

Javaによる統合シミュレーションとDBオンラインモデリング技術

早稲田大学大学院
情報生産システム研究科
教授

大貝 晴俊
Harutoshi Oogai



1. はじめに

Java技術によって統合した大規模シミュレーション技術と、データベースを利用したオンラインモデリング技術について、高炉を例に紹介する。

高炉プロセスは、大量の溶銑を安価に供給するため大型化が進められ、現在では1日の生産量が1万トンを超えている。またその原燃料は、良質な原燃料の枯渇から、従来と比較して品質が低下しており、操業にとって好ましくない品質の原燃料を使用せざるを得ない場合が生じている。このため以前よりも、操業の不調が増加しており、高炉操業を予測し、現場の操業を支援するシステムの開発が求められている。

高炉のシミュレーション技術として、これまで各種の物理モデル¹⁾⁻⁷⁾が開発されてきた。過去に構築されたモデルの中には、計算機性能の制約により、部分モデルとして構築され、現在は十分に利用されていない有効なモデルが多く存在する。そこで既存の完成されている部分モデルや、新たに開発するモデルを組み合わせ統合することで、高炉の大規模なシミュレータすなわち高炉統合シミュレータを構築する。この場合、最初からシミュレータを構築するよりも少ない労力で、大規模かつ複雑なシミュレーションを行うことが可能となる。しかし異なるコンピュータ環境（プラットフォーム）に存在するシミュレータや異なるプログラム言語で記述されたシミュレータの統合は、シミュレータ間の互換性が弱いため一般的に困難である。そこでこのような統合を実現するために、JavaのRMI⁸⁾⁻¹⁰⁾ (Remote Method Invocation)と、JNI⁸⁾⁻¹¹⁾ (Java Native Interface)の技術を利用することで解決する。

次に近年の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"¹⁷⁾⁻¹⁸⁾あるいは"Lazy Learning"¹⁹⁾⁻²⁰⁾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、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き、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。局所モデルを都度廃棄して、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。定性推論の分野における事例ベース推論²¹⁾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"データセットを検索するために、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うしなければならないという点にある。例えば高炉は、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、観測データ変数を位相（時間）空間まで拡張して、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。

そこで大規模なデータベースにJITモデリングをオンラインで適用するにあたり、このような問題を回避して、実用となる手法を説明する。

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セット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"データセット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"データセット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。

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-based Online Modeling)"と呼び、本手法の有効性を検証するために、高炉への応用事例を説明する。

2. 高炉プロセスとJavaによるシミュレータ統合技術

2.1 高炉プロセス

高炉は、溶けた銑鉄を製造するための巨大な反応器で、炉内に気相、液相、固相の3相が共存し、それらが、相互に影響を及ぼし合う複雑さをもったプロセスである。銑鉄は原料である鉄鉱石とコークスを上部の炉頂から、交互かつ層状に装入し、高炉下部の羽口から高温の熱風を吹き込み、コークスを燃焼させ、燃焼で発生する高温の還元ガスによって、鉄鉱石中の酸化鉄を、還元・溶解して製造される。このように高炉は、ガスと固体間で、熱交換と還元反応を行いながら、固体は下降し、気体は上昇する向流移動層型反応器であり、熱の供給およびガスの通気、固体の荷下がり、の三つが円滑に行われることが、操業において重要な要素である。

またこの反応器は、Fig.1¹⁾に示すように、徳利型の形状をした容器で、炉口部、炉胸(シャフト)部、炉腹(ベリー)部、朝顔(ボッシュ)部、炉床部の五つの部分から構成され、炉胸部と朝顔部の二つは、円錐台形、炉口部と炉腹部、炉床部の三つは、円柱形の形状である。

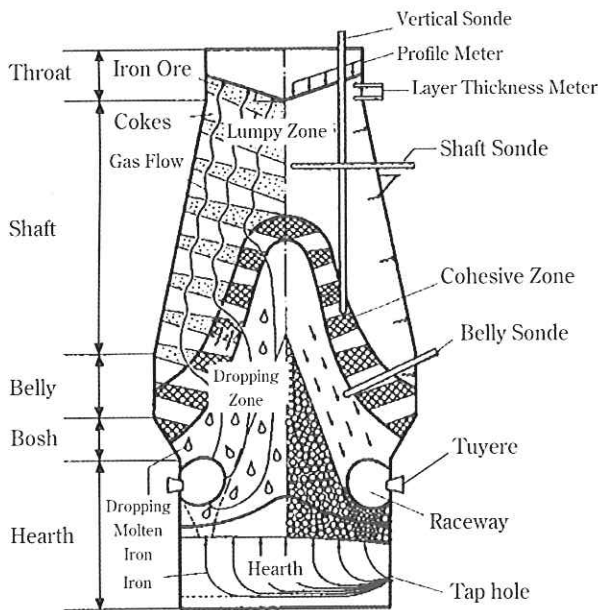


Fig.1 Outline of a blast furnace process

2.2 Javaによるシミュレータ統合技術

高炉の部分シミュレータを統合するにあたり、JavaのRMIとJNIの技術を用いた。またJavaからFortranの変数にアクセスするために開発されたツール、Jni4FCB⁸⁾について説明する。

