

Javaによる高炉統合シミュレータと統合可視化システム[†]

小川 雅俊*・大貝 晴俊*・古賀 雅伸**・伊藤 雅浩***

松崎 眞六***・内田 健康****・田島 和典*****

Java-based Integrated Blast Furnace Simulator and Integrated Visualization System

Masatoshi OGAWA*, Harutoshi OGAI*, Masanobu KOGA**, Masahiro ITO***,

Shinroku MATSUZAKI***, Kenko UCHIDA**** and Yasunori TAJIMA*****

Abstract: In the field of pig ironmaking process, malfunction of operation is caused by enlarging a blast furnace and increasing use of low quality ore. Thus, operation support systems predicting a blast furnace are demanded. This paper introduces a Java-based integrated blast furnace simulator and an integrated visualization system for blast furnace in order to support blast furnace operation. The Java-based integrated blast furnace simulator is constructed by reusing effective existing partial simulators. RMI (Remote Method Invocation) and JNI (Java Native Interface) of Java technology are applied to integrate those simulators. The RMI integrates those simulators on different computer environment, while the JNI integrates those simulators programmed different programming languages. Therefore, the Java-based large-scale simulator can be built with less work than to redevelop another simulator. The integrated visualization system provides visual information on measured data and calculated data at the same time. Furthermore, a function of the integrated visualization system that visualizes calculated data of multi-variable is developed. The function can select and display multiple pieces of information freely.

Key Words: process simulator, steel industry, blast furnace, visualization, Java

1. 緒言

近年、様々な産業プロセスにおいて設備の合理化や大規模化が行われている。鉄鋼プラントにおける高炉プロセスも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1万トンを超える。また、高炉の原燃料は、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。このような高炉の大型化と低品質原燃料の使用頻度の増加に伴い、以前よりも操業不調を発現させる要因が増加しており、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。

一方、高炉の予測技術として、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開発当時の計算機性能の制約により、部分モデルとして構築され、現在は必ずしも利用されていない有効なモデルが数多く存在

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した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とを提案する。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。しかしながら、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RMI^{8)~10)} (Remote Method Invocation)とJNI^{8),11)} (Java Native Interface)の技術を利用する。

また、高炉の操業支援の方法として、高炉プロセスから得られる大量のデータを整理し、オペレータに対して視覚的にわかりやすく情報を提供する可視化技術が注目されている^{12),13)}。文献¹³⁾は、プロセスコンピュータから得られる高炉の実測データを各センサの設置位置と正確に対応させて画像情報化し、さらに2次加工処理により融着帯根部の情報を顕在化する方法を提案している。この可視化技術は、操業を支援する有効な方法となっている。しかしながら、高炉シミュレータの計算結果と実測データを同時に統合化して可視化したシステムは、まだ報告されていない。また、高炉統合シミュレータから得られた膨大な計算結果から必要な変数を選択してわかりやすく可視化するシステム、すなわち、高炉統合可視化システムの開発が求められている。

本研究では、高炉操業を支援するために、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た大規模な高炉統合シミュレータの構築、および計算結果と実測データの両者を

[†] 計測自動制御学会制御部門大会にて発表 (2005.5)
* 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
** 九州工業大学情報工学部 福岡県飯塚市大字川津 680-4
*** 新日本製鐵 (株) 千葉県富津新富 20-1
**** 早稲田大学理工学部 東京都新宿区大久保 3-4-1
***** ニッテツ北海道制御システム 北海道室蘭市仲町 12
* Graduate School of Information, Production and Systems engineering, Waseda University
** Department of Control Engineering and Science Kyushu Institute of Technology
*** Nippon Steel Corporation
**** Waseda University Science and Engineering
***** Nittetsu Hokkaido Control Systems Co.
(Received May 31, 2005)

