

# 高炉操業の可視化方法の開発

## Development of the Visualizing Information Technique of Blast Furnace Operation

松崎 眞 六<sup>\* (1)</sup> 伊藤 雅 浩<sup>\* (2)</sup> 内藤 誠 章<sup>\* (3)</sup> 柿内 一 元<sup>\* (4)</sup>  
 Shinroku MATSUZAKI Masahiro ITO Masaaki NAITO Kazumoto KAKIUCHI  
 磯部 誠<sup>\* (5)</sup> 佐々木 望<sup>\* (6)</sup> 内田 健 康<sup>\* (7)</sup> 大貝 晴 俊<sup>\* (8)</sup>  
 Makoto ISOBE Nozomi SASAKI Kenko UCHIDA Harutoshi OGAI

### 抄 録

ステーブ温度やシャフト圧力のデータを二次元的に画像化することにより、シャフト圧力変動やスリップ発生にともなう炉内の空間的な変動を客観的に可視化することが可能になった。また、データの空間変化率、時間変化率などと操業データの推移を組み合わせることで、シャフト圧力変動等の早期検出が可能となる。また可視化画像から独立成分分析を用いて特徴量を抽出し、その時系列変化を監視することにより、空間的かつ時系列双方の監視が容易となる。さらに、JITモデリングを応用した“大規模データベースオンラインモデリング”を開発し、高炉実操業データを用いてその有効性を確認した。このとき、過去の類似事例検索、将来予測に関する計算は極めて短時間に実行され、オンライン適用が十分可能であることを確認した。

### Abstract

Visualization of shaft pressure variations and spatial changes caused by slipping in the blast furnace has established by turning stave temperature and shaft pressure data into images distributed in two dimensions. In addition, combining the two-dimensional distribution of secondarily processed data of changes in space and time with the progress of operation data enables early detection of shaft pressure fluctuations. It has been also found that there exists a relationship between the cohesive zone root position, assumed by the visualized two-dimensional image of the stave temperature change over time, and the origins of shaft pressure fluctuations. It is extracted quantity of characteristic namely an independent ingredient from a two-dimensional image using an independent component analysis. It will be expected that spatial image and time series order become easy by watching a change of time series of independent ingredient. We have developed “Large scale database Online Modeling” as the practical method based on the Just-In-Time modeling concept on blast furnace operation, which has very complicated physical phenomena and strong non-linear specific characteristics. The validity of the developed modeling method has been confirmed by the study with blast furnace operation data, then the past similar operation data have been searched and the prospective operation data have been estimated very quickly and precisely.

## 1. 緒 言

高炉の操業を行う上で、その時々炉内状況の正確な把握と将来の予測は重要な要件である。従来からも製鉄分野では実操業データの統計的な解析<sup>1-4)</sup>やモデル計算<sup>5-8)</sup>、AIの応用<sup>9-14)</sup>等、更には経験等を踏まえて、現状把握、将来予測を行い、高位安定操業を継続してきた。しかしながら、要因合理化、原燃料性状の悪化、環境変化による生産量の増加など、安定操業を阻害する要因が増加しつつある。このような状況において、出鉄比の確保と還元材比の低減をあわせて推進するためには、非定常操業時の炉内現象把握、将来予

測、対策アクションを定量的に提示するシステムの確立が、従来にも増して必要である。

一方、近年の計算機能力の大幅な向上、大量のデジタルデータを蓄積する安価なハードウェアやデータベースシステムの普及、デジタル画像処理技術の高度化と汎用化は急速な勢いで進んでおり、極力短いサンプリング時間で高炉操業データを長期間大量に蓄積し、高炉操業データを画像情報化する技術が実現可能となってきた。

このような技術を活用し、新たな高炉制御システムを構築するためには、精度の良い連続的なセンサの開発、操業データを網羅したデータベース、更にこれらのデータベースを効率良く可視化、解析

\* (1) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主幹研究員 工博  
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2836

\* (2) 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネジャー

\* (3) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 部長 工博

\* (4) 君津製鉄所 製鉄部 グループリーダー

\* (5) 大分製鉄所 製鉄工場 高炉課 マネジャー

\* (6) 名古屋製鉄所 製鉄工場 工場長

\* (7) 早稲田大学 理工学部 電気・情報生命工学科 教授 工博

\* (8) 早稲田大学 大学院 情報生産システム研究科 教授 工博

するシステムの開発が必要である。そのため、大規模データベースの構築、データベースを活用した高炉の二次元可視化技術の開発及びデータベースを高炉の非定常現象の解析に活用したので、その結果について報告する。

## 2. 高炉操業データのデータベース

新日本製鐵の高炉データベースシステムは1980年代に構築され、約20年間機能してきたが、システムとしてはハードウェアもソフトウェアも古く、ディスク容量も小さいため、非定常解析を行う上で種々の問題点が顕在化していた。従って、高炉、製鉄の操業データを極力短周期かつリアルタイムに近い時間で把握するため、図1に示すような新たなデータベースを構築した。