・RMI (Remote Method Invocation)

RMI⁹⁾⁻¹⁰⁾はJavaの環境で分散オブジェクトを利用できる仕組みを提供する。分散オブジェクトとは、ネットワーク上に分散して配置されたオブジェクトのことであり、複数のコンピュータ上にある分散オブジェクトを利用して、一つのアプリケーションを分散アプリケーションとして実行することができる。

・JNI (Java Native Interface)

JNI^{8),11)}とはJavaプログラムからCやC++、Fortranなどから生成されたネイティブコード(CPU依存コード)を実行するための仕組みであり、Javaの他言語インターフェースである。JNIはネイティブコード内で以下のことが実行可能である。

・Jni4FCB (JNI for Fortran Common Block)

Jni4FCB⁸⁾とはJavaからFortranのCommon Blockの変数に、アクセスを可能にするインターフェイスプログラム生成ツールである。このアクセスの仕組みの概念図をFig.2に示す。JavaからJNIを利用して、Cの関数を呼び出すことで、FortranのCommon Blockの変数にアクセスする。Jni4FCBは、JavaからFortranにアクセスするために必要なプログラム(Fig.2の例では、RabitFCB.java, RabitFCB.c)を自動的に生成する。

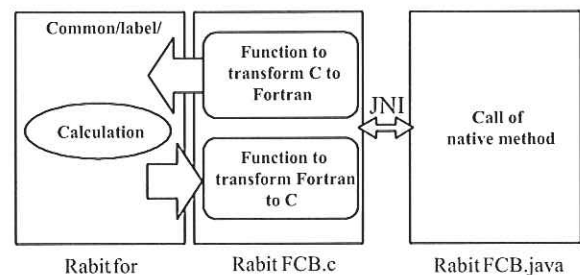


Fig.2 Basic concept of the mechanism accessing Fortran from Java

3. Javaによる高炉統合シミュレータ²⁸⁾

高炉の大規模かつ複雑なシミュレーションを行うために、既存の完成されている高炉の部分シミュレータを有効に活用し、それらをJavaで統合して、高炉統合シミュレータを構築した。統合を行った高炉の部分シミュレータは、RABIT^{6),7),15)}モデルとBRIGHT^{1),3)}モデルであり、RABITモデルは高炉の装入物分布を計算するモデル、BRIGHTモデルは高炉の炉内現象を計算するモデルである。

ここで複数の部分シミュレータをJavaで統合するために、2.2節で述べたJavaのRMIとJNI、Jni4FCBを応用した。RMIとJNIを用いたRABITとBRIGHTのシミュレータ統合の概略図を、Fig.3に示す。RMIは異なるコンピュータ環境にある部分シミュレータの統合を可能にし、JNIはFortran言語で記述された部分シミュレータの統合を可能にする。Jni4FCBは、CやJavaのインターフェースを生成する。またRABITモデルの計算結果を、BRIGHTモデルが利用する形式をしている。

3.1 RABITモデルの概要

RABIT^{6),7),15)}モデルは、炉内のガス流れおよび高炉の装入物の落下・堆積過程、鉱石によるコークス層崩れの現象などが考慮された高炉の装入物分布モデルである(Fig.4¹⁵⁾)。

