

# 大型ベルレス高炉における装入物分布 シミュレーションモデルの開発と操業 への適用

服部 道紀\*・飯野 文吾\*・下村 昭夫\*  
築地 秀明\*・有山 達郎\*

## Development of Burden Distribution Simulation Model for the Bell-less Top in a Large Blast Furnace and Its Application

Michinori HATTORI, Bungo IINO, Akio SHIMOMURA,  
Hideaki TSUKIJI and Tatsuro ARIYAMA

### Synopsis:

The burden distribution model was indispensable so as to ensure smooth blow-in and stable operation with high productivity of Keihin No. 1 blast furnace, which is one of the largest blast furnaces with bell-less top. On the basis of the full scale model and 1/10 scale model experiments, the effect of enlargement of throw diameter on burden profile was analyzed. The behavior of the discharged material from the lower banker was also investigated. Considering these influences, the burden distribution model for Keihin No. 1 blast furnace was constructed. It has been successfully applied for the operation of Keihin No. 1 blast furnace with high productivity.

**Key words:** bell-less top; burden distribution; simulation model; blast furnace.

## 1. 緒 言

高炉操業は、下工程への溶銑の安定した供給と原燃料の変化および鉄鋼需要の変動に対応するため、より一層の弾力的な操業が要求されている。近年、ベルレス装入装置は多くの高炉で採用されているが、その分布制御に対する高い自由度を生かすためには、シミュレーションモデルによる事前の装入物分布の設計など、効率的な分布制御の確立が必要である。NKKでは、1983年に福山第2高炉(内容積2828 m<sup>3</sup>、炉口径8.6 m)において、初めてベルレス装入装置を導入し、1/10規模模型実験と実物大模型実験の結果をもとに装入物分布シミュレーションモデルを構築し、実炉に適用してきた<sup>1)</sup>。1989年11月には京浜第1高炉(4907 m<sup>3</sup>)が第2次の火入れを行ったが、本高炉は炉口径11 mの大型のベルレス高炉であり、火入れ後の立ち上げとその後の円滑な操業のた

めに装入物分布を推定するモデルが必要であった。このため、福山第2高炉用に開発した装入物分布シミュレーションモデルをもとに、1/10規模模型実験を行うことにより大型高炉のベルレス装入装置における基本的な分布支配要因を検討し、その結果を取り入れることにより、京浜第1高炉に適した装入物分布シミュレーションモデルを構築した。ベルレス装入装置の装入物分布を考える上で考慮すべき事象として、分配シュートからの原料落下挙動、落下後に形成される層の分布形状、ガス流速の影響、下層の分布形状と降下の影響および半径方向の粒度分布がある<sup>2)</sup>。このうち、炉口径の拡大によって最も影響されるのは分布形状と考えられる。そこでこれに注目した1/10規模模型実験により、炉口径の拡大の影響の解析を行った。さらに、実炉における原料落下軌跡の測定、半径方向の粒度分布推定の精度向上のために下部バンカーからの原料排出時の粒度変化の測定等を行った。

平成3年12月6日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Dec. 6, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

\* NKK京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corporation, 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

本報告ではそれらの検討結果と装入物分布シミュレーションモデルの京浜第1高炉への適用した結果について報告する。

## 2. 装入装置

Fig. 1 に京浜第1高炉のベルレス装入装置の概要を示す。福山第2高炉は並列ホッパー式のベルレス装入装置であるが、京浜第1高炉は装入物分布の円周バランスの均一性を重視し、4ポートの垂直2段ホッパー式ベルレス装入装置を採用した。その上部および下部ホッパーは内容積は90 m<sup>3</sup>であり、また、分配シュートは、炉口径(11.0 m)を考慮し、分配シュート長さが5 mのものをを用いた。装入シーケンスは、今後の装入モードの多様化を考慮し、最大6バッチ、4チャージまでのサイクル使用が可能とし、さらに分配シュートの傾動変更は、外振り、内振りの両者が設定できるようにした。

## 3. 装入物分布試験とシミュレーションモデルの構築

福山第2高炉の装入物分布シミュレーションモデルは1/10規模模型と実物大模型による装入物分布試験の結果および装入物分布に関する当社の従来の知見から成っている。すなわち、このモデルは旋回している分配シュートからの原料の落下軌跡、落下後に形成される分布形状の推定を主体に、さらにガス流速、下層の形状および降下の影響を考慮したものである。この中で分布形状は3次の多項式と直線で近似し、そのパラメータは実験的に決定した。そのため、これらのパラメータは対象とする高炉固有の値で、炉口径の拡大によってパラメータは変

