Si・低還元材比・低コークス比・高出鉄比の操業指向のもと、良質なヘマタイト鉱石の枯渇化による劣質原料の多量使用など、原燃料環境が大きく変化し、操業不調の発現要因が増加している。

高生産性と前記操業指向の両立には、熱的に限界ともいえる条件での安定操業の継続が不可欠であり、不安定な操業要因、すなわち非常操業におけるプロセス挙動の把握と解明が一段と重要になっている。

高炉には、温度、圧力、ガス組成など各種検出端が多数設置され、長期間の連続計測が可能となっており、これまでも計測データから溶銑温度の急激な低下、炉頂ガス成分の変動、スリップ、ドロップ、棚つりなどの装入物の降下異常、シャフト圧力変動、ガス抜け、吹き抜けなどのガス流れ異常など炉況異常に関する多くの解析が行われ、その予測技術が研究されてきた^[7-10]。

しかしながら、近年の炉容積の拡大に伴う炉体プロフィールの変化（大型化や炉腹部の拡大）は、炉内現象の分布特性の偏在化要因となり、その結果、不安定な操業要因は、炉半径方向、炉高方向、炉周方向の局所領域で発生するため、2次元の或いは3次元的な計測データの収集と解析が重要となっている。

多数の計測データの時系列チャートを空間的、時間的に総合的に判断して行なう非常挙動の把握や予測は現場オペレータの経験と技量に負うところが大きい。

そこで著者らは高炉計測データの空間的、時間的可視化をオンラインで実現しオペレータを支援する画像情報化システムを開発し、現場適用を進めてきた^[11,12]。

本システムの視点は、高炉を、空間的分布特性を有する分布定数系のプロセスとしてあらためて捉えなおし、客観的な画像情報によって、その非常挙動を定量化し、共有化する点にある。

まず、システム開発の第1ステップとして、オペレータの親和性を優先し、炉体計装図と直接対応が取れる炉高・炉周方向の2次元展開画像情報化システムを開発した（プロコン分周期同期版）。

そして、今回、システム開発の第2ステップとして、高炉計測データの多元的可視化による相互関連性や炉体部位との関連性の更なる把握を目的に、また炉内ガス流れや還元反応が時々刻々変化する状況下で異常が発生したときの操炉即応性の向上を図るべく、計装秒周期に同期して動作する炉高・炉周・炉半径方向の3次元画像情報化システムを開発し、実機にオンライン適用した。

本報では、高炉操業データの3次元画像情報化方法と画像情報の空間的特徴を独立成分分析で抽出することによる操業監視方法について報告する。

* 新日本製鐵(株) 技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター
千葉県富津市新富 20-1

** 早稲田大学 先進理工学部 東京都新宿区大久保 3-4-1

*** 早稲田大学 大学院 情報生産システム研究科
福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

* Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Co. Ltd.,
20-1, Shintomi, Futtsu-city, Chiba, Japan.

** School of Advanced Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1, Okubo, Shinjyu-ku, Tokyo, Japan.

*** Graduate School of Information, Production and Systems engineering,
Waseda University, 2-7, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyusyu-city,
Fukuoka, Japan.

(Received March 17, 2009)

2. 高炉操作データの3次元画像情報化

高炉には、操業監視および設備管理の目的で、炉体温度計、炉内圧力計、炉頂ガス成分計など、多種の計測器が多数配設される。

たとえば、炉体温度計には、ステープ温度計、炉床壁温度計、炉底面温度計などがあり、炉体全体の温度分布を把握すべく約350点が配設される。

炉内圧力計は、シャフト部に炉周角度で90°]または45°]毎、炉高方向に複数水準配設され、炉頂圧力計、送風圧力計と共に監視される。

従来、高炉ではおのおのの計測器の計測データを時系列チャートやレーダーチャートなどのグラフ形態で操業監視画面などに出力して操業状態を監視していた。

この場合、計測データの空間的分布特性の時系列変化を評価するには、多数の計測器の中から適切な計測器を選択して複数のチャートを出力させ、オペレータが頭のなかで個々にイメージする評価となり、オペレータに依存し、またオペレータ間および技術スタッフ間で評価結果を正確に共有することも困難であった。

上記課題の解決方法の一つとして、各計測器の位置情報を正確に考慮し計測データの空間的分布特性を画像情報化するシステムを開発してきた。

2.1 計測値の空間的補間手法と等値線探索手法

炉体上に配設される計測器は、冷却経路や構造部材の存在などの制約から必ずしも空間的に均等に配設されない。そこで、計測器が設置されていない領域の値の推定に以下の空間的補間計算を実施し、計算結果に基づいて3次元空間上の等値線を探索する。

Fig.1を用いて、その手法の考え方を説明する。

炉体は炉口部(Throat)、炉胸部(Shaft)、炉腹部(Belly)、朝顔部(Bosh)、炉床部(Hearth)で構成される。

Fig.1の領域Aには、炉胸部を構成するステープに配設された温度計を例に、その位置を●で示している。

炉体にステープ温度計の配設密度より密で炉体温度分布の評価に必要な空間分解能の仮想グリッドを設定し、仮想格子点の温度をステープ温度計の計測値で空間的に補間し算出する。Fig.1に○で仮想格子点を示す。

領域A内の仮想格子点pの3次元座標 (θ_p, r_p, h_p) は既知であり、この座標情報を用いた3次元ユークリッド距離計算に従い、仮想格子点pを取り囲む形で周囲に隣接する4つのステープ温度計a, b, c, dを選択する。

おのおののステープ温度計の温度と座標 $T_a(\theta_a, r_a, h_a)$, $T_b(\theta_b, r_b, h_b)$, $T_c(\theta_c, r_c, h_c)$, $T_d(\theta_d, r_d, h_d)$ は既知である。