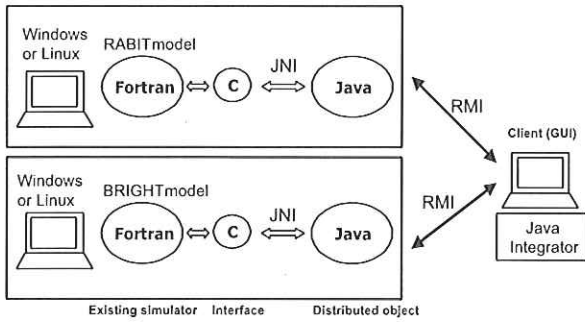


Fig.3 Overview of integrating BRIGHT model and RABIT model

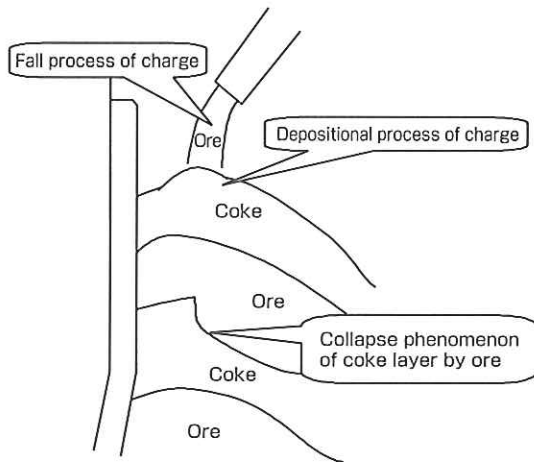


Fig.4 Burden distribution model

3.2 BRIGHTモデルの概要

BRIGHT^{1),3)}モデルは、高炉の炉内現象を計算する2次元数式モデルである。BRIGHTモデルは、Fig.5^{1),16)}に示すように、装入物分布モデル、ガス流れモデル、固体流れモデル、化学反応モデル、伝熱モデルの5つのサブモデルと、これらを統合し、融着帯形状を推定するモデルで構成される。

3.3 高炉統合シミュレータの実行の流れ

Javaによる高炉統合シミュレータは、BRIGHTモデルと、RABITモデルが同じコンピュータ環境で動作可能である場合は、計算機1台のみで構成できる。その場合には、JNIのみを用いて実行でき、処理フローをFig.6に示す。

まずJavaのメインメソッドから、RABITの計算に必要な入力情報を引数として、JNIを利用し、Cコードを介して、FortranのRABITが計算される。続いてそのRABITの計算結果と、BRIGHTの計算に必要な入力情報を引数として、同様にFortranのBRIGHTが計算され、BRIGHTの計算結果がJavaのメインメソッドに返さる。その後計算結果は、データベースに格納される。ここではRABITの計算結果を、BRIGHTが利用する形となっている。また入力情報は、高炉設備諸元や操作条件（コークス比、送风量、微粉炭吹き込み量など）であり、BRIGHTとRABITのそれぞれのモデルに、Javaから与えている。出力情報は固体温度、ガス温度、固体圧力、ガス圧力、出銑量などである。

