

## 鉄鋼プロセスデータの画像情報化と操業状態監視技術

## Technology of Visualizing and Monitoring for State of Steel Production Process

伊藤 雅浩\*  
Masahiro ITO井上 雅貴  
Masataka INOUE

## 抄 録

鉄鋼プロセスには監視すべき状態量が空間的分布をもつプロセスがあり、これまでも各種の計測センサを開発して多数設備に設置し、その操業状態を監視してきた。各センサの設置位置とその計測値を設備上に対応づけることによる鉄鋼プロセスデータの画像情報化技術の概要と画像情報化データに潜在する統計的、局所的な偏在情報を顕在化することによる操業状態監視技術の数学的背景及び検討事例を抄述した。

## Abstract

In the steel production process, we have many processes in which the amount of state to be monitored has a spatial distribution, and various measuring sensors have been developed and installed in a large number of facilities to monitor the operation status. We outline the image information technology of steel production process data by correlating the installed position of each sensor and the measured value on the facility and reveal statistical and local uneven distribution information latent to image information data and their mathematical backgrounds and examination cases of operating condition monitoring technology by doing so will be described.

## 1. 緒 言

鉄鋼プロセスには監視すべき状態量が空間的分布をもつプロセスがあり、これまでも各種の計測センサを開発して多数設備に設置することで、その操業状態を監視してきた。そして、筆者らは、従来、オペレータの経験や技量に負うところが多かった多数の計測データを空間的、時間的に総合的に判断して行う鉄鋼プロセスの非定常挙動の把握や予測を支援する目的で、鉄鋼プロセスの操業データの画像情報化技術の開発を進めてきた<sup>1,2)</sup>。

本報では、これまで開発してきた鉄鋼プロセスデータの画像情報化技術の概要と画像情報化データに潜在する統計的、局所的な偏在情報を顕在化して操業状態を監視する技術の数学的背景と検討事例を抄述する。

## 2. 鉄鋼プロセスデータの画像情報化

## 2.1 高炉プロセス操業データの等値線探索方法

高炉には、操業監視及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、多種の計測センサを多

数設置している。例えば、炉体温度計には、ステープ温度計、炉床壁温度計、炉底温度計などがあり、炉体全体の温度分布を把握すべく約350点を設置している。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設置し、炉頂圧力計、送風圧力計と共に監視している。

このとき、炉体上に設置する計測センサは、必ずしも空間的に均等に配置できない。そこで、計測センサが設置されていない領域の値を空間的に補間して3次元空間上の等値線を探索する。

図1を用いて、その手法の考え方を説明する。炉体は、炉口部、炉胸部、炉腹部、朝顔部、炉床部で構成される。図1の領域Aには、炉胸部を構成するステープに配置した温度計を例に、その位置を●で示している。ここでステープ温度計の配置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炉体に設定し、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て算出する。図1に○で仮想格子点を示す。

このとき、領域A内の仮想格子点pの3次元座標( $\theta_p$ ,

\* 設備・保全技術センター システム制御技術部 システム制御技術室 主幹 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

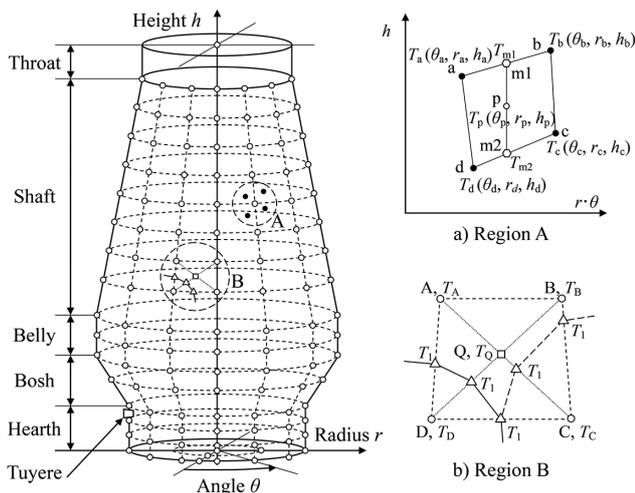


図1 高炉プロセス操業データの等値線探索方法  
Concept of deciding a measuring data contour line on blast furnace

$r_p, h_p$ ) は既知であり、この座標を用いた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座標と温度  $T_a(\theta_a, r_a, h_a)$ ,  $T_b(\theta_b, r_b, h_b)$ ,  $T_c(\theta_c, r_c, h_c)$ ,  $T_d(\theta_d, r_d, h_d)$  は既知である。

このとき、仮想格子点  $p$  における未知なる温度  $T_p$  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る線形補間式、すなわち、以下の式(2)を代入した式(1)で計算できる。