このとき、未知なる仮想格子点pでの温度 T_p は、上記4温度計の位置を炉周 $(r \cdot \theta)$ ・炉高 (h) 方向の2次元平面に射影することによって、線形補間式、すなわち、以下の(2)式を代入した(1)式で計算できる。

具体的には、線形補間の第1段階として、(2)式で直線ab上でx座標が $r_p \cdot \theta_p$ である点m1の温度 T_{m1} とy座標 h_{m1} 、および直線cd上でx座標が $r_p \cdot \theta_p$ である点m2の温度 T_{m2} とy座標 h_{m2} を計算する。

つぎに、線形補間の第2段階として、(1)式で直線m1-m2上でy座標が h_p である点pの温度 T_p を計算する。

この計算をすべての仮想格子点で実施することにより、温度計の位置情報を正確に考慮した形で炉体上の温度の空間的分布の計算が完了する。

つぎに、値の定まった仮想格子点に基づく等値線の探索手法を説明する。

Fig.1の領域Bには、4つの仮想格子点A, B, C, Dがあり、おのおのの温度が T_A, T_B, T_C, T_D である。

仮想グリッドの四角形要素ABCDの対角線交点(Fig.1中□)をQとし、点Qでの温度 T_Q を4頂点温度の相加平均、すなわち(3)式で計算する。

$$T_p = T_{m2} + \frac{h_p - h_{m2}}{h_{m1} - h_{m2}} \cdot (T_{m1} - T_{m2}) \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_{m1} = T_a + \frac{r_p \cdot \theta_p - r_a \cdot \theta_a}{r_b \cdot \theta_b - r_a \cdot \theta_a} \cdot (T_b - T_a) \\ T_{m2} = T_d + \frac{r_p \cdot \theta_p - r_d \cdot \theta_d}{r_c \cdot \theta_c - r_d \cdot \theta_d} \cdot (T_c - T_d) \\ h_{m1} = h_a + \frac{r_p \cdot \theta_p - r_a \cdot \theta_a}{r_b \cdot \theta_b - r_a \cdot \theta_a} \cdot (h_b - h_a) \\ h_{m2} = h_d + \frac{r_p \cdot \theta_p - r_d \cdot \theta_d}{r_c \cdot \theta_c - r_d \cdot \theta_d} \cdot (h_c - h_d) \end{cases} \quad (2)$$

$$T_Q = \frac{1}{4} \cdot (T_A + T_B + T_C + T_D) \quad (3)$$

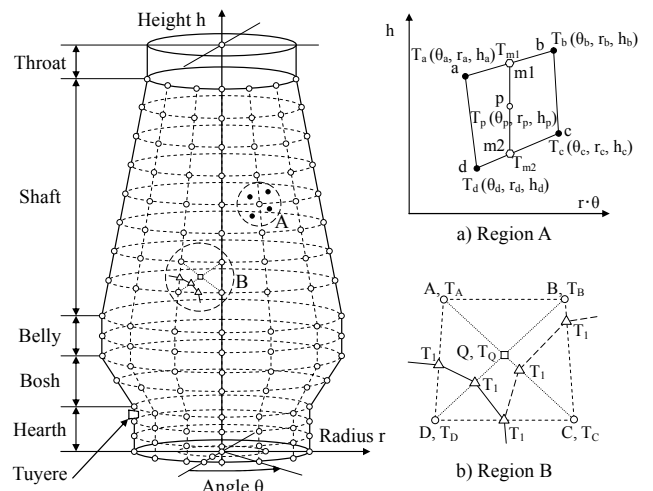


Fig.1 Concept of deciding a measuring data contour line on blast furnace.

このとき、仮想グリッドの四角形要素ABCDが、内角の1つが 180° を超えない四角形要素であれば、四角形要素ABCD内部を、対角線交点Qを頂点に持つ4つの三角形要素(ABQ, BCQ, CDQ, DAQ)に分割できる。

領域Bで、各三角形要素内の温度は辺端の値の線形補間で決定されると仮定する。今、探索したい等値線の温度を T_1 とし、四角形要素の4頂点の温度に対して $T_D < T_1 < T_C$:①, $T_D < T_1 < T_A$:②である場合、 T_1 の値をとる地点は必ず辺DC上、辺DA上に存在する。

三角形要素DQC内の温度の連続性から T_1 の値をとる地点は、辺DQ上、或いは辺QC上のどちらかに、両端の温度の値を線形補間した温度地点として存在する。

【ケース1】仮に $T_D < T_1 < T_C$:③とすると、辺DQ上に T_1 の値をとる地点が存在し、△印で示す。つぎに条件②より、必ず辺DA上に T_1 の値をとる地点が存在し、△印で示す。最後に得られた△印を実線で結ぶと四角形要素ABCD内の温度 T_1 の等値線が探索できる。

【ケース2】また、条件③の他の可能性条件である、 $T_Q < T_1 < T_C$:④の場合は、 $T_B < T_1 < T_C$:⑤を例にとれば、必ず辺QC上および辺BC上に T_1 の値をとる地点が△印に存在し、これらを結ぶ等値線を破線で示す。

四角形要素ABCDに対して他の温度条件の組み合わせもあるが処理過程は上記と同様である。

上記処理を、仮想グリッドを構成するすべての四角形要素に実施する。

上記手順で等値線を探索すれば、ステープ温度計が空間的に不均等に配設される場合でも、仮想グリッドに内角の1つが 180° を超えない四角形要素を構成しておけば、四角形要素内の局所的な分布特性を対角線交点に反映させた形で等値線を探索することができる。