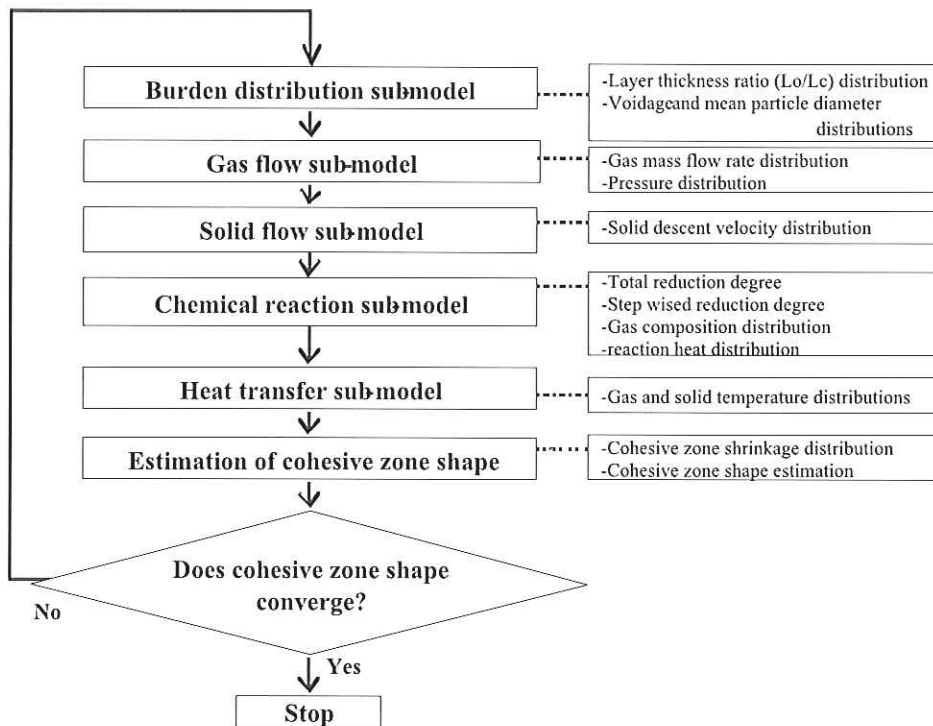


Fig.5 Configuration of BRIGHT model

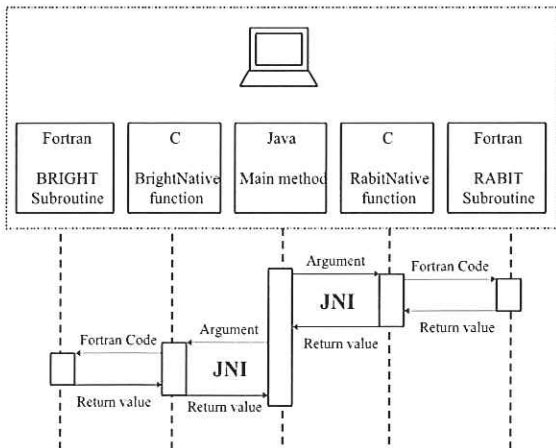


Fig.6 Process flow of the integrating simulator by using JNI

3.4 シミュレータ計算結果と実測データの統合可視化

高炉統合シミュレータの計算結果を、実績データとともに可視化の画面をFig.7に示す。Fig.7の左側のコンタ図は、高炉統合シミュレータの計算結果を高炉の半径方向の断面図として、圧力や温度などをその値に応じて、異なる色と等値線で示したものである。ここでは固体温度とガス圧力の炉内分布を示している。

下のコンタ図¹³⁾は、高炉設備上で計測される実測データの空間的分布特性を画像情報で示している。このコンタ図は、各計測センサの実測データを、そのセンサの3次元設置位置情報と正確に対応させて、炉高方向と炉周方向の2次元平面上に射影し、圧力や温度などを、その値に応じて異なる色と等値線で示したものである。

さらに中央のグラフは、画像情報化された実測データと、計算結果の両者を統合表示している。縦軸に高炉の高さと、横軸に圧力や温度の大きさを示す。

4. Just-In-Timeモデリング¹⁷⁾¹⁸⁾

大規模データベースオンラインモデリング(LOM)の基本的な概念となるJITモデリングを、以下に簡単に説明する。

対象とするシステムは、非線形で動的なシステムであり、次式のような回帰式モデルで与えられるとする。

$$y(t+p)=f(y(t),y(t-1),\dots,y(t-ny),u(t-d),u(t-d-1),\dots,u(t-d-nu)) \quad (1)$$

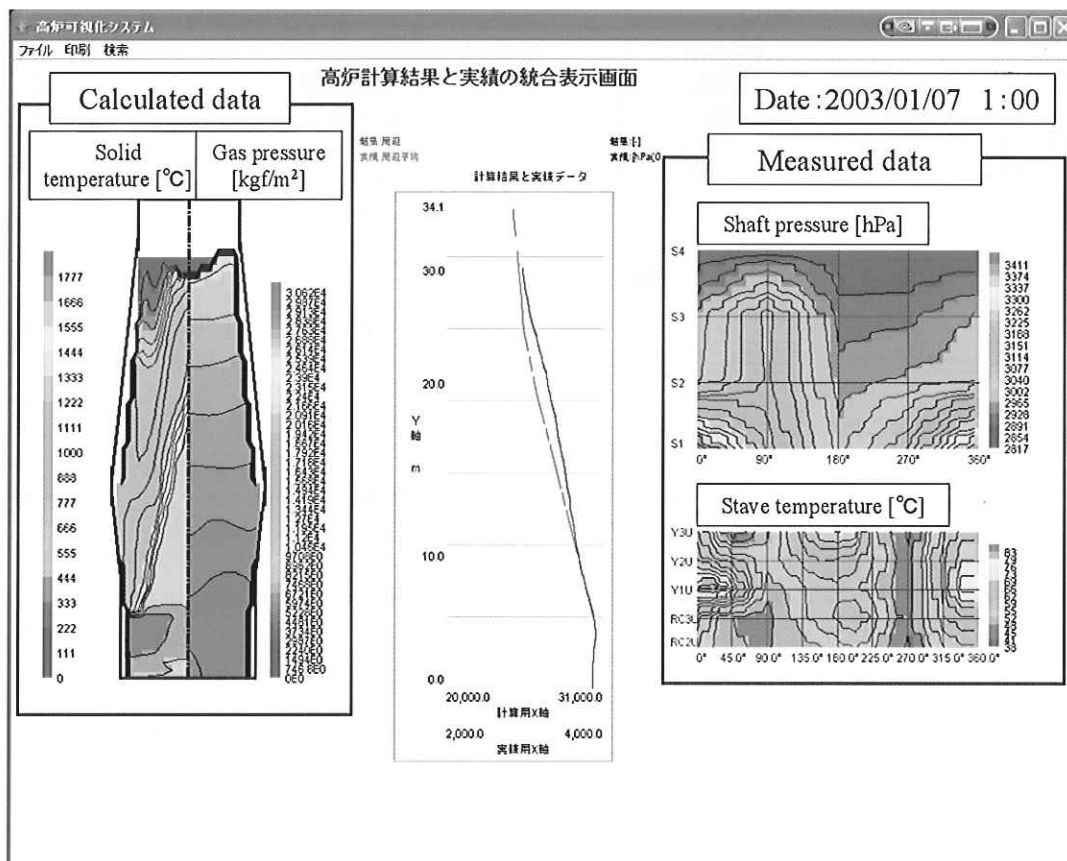


Fig.7 Image panel of the integrated visualization system

ここで

- $u(t)$: 時刻 t におけるシステムの制御入力ベクトル
- $y(t)$: 時刻 t におけるシステムの観測出力ベクトル
- n_u : 制御入力ベクトルの次数
- n_y : 観測出力ベクトルの次数
- p : 予測時間
- d : むだ時間
- f : 未知の非線形関数