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

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

そして、この計算をすべての仮想格子点で実施することで温度計の位置を正確に考慮した形で炉体温度の空間的分布計算が完了する。

図1の領域Bには値の定まった4つの仮想格子点A, B, C, Dがあり、おのおのの温度が  $T_A, T_B, T_C, T_D$  であるとき、仮想グリッドの四角形要素ABCDの対角線交点(図中□)をQとし、点Qにおける温度  $T_Q$  を4頂点温度の相加平均、すなわち式(3)で計算する。

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

仮想グリッドの四角形要素ABCDが内角の1つが  $180^\circ$  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。

上記の手順で計算した4つの三角形要素の頂点の値を用い、各三角形要素内の温度は辺端の値の線形補間で決定できると仮定すると、探索したい温度  $T_1$  の値を取る各三角形要素の辺上の座標が決定でき、これらを結ぶことで  $T_1$  の等値線を探査することができる。

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 高炉プロセス操業データの画像情報化

図2, 図3に高炉プロセス操業データの画像情報化例を示す。3次元化は視点及び消失点を設定した透視投影法による。図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。図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。

図2, 図3は、高炉プロセスの温度分布や圧力分布の客観的な把握や共有がオペレータの経験や技量によらず可能になることを示している。

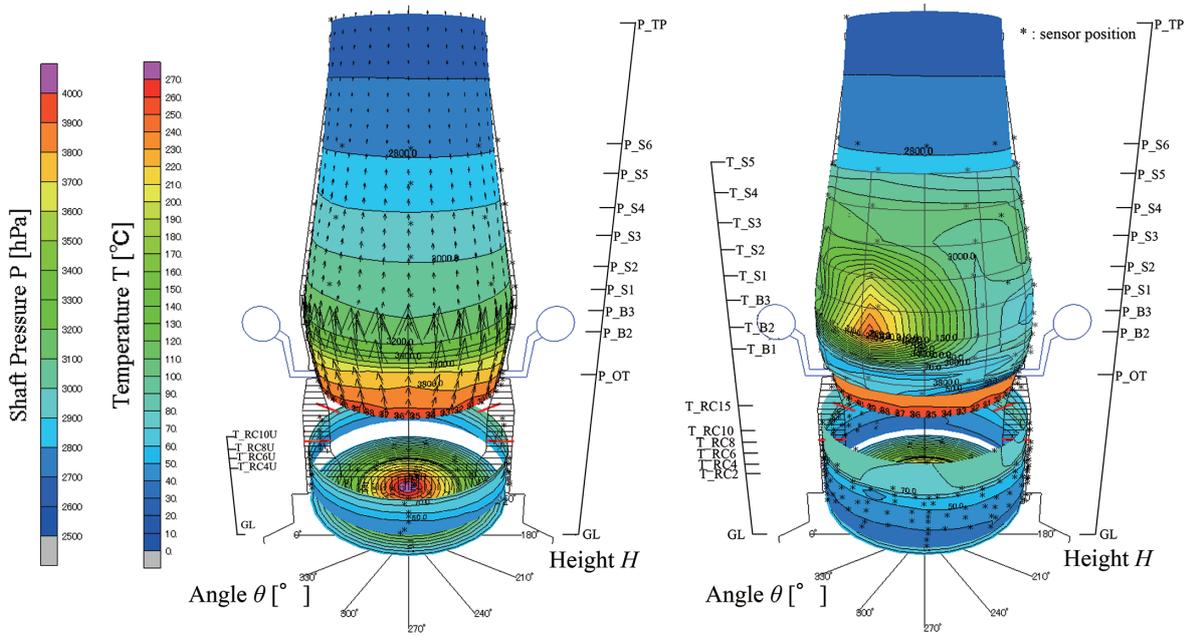
なお、シャフト圧力の空間変化率ベクトルは、各仮想格子点で炉周・炉高接線方向についてシャフト圧力の空間変化率成分を計算し、この2成分からなるベクトルを定義したもので、その大きさは従来の通気性指標  $\Delta P/L$  Pa/m を空間的に拡張した量に相当する。