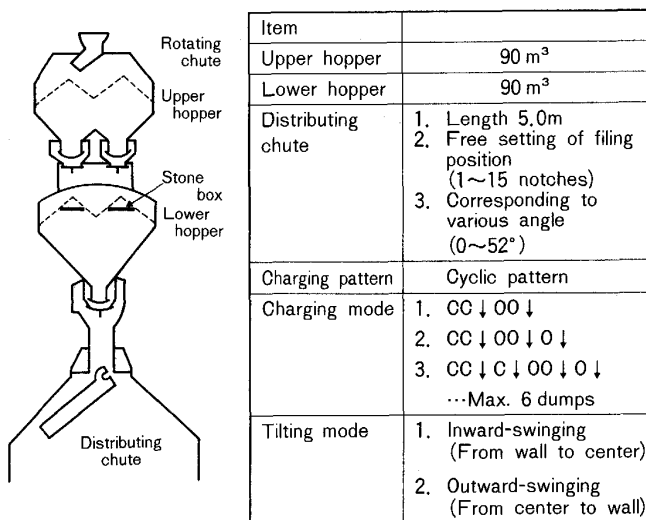


Fig. 1. Schematic illustration of charging equipment of Keihin No. 1 BF.

化することが考えられる。また、分配シュート長さの増大とともに落下軌跡も再検討を要する。一方、ガス流速、下層の形状および降下の影響については既に一般的な形で定量化がなされ<sup>2)~4)</sup>、それが適用可能である。したがって、ここでは京浜第1高炉の1/10規模模型を用いた実験を行い、福山第2高炉1/10規模模型および実物大模型の実験結果と比較することにより、炉口径拡大による分布形状への影響について検討を行った。さらに実炉において填充時に原料落下軌跡および下部バンカーからの原料排出時の粒度変化を実測した。

### 3.1 1/10 規模模型実験

#### 3.1.1 実験方法

京浜第1高炉の堆積状況の調査は、1/10規模模型装置を用いた<sup>5)</sup>。この設備は、全周模型で、原料切り出し装置、装入ベルトコンベアー、炉頂装入装置を備えている。Table 1 に実験条件を示す。実炉と模型の相似条件を考慮し、分配シュートの旋回・傾動速度は実炉の $\sqrt{10}$ 倍とした。分布形状の実験はコークス 39 kg、鉱石 148 kg を各々一定の傾動角度で装入後(以下単重リング装入と記す)、表面形状を0.01 m 間隔、円周方向4か所で測定した。

#### 3.1.2 実験結果

##### 1) 装入物分布の円周方向バランス

京浜第1高炉は垂直2段ホッパー式ベルレス装入装置の採用により装入物分布の円周バランスの均一化を図っている。そこでその効果の確認のため、1/10規模模型で単重リング装入時の特性を測定した。測定結果の一例を福山第2高炉の1/10規模模型実験の結果とあわせてFig. 2 に示す。本図は装入コンベアーと平行した方向の断面の分布である。福山第2高炉の場合には分布形状は偏心し、中心に対して非対称となっているが、京浜第1高炉では炉口径が大きいかかわらず、円周方向バランスは優れていることがわかる。これは垂直シュート内の原料の偏流が改善された結果であると考えられる。

##### 2) 装入物の分布形状

福山第2高炉の装入物分布シミュレーションモデルでは、実物大模型実験により単重リング装入時の分布形状

Table 1. Experimental conditions.

Item	Similarity	Full scale	1/10 model	Unit
○ Equipment size	$l'/l = 1/10$			
Throat diameter		$l = 11\ 000$	$l = 1\ 100$	mm
○ Velocity	$w'_i = \sqrt{10}w_i$			
Rotation velocity		$w_1 = 7.92$	$w'_1 = 25.05$	min <sup>-1</sup>
Tilting velocity		$w_2 = 0.243$	$w'_2 = 0.768$	min <sup>-1</sup>
○ Particle diameter	$D'_i = 1/10D_i$			
Coke		$D_1 = 48.5$	$D'_1 = 5.6$	mm
Ore		$D_2 = 17.0$	$D'_2 = 1.8$	mm

を Fig. 3 (b) にしめすような5つのパターンに分類しており、これらのパターンを分配シュートの傾動角と分配シュートから落下する原料の分布表面での衝突点（以下原料衝突点と記す）の SL レベル位置で整理している<sup>2)</sup>。そのため炉口径、分配シュート長さの異なる京浜第1高炉へこの関係を適用するには検討が必要であった。そこで、まず、京浜第1高炉の1/10規模模型実験を用いて分布形状の観察を行った。分布形状の分類は、福山第2高炉の実物大模型を用いた実験と同様、5つの