システムの概要は以下の通りである。プロセスコンピュータで収集された、生産データ、送風条件、装入物装入条件、出銑滓関連データ、各種センサデータは、目的に応じて分、時間、日、月の周期に編集される。各高炉で収集されたデータは、全高炉共通のサーバーに1時間1回の周期で伝送され蓄積される。基本的に全高炉全炉代のデータを蓄積してゆく予定である。蓄積されたデータは、WEBを介して社内LANに接続されたパーソナルコンピュータで原則参照可能である。

## 3. ステープ温度、シャフト圧力データの二次元可視化システム

高炉の操業については、物理モデルやAIの発展、あるいは多数の検出端の開発にもかかわらず、実際の高炉での非定常現象の把握や予測は、現場オペレータの経験と技量に負うところが大きい。このひとつに、高炉のセンサの種類と数の多さがあげられる。高炉は高さ方向、炉周方向共に空間的な広がりを持った装置であり、設置されているセンサも温度計だけで数百を超える。これらのセンサから得られる情報を統合的に理解し、定量的な処置をするためには、かなりの経験を要したものと考えられる。従って数多くのセンサを統合的に計算機処理することにより、より容易かつ有効にセンサの情報が活用可能となると考えられる。新日本製鐵では、連続的かつ二次元空間的な情報が得られる、炉体ステープ温度とシャフト圧力データについて二次元可視化システムである、高炉操業解析総合支援システム (VENUS; Visual evaluation and numerical analysis system of Blast Furnace operation) を開発した。

### 3.1 データの二次元可視化方法<sup>15-18)</sup>

高炉の炉体形状を考慮しつつ、炉の外表面を炉高方向・炉周方向

二次元平面に射影展開し、センサの計測データの値をセンサの三次元設置位置情報と正確に対応させて二次元射影平面上に配置し、計測データの等値線図、コンタ図、ベクトル線図を作成した。高炉のセンサは、通常等間隔配置ではないため、任意のセンサ位置に対応可能な等値線探索アルゴリズムを開発した。またセンサが設置されていない領域は、必要な空間分解能に応じた仮想グリッドを設定し、その近傍の実計測データを仮想グリッドと近傍計測センサ間の実際の三次元ユークリッド距離を用いた空間的補間処理によって仮想グリッド上の値を補間した。

### 1) ステープ温度の可視化例

ステープ温度の可視化例を図2に示す。図の横軸は炉周角度、縦軸は炉の高さ方向を、\*は測定センサの位置を示している。これらの画像情報を時間推移に伴い逐次更新することにより、高炉の空間的分布特性の非定常現象を動画情報として定量化、可視化が可能となる。

### 2) シャフト圧力の可視化例

図3にシャフト圧力の二次元可視化例を示す。図中の矢印はシャフト圧力の空間変化率ベクトル、いわゆる差圧を示したものである。

いずれも単なる数字のデータに比べ、圧力変動の発生位置などの空間的な状況が視覚的に容易に判断されることがわかる。また、高炉内の種々の現象は時間的、空間的な遅れを伴って変化すると考えられるため、現時点の値に加えて、次節に説明するよう