最終的に三角形要素を用いるので、等値線が互いに交わったり、途中で途切れたりする問題が発生しない。

また、等値線を構成する座標の計算も簡単な代数計算(辺端の値を用いた辺上の線形内挿補間計算)で一意的に決定でき、高速な等値線探索処理が可能となる。

2.2 3次元画像情報化手法

値の定まった全三角形要素の座標情報を用いて炉体温度分布の3次元画像を作成する。

作成にはポリゴンモデル(一つの面を三角形、四角形といった多角形の集合で表現するモデリング法)や陰面処理(視線の手前にある物体で隠される物体や面を検出して描画しない処理)などの処理が必要である。

近年は、OpenGL^{脚注1}をはじめとする3次元グラフィック処理用のプログラミング・インターフェースや高性能な画像処理チップ(GPU: Graphics Processing Unit)が汎用化し、今回、3次元グラフィック処理にはこれ

らを活用した。ポリゴンには前記三角形要素を用いた。

その結果、中央処理装置(CPU: Central Processing Unit)の負荷が減り、汎用PCで高度な画像処理が高速で可能となり、計測データの収集から仮想格子点の値の更新、等値線の探索、3次元画像の作成と画面更新に至るまでの一連の処理を、後述の2次加工値のリアルタイム計算を含め、計装周期の1秒周期内で安定的に完了させることを実現した(従来手法では1分周期)。

2.3 羽口先圧力の推定

炉内通気性の監視には、前述のシャフト圧力計、送風圧計、炉頂圧計の値のほかに炉下部炉周上に配置される約40の羽口(Tuyere)先での圧力の値が重要である。

ただし、羽口先圧力 $P_{OT,i}$ は実測できないため、各羽口支管における圧力損失 $\Delta P_{L,i}$ を計算し、送風圧 P_B の値から推定する。羽口支管における圧力損失 $\Delta P_{L,i}$ には、

a)運動エネルギーの散逸による圧力損失 $\Delta P_{k,i}$

b)管壁の摩擦抵抗による圧力損失 $\Delta P_{f,i}$

c)微粉炭吹き込みによる圧力損失 $\Delta P_{pc,i}$

を考える(添え字*i*は、羽口番号を示す)。

$$\Delta P_{L,i} = P_B - P_{OT,i} = \Delta P_{k,i} + \Delta P_{f,i} + \Delta P_{pc,i} \quad (4)$$

各羽口支管内を通過する熱風の流速は支管長に対し十分速いので、熱風環状管から各羽口先までの熱風の流れを、圧縮性を有する1次元定常流れと仮定する。

a)の圧力損失 $\Delta P_{k,i}$ は、理想気体の断熱変化の仮定のもとで力学的エネルギーの保存則^[13]から計算する。

b)の圧力損失 $\Delta P_{f,i}$ は、各羽口支管(円管)を直管部と曲管部に分割し、それぞれの管摩擦抵抗を計算して、その総和で計算する。直管部の摩擦係数 λ はフロムムの式^[14]で、曲管部の損失係数 ξ はKirchbachらの値^[15,16]をモデル化して与える。

c)の圧力損失 $\Delta P_{pc,i}$ は、別途算出した微粉炭吹き込み前後の実測値に基づくモデルで与える。

2.4 計測値の2次加工値の3次元画像情報化

ステープ温度やシャフト圧力など計測値だけでなく、これらの時間変化率や空間変化率などの2次加工値をリアルタイムで計算し3次元画像情報化して監視する。

ステープ温度の時間変化率の画像情報やシャフト圧力の空間変化率ベクトル線図は、炉壁付着物の生成・脱落や融着帯根部の炉壁近傍ガス流れ状態と関連がある。

なお、シャフト圧力の空間変化率ベクトルは各仮想格子点で炉周($r \cdot \theta$)接線方向・炉高(h)接線方向についてシャフト圧力の空間変化率成分を計算し、この2成分からなるベクトルを定義する。このとき、シャフト圧力の空間変化率ベクトルの大きさは、従来の通気性指標 $\Delta P/L$ [Pa/m]を空間的に拡張した量に相当する。

脚注¹ OpenGL は、Silicon Graphics Inc.の登録商標。

2.5 実施例

Fig.2に高炉操作データの3次元画像情報化の実施例を示す。3次元化は視点および消失点座標を設定した透視投影法による。Fig.2は新日本製鐵(株)大分製鐵所第2高炉でデータ日時は2005年1月1日0時0分である。

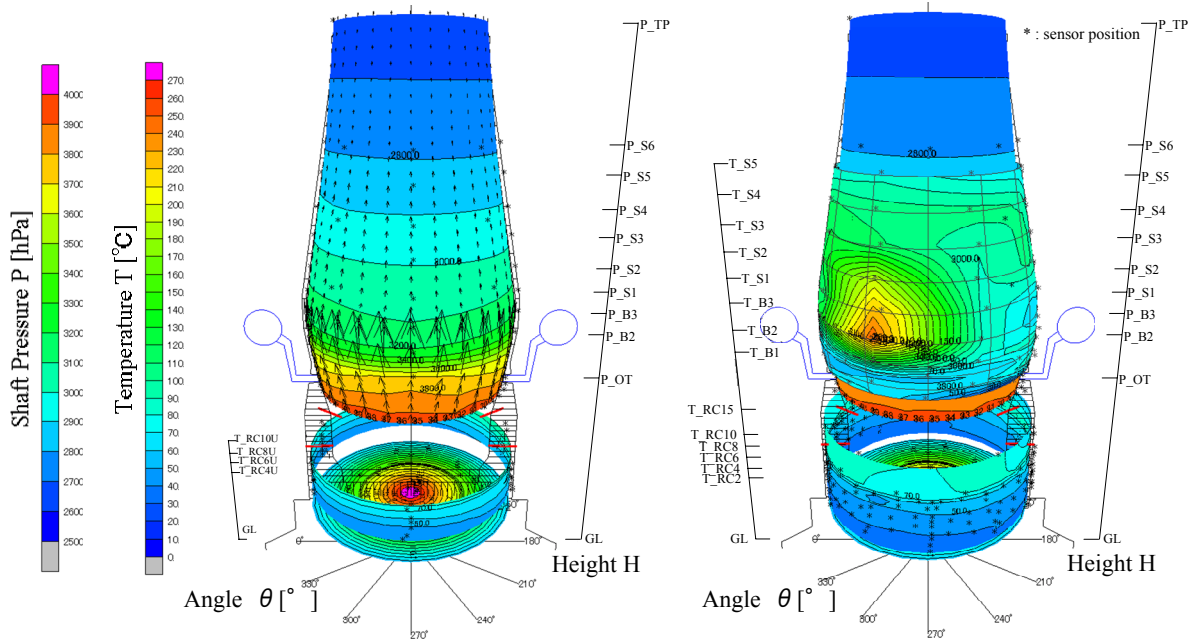
Fig.2のa)では、炉体にシャフト圧力の空間変化率ベクトル線図を重ねたシャフト圧力分布を、炉下部に炉床壁温度(内側)分布、炉底温度分布を表示している。