## 2.3 連続鋳造プロセスの幅可変鋳型の操業データの画像情報化<sup>3)</sup>

次に、画像情報化領域が時間的に変化する鉄鋼プロセスの画像情報化の例として、連続鋳造プロセスの幅可変鋳型の操業データの画像情報化技術の概要を述べる。

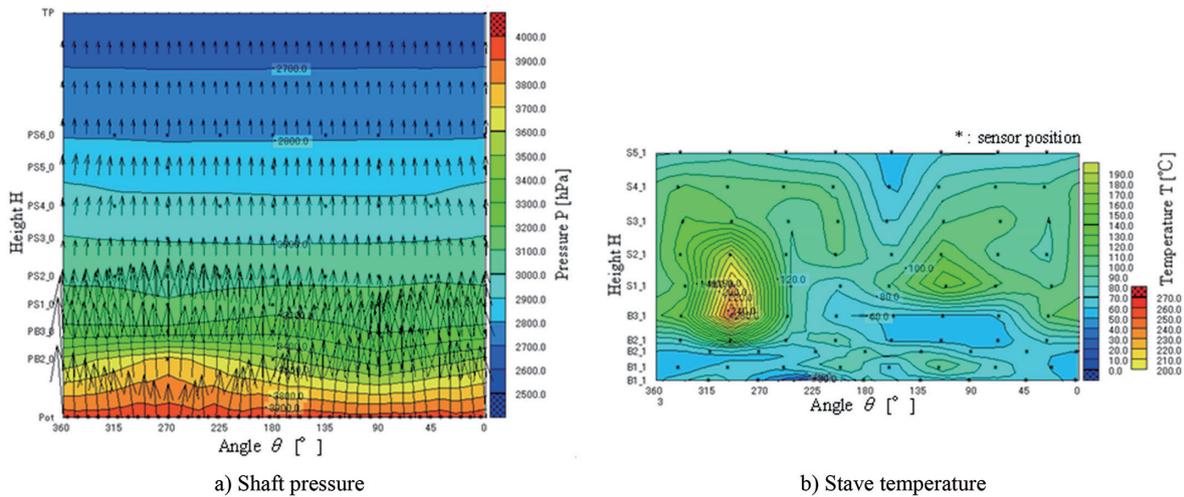
図4に幅可変鋳型の略構成図、図5に座標系と鋳型寸法を示す。このうち、鋳型短辺面BFGCが  $B'F'G'C'$  に移動する過程を図6に拡大して示す。幅可変鋳型において温度計測点(図中○)は必ずしも空間的に均等に配置されていないが、図6では、鋳型長辺面に温度計測点  $a$  及び  $b$  が、短辺面には温度計測点  $c$  及び  $d$  が設置されている。

各温度計測点の設置位置は設備図面から既知である。温度計測点  $c$  及び  $d$  は短辺面BFGCに固定されており、短辺面BFGCに伴って移動する。短辺面移動中の温度計測点  $c'$  及び  $d'$  の3次元座標は、短辺面の位置情報(例えば、図6のC又はG, C'又はG'の座標)と機械的構造(例えば、図6のテーパ角  $\alpha$  rad)を用いて、時々刻々算出できる。



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

図2 高炉プロセス操業データの3次元画像情報化例 (新日鐵住金大分製鉄所第2高炉)  
3-Dimensional image of blast furnace process data (#2BF Oita Works, NSSMC)



a) Shaft pressure

b) Stave temperature

図3 高炉プロセス操業データの2次元画像情報化例 (新日鐵住金大分製鉄所第2高炉)  
2-Dimensional image of blast furnace process data (#2BF Oita Works, NSSMC)

1) 鑄造幅可変前：接続線 BC 上の点 p, 点 q の温度計算

図5, 図6で鑄造幅可変前の鑄造幅  $l$  を  $W_1 (=2 \times L_1)$ , 鑄造厚を  $M$ , 鑄型中央下端奥に座標軸の原点をとり, 温度計測点の点 a 及び点 c の座標  $a(X_a, Y_a, Z_a)$ ,  $c(X_c, Y_c, Z_c)$  と温度  $T_a, T_c$  が既知とする。

ここで, 鑄型長辺面 ABCD と短辺面 BFGC を展開した平面  $XY$  と考えると (図7), 接続線 BC 上の点 p は直線 ac 上にあることから, 点 p の座標  $p(X_p, Y_p, Z_p)$  は, 式(4.1)～式(4.3)で定義できる。

$$X_p = L_1 \tag{4.1}$$

$$Y_p = Y_a + \frac{Y_c - Y_a}{L_1 + M - Z_c - X_a} \cdot (X_p - X_a) \tag{4.2}$$

$$Z_p = M \tag{4.3}$$

このとき, 点 p は図1の高炉で例示した m1 に対応するから, 温度  $T_p$  の値は, 式(1), 式(2)と同様の線形補間式, 式(5)で計算できる。

$$T_p = T_a + \frac{T_c - T_a}{L_1 + M - Z_c - X_a} \cdot (X_p - X_a) \tag{5}$$

接続線 BC 上の点 q の座標  $q(X_q, Y_q, Z_q)$  と温度  $T_q$  の値も同様にして, 式(6.1)～式(6.3), 式(7)で計算できる。

$$X_q = L_1 \tag{6.1}$$

$$Y_q = Y_b + \frac{Y_d - Y_b}{L_1 + M - Z_d - X_b} \cdot (X_q - X_b) \tag{6.2}$$