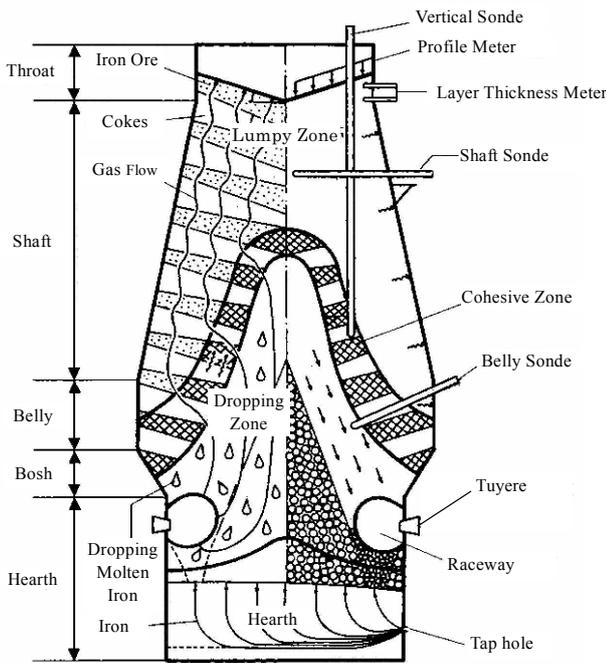


Fig.1 Outline of a blast furnace process

同時に表現し、複数の計算結果を自由に選択してわかりやすく表示する計算結果の選択可視化機能を具備する高炉統合可視化システムの実現を目的とする。

高炉統合シミュレータを構築するにあたり、異なるコンピュータ環境に存在する部分シミュレータを統合するためにJavaのRMIを用いた。また、異なるプログラム言語で記述された部分シミュレータを統合するためにJavaのJNIを用いた。高炉統合可視化システムを実現するにあたり、実測データと計算結果のデータベースシステムを構築した。このとき、計算結果の選択可視化機能は、Focus+Context手法¹⁴⁾を参考に、対話性を考慮して実現した。

以下、本論文の構成を述べる。2章では対象とする高炉プロセスの概要と利用するJavaによるシミュレータの統合技術について述べる。3章では統合する高炉モデルと構築した高炉統合シミュレータについて述べる。4章では開発した高炉統合可視化システムについて述べる。さらに、そこで用いた実測データと計算結果の統合可視化手法と計算結果の選択可視化手法を説明する。最後に5章で本論文の結論を述べる。

2. 高炉プロセスの概要とJavaシミュレータ統合技術

2.1 高炉プロセスの概要

高炉は溶けた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。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、

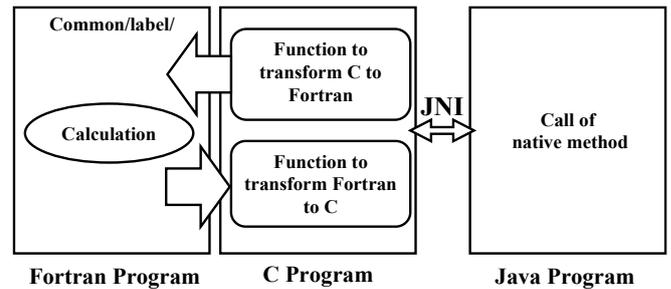


Fig.2 Basic concept of the mechanism accessing Fortran from Java

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、3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5つの部分から構成され、炉胸部と朝顔部の2つは円錐台形、炉口部と炉腹部、炉床部の3つは円柱形の形状である。

2.2 Javaによるシミュレータ統合技術

本研究では、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。本節ではRMI, JNI, Jni4FCBの概要について説明する。

・RMI (Remote Method Invocation)

RMI⁸⁾⁻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1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。RMIの特徴を以下に示す。

- 1) ネットワーク間に配置されたオブジェクトを利用することができる。
- 2) ネットワーク上の端末間において分散オブジェクトのメソッド呼び出しという形式でデータを交換できる。
- 3) Java環境で標準的に用意されているため、コンピュータ環境に依存することなく利用できる。