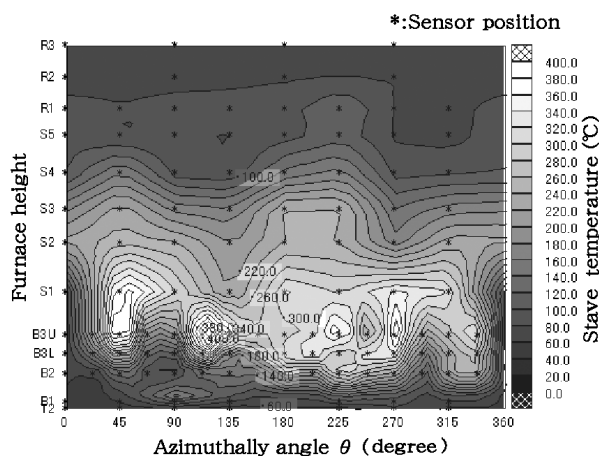


図2 ステープ温度の二次元可視化例  
Two-dimensional image of stove temperature

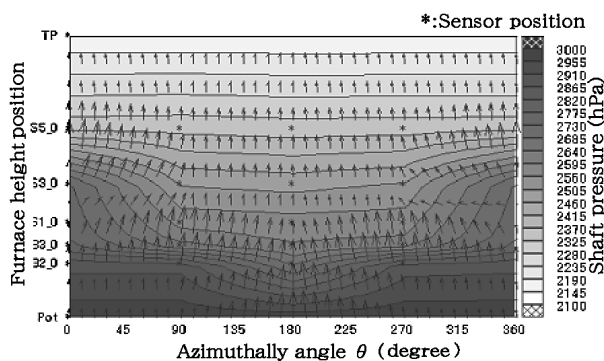


図3 シャフト圧力の二次元可視化例  
Two-dimensional image of shaft pressure

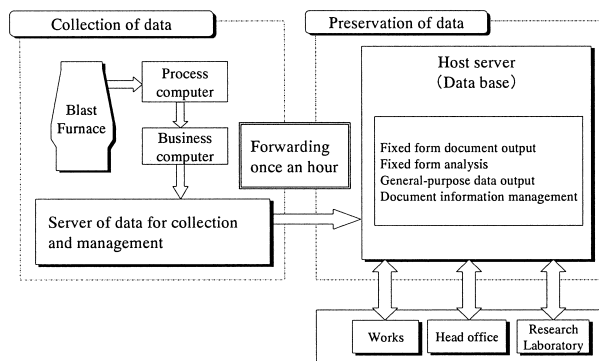


図1 データベースの概要  
Outline of data base

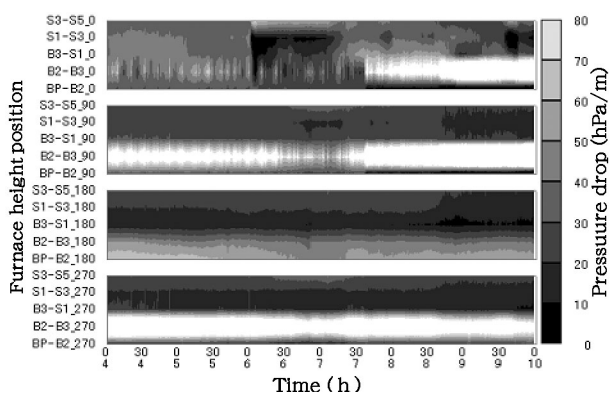


図4 シャフト圧力の高さ方向分布の時系列推移図  
Distribution of shaft pressure drop

に、空間変化率だけでなく、過去の履歴を考慮した時間変化率も計算し、二次元可視化した。

3) 時間変化の描画

図2、図3のような二次元展開図では、瞬時の状況は把握できるが、時間的な変化は把握できない。従って、図4のように、高炉の炉周方向の4方向(上から0度、90度、180度、270度方向)のみの時間推移を描画することにより、空間的な変化と時間的な変化を同時に把握可能となる。図4はシャフト差圧の高さ方向分布の時系列推移図を示したものである。これから6時頃に、主として0度方向でシャフト圧変動が生じていることが視覚的に容易に理解可能となる。

なお計算機上では、図2、図3を連続して描画する(アニメーション表示することにより、より容易に時系列推移の把握が可能となる。

3.2 空間変化率

シャフト圧力は炉内の充填構造やガス流れの変化を敏感に反映するが、圧力情報を細かく見るために従来から圧力の空間的な変化率、いわゆる差圧を監視してきた。本システムではこの差圧を一般化した空間変化率ベクトルの可視化画像を差圧の代わりに採用した。

シャフト圧力の可視化画像の二次加工処理として、シャフト圧力

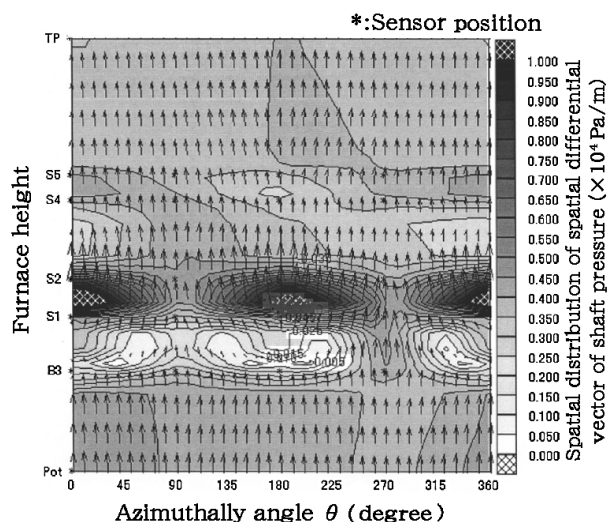


図5 シャフト圧力の空間変化率分布例  
Spatial distribution of spatial differential vector of shaft pressure

の空間変化率ベクトルを、高炉の特徴である徳利型の炉体形状を考慮した三次元空間上で定義し、炉高方向、炉周方向の二次元射影平面上に画像情報化した(図5)。

なお、空間変化率はステープ温度に対しても定義可能である。

3.3 時間変化率

炉内ガス流れや、固体流れが変動した時に、炉壁部での熱交換が大きく変動する。また融着帯はガスの通気が悪いため、炉周方向で融着帯の厚みや形状が異なるとガスが一樣に通過せず、局部的に通気抵抗の小さい領域を通過することがたびたび生じると考えられる。このとき、ガスが選択的に通過した領域では他の領域よりステープ温度の時間的な変化が著しいと推定される。そこで可視化画像の二次加工処理として、時間変化率を定義して炉高方向・炉周方向二次元射影平面上に画像情報化した。時間変化率を用いることにより、単に温度の測定値を監視するより、より早期かつ精度良く、炉内変動把握が可能となる。時間変化率はシャフト圧力に対しても定義可能である。