$$Z_q = M \tag{6.3}$$

$$T_q = T_b + \frac{T_d - T_b}{L_1 + M - Z_d - X_b} \cdot (X_q - X_b) \tag{7}$$

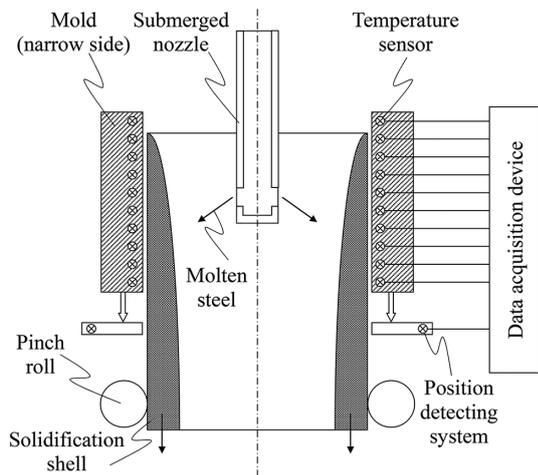


図4 連続鋳造機幅可変鋳型構成図

Configuration diagram of a continuous casting machine variable width mold

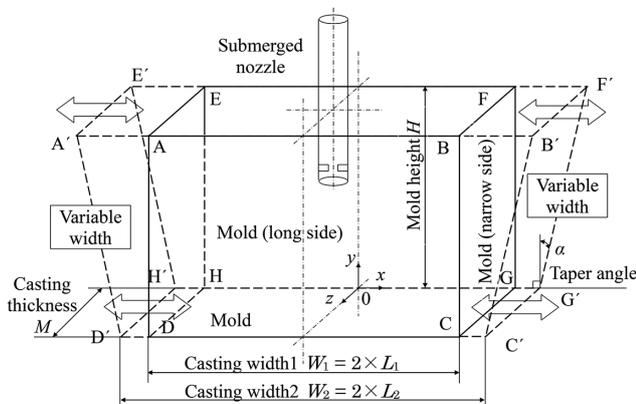


図5 連続鋳造機幅可変鋳型の幅可変説明図

Explanation of continuous casting machine variable width mold

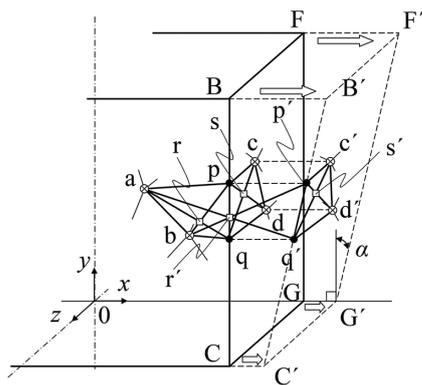


図6 鋳造幅可変過程における温度計測点

Temperature measurement points in casting width variable process

そして、計測温度  $T_a, T_b, T_c, T_d$  と計算温度  $T_p, T_q$  に基づき、四角形領域  $apqb, cpqd$  の対角線交点  $r$  及び  $s$  の温度  $T_r, T_s$  を、式 (3) と同様の相加重平均式で求める。

$$T_r = \frac{1}{4} \cdot (T_a + T_p + T_q + T_b) \quad (8)$$

$$T_s = \frac{1}{4} \cdot (T_c + T_p + T_q + T_d) \quad (9)$$

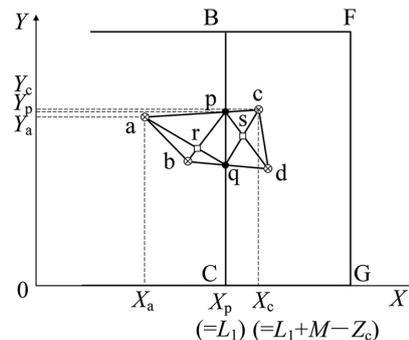


図7 鋳型コーナ展開平面と温度計測点 (鋳造幅可変前)  
Temperature measurement points on developed mold corner plane (before changing casting width)

2) 鋳造幅可変過程：接続線  $B'C'$  上の点  $p'$ , 点  $q'$  の温度計算  
鋳造幅可変過程の鋳造幅  $2$  を  $W_2 (=2 \times L_2)$ , 鋳造厚  $M$ , 温度計測点の点  $a$ , 点  $c'$  の座標  $a(X_a, Y_a, Z_a)$ ,  $c'(X_c, Y_c, Z_c)$  と温度  $T_a, T_c$  が既知とする。