・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。

- 1) Javaオブジェクトの生成
- 2) クラス変数へのアクセス

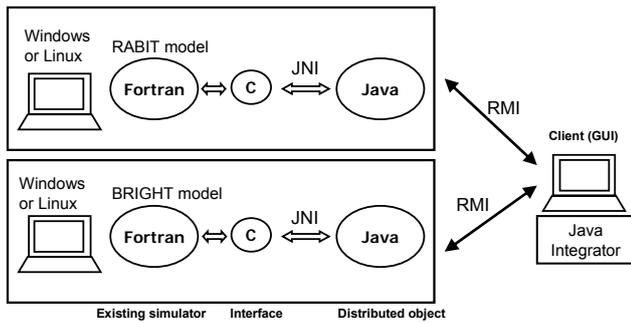


Fig. 3. Overview of integrating BRIGTH model and RABIT model

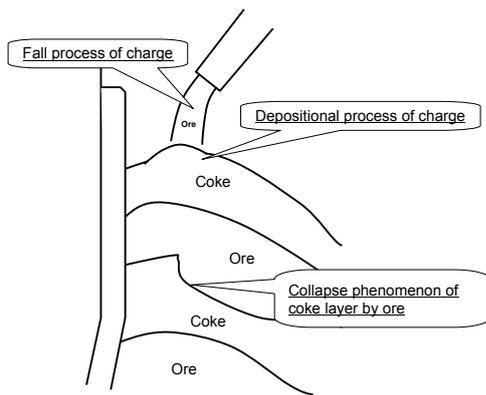


Fig. 4 Burden distribution model

- 3) インスタンス変数へのアクセス
- 4) クラスのロード

• 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インタフェースプログラムを自動的に生成する。

3. Javaによる高炉統合シミュレータ

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BRIGTH^{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、BRIGTH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BRIGTH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のインタフェースを生成する。また、RABITモデルの計算結果

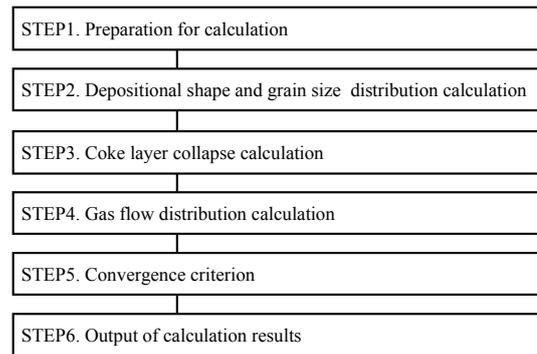


Fig. 5 Overview of computational algorithm in RABIT model

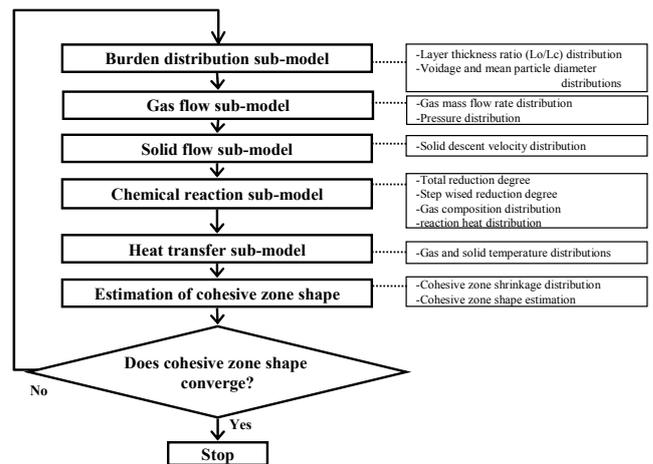


Fig. 6 Configuration of BRIGTH model

をBRIGTHモデルが利用する形式をしている。

次節以降では高炉のRABITとBRIGTHの部分モデルの概要を述べ、続いてJavaによる高炉統合シミュレータの実行の流れについて説明し、その計算結果については4章において計算結果と実測データの統合可視化例として示す。

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⁾)