また、後述するように、可視化画像のステープ温度の時間変化率、あるいはシャフト圧力の空間変化率すなわち差圧から融着帯の根レベルを推定することができる。

このように、ステープ温度やシャフト圧力分布およびその解析値を二次元的に可視化することにより、炉の高さ方向、炉の円周方向の空間的な変化および時間的な推移が容易に把握可能となる。また、シャフト圧力変動について、炉頂部の検出端だけを用いるより、より早くかつ確実な検出が可能となる。

3.4 可視化画像を用いた融着帯根位置の推定

二次元可視化画像の二次加工データを用いて融着帯根レベルの推定を試みた。融着帯の推定方法は過去さまざまに報告されている<sup>19-25)</sup>。いずれも、シャフト圧力や炉体温度を用いたものである。本二次元可視化画像を用いた推定方法にも、ステープ温度分布を用いる方法とシャフト圧力分布を用いる方法が考えられる。

ステープ温度を用いる方法としては、その時間変化率から推定する方法が考えられる(図6)。融着帯ではガスの通気抵抗が大きいため、融着帯を通過するガスは必ずしもプラグフローにならず部分的なガス抜けが頻繁に生じる。この結果、融着帯の根部に相当する位置ではステープ温度が局所的に変化すると考えられる。従って、ステープ温度の単位時間あたりの温度変化量が大きい領域が融着帯の根位置を表していると仮定できる。

一方、シャフト圧力分布を用いる方法としては、その空間変化率

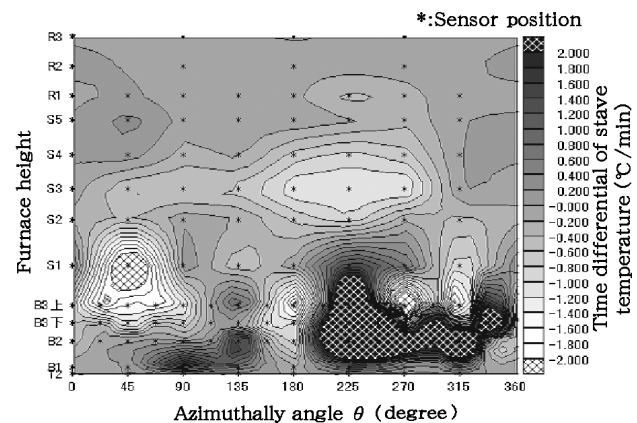


図6 ステープ温度の時間変化率分布例  
Time differential of stove temperature

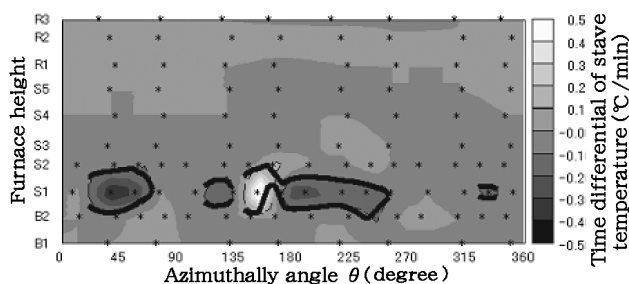


図7 ステープ温度の時間変化率から求めた融着帯根位置の推定結果例

Estimation result of root of cohesive zone by time differential rates of stove temperature

から推定する方法が考えられる。通常融着帯の圧力損失は、シャフト部の倍程度であり、例えば中心流の抑制、粉の蓄積等により通気悪化が生じた際、シャフト部であれば比較的ガス流れが分散し均一化するが、融着帯の根においては通気抵抗が大きいので、横方向にガスが分散しにくく、炉の上部方向へのガス抜けとなり、異常に高い圧力損失を示すと考えられる。すなわち、ガス抜けによる圧力上昇は融着帯を顕在化させるセンサの役割を果たしており、圧力の異常上昇位置からも融着帯根位置が検知できる可能性がある。しかしながら、シャフト圧力計は融着帯が存在すると想定されるボッシュ部では詰まり等の問題で設置点数が少ないため、ここではステープ温度の時間変化率から融着帯根位置を推定した。

ステープ温度分布から時間変化率の等値線図を作成し、時間変化率が高い、あるいは小さい閾値を設定し、閾値の等値線が形成する図形を切り出し、これらの図形の外形線を上側曲線と下側曲線に分割して、各曲線を平均化することにより、融着帯根部の上面位置及び下面位置の炉周方向分布を推定した<sup>26)</sup>。

ただし本推定方法は、融着帯周辺での小規模な吹き抜けを仮定して検知手段として用いているので、このような現象が生じない時は推定が出来ない。また、融着帯起因以外の大規模な吹き抜けが生じた場合にはそちらが検知される事になるため、この方法は適用できない。