Fig.2のb)では、炉体にステープ温度分布を重ねたシャフト圧力分布、炉下部に炉床壁温度(外側)分布、炉底温度分布を表示している。

3次元画像情報化により、炉下部の3次元湯流れに起因する炉床壁・炉底の偏温度分布の関連付けや、炉体の偏圧力分布・偏温度分布と朝顔、炉腹などの形状プロフィールとの関連付けが容易となり、立体的な視点での炉内状況の監視が可能となった。

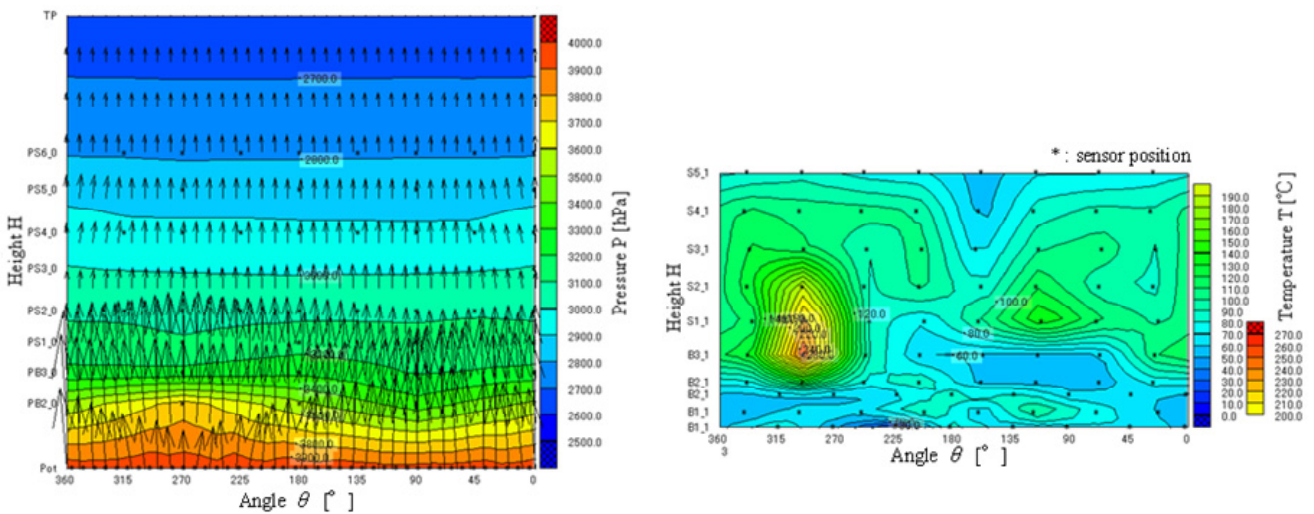
なお、Fig.3はFig.2と同時刻の炉体外形面上のシャフト圧力分布とステープ温度分布を炉周角度(θ)・炉高(H)方向の2次元平面に展開して表示したものである。

3次元画像情報では視点と反対側の情報が隠れてしまうデメリットがあり、実際の運用では全体を一望できる2次元画像情報も併用して操業監視している。



a) Shaft pressure, hearth wall (inside) and hearth temperature b) Shaft pressure, stave, hearth wall (outside) and hearth temperature

Fig.2 3-Dimensional image of blast furnace process data (#2BF Oita works, NSC).



a) Shaft pressure

b) Stave temperature

Fig.3 2-Dimensional image of blast furnace process data (#2BF Oita works, NSC).

3. 独立成分分析による操業監視

高炉操業データの画像情報化システムは社内全高炉の操業現場に設置された。その定着に伴い、つぎなる開発ステップとして画像特性の定量化によるオンライン操業監視技術の開発が求められている。

そこで、近年、音声・画像処理などの分野で注目されている独立成分分析（ICA：Independent Component Analysis）を高炉操業データ画像に適用し、独立成分信号の時系列推移を評価する操業監視法を検討した。

3.1 独立成分分析

独立成分分析とは、Jutten & Herault (1991) [17]に端を発するブライント信号分離（BBS：Blind Source Separation）と呼ばれるデータ解析/信号処理手法であり、Comon (1994) [18]により命名されたとされる。

その特徴は、原信号の独立性を仮定するだけでそれ以外の信号伝送路の伝達特性などの情報は未知（Blind）とすることにあり、その典型的な応用例として、

- 1) 複数話者の音声信号の分離
- 2) 信号処理・画像処理における加法的な雑音の除去
- 3) 通信分野における混線信号（crosstalk）の分離
- 4) 多点計測されたレーダ・ソナー信号の前処理
- 5) 生体計測信号の解析（脳磁図MEGなど）