RABITモデルの特徴は、炉中心部の分布形態に大きく影響を及ぼす炉内でのガス流れおよびコークス層崩れ、装入物の降下等の現象が装入物の分布形態に与える影響について、模型実験装置等を用いて得られた知見を基に定式化されていることである。RABITモデルのアルゴリズムの概要は、Fig. 5¹⁵⁾に示すように計算準備、堆積形状・粒度分布計算、コークス層崩れの計算、ガス流分布の計算、収束判定、計算結果の出力の6つのステップに大きく別けられる。

3.2 BRIGTHモデルの概要

BRIGTH^{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。BRIGTHモデルは、Fig. 6^{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

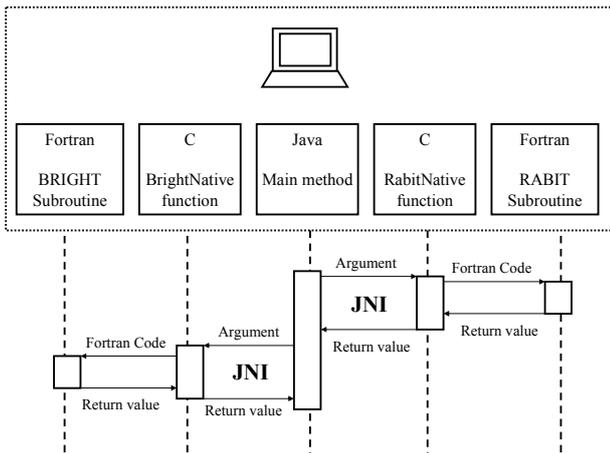


Fig.7 Process flow of the integrated blast furnace simulator by using JNI

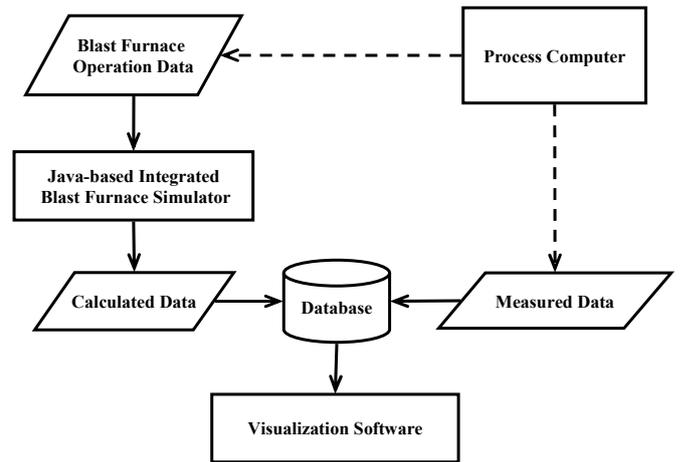


Fig.9 Configuration of the integrated visualization system

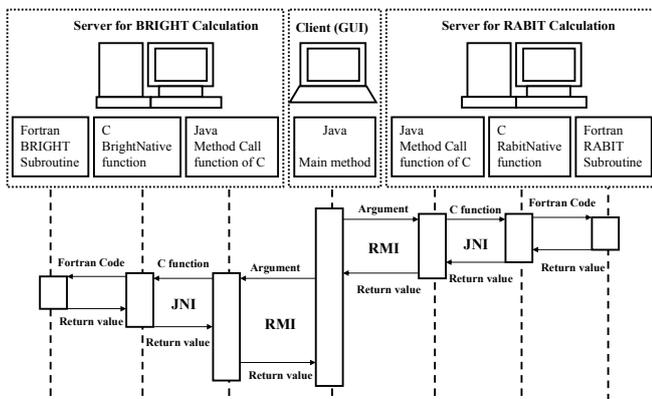


Fig.8 Process flow of the integrated blast furnace simulator by using JNI and RMI

融着帯形状を推定するモデルで構成される。ここで下流に位置するモデルの計算は、その上流に位置するすべてのモデルの計算結果を必要とする。

計算の流れは、入力情報として1セットの操作条件を与え、5つのサブモデルを順番に計算し、融着帯形状を推定し、融着帯形状の変化量の平均値が0.5m以内に収まるまで繰り返し計算を行う。融着帯形状の変化が収束したとき、還元率と温度の収束値が求まる。