図7の展開平面  $XY$  の考え方を拡張し、鋳型長辺面  $A'B'C'D'$  と短辺面  $B'F'G'C'$  を展開した拡張平面  $XY$  を仮想すると (図8), 同様にして接続線  $B'C'$  上の点  $p'$  及び点  $q'$  の座標  $p'(X_p, Y_p, Z_p)$ ,  $q'(X_q, Y_q, Z_q)$  と温度  $T_p, T_q$  は、式 (10) ~ 式 (15) で定義し、計算できる。

$$X_p = L_2 \quad (10 \cdot 1)$$

$$Y_p = Y_a + \frac{Y_c \cdot \cos \alpha - Y_a}{L_2 + Y_c \cdot \sin \alpha + M - Z_c - X_a} \cdot (X_p - X_a) \quad (10 \cdot 2)$$

$$Z_p = M \quad (10 \cdot 3)$$

$$T_p = T_a + \frac{T_c \cdot \cos \alpha - T_a}{L_2 + Y_c \cdot \sin \alpha + M - Z_c - X_a} \cdot (X_p - X_a) \quad (11)$$

$$X_q = L_2 \quad (12 \cdot 1)$$

$$Y_q = Y_b + \frac{Y_d \cdot \cos \alpha - Y_b}{L_2 + Y_d \cdot \sin \alpha + M - Z_d - X_b} \cdot (X_q - X_b) \quad (12 \cdot 2)$$

$$Z_q = M \quad (12 \cdot 3)$$

$$T_q = T_b + \frac{T_d \cdot \cos \alpha - T_b}{L_2 + Y_d \cdot \sin \alpha + M - Z_d - X_b} \cdot (X_q - X_b) \quad (13)$$

$$T_r = \frac{1}{4} \cdot (T_a + T_p + T_q + T_b) \quad (14)$$

$$T_s = \frac{1}{4} \cdot (T_c + T_p + T_q + T_d) \quad (15)$$

展開図としては図8の  $X$  軸は  $C'$  においてテーパ角  $\alpha$  に対応した折線となるが、ここでは各点の座標や温度の計算式をメルカトル図法的に展開した平面  $XY$  における線形補間と考え、図7と同じ展開図を示している。 $\alpha=0$  かつ  $L_2=L_1$  のとき、式 (10) ~ 式 (15) は式 (4) ~ 式 (9) と一致する。

式 (8), 式 (9) で鋳造幅可変前の四角形領域  $apqb, cpqd$  の対角線交点の温度  $T_r, T_s$  が、式 (14), 式 (15) で鋳造幅可変過程の四角形領域  $ap'q'b, cp'q'd$  の対角線交点の温度  $T_r, T_s$  が求まるから、これらの四角形領域をあらかじめ内角の1つが  $180^\circ$  を超えない四角形要素として関連づけしておけば、画像情報化領域が時間的に変化する鋳造幅可変過程においても時々刻々等値線を探査して描画することができ、

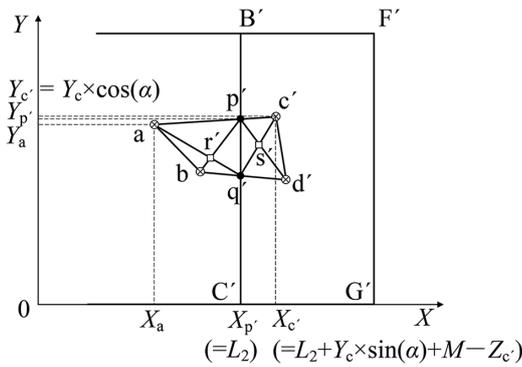


図8 鋳型コーナ展開平面と温度計測点(鋳造幅可変過程)  
Temperature measurement points on developed mold corner plane (under changing casting width)

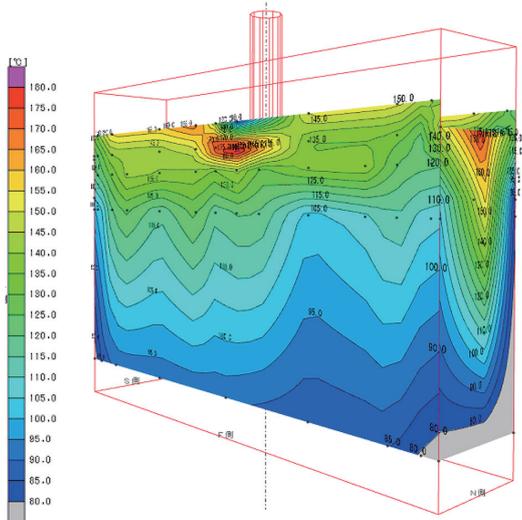


図9 連続鋳造機幅可変鋳型温度の3次元画像情報化例  
(新日鐵住金八幡製鉄所第1連続鋳造機)  
3-Dimensional image of continuous casting machine variable width mold temperature (#1CC Yawata Works, NSSMC)