などがある[19]。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_{11} \cdot s_1(t) + a_{12} \cdot s_2(t) \\ x_2(t) &= a_{21} \cdot s_1(t) + a_{22} \cdot s_2(t) \\ &\dots \\ x_m(t) &= a_{m1} \cdot s_1(t) + a_{m2} \cdot s_2(t) \end{aligned}$$

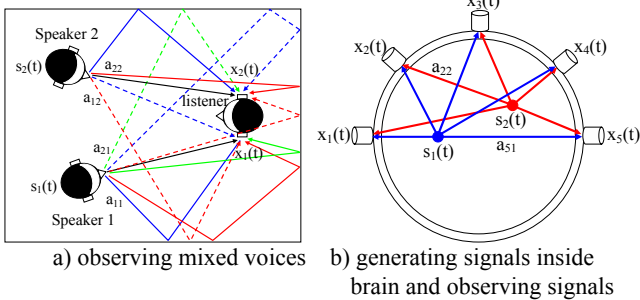


Fig.4 Typical applied example of ICA. [19]

Fig.4で $s_1(t), s_2(t)$ が原信号であり、 $x_1(t), x_2(t), \dots$ が観測信号である。それぞれをベクトル表示して、 $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))^T$ 、 $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T$ とし、 a_{ij} を (i, j) 成分とする m 行 n 列の行列を混合行列 \mathbf{A} と定義して、これらの関係を次式で記述する。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) \quad (5)$$

独立成分分析とは、複数の信号源が互いに統計的に独立な信号を発生すると仮定し、これらが線形に混合した信号が複数のセンサで観測されるとき、 m 個の観測信号 $\mathbf{x}(t)$ から n 個の原信号 $\mathbf{s}(t)$ を復元することである（ただし、 $n \leq m$ ）。

3.2 独立成分分析の定式化と分析手法

独立成分分析には様々な手法が提案されている[20,21]。

本報では、信号の統計的独立性指標に4次キュムラントを使い、独立成分の導出に不動点法を用いたHyvärinenらのFastICAと呼ばれる手法[22]を採用した。

3.2.1 問題設定

(5)式で混合行列 $\mathbf{A} \in \mathcal{R}^{m \times n}$ は未知のフルランク行列で、観測信号ベクトル $\mathbf{x}(t)$ のサンプル数を k として観測信号行列 $\mathbf{X} \in \mathcal{R}^{m \times k}$ を定義すると、(5)式および未知の独立成分信号行列 \mathbf{S} は、以下で表現できる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S} \quad (6)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(1) \ \mathbf{x}(2) \ \dots \ \mathbf{x}(k)] \in \mathcal{R}^{m \times k} \quad (7)$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}(1) \ \mathbf{s}(2) \ \dots \ \mathbf{s}(k)] \in \mathcal{R}^{n \times k} \quad (8)$$

独立成分分析とは、独立成分および混合行列に関する知識を一切利用せず、観測信号行列 \mathbf{X} から独立成分信号行列 \mathbf{S} 、混合行列 \mathbf{A} を推定する手法であるが、推定される独立成分信号行列 \mathbf{S} の大きさと符号、行列を構成する成分の順序には任意性が残る。実際には、観測信号行列 \mathbf{X} のみから、ある行列 $\mathbf{W} \in \mathcal{R}^{n \times m}$ を用いて、

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} \quad (9)$$

で計算される復元信号行列 \mathbf{Y} の各成分が互いに統計的に独立となる \mathbf{W} （復元行列）を求めることになる。

理想的には $\mathbf{W} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{I}$ であれば、 $\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}$ 、 $\mathbf{S} = \mathbf{Y}$ と一意に決定できるが、手法としては上記任意性が残る。

3.2.2 前処理（無相関化）

問題を単純化する工夫として観測信号の無相関化と低次元化が提案されている。これらを同時に行なう統計的手法に主成分分析があり前処理として利用される。

変換行列 \mathbf{M} を用いて観測信号 x_i の無相関化と低次元化を行なう場合、 $\mathbf{B} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}$ として次式を得る。

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{s} \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{s} の成分信号 s_i は独立変数であり、変換後の変数 \tilde{x}_i は無相関であることから、

$$E[\tilde{\mathbf{x}} \cdot \tilde{\mathbf{x}}^T] = \mathbf{B} \cdot E[\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^T] \cdot \mathbf{B}^T = \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}^T = \mathbf{I} \quad (11)$$

となり、 $\mathbf{B} \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は直交行列である。

独立成分分析は、任意のフルランク行列 \mathbf{A} を推定する問題から、直交行列 \mathbf{B} を推定する問題に変換される。

3.2.3 独立成分の導出

信号の独立性を4次キュムラント（尖度, kurtosis）,

$$\text{kurt}\{y_i\} = E[y_i^4] - 3 \cdot E[y_i^2]^2 \quad (12)$$

で評価する。尖度が0であれば、その信号は正規分布であり、尖度を0から離していく、つまり尖度を最大もしくは最小にするような復元行列 \mathbf{W} を求めれば、復元信号行列 \mathbf{Y} の各成分は互いに独立となる。

FastICAは、復元行列 \mathbf{W} の n 個の成分ベクトル \mathbf{w} を不動点法により一つずつ収束計算で求めて \mathbf{B} を得る。

3.3 画像情報化した高炉操作データの基底画像

新日本製鐵(株)君津製鉄所第4高炉のシャフト圧力およびステープリブ温度の炉周角度(θ)・炉高(H)方向の2次元展開画像に独立成分分析を実施した。

データ期間は、2004年8月1日0時0分から2005年7月31日23時55分の1年間、サンプリング周期5分で画像数はおのおの105,120 ($=k$) である。個々の画像に14×14の等間隔格子を設定して値を切出し (Fig.5), 番号順に並び替えて196 ($=m$) 次元の観測信号ベクトル $\mathbf{x}(t)$ とし、観測信号行列 $\mathbf{X} \in \mathcal{R}^{m \times k}$ とする。