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. 7 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れる。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、送風量、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、出鉄量などである。

また、BRIGHT モデルと RABIT モデルが異なるコンピュータ環境に存在する場合において、BRIGHT と RABIT をそれぞれ専用のサーバーマシンで RMI を利用して分散して計算できる。この分散型高炉統合シミュレータと処理フローを Fig. 8 に示す。

クライアントの Java のメインメソッドから RMI を利用して分散オブジェクトのメソッド呼び出しを行い、分散オブジェクトから JNI を利用し、C コードを介して RABIT サーバの RABIT が計算される。その計算結果がクライアントに返されて、同様に BRIGHT が計算される。Fig. 8 における計算機間のデータの受け渡しを説明する。まず、クライアントから RABIT の計算に必要な入力情報が RABIT サーバへ渡される、そして、RABIT サーバからクライアントへ RABIT の計算結果が返される。また、クライアントは、RABIT の計算結果と BRIGHT の計算に必要な入力情報を BRIGHT サーバへ渡す。最後に BRIGHT サーバからクライアントへ BRIGHT の計算結果が返される。

4. 高炉統合可視化システム

4.1 高炉統合可視化システム

高炉統合シミュレータから得られる計算結果や高炉プロセスから得られる実測データの統合表示、選択表示が自由に行える高炉統合可視化システムを構築した。高炉統合可視化システムの構成を Fig. 9 に示す。

高炉統合可視化システムは、データベースシステム、高炉統合シミュレータ、可視化ソフトウェアで構成される。

データベースシステムは、高炉統合シミュレータから得られる計算結果とプロセスコンピュータから逐次収集された実測データの両方を蓄積する。可視化ソフトウェアは、パーソ

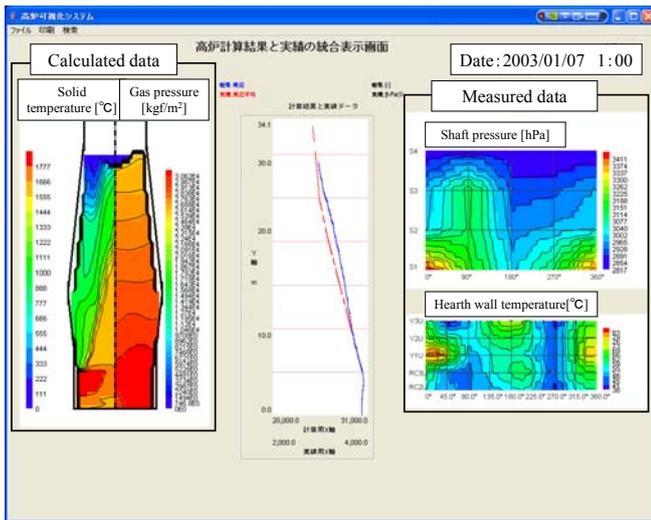
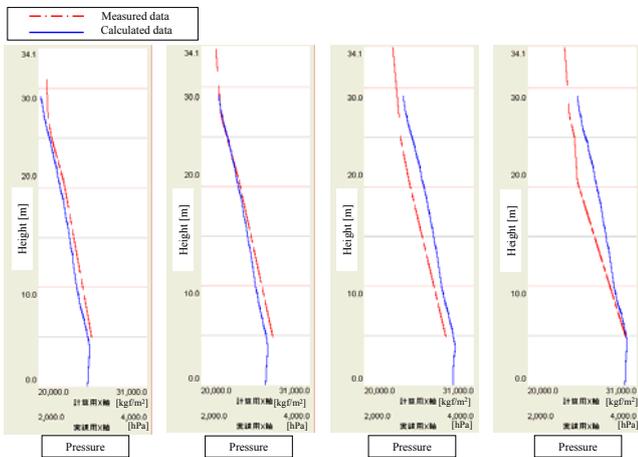


Fig.10 Image panel of the integrated visualization system



(a)2003/1/11 (b)2003/1/12 (c)2003/1/13 (d)2003/1/14

Fig.11 Example of time series transition of calculated data and measured data (2003/1/11~2003/1/14)

ナルコンピュータ, 上でデータベースからデータを抽出して計算結果と実測データの両者を同時に統合表示する. また, 計算結果と実測データの時系列推移を動画情報として提供する.