実高炉で融着帯の根領域を推定した例を図7中の太実線で示す。融着帯を判定する時のステープ温度の時間変化率の上下限界は±0.2°C/minとした。この判定基準は高炉の操業状態や稼働年数を考慮して決める必要がある。図7から、部分的ではあるが融着帯の根レベルと想定される領域が判定できることがわかる。これらの領域を時間を追って追跡することにより炉半径方向の融着帯根位置の分布と時間変動が定量化可能である。

#### 4. 独立成分分析による可視化画像のパターン解析<sup>27)</sup>

可視化画像により、炉内の変動状況を解析するためには、炉体表面の二次元的な空間情報と時系列的な変化情報をあわせて監視する必要がある。しかしながら両者を同時に計算機のCRT画面上でオペレータが監視し続ける事は必ずしも容易ではない。したがって、二次元可視化画像からある特徴量を定義して抽出し、特徴量の時系列変化を監視することを検討した。

可視化画像の特徴量を抽出する手法としては、独立成分分析(Independent Component Analysis : ICA)を用いた。ICAは、近年画像処理や脳内活動信号処理の分野で潜在化している特徴量を精度よく

抽出する方法として注目されており、音声信号や画像等の多次元データから構成されるデータ群から統計的に独立な成分を抽出し、抽出した独立成分を評価することで多次元データの特徴を定量的に評価する技術である。本報告ではICAアルゴリズムとして、HyvarinenらのFastICA<sup>28)</sup>を用いた。FastICAでは統計的独立性の評価量として四次の統計量である尖度(kurtosis)を採用している。

可視化画像 $x(t)$ に対し適当な期間について独立成分分析を実施すると、その画像全体を代表するような基底画像 $A$ と、個々の画像が基底画像のどのような組み合わせで形成されたかを示す独立成分 $s(t)$ を分離する分離行列が抽出できる。可視化画像 $x(t)$ と基底画像 $A$ 及び独立成分 $s(t)$ の関係は次式で表せる。

$$x(t) = As(t) \tag{1}$$

ここで、基底画像の数は基本的には任意に設定することができるので、基底画像を例えば5つと設定すると、この5つの基底画像に対する5つの独立成分 $s(t)$ が決定され、この独立成分の推移を監視することが、二次元可視化画像のアニメーション画像を監視することに対応する。

図8は、ある高炉の一年分の画像情報化したシャフト圧力画像群について、独立成分数を5と設定して独立成分分析を実施した結果、得られた5つの基底画像 $A_1 \sim A_5$ (図中右側)と、各基底画像に対する独立成分 $s_1(t) \sim s_5(t)$ の時系列推移(図中左側の下5列)、及び送風量、シャフト圧力の時間変化率の変化量を示したものである。

基底画像は5つ描かれているが、横軸と縦軸はシャフト圧力の二次元可視化画像と同様で、横軸が高炉の円周方向、縦軸が高炉の高さ方向である。基底画像には高炉の状況が明らかに示された画像がいくつかある。例えば、基底画像 $A_2$ は圧力分布が炉の高さ方向で水平となっており、高炉の圧力分布の基本となる画像と考えられる。

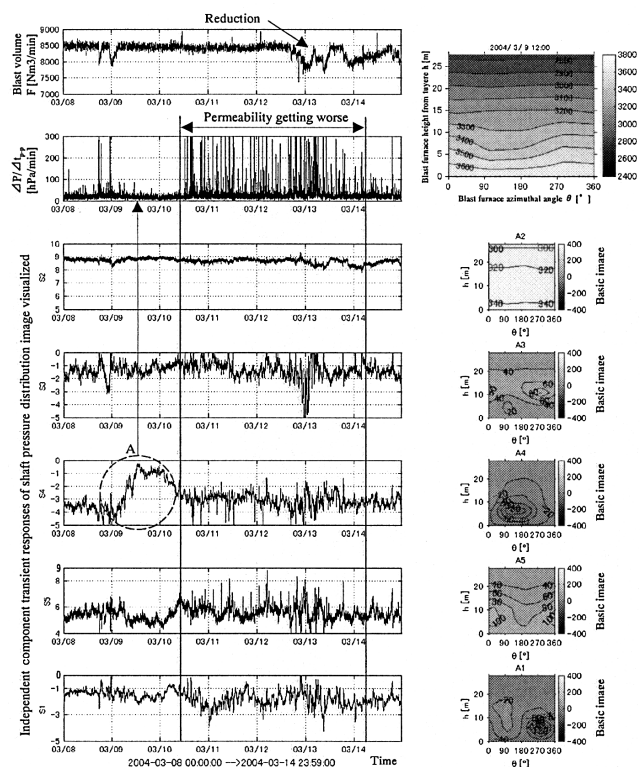


図8 シャフト圧力画像の基底画像と独立成分の推移 Independent component transient responses of shaft pressure distribution image

また、基底画像 $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ は圧力変動の起因状況を表す画像、 $A_2$ は圧力変動状況を表した画像に対応していると考えられる。炉内状況と基底画像の関連については今後定量的な検証が必要である。