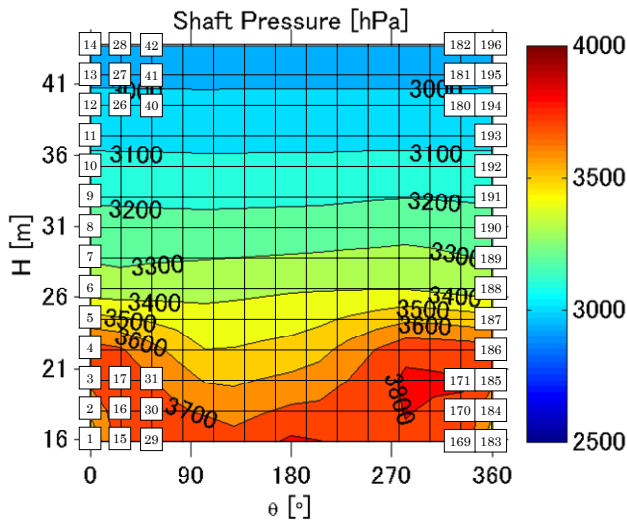


Fig.5 Mesh and element number of vector $\mathbf{x}(t)$ on image.

シャフト圧力およびステープリブ温度の各観測信号行列 \mathbf{X} に独立成分分析を実施し復元行列 \mathbf{W} を求める。

簡単のため、混合行列 $\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}$ 、独立成分信号 $\mathbf{S} = \mathbf{Y}$ とすると、(6)式から個々の画像は、混合行列 \mathbf{A} と独立成分信号 \mathbf{S} の線形結合で構成される。 \mathbf{S} の成分信号 s_i に対応する \mathbf{A} の列成分係数をFig.5の格子位置に再配置すると対応する基底画像 A_i が得られる。

Fig.6中の画像は、上から順にシャフト圧力の基底画像 A_1 から A_5 、続けてステープリブ温度の基底画像 A_1 から A_3 であり、各画像の等値線から以下と解釈できる。

1) シャフト圧力

- 基底画像 A_1 : 炉内通気特性のベース画像
- 基底画像 A_2 : 羽口上の朝顔部ガス流れ成分の画像
- 基底画像 A_3 : 100°]付近のガス偏流成分の画像
- 基底画像 A_4 : 0°]付近のガス偏流成分の画像
- 基底画像 A_5 : 300°]付近のガス偏流成分の画像

2) ステープリブ温度

- 基底画像 A_1 : 炉高位部の高温帯成分の画像
- 基底画像 A_2 : 炉中位部の高温帯成分の画像
- 基底画像 A_3 : 炉中位部の偏温度成分の画像

なお、独立成分数 n は、前処理の主成分分析で得られる固有値の値を参考にし、基底画像の物理的解釈が可能となる数とした (シャフト圧力 $n = 5$; ステープリブ温度 $n = 3$) 。

3.4 独立成分信号の時系列推移による操業監視

独立成分信号 $s_i(t)$ は対応する基底画像 A_i の時々刻々の強度を表す。操業不調回避のため実施した減風アクション前後の独立成分信号 $s_i(t)$ の推移例をFig.6に示す。

Fig.6は、通常の操業監視において、炉中位部の差圧が高めに推移し、その後スリップが3回発生したため、9月30日9時20分に減風を実施 (Fig.6中のA) した例である。なお、鉄鉱石の炉内滞留時間約10時間を踏まえ、減風48時間前の時刻に目安となる破線を付加している。

独立成分信号の時系列推移による操業監視の観点からFig.6を分析すると、減風約30時間前の29日3時頃、シャフト圧力の基底画像 A_1, A_3 およびステープリブ温度の基底画像 A_2, A_3 に対応する独立成分信号 $s_i(t)$ が大きく変化している (それぞれFig.6中の B_4, B_3, B_2, B_1) 。

これらの独立成分信号 $s_i(t)$ の変化から、減風に至るまでの過程として以下の炉内状況の推移が推定できる。

まず、炉中位部におけるステープリブ温度の偏温度成分の基底画像 A_3 の独立成分信号が小さくなり (B_1)、つぎに炉中位部におけるステープリブ温度の高温帯成分の独立成分信号が大きくなっている (B_2) 。

これは炉中位部の偏温度分布の要因となった炉壁付着物が脱落して一時的に均温度化し (独立成分信号の符号と絶対値に注意)、その結果、炉壁近傍の通気性が一時的に改善され、炉中位部高温帯の温度レベルが上昇したことを示している。

その後、炉周角度100°]付近のガス偏流成分の基底画像 A_3 の独立成分信号が急減し (B_3)、炉内通気特性のベース画像 A_1 の独立成分信号が増大している (B_4) 。

すなわち、炉中位部高温帯の温度レベルの上昇により炉内粒子の充填構造が変化し、炉周角度100°]付近でスリップの原因となる炉中位部の差圧変動が発現し、最終的に炉体通気性が悪化したため減風が実施された。

従来からの操業指標である差圧 ΔP (=送風圧 P_B - 炉頂圧 P_{Tp}) の変動も確認できるが (Fig.6中のD)、その変化幅は小さく、また差圧 ΔP は炉体の通気性に対して全体的な指標を示すに過ぎないため、炉内状況に関する情報が少ない。