4.2 計算結果と実測データの統合可視化

高炉統合可視化システムの統合可視化の画面をFig. 10に示す. Fig.10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. Fig.10では, 固体温度とガス圧力の炉内分布を示している.

Fig.10の右側のコンタ図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. Fig.10では, シャフト圧力と炉床壁温度の空間的分布特性を示している.

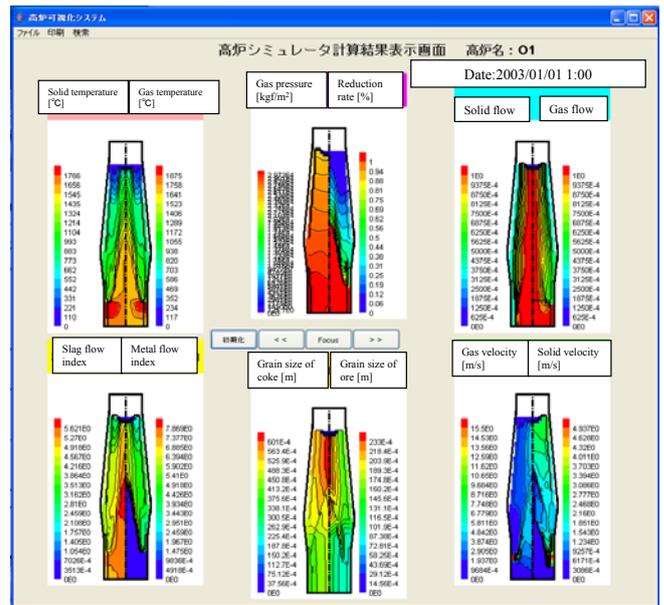


Fig.12 First mode comprehending an overview of calculated data

さらに, Fig.10の中央のグラフは, 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. Fig.10では, 炉内ガス圧力の計算結果を実線でシャフト圧力の実測データを一点鎖線で示している. ここでは, 横軸が圧力の大きさを示し, 実測データの単位を [hPa], 計算結果の単位を [kgf/m²]で示している.

Fig.10の中央のグラフによる計算結果と実測データの時系列推移の例をFig. 11に示す. Fig.11は2003年1月8日から休風に入り, 1月10日に送風を再開した後の1月11日から1月14日の午前1時の圧力分布の結果を示す. 休風で下降していた炉内の圧力が送風再開により, 徐々に計算結果と実測データの両者が上昇していく様子が確認できる.

4.3 計算結果の選択可視化

シミュレーションの計算結果の表示項目は, ガス圧力, ガス温度など, 15項目以上あり, それらの多変数の計算結果を自由に選択して表示できる可視化機能を開発した. この可視化機能は, 情報の可視化におけるFocus+Context手法¹⁴⁾の考え方を参考にし, かつ対話性を考慮して構築した. Focus+Context手法とは, 全体像を把握でき, かつ現在着目している箇所を確認できる可視化手法である. また, 対話性は利用者の直接操作により表示画面を移動・拡大させて表示条件を変更することである. 構築した可視化システムは一度に多変数の計算結果を把握可能とするために2つのモードから構成される.

1つ目は, 多変数の計算結果の全体の概観を俯瞰するためのモードであり, Fig. 12に示すように12項目を同時に可視化することができる. たとえば, Fig.12では, 固体温度, ガス温度, ガス圧力, 還元率, 固体流れ, ガス流れ, 流動指数スラグ, 流動指数メタル, コークス粒径, 鉍石粒径, ガス流速, 固体速度の12項目を表示している.