送風量の推移図から、3月10日12時頃から炉内通気性が悪化し、3月12日18時頃から減風するに至ったことが推定される。対応する時期の独立成分をみると、炉の安定状況を表す基底画像 $A_2$ の独立成分が低下しており、その他の基底画像の独立成分が変動していることがわかる。また基底画像 $A_4$ に対応する独立成分 $S_4(t)$ に着目すると、炉内通気が悪化する約1日前に大きく変動していたことがわかる(図8中A部)。

このように、単に二次元可視化画像を時々刻々観察するだけでなく、独立成分分析を用いて特徴量を抽出し、その特徴量すなわち独立成分の変化を追跡することにより、より定量的かつ精度の良い操業監視が可能になると期待される。

### 5. 大規模データベースオンラインモデリング<sup>29)</sup>

高炉の操業を監視する場合や、操業アクションを決定する場合、過去の操業データや操業推移図を参考にすることは日常的に行われている。この過去類似データの検索は、主として経験や記憶に基づいて行われているが、当然見落としや見間違いが生じる可能性がある。従って、過去のデータを有効に活用するために、この過去類似データの検索プロセスの自動化について大規模データベースオンラインモデリング技術を応用することを検討した。さらに、過去類似データの検索プロセスの自動化が可能となれば、過去のデータから将来予測も可能となると期待される。

近年、計算機ハードウェアやデータベースシステム技術の発展に伴って大量データの蓄積と高速な検索が可能となったこと等を背景に、“Just-In-Time(以後、JITと略す)モデリング”<sup>30,31)</sup>或いは“Lazy Learning”<sup>32,33)</sup>と呼ばれる新しい考え方の局所的なモデリング手法が注目を集めている。これらは、定格設計点以外の幅広い動作範囲において観測したデータをそのままデータベースとして蓄積しておく、システムの予測等の必要が生じる都度、入力である“要求点(Query)”に関連性の高いデータをデータベースから“近傍”データとして検索し、検索したデータの出力を補間する局所モデルを構成して“要求点”の出力を得るモデリング手法である。

またこの局所モデルはシステムの予測が必要となった時に構成し、予測後には廃棄し、観測データの更なる蓄積に対応していく点に特徴を有する考え方である。このとき、“近傍”の選択は原理的に時間には依存しないとされ、システムの特徴性を顕在化する目的に合わせて観測データの位相空間までを拡張して取扱うことができる。定性推論の分野における事例ベース推論<sup>34)</sup>も同様の考え方に基づいている。

JITモデリングにおける課題は、“要求点”に類似した“近傍”データを検索するために、全ての観測データについて“要求点”との距離を求めて順序付ける処理を、システムの予測等を実施する都度に行わなければならない点にある。高炉は物理現象が複雑かつ非線形性が強いプロセス(システム)であるため既に数多くの観測データ点が設置されており、観測データ変数の位相空間までを拡張して大規模なデータベースを構築しようとする場合、計算負荷が非常に大きくなりオンライン適用が困難となる。

#### (1)過去類似例検索の考え方

そこで、本報は、大規模なデータベースにJITモデリングをオン

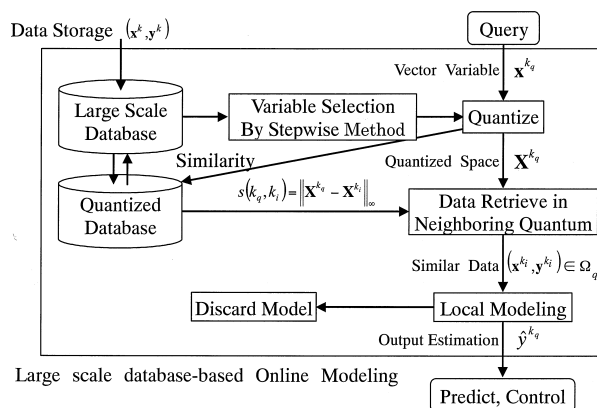


図9 大規模データベースオンラインモデリングによる過去類似例検索システムのアルゴリズム

#### Large scale database online modeling

ラインで適用するにあたり、このような問題を回避して実用となる手法を検討した(図9)。

本手法は、①ステップワイズ法を応用して観測データ変数の位相を含めた膨大な変数の中からシステムの出力に寄与する変数を選択してノイズとなる変数を積極的に削除し、②選択された変数で構成される多次元位相空間の観測データを量子化した検索用データベースに格納しておき、③“要求点”の“近傍”データを量子化された検索用データベース上で量子単位での検索を行うことで検索の効率化と計算負荷の大幅な低減を図り、④検索した近傍データの出力を補間する局所モデルを用いて“要求点”の出力を推定する手法である。このとき、局所モデルは都度廃棄して観測データの更なる蓄積に備え、対象システムの経時的な特性変化に対応していく点はJITモデリングと同じである。

本報では、この手法を“大規模データベースオンラインモデリング(LOM: Large scale database Online Modeling)”と呼び、本手法の有効性を検証するために高炉操業に適用した事例を報告する。