溶鋼旋回流の影響等により、初期凝固の状態把握が難しい鋳型コーナにおいても近傍の温度計測値を用いて温度分布の空間的把握と時間的推移監視が可能となる。

図9に連続鋳造機幅可変鋳型の操業データの画像情報化例を示す。

### 3. 鉄鋼プロセスの操業状態監視技術

#### 3.1 基本的な考え方

鉄鋼プロセスデータの画像情報化は、操業状態監視にあたり、鉄鋼プロセスの分布定数系特性を踏まえ、計測センサ毎、仮想グリッド点毎あるいは画素毎に状態量を持つ多次元ベクトルを扱うことを意味する。

鉄鋼プロセスは連続稼働を基本とするプロセスが多く、この画像情報化データは大量に収集でき、正規分布に基づく統計解析やいわゆる Bigdata 解析、画像入力による近年の AI 的手法が注目される。

このとき、鉄鋼プロセスに求められる操業状態監視とは、統計的にまたは時間的に大部分を占める定常で安定な大量

の操業データの中から、数量的には必ずしも多くないが操業状態の不安定挙動が内在／潜在する局所的な／非定常特性を顕在化させることであり、多変量解析として一般に広く用いられる主成分分析では抽出できない潜在特性を抽出することが重要となる。

すなわち、鉄鋼プロセスは基本的に定常的な安定状態を実現指向するものであるから、統計的にまたは時間的に大部分を占める定常特性を抽出する解析(例えば主成分分析)は静特性としての操業条件の最適化に有効であるが、プロセス不調につながる a) 動特性としての非定常特性の監視や b) 空間的局所に潜在する偏在特性の監視にあたっては、前者にはブラインド信号分離<sup>4)</sup>で注目される独立成分分析が、後者には生物視覚系の情報処理研究に端を発するスパースモデリング<sup>5,6)</sup>が有効と考える。

以下にその数学的な背景と検討例を示す。

#### 3.2 画像情報化した鉄鋼プロセスデータの操業状態監視モデル

図10<sup>7)</sup>に脳磁図解析における脳内発生信号と観測信号の関係を示す。高炉プロセスや連続鋳造プロセスの鋳型内部にも相変化や化学反応といった物理現象に起因する熱源や圧力源が局所的あるいは空間分布を持って複数存在し、これらが内部を伝導／流動した結果の温度や圧力が設備に設置したセンサの計測値であると考えられることができる。

図10で  $s_1(t), s_2(t)$  が原信号であり、 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_5(t)$  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  $(i, j)$  要素とする  $m$  行  $n$  列の行列  $\mathbf{A}$  を定義して、これらの関係が次式で記述できると仮定する。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) \tag{16}$$

式(16)は観測信号  $\mathbf{x}(t)$  を行列  $\mathbf{A}$  による原信号  $\mathbf{s}(t)$  の線形結合で表現するモデルである。このとき  $a_{ij}$  は信号源  $j$  からセンサ  $i$  への線形結合係数である ( $x_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot s_j(t)$ )。こ

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_{11} \cdot s_1(t) + a_{12} \cdot s_2(t) \\ x_2(t) &= a_{21} \cdot s_1(t) + a_{22} \cdot s_2(t) \\ &\dots \\ x_5(t) &= a_{51} \cdot s_1(t) + a_{52} \cdot s_2(t) \end{aligned}$$

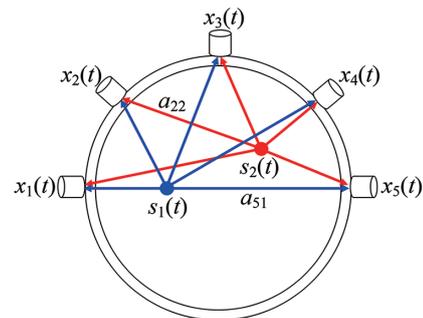


図10 脳内で発生した信号と観測信号の関係<sup>7)</sup>  
Generating signals inside brain and observing signals

ここで、行列  $\mathbf{A}$  の非線形性やダイナミクスは小さく無視できるとすれば、主成分分析、独立成分分析、スパースモデリングはいずれも、式 (16) を構成する行列  $\mathbf{A}$  (実際には下記復元行列  $\mathbf{W}$ ) をそれぞれの評価関数で導出し、式 (17) により、原信号  $\mathbf{y}(t)$  を明らかにする解析手法と捉えることができる<sup>\*1</sup>。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (17)$$