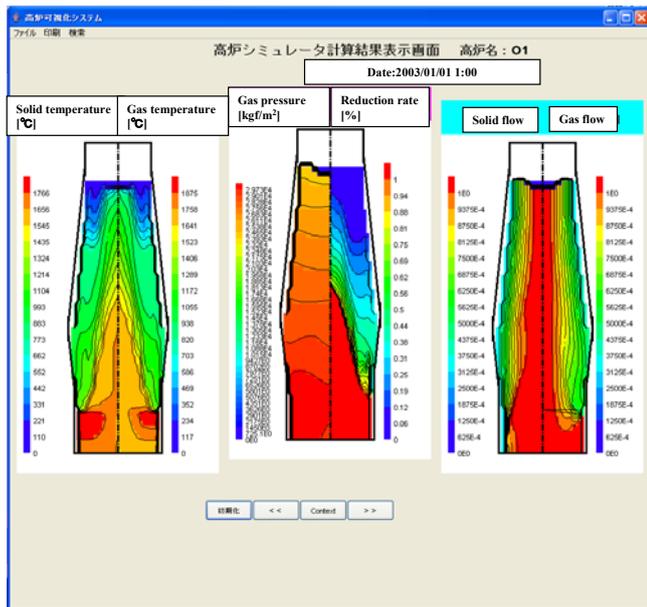


Fig.13 Second mode displaying a remarkable point

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，武田，大森：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，須賀田：製鉄研究，325，34/42 (1987)
- 4) 桑原，高根，関戸，鞭：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，杉山，藤原，圃中，芦村：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，国友，入田，松崎：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，松崎，国友，磯山，草野：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 **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，伊藤，内藤，磯部，柿内：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，松崎，柿内，磯部：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：高炉炉頂部における装入物分布に関する研究，博士論文 9/18 (2003)
- 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)

2つ目は、多変数の計算結果の着目点の詳細な情報を表示するためのモードであり、Fig. 13 に示すように、6項目を拡大して表示する。たとえば、Fig.13 では固体温度とガス温度、ガス圧力、還元率、固体流れ、ガス流れの6項目を表示している。

この2つのモードを切り替えることによって多変数の計算結果の全体の外観と着目点を把握可能とし、さらにドラッグ&ドロップによる対話的な操作によって簡単に検索した項目の配置を移動して、自由に計算結果の選択と表示が可能である。

5. 結言

本論文では、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および高炉統合可視化システムの開発について説明した。高炉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、高炉統合可視化システムにおいては、高炉統合シミュレータによる計算結果と実測データを、統合した形で並べて可視化できるようにした。さらに、多変数の計算結果の選択可視化機能を開発し、複数の情報を自由に入れ替えて表示できるシステムとした。

今回、提案したJavaによる高炉統合シミュレータおよび高炉統合可視化システムを基盤に、今後、更なる機能向上を図り、実際の操業現場で活用できる技術として研究開発を進めていく予定である。

[著者紹介]

日本鉄鋼協会, IEEE等の会員.

小川 雅俊 (学生会員)



2003年大阪工業大学工学部経営工学科卒業。
2005年早稲田大学大学院情報生産システム研究科情報生産システム工学専攻修士課程修了。同年、同情報生産システム工学専攻博士(後期)課程入学、現在に至る。高炉プロセスのモデリングとシミュレーション技術の研究に従事。電気学会の会員。

田島 和典



1991年日本工学院北海道専門学校電子工学科卒業。同年、ニッテツ北海道制御システム(株)入社。遺伝的アルゴリズムを用いたスケジューリングシステムの実機化、WebシステムのFA適用化等の開発に従事。

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。
76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等の研究に従事。人工知能学会、日本鉄鋼協会等の会員。

古賀 雅伸 (正会員)



1993年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士課程修了。東京工業大学工学部助手、同大学情報理工学研究科助手を経て、現在九州工業大学情報工学部助教授。制御系CADの研究に従事。システム制御情報学会等の会員。

伊藤 雅浩



1989年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。
91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、連続鋳造機、高炉等の鉄鋼業における各種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。2004年より早稲田大学大学院情報生産システム研究科博士課程(後期)在学。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、プロセス制御等の研究開発に従事。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。
76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。83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、ロバスト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、