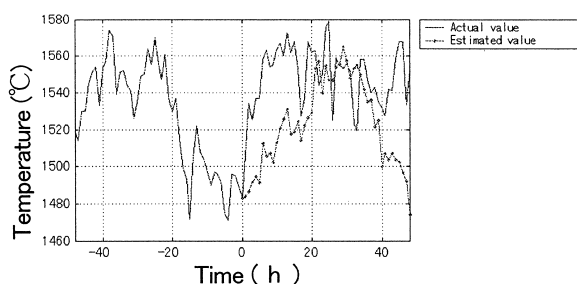
#### (2)過去類似例の検索例

ここでは溶銑温度に注目した過去類似事例検索についての検索例を示す。まず、準備された高炉の操業データベースの中から、溶銑温度の検索に有効と考えられるデータ項目を選択する。具体的には、データベースから“要求点”の過去8時間分のデータを抜き出し、“要求点”の1時間後の溶銑温度と相関の高いデータ項目を、ステップワイズ法を用いて選択する。選択された項目の全データを量子化して圧縮したうえで、相似度を尺度に類似例を検索する。相似度は $\infty$ ノルムを用いた。

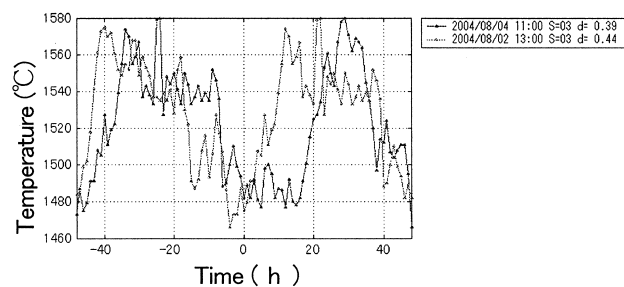
$$\|X\|_{\infty} = \max(|X_1|, |X_2|, \dots, |X_n|) \quad (2)$$

過去類似事例の検索例を図10に示す。図10は、類似例を検索したい基準日を0時として前後48時間の推移を表示しており、図10a)が溶銑温度の実績値で検索したいデータ、図10b)が類似例として検索され溶銑温度の推移図である。検索には8時間分のデータを用いたが、前後48時間、計96時間にわたり、似たような推移を示すデータセットが2例検索されたことがわかる。また、図10a)には、図10b)の類似例の現時点0時から未来のデータを平均したものを予測値として示した。これについてもよく一致していることがわかる。

実績値とこの1時間後の予測値について、他の期間も含め多数のデータについて相関を調べたが、相関係数でも0.7程度の比較的高い値を示している(図11)。



a) Actual and estimated molten iron temperature



b) Actual molten iron temperature of past similar data sets

図10 過去類似例の検索例  
The past similar data sets and estimated

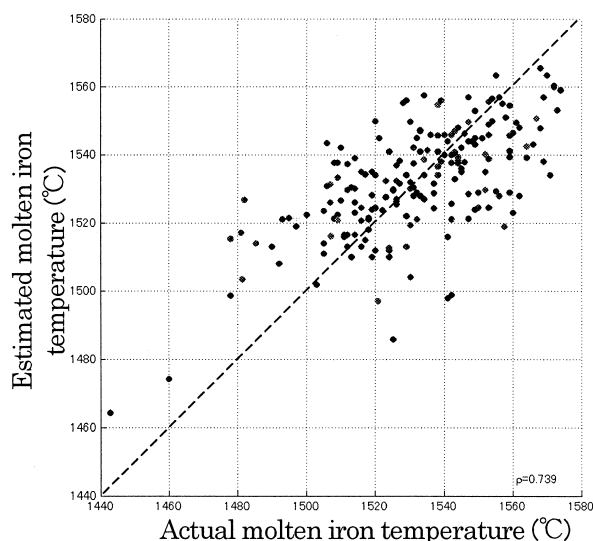


図11 溶銑温度の実測値と予測値の比較

Correlation between after 1 hour actual molten iron temperature and estimated molten iron temperature

本システムの更なる検索精度向上を図るため、検索の基礎となるデータベースの構成(項目内容、項目数、時間刻み幅、蓄積時間等)、データベースからのデータの選択方法、量子化数、相似度、局所モデルなどについて、検討や最適化を進めている。

## 6. 結 言

ステップ温度やシャフト圧力のデータを二次元的に画像化することにより、シャフト圧力変動やスリップ発生にともなう炉内の空間的な変動を客観的に可視化することが可能になった。データの空間

変化率、時間変化率などと操作データの推移を組み合わせることにより、シャフト圧力変動等の早期検出が可能となる。

また可視化画像から独立成分分析を用いて特徴量を抽出し、その時系列変化を監視することにより、空間的かつ時系列双方の監視が容易となると期待される。

大規模データベースオンラインモデリングを用いて、高炉データの過去類似例の検索を試みたが、検索方法として有用であり、さらに将来予測モデルとしても可能性の高いことを確認した。