である。ここでシステムの入力ベクトル x^k と、出力ベクトル y^k を、式(2)、式(3)のように再定義すると、

$$y^k = y(k+p) \quad (2)$$

$$x^k = \{y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-n_u)\} \quad (3)$$

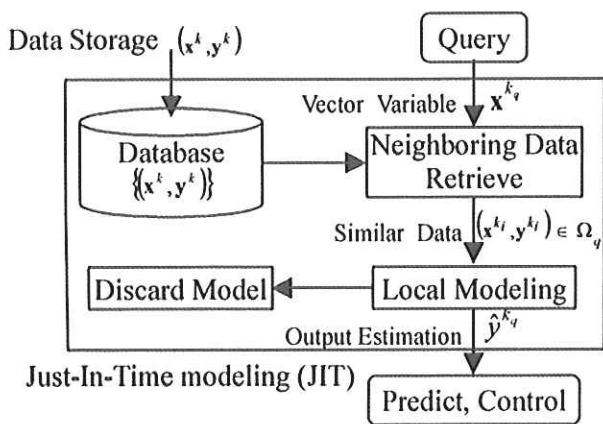


Fig.8 Just-In-Time modeling.

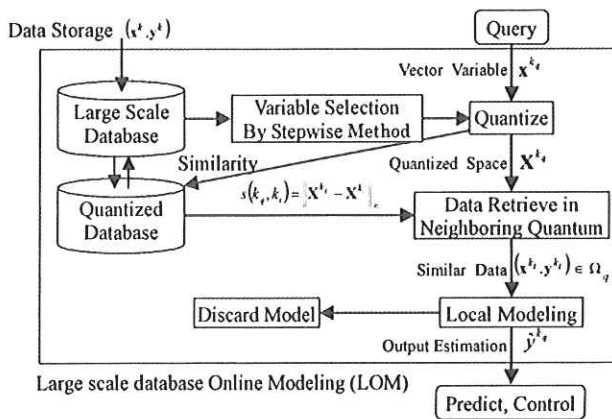


Fig.9 Large scale database-based Online Modeling.

時間の推移に伴い、入力ベクトル x^k と出力ベクトル y^k のデータセットが、 (x^1, y^1) 、 (x^2, y^2) 、 \dots の如く、対象とするシステムから大量に得られ、データ集合 $\{(x^k, y^k)\}$ 、 $(k=1, 2, \dots)$ として、データベースに蓄積される。 k は離散化時間である。このとき JITモデリングは、予測や制御の要求の都度、蓄積

されているデータ集合 $\{(x^k, y^k)\}$ から、非線形関数 f を求めることに相当する。

例えば、システムの予測が必要となったとき、システムの現在の状態 $\{(x^{k_q}, y^{k_q})\}$ を"要求点(Query)"とし、"要求点"に類似した"近傍"のデータセット $\{(x^{k_i}, y^{k_i})\}$ ($k_i < k_q$)が、過去に観測されてデータ集合に存在すれば、現在のシステムの時間的发展を記述する(すなわち予測する)非線形関数 f^{k_q} は、過去の非線形関数 f^{k_i} と似たものになるとする考え方である。"近傍"データセットが複数存在すれば、これらのデータセットの出力 y^{k_i} を補間する局所モデルを用い、システムの出力 y^{k_q} を予測する。

予測後その都度、局所モデルは廃棄され、観測データが新たに蓄積されて、データ集合 $\{(x^k, y^k)\}$ が更新されていくことで、対象プロセスの経時的な特性変化が次回予測等に反映される (Fig.8)。

5. 大規模データベースオンラインモデリング(LOM)²⁹⁾

大規模データベースオンラインモデリング(LOM)は、JITモデリングを実プロセスの多次元位相空間に適用するにあたり、ステップワイズ法による多次元位相空間の低次元化と、低次元化した多次元位相空間の量子化による近傍検索の効率化と、要求の都度生成し、使用后廃棄される局所モデルで構成される (Fig.9)。

5.1 ステップワイズ法による多次元位相空間の低次元化

ステップワイズ法は回帰式モデルにおいて、できるだけ入力変数の数を少なくし、かつ観測値と予測値の差の平方和(残差平方和)が実用に耐え得るほど小さいものとするために、ある検定基準を設けて入力変数の追加、除去を行う方法である²⁷⁾。