パターンに分類できた。次に、これらのパターンと原料の落下軌跡との関係を調査した。Fig. 2の単重リング装入時の実験結果にも見られるように、炉口径の異なる両者の模型ともに、半径方向の装入物分布形状は原料衝突点と炉壁からの距離が変化するにともなって、連続的に変化していることが観察された。原料衝突点が炉壁と接近している場合はV型分布となり、装入面が上昇し、原料衝突点が炉壁から離れている場合はM型分布となる傾向にある。このように分布形状は原料衝突点の炉壁からの距離に大きく依存していると判断された。この考え方にもとづいて、京浜第1高炉の単重リング装入時の分布形状は次のように推定した。すなわち、原料衝突点の炉壁からの距離が同一の場合には、京浜第1高炉の分布形状は、福山第2高炉実物大模型における分布形状と同一になるものとした。Fig. 3 (a) に福山第2高炉実物大模型による分布形状から、京浜第1高炉の原料衝突点位置と分布形状の関係について推定した結果を示す。図中、(a)のA・B・C・D・Eで示される領域は、(b)における各記号に対応する分布形状で特徴づけられる領域である。さらに、同図中に京浜第1高炉1/10規模模型実験において得られた原料衝突点位置と前述の分布形状の分類にしたがった分布形状の変化も合わせて示したが、両者の分布形状は良く対応している。このことから、単重リング装入における分布形状は原料衝突点の炉壁からの距離により一義的に決まることが明らかとなり、京浜第1高炉の分布形状の推定が可能となった。

また、この装入物分布シミュレーションモデルでは、実物大模型実験より得られた分布形状を数学的に近似す

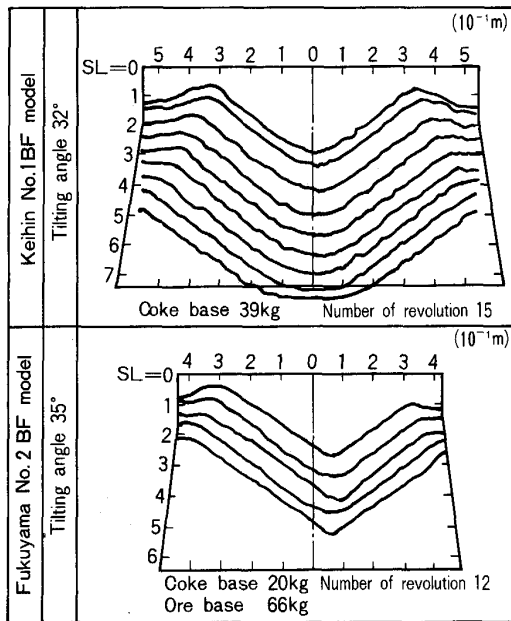


Fig. 2. Comparison of burden profile between Keihin No. 1 BF and Fukuyama No. 2 BF.

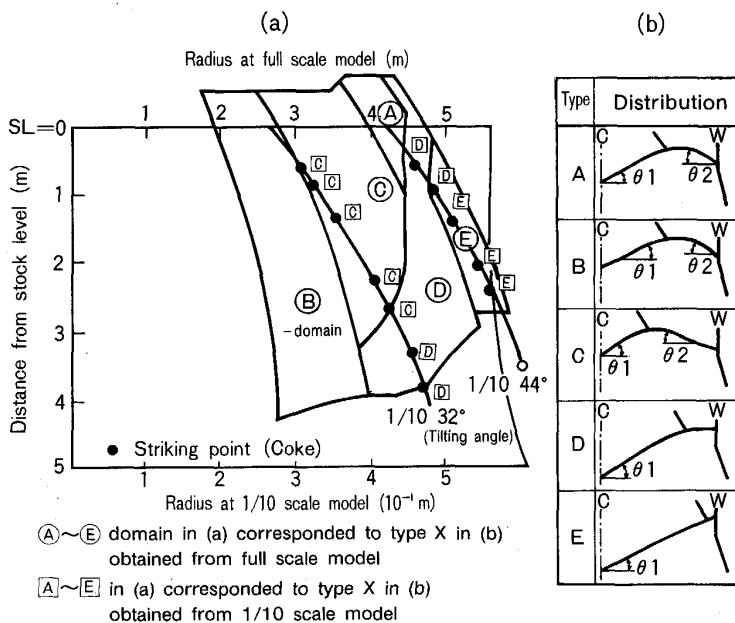


Fig. 3. Comparison of burden profile between full scale model (Fukuyama No. 2 BF) and 1/10 scale model (Keihin No. 1 BF).