## 参考文献

- 1) Miyasaka, N., Sugata, M., Hara, Y., Kondo, S.:Tetsu-to-Hagané. 58, 18(1972)
- 2) Kuwano, Y., Yamamoto, S., Ohtani, K., Honda, K., Chan, T., Nakane, C.:Tetsu-to-Hagané. 58, 1203(1972)
- 3) Shimizu, M., Yamaguchi, A., Inaba, S., Narita, K.:Tetsu-to-Hagané. 68, 936(1982)
- 4) Kawata, H., Kishimoto, S., Maki, A., Saijo, Y., Wakai, H., Yamamoto, K.:Tetsu-to-Hagané. 79, T5(1993)
- 5) Yagi, J.:Tetsu-to-Hagané. 69, 1242(1983)
- 6) Takatani, K.:Tetsu-to-Hagané. 81, 1031(1995)
- 7) Nogami, H.:Tetsu-to-Hagané. 89, 211(2003)
- 8) Sugiyama, T., Sugata, M.:Seitetsu Kenkyu. (325), 34(1987)
- 9) Yagi, J., Akiyama, T.:CAMP-ISIJ. 2, 2(1989)
- 10) Yamazaki, M., Sato, M., Kiguchi, M., Iida, O., Fukumura, S.:CAMP-ISIJ. 2, 6(1989)
- 11) Nagai, N., Arai, A., Matsuda, K., Kadoguchi, T., Yabata, T.:CAMP-ISIJ. 2,10(1989)
- 12) Otsuka, K., Matsuoka, S., Aminaga, Y., Yoshida, M., Yokoi, T., Inada, T.:CAMP-ISIJ. 2, 14(1989)
- 13) Takarabe, T., Nakamori, T., Oda, H., Taira, M., Watanabe, S., Seki, O.:CAMP-ISIJ. 2, 18(1989)
- 14) Niwa, Y., Sumikago, T., Sakurai, M., Aoki, T.:CAMP-ISIJ. 2, 22(1989)
- 15) Ito, M., Matsuzaki, S.:CAMP-ISIJ. 15, 927(2002)
- 16) Matsuzaki, S., Ito, M.:CAMP-ISIJ. 15, 928(2002)
- 17) Ito, M., Matsuzaki, S.:CAMP-ISIJ. 16, 300(2003)
- 18) Ito, M., Matsuzaki, S., Kakiuchi, K., Isobe, M.:Shinnittetsu Giho. (379), 33(2003)
- 19) Irita, T., Isoyama, M., Abe, T., Hasegawa, J., Okuno, Y.:Tetsu-to-Hagané. 68, S107(1982).
- 20) Kase, M., Sugata, M., Yamaguchi, K.:Tetsu-to-Hagané. 66, 1928(1980)
- 21) Ashimura, T., Morishita, N., Inoue, Y., Higuchi, M., Baba, M., Kanamori, K., Wakuri, S.:Tetsu-to-Hagané. 80, 457(1994)
- 22) Sasahara, S., Yamaguchi, A., Shimizu, M., Sugiyama, T., Inaba, S., Ono, R., Hachiya, S.:Tetsu-to-Hagané. 72, A5(1986)
- 23) Yoshida, Y., Kitayama, S., Ishiwaki, S., Nagai, N., Arai, A.:CAMP-ISIJ. 6, 49(1993)
- 24) Sato, T., Yamaoka, Y., Takebe, T., Kimura, R., Yamada, Y., Ohno, Y., Miyazaki, T.:Tetsu-to-Hagané. 72, A1(1986)
- 25) Hukushima, T., Ohno, Y., Yamada, Y., Kondo, K., Sumigame, T., Kishimoto, S.:Nippon Koukan Gihou. 99, 1(1983)
- 26) Ito, M., Matsuzaki, S.:CAMP-ISIJ. 16, 1109(2003)
- 27) Ito, M., Matsuzaki, S., Matsushita, N., Mori, J., Uchida, K., Ohgai, H.:CAMP-ISIJ. 18, 1141(2005)
- 28) Hyvarinen, A.:IEEE Transactions on Neural Networks. 10, 626(1999)
- 29) Ito, M., Matsuzaki, S., Ogai, H., Odate, N., Uchida, K., Saito, S., Sasaki, N.:Tetsu-to-Hagané. 90, 917(2004)
- 30) 鄭秋宝, 木村英紀:Inverse/Predictive Just In Time制御. 日本鉄鋼協会“大量データをベースとした省力化のための診断・制御の高度化”発表会資料. 2001
- 31) Zheng, Q., kimura, H.:Trans. Soc. Instrum. Control Eng. 37, 640(2001)
- 32) Atkeson, C.G., Moore, A.W., Schaal, S.:Artificial Intelligence Review. 11, 11(1997)
- 33) Bontempi, G., Birattari, M., Bersini, H.:Int. J. Control. 72, 643(1999)
- 34) Tsutsui, H., Kurosaki, A., Sato, T.:Trans. Soc. Instrum. Control Eng. 33, 947(1997)