高炉の場合、観測データの測定項目自体が膨大な数であり、位相変数まで考慮すると、極めて大きな次元数の多次元空間を取扱わなければならない。

5.2 多次元位相空間の量子化と"近傍"の検索

LOMでは、大規模かつ大量データをオンラインで高速に扱うことを実現するため、多次元位相空間上の観測データを、量子化された検索用データベースに格納しておき、この量子化データベース上で"要求点"の"近傍"データセットを、量子単位で検索することによって、検索の効率化と計算負荷の大幅な低減を図る。

量子化を導入することにより、要求点と検索点との相類似度 s は離散値となり、"近傍"を検索するには、まず"要求点"を含む同一量子、隣の量子、 \dots 、というように、量子化データベース上で、単純かつ効率的に検索することができる (Fig.10)。

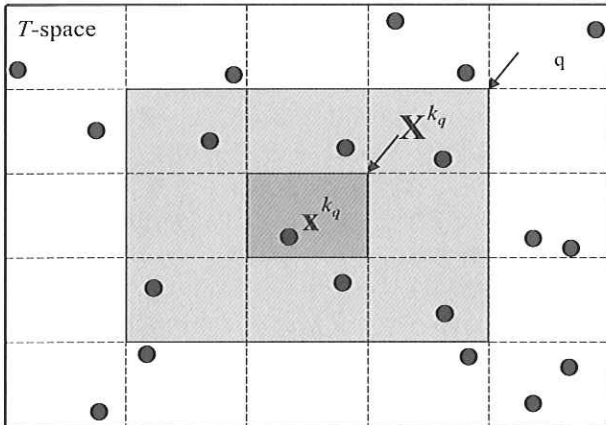


Fig.10 Neighboring quantized space of query.

5.3 局所モデル

"要求点"ベクトル x^{k_q} が与えられたとき、"要求点"の"近傍"データセットに、局所モデルを用いて、出力の推定を行う。

JITモデリングにおける代表的な局所モデルには、重み付き線形平均法(LWA)や、重み付き局所回帰法(LWR)などが提案されているが、ここでは高炉操業データへの適用の第1ステップとして、最も単純な相加平均法を用いた。

すなわち、"要求点"ベクトル x^{k_q} に対する出力の推定値ベクトル y^{k_q} を、

$$\hat{y}^{k_q} = F(x^{k_q}) = \frac{1}{M} \sum_{y^k: (x^k, y^k) \in \Omega_q} y^k \quad (4)$$

で算出する。ここでMは、近傍空間 Ω_q に属する出力ベクトル y^k の個数である。

5.4 高炉操業における大規模オンラインデータデータベースモデリング

高炉には温度、圧力、組成をはじめ、各種物理量の検出端が多数設置されている。各計測値はオンラインでプロセスコンピュータ(以後プロコンと略す)に伝送され、蓄積される。

これらプロコン内に蓄積される大量の操業データをプロコンから取り出して、大規模データベースを構成し、第3章で述べた大規模データベースオンラインモデリング(LOM)を適用して、過去の類似操業事例の検索と、検索結果に基づく将来予測を実施し、本手法の有効性を検証した。

名古屋製鉄所第3高炉の操業データを対象データベースとした。データ項目数は、145項目、サンプリング時間は1時間である。データ収集期間は、2003年4月1日~2004年1月28日でデータ点数は、7266点である。

LOMではステップワイズ法を用いて、1時間後の溶銑温度 $y_l(t+1)$ に対する変数の寄与率(F値)を計算して、入力変数の追加及び除去を実施した。追加検定基準 F_{in} と除去検定基準 F_{out} に、一般に検定基準として採用されるF値が、20以上となる

Table1. Selected variables for molten iron temperature after 1 hour.

Selected variables by stepwise method		F value
Number	Content	
1	Molten iron temperature (present)	21225
2	Molten iron Si concentration (before 1 hour)	496
3	Molten iron Ti concentration (present)	273
4	Tapping velocity (present)	215
5	Molten iron temperature (before 4 hours)	104
6	Molten iron temperature (before 1 hour)	87.3
7	Top gas CO concentration (present)	76.0
8	Top gas CO concentration (before 1 hour)	71.3
9	Pulverized Coal Ratio (present)	65.2
10	Taphole number (before 2 hours)	65.1
...
32	Slag Al2O3 concentration (before 2 hours)	20.4