### 3.3 主成分分析、独立成分分析、スパースモデリングの評価関数

3つの解析手法の評価関数と復元行列  $\mathbf{W}$  を以下に整理する。

原信号  $y_j(t)$  の平均が非零 ( $E\{y_j(t)\} \neq 0$ ) のとき、平均まわりの第  $k$  次モーメント  $\kappa_{kj}$  は、以下である<sup>8)</sup>。

$$\kappa_{1j} = E\{y_j\} \quad (18-1)$$

$$\kappa_{2j} = E\{y_j^2\} - [E\{y_j\}]^2 \quad (18-2)$$

$$\kappa_{3j} = E\{y_j^3\} - 3E\{y_j^2\}E\{y_j\} + 2[E\{y_j\}]^3 \quad (18-3)$$

$$\kappa_{4j} = E\{y_j^4\} - 3[E\{y_j^2\}]^2 - 4E\{y_j^3\}E\{y_j\} + 12E\{y_j^2\}[E\{y_j\}]^2 - 6[E\{y_j\}]^4 \quad (18-4)$$

前処理で  $y_j(t)$  の平均を零化すれば、上記で  $E\{y_j(t)\} = 0$  となる。

#### 1) 主成分分析の評価関数と復元行列 $\mathbf{W}$

評価関数：2次モーメント(分散)の最大化

$$\kappa_{2j} = E\{y_j^2\} (= \sigma_{y_j}^2) \quad (19)$$

統計的にデータ数が多い直交方向ベクトル  $\mathbf{w}_j$  からなる復元行列  $\mathbf{W}$

#### 2) 独立成分分析の評価関数と復元行列 $\mathbf{W}$

評価関数：高次モーメントの最大化又は最小化

例えば、4次モーメント(尖度)の最大化又は最小化(Fast ICA)<sup>8,9)</sup>

$$\kappa_{4j} = E\{y_j^4\} - 3[E\{y_j^2\}]^2 \quad (20)$$

統計的に独立な方向ベクトル  $\mathbf{w}_j$  からなる復元行列  $\mathbf{W}$

#### 3) スパースモデリングの評価関数と基底行列 $\Phi$

評価関数：零要素を構成する基底行列  $\Phi$  の最適化<sup>10)</sup>

$$\min_{\mathbf{x} \in R^m} \|\mathbf{x}\|_0 \text{ subject to } \mathbf{y} = \Phi \cdot \mathbf{x} \quad (21)$$

空間主成分から局所偏分を抽出する直交関数  $\phi_j$  からなる基底行列  $\Phi$ <sup>\*2</sup>

### 3.4 独立成分分析を用いた高炉プロセス操業状態監視の解析事例

新日鐵住金(株)君津製鉄所第4高炉のシャフト圧力の炉周角度( $\theta$ )・炉高( $h$ )方向の2次元画像情報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105120(=k)である。

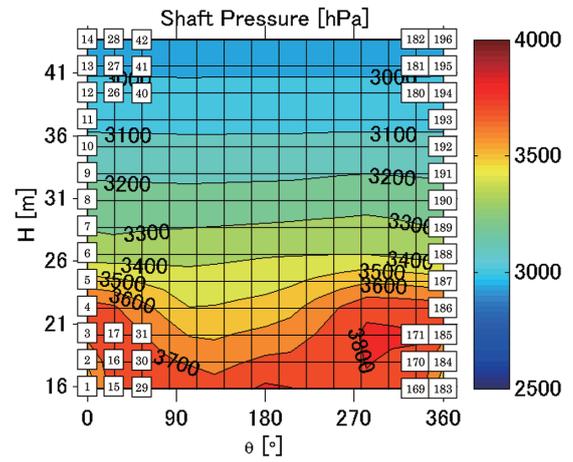


図11 観測信号ベクトル  $\mathbf{x}(t)$  切出しメッシュと要素番号 Mesh and element number of observing signal vector  $\mathbf{x}(t)$  on image

個々の画像に  $14 \times 14$  の等間隔格子を設定して値を切出し(図11)、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  $\mathbf{X} \in R^{m \times k}$  とした。独立成分数  $n$  は、基底画像の物理的解釈が可能となる数として  $n=5$  とした。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S} \quad (22)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(1) \ \mathbf{x}(2) \ \dots \ \mathbf{x}(k)] \in R^{m \times k} \quad (23)$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}(1) \ \mathbf{s}(2) \ \dots \ \mathbf{s}(k)] \in R^{n \times k} \quad (24)$$

以下、簡単のため、 $\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}$ 、 $\mathbf{S} = \mathbf{Y}$  とする。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  $s_j(t)$  の推移例を図12に示す。図12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  $A_5$  であり、各画像の等値線から以下と解釈できる。

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  $A_3$  :  $100^\circ$  付近のガス偏流成分の画像

基底画像  $A_4$  :  $0^\circ$  付近のガス偏流成分の画像

基底画像  $A_5$  :  $300^\circ$  付近のガス偏流成分の画像

ここで、基底画像とは、独立成分信号  $s_j(t)$  に対応する行列  $\mathbf{A}$  の列成分を図11の格子位置に再配置して得られる画像である。