その点、上記のように独立成分信号 $s_i(t)$ の時系列推移は変動する分布基底を明示し、その変動を抽出して数値化しており、操業監視に有効と考えられる。

このとき、マクロな監視指標として、独立成分信号のユークリッドノルム $\|\mathbf{s}(t)\|_2$ も大きく変動する (C_1, C_2) 。

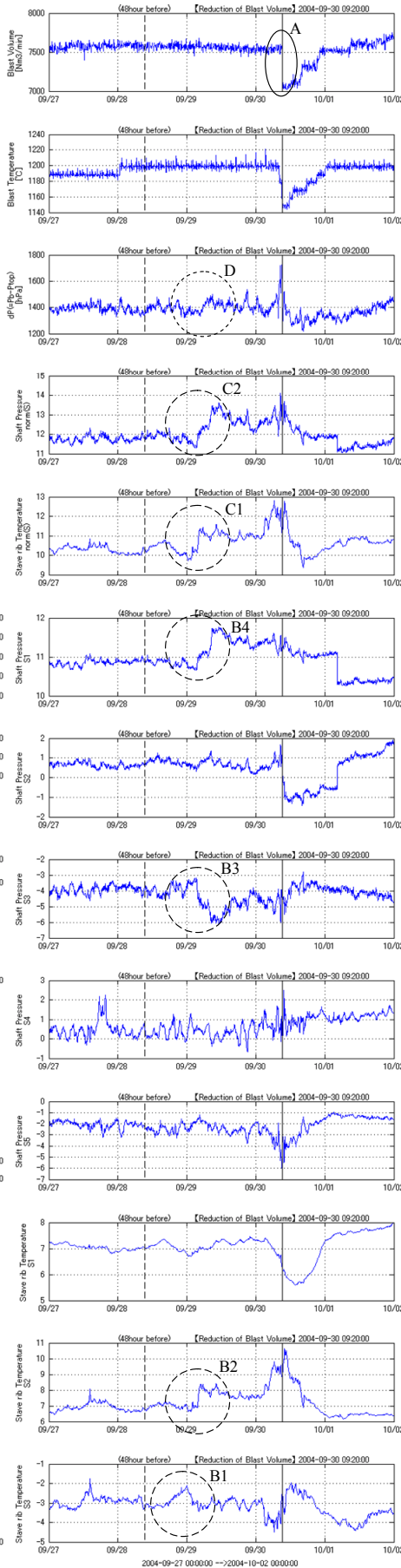


Fig.6 Results of ICA for shaft pressure and stove rib temperature image.

したがって、たとえば、まずマクロな監視指標として、独立成分信号のユークリッドノルム $\|\mathbf{s}(t)\|_2$ を監視しておき、 $\|\mathbf{s}(t)\|_2$ の変動を確認した後、個々の基底画像 A_i に対応する独立成分信号 $s_i(t)$ の推移を分析することで、最終的な炉体通気性悪化に至る以前の早い段階から操業不調要因の発現過程を顕在化させ、操業監視に活用できると考えられる。

3.5 独立成分信号の類似性に基づく類似画像検索

つぎに、独立成分信号ベクトル $\mathbf{s}(t)$ の類似性に基づく類似画像検索の可能性を検討した。

2005年7月31日23:55のシャフト圧力画像と類似の画像を独立成分信号ベクトルのユークリッドノルム $\|\mathbf{s} - \mathbf{s}^*\|_2$ が小さい画像として前記データ期間1年分の画像から検索した結果をTable.1およびFig.7に示す。

Fig.7は、左上の目標画像（2005年7月31日23:55）に対し、 $\|\mathbf{s} - \mathbf{s}^*\|_2$ が最も小さい画像（2005年7月2日02:25）を類似画像の第1候補として右上に、2番目に小さい画像（2005年7月1日05:35）を第2候補として左下に、3番目に小さい画像（2005年7月2日02:30）を第3候補として右下に示している。

検索画像は目標画像のシャフト圧力分布画像とよく類似しており、独立成分信号の類似性に基づく類似画像検索と当該日時の特定が可能であることが分かった。

Table.1 Searching result of similar shaft pressure image.

Image	Target	Similar #1	Similar #2	Similar #3
Date	2005-07-31	2005-07-02	2005-07-01	2005-07-02
Time	23:55	02:25	05:35	02:30
S1	11.6520	11.5993	11.5561	11.6068
S2	1.2328	1.1335	1.2078	1.2065
S3	-2.9165	-2.9838	-2.8203	-3.0232
S4	0.2084	0.1724	0.0727	0.0344
S5	-4.3874	-4.4537	-4.4039	-4.3522
$\ \mathbf{S} - \mathbf{S}^*\ _2$	0.0000	0.1512	0.1943	0.2136

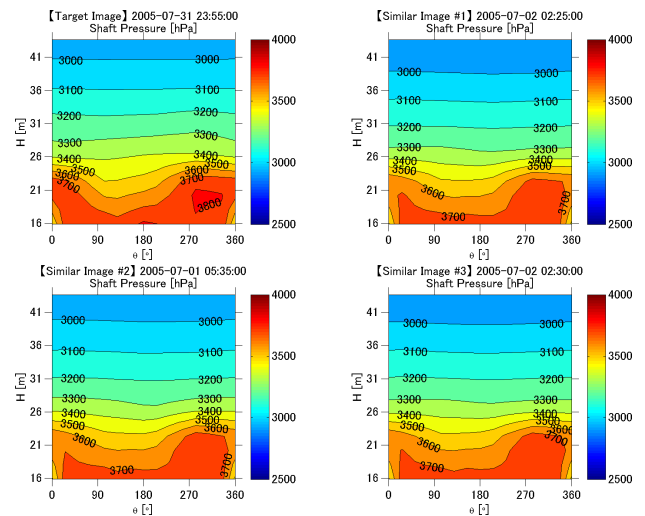


Fig.7 Target and similar image of shaft pressure.