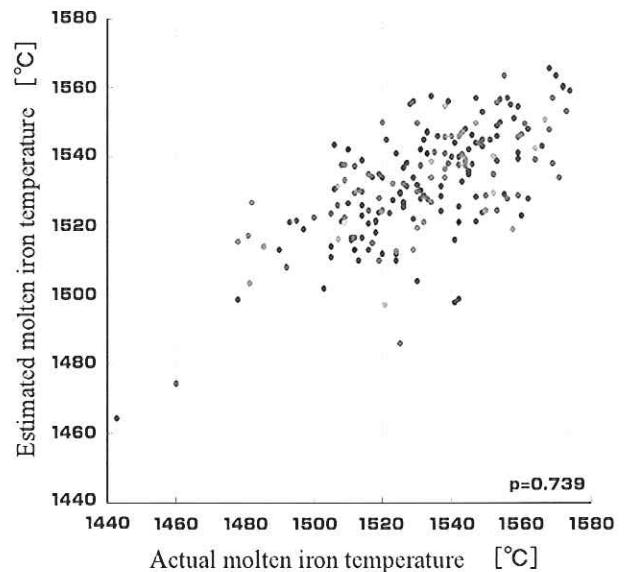


Fig.11 Correlation between after 1 hour actual molten iron temperature and estimated molten iron temperature by LOM.

位32変数を選択した(Table 1)。

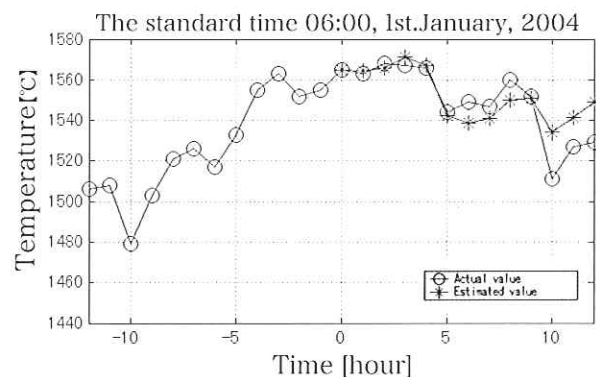
量子化数の設定にあたっては、いくつかの指針があるが、ここではスタージェスの公式によって得られる量子数等を参考にして、何通りか設定し、溶銑温度の予測精度が最良となる量子数 20 を選択した。溶銑温度の予測精度は、全データ7266点のデータセットからランダムに、200セットを取り出して、それぞれを"要求点" x^{k_q} とし、LOMモデルによる1時間後の溶銑温度の予測値、 $y_l^{k_q+1}$ と、実績値 $y_l^{k_q+1}$ との相関で評価した。このとき相関係数 ρ は、0.739であり、1時間後の溶銑温度が良好に予測できることが確認できた (Fig.11)。

大規模データベースの中から、任意のデータセットを"要求点"ベクトル x^{k_q} とし、量子化された多次元位相空間上で"近傍"にある量子内に存在するデータセットを、過去のデータセットの中から選択することで、"要求点"と類似する過去の操業事例を効率よく検索することができる。

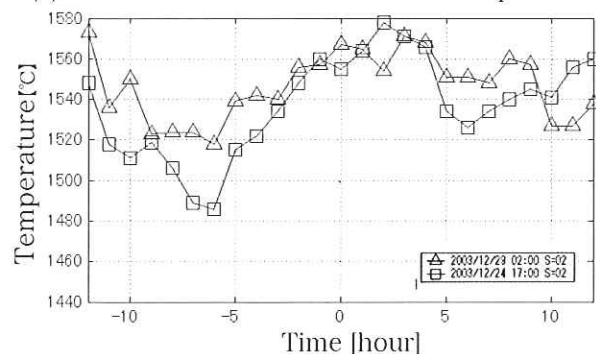
例えば2003年4月1日～2004年1月28日の全データセット7266点の中から、2004年1月1日6:00のデータセットを取り出して"要求点"とし、"要求点"より過去のデータセットから、"近傍"データセットを検索すると、相類似度 $S=2$ の近傍量子内に、2つのデータセットが存在し、2004年1月1日6:00と似た操業状態が過去に2ケース存在したことがわかる (Fig.12.(b))。(このとき相類似度 $S=0,1$ すなわち同一量子や一つ隣の量子には、類似的な操業事例が存在しなかった。)

検索された2つの"近傍"データセットの出力ベクトル y^k に対し、式(4)を用いて出力変数すなわち1時間後の溶銑温度を推定し、その値をFig.12.(a)に示す。Fig.12.(a)からステップワイズ法で変数の寄与率を計算する際に、出力変数と定義した1時間後の溶銑温度が、精度良く予測できていることが確認できた。

さらに、この2つの"近傍"データセットの1時間後以降の実績値を用いて、1時間後だけでなく、基準時間から、将来の12時間にわたる溶銑温度の推移を式(4)を用いて予測してみると、2004年1月1日6:00以降12時間の溶銑温度推移の実績値と、予測値は、良く一致することが確認できた (Fig.12.(a))。



(a) Actual and estimated molten iron temperature



(b) Actual molten iron temperature of the past similar data sets

Fig.12 The past similar data sets and estimated result of molten iron temperature by LOM.