図12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(図12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図12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  $A_1$ 、 $A_3$  に対応する独立成分信号  $s_j(t)$  が大きく変化している(それぞれ図12中のB4、B3)。従来からの操業指標である差圧  $\Delta P$  (=送風圧  $P_B$  - 炉頂圧  $P_{TP}$ ) の変動も確認できるが(図12中のD)、その変化幅は小さく、また差圧  $\Delta P$  は炉体の通気性に対して全体的な指標を示す

\*1 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、手法によっては、原信号ベクトルのスケールと符号、成分順序には任意性が残る。

\*2 2次元要素  $(x, y)$  の状態量  $I(x, y) = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \phi_j(x, y)$  と定式化<sup>5,6,10)</sup>。

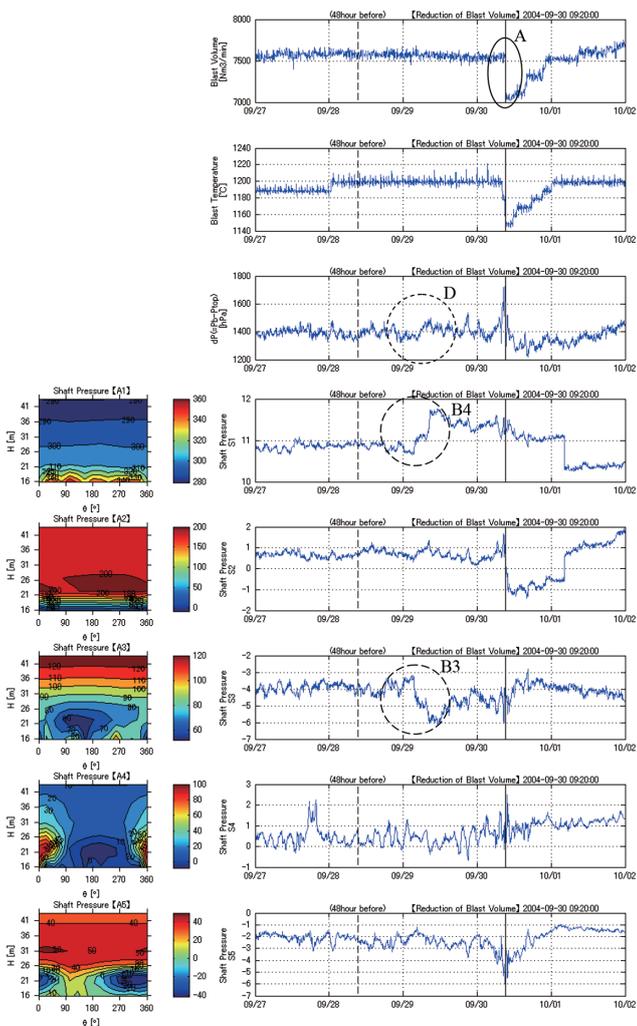


図 12 シャフト圧力の画像情報化データの独立成分分析  
Results of ICA for shaft pressure image

に過ぎないため、炉内状況に関する情報が少ない。

その点、独立成分信号  $s_j(t)$  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。

#### 4. 結 言

本報は、開発してきた鉄鋼プロセスデータの画像情報化技術の概要と大量の画像情報化データに潜在する統計的、局所的な偏在情報を顕在化して操業状態を監視する技術の数学的背景と検討事例を抄述した。

なお、本報の図 1, 図 2, 図 3, 図 11 及び図 12 と図を説明する記載は、(公益社団法人) 計測自動制御学会の転載許諾のもと参考文献 2) より引用した。

#### 参考文献

- 1) 伊藤雅浩 ほか：新日鉄技報. (379), 33 (2003)
- 2) 伊藤雅浩 ほか：計測自動制御学会産業論文集. 8 (10), 82 (2009)
- 3) 日本特許公報：特許第 4980388 号. 2012 年 4 月 27 日
- 4) Jutten, C. et al.: Signal Processing. 24 (1), 1 (1991)
- 5) Olshausen, B.A. et al.: Nature. 381, 607 (1996)
- 6) Olshausen, B.A. et al.: Network. 7 (2), 333 (1996)
- 7) 村田昇：独立成分分析. 第 1 版. 東京, 東京電機大学出版局, 2004, p. 23, 205
- 8) Hyvärinen, A. et al. 著, 根本幾 ほか訳：独立成分分析. 第 1 版. 東京, 東京電機大学出版局, 2005, p. 45, 197, 426
- 9) Hyvärinen, A. et al.: Neural Computation. 9, 1483 (1997)
- 10) 永原正章：スパースモデリング. 初版. 東京, コロナ社, 2017, p. 9



伊藤雅浩 Masahiro ITO  
設備・保全技術センター  
システム制御技術部 システム制御技術室  
主幹  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



井上雅貴 Masataka INOUE  
設備・保全技術センター  
システム制御技術部 システム制御技術室  
主査