4. 結言

本報では、高炉操業データの3次元画像情報化システムにおける画像情報化方法について報告した。

開発した計装秒周期版3次元画像情報化システムは、新日本製鐵(株)名古屋製鉄所第1高炉で2007年4月に稼動し、従来の2次元プロコン分周期版では把握できなかった炉内変動のリアルタイム可視化を実現している。

また、画像特性の定量化によるオンライン操業監視の実現に向け、独立成分分析による方法を実操業データで検討した。その結果、独立成分分析で高炉操業データ画像に潜在化している特徴的な画像成分(基底画像)が抽出できることを確認し、更に独立成分信号の時系列変化による炉内変動の検出や過去の類似操業日時の検索が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 高炉解体調査と炉内状況(高炉解体調査1), 鉄と鋼, **62-5**, 535/546 (1976)
- 2) 八木順一郎: 高炉の数学的モデル, 鉄と鋼, **69-10**, 1242/1249 (1983)
- 3) 杉山喬, 須賀田正泰: 高炉二次元トータルモデル(BRIGHT)の開発とその応用, 製鉄研究, **325**, 34/43 (1987)
- 4) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa: Three-dimensional Dynamic Simulator for Blast Furnace, ISIJ Int., **39-1**, 15/22 (1999)
- 5) J.A.de Castro, H.Nogami and J.Yagi: Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multifluid Model, ISIJ Int., **42-1**, 44/52 (2002)
- 6) 財部毅, 中森孝, 織田博史, 平政道, 渡辺敏, 関任利: 君津 3,4 高炉における知識工学の高炉管理システムへの適用, CAMP-ISIJ, **2**, 18/21 (1989)
- 7) 桑野芳一, 山本誠一, 大谷啓一, 本田紘一, 張東植, 中根千富: 高炉の通気および荷下がり特性に関する研究, 鉄と鋼, **58-9**, 1203/1216 (1972)
- 8) 川田仁, 岸本純幸, 牧章, 西条義夫, 若井造, 山本健一: NKK 福山第5高炉における吹抜け機構, 鉄と鋼, **79**, T5/T8 (1993)
- 9) 築地秀明, 脇元一政, 山田裕, 石井邦彦, 宮原弘明, 山本修一: 高炉の炉況異常の予測方法の検討(高炉におけるカオス理論の適用—その1), CAMP-ISIJ, **8**, 1068 (1995)
- 10) 築地秀明, 脇元一政, 中村博巳, 石井邦彦, 宮原弘明, 山本修一: 高炉操業支援システムへのウェーブレット変換の適用(高炉における異常炉況予測方法の検討—2), CAMP-ISIJ, **9**, 751 (1996)
- 11) 伊藤雅浩, 松崎眞六, 柿内一元, 磯部誠: 高炉操業解析総合支援システム Venus の開発—高炉操業データの画像情報化技術の開発—, 新日鉄技報, **379**, 33/38 (2003)
- 12) 松崎眞六, 伊藤雅浩, 内藤誠章, 磯部誠, 柿内一元: 高炉の非正常現象の可視化方法の開発, 鉄と鋼, **92-12**, 911/918 (2006)
- 13) 中山泰喜: 流体の力学, 177/182, 養賢堂 (1979)
- 14) 青野照彦, 小田部紀夫, 持田順二, 浅井謙一: 高炉羽口部の圧力損失についての考察, 鉄と鋼, **80**, S688 (1980)

- 15) 中山泰喜: 流体の力学, 95/96, 養賢堂 (1979)
- 16) H.Kirchbach and W.Schubart: Mitt. Hydr. Inst. T.H.München, **2**, 72 (1928); **3**, 121 (1929)
- 17) C.Jutten and J.Herault: Blind separation of sources, Part 1: an adaptive algorithm based on a neuromimetic architecture. Signal Processing, **24-1**, 1/10 (1991)
- 18) P.Comon: Independent component analysis: a new concept?, Signal Processing, **36**, 287/314 (1994)
- 19) 村田昇: 独立成分分析, 1/28, 東京電機大学出版局 (2004)
- 20) A.Hyvärinen, J.Karhunen and E.Oja: Independent Component Analysis, 178/192, John Wiley & Sons, Inc. (2001)
- 21) 根本幾, 川勝真喜: 独立成分分析, 197/214, 東京電機大学出版局 (2005)
- 22) A.Hyvärinen and E.Oja: A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis, Neural Computation, **9**, 1483/1492 (1997)

[著者紹介]

伊藤 雅 浩 (正会員)



1989年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1991年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年、新日本製鐵(株)入社。熱交換器、連続鑄造機、高炉などの鉄鋼業における熱プロセスのモデリング、制御系設計、システム開発に従事。日本機械学会、日本鉄鋼協会の会員。

松崎 眞 六



1981年東京大学工学部金属工学科卒業。同年、新日本製鐵(株)入社。高炉・製鉄プロセスの研究開発に従事。2003年東北大学大学院博士課程(後期)修了、博士(工学)。現在は高炉プロセスのシミュレーション、プロセスモデリング、プロセス制御などの研究開発に従事。日本鉄鋼協会の会員。

内 田 健 康 (正会員)



1971年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1976年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。工学博士。1983年より早稲田大学教授(現在、電気・情報生命工学科)。制御系の情報構造、ロボ制御および最適化制御の理論と応用、生物における制御問題などの研究に従事。電気学会、システム制御情報学会、日本鉄鋼協会、IEEEなどの会員。

大 貝 晴 俊 (正会員)



1974年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1976年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、新日本製鐵(株)入社。鉄鋼プロセス制御の開発に従事。2003年より早稲田大学大学院情報生産システム研究科教授。博士(工学)、プロセス制御、プロセスモデリング、シミュレーション技術などの研究に従事。電気学会、システム制御情報学会、人工知能学会、日本鉄鋼協会などの会員。