また高炉操業データは、現在、逐次更新中であり、幅広い動作範囲で、観測データがそのままデータベースとして蓄積されることにより、幅広い操業範囲での高炉の操業予測も可能であると考えられる。

6. おわりに

本稿では、高炉操業を支援するための、Javaによる高炉統合シミュレータの構築技術について説明した。統合シミュレータにおいては、既存の完成されている部分シミュレータを有効に活用して、Javaで統合し、新たにシミュレータを再構築するよりも少ない労力で、利用しやすい大規模なシミュレータが構築できることを示した。

また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、大量のデータの蓄積と、高速検索が可能となったこと等を背景に、近年注目されているJITモデリングを、物理現象が複雑で、非線形性の強い高炉にオンライン適用するにあたり、実用的な手法を検討し、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。

参考文献

- 1) 杉山喬：高炉内の流動・伝熱・反応解析，第94・95回西山記念技術講座，131/173 (1983)
- 2) 八木順一郎，武田幹治，大森康男：有限要素法によるガス流れと伝熱の2次元解析，鉄と鋼，66，1888(1980)
- 3) 杉山喬，須賀田正泰：製鉄研究，325，34/42 (1987)
- 4) 桑原守，高根慎司，関戸邦雄，鞭巖：高炉プロセスの数学的二次元モデル，鉄と鋼，77，1593 (1991)
- 5) 内藤誠章，杉山喬，藤原豊，圃中朝夫，芦村敏克：高炉トータルモデルを用いた大分2高炉炉内解析，材料とプロセス，4，166 (1991)
- 6) 奥野嘉雄，国友和也，入田俊幸，松崎眞六：高炉内層頂部におけるコークス層崩れ現象の装入物分布に及ぼす影響，鉄と鋼，7，783/790 (1986)
- 7) 奥野嘉雄，松崎眞六，国友和也，磯山正，草野祥昌：ベルレスの装入法における装入物分布推定モデルの開発，鉄と鋼，191/98 (1987)
- 8) M. Koga, H. Ogai, M. Ogawa, M. Ito, K. Uchida and S. Matsuzaki: "Development of the Blast Furnace Integrated Java-Based Simulator" 2004 IEEE International Conference on Control Application, 1290/1295 (2004)
- 9) Cay S. Horstman and Gary Cornell: Core Java2 Vol.2, Chap.11 ASCII, Inc (2002)
- 10) 中山 茂：Java分散オブジェクト入門，技報堂出版 (2000)
- 11) ロブ・ゴードン: Java Native Interface プログラミング，ピアソンエディケーション (1998)
- 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，材料とプロセス，4，780/783 (2003)

- 13) 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, 新日鐵技報 379 33/38 (2003)
- 14) T. Soukup and I. Davidson: Visual Data Mining, John Wiley & Sons, Inc (2002)
- 15) 松崎眞六: 高炉頂部における装入物分布に関する研究, 博士論文 9/18
- 16) M. Naito and T. Nishimura: "Prediction of sinter reduction behavior in a blast furnace by a mathematical model" Asia Steel International Conference 2000. B (Iron making), 268/276 (2000)
- 17) 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)
- 18) Q. Zheng and H. kimura : Trans. Soc. Instrum. Control Eng., 37,640,(2001)
- 19) C.G. Atkeson, A.W. Moore and S. Schaal : Artificial Intelligence Review, 11,11(1997)
- 20) G. Bontempi, M. Birattari and H. Bersini : Int. J. Control, 72,643(1999)
- 21) H. Tsutsui, A. Kurosaki and T. Sato : Trans. Soc. Instrum. Control Eng., 33,947(1997)
- 22) J. Zhang, Y. Yim and J. Yang : Artificial Intelligence Review, 11,175(1997)
- 23) Q. Zheng and H. Kimura: 42nd Japan Joint Automatic Control Conference, Tokyo, 143(1997)
- 24) D. Kibler, D. W. Aha and M. K. Albel : Computational Intelligence, 5(1989)
- 25) C. G. Alkeson A. W. Moore and S. Schaal : Artificial Intelligence Review, 11,11(1997)
- 26) W. S. Cleveland and S. J. Delvin : Journal of the American Statistical Association, 403,83(1988)
- 27) 河口至商著: 多変数解析入門 I, 森北出版, 東京, 27 (1973)
- 28) 大貝晴俊・古賀雅伸・小川雅俊・伊藤雅浩・松崎眞六: Javaによる高炉統合シュミレータ、計測と制御、45、1、37/42 (2006)
- 29) 伊藤雅浩・松崎眞六・大貝晴俊・大舘尚記・内田健康・齋藤信一・佐々木望: 高炉操業における大規模データベースオンラインモデリング、鉄と鋼、90、11、59/66 (2004)