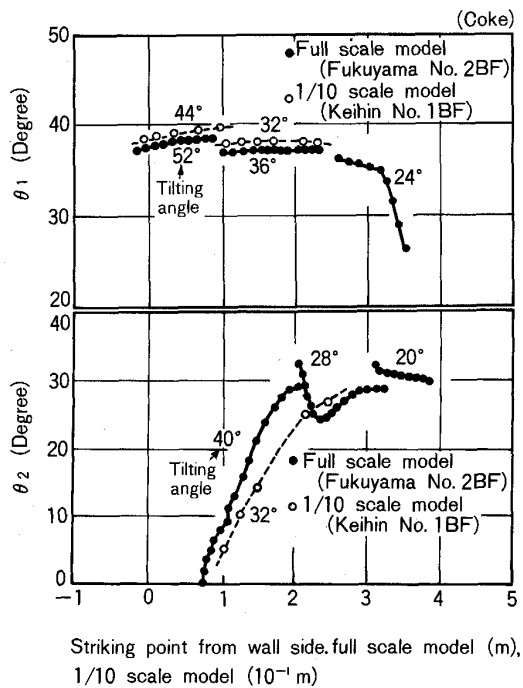


Fig. 4. Comparison of burden profile parameters of coke between full scale model (Fukuyama No. 2 BF) and 1/10 scale model (Keihin No. 1 BF).

る方法として、5~10個のパラメータにより、曲線部を3次関数で、残りの部分を直線として取扱い、その組み合わせで分布形状を表現しているが、これらのパラメータも分布形状の分類と同様、分配シュートの傾動角と原料衝突点のSLレベル位置で整理している<sup>2)</sup>。この実物大模型実験結果を京浜第1高炉へ適用するために、これらのパラメータについても分布形状と同様の検討を行った。Fig. 4は単重リング装入時のコークスについての分布形状の中心側の傾斜角度 $\theta_1$ と炉壁側の傾斜角度 $\theta_2$ におよぼす原料衝突点の炉壁からの距離の影響を示している。またFig. 5には単重リング装入時の鉱石についての調査結果を示す。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ の定義は、Fig. 3(b)に示した。●印は福山第2高炉の実物大模型実験の結果、○印は京浜第1高炉の1/10規模模型実験の結果、添字は実験時の分配シュートの傾動角を示している。いずれの傾動角においても炉壁と原料衝突点が接近し、V型分布になる場合には $\theta_1$ は大きく、 $\theta_2$ は小さく、炉壁と原料衝突点が離れてM型分布になる場合は逆の傾向を示しており、各々のパラメータは、原料衝突点の炉壁からの距離の多項式で近似できることがわかった。また、福山第2高炉の実物大模型実験と京浜第1高炉の1/10規模模型実験とでこれらのパラメータは良く一致していた。これらの結果より、単重リング装入時の京浜第1高炉の分布形状のパラメータは、福山第2高炉の実物大模

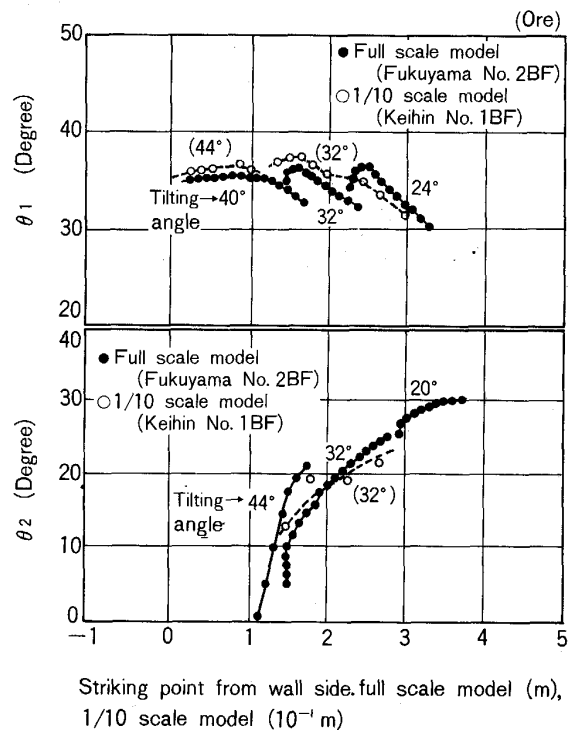


Fig. 5. Comparison of burden profile parameters of ore between full scale model (Fukuyama No. 2 BF) and 1/10 scale model (Keihin No. 1 BF).

型実験結果から得られた原料衝突点の炉壁からの距離の多項式で近似したパラメータを用いた。

### 3.2 実炉での原料落下軌跡および下部バンカーからの原料排出挙動

#### 3.2.1 原料の落下軌跡

分布形状は前述のように原料衝突点と炉壁からの距離で支配されると考えられるが、原料衝突点の位置の決定には原料の分配シュートからの落下軌跡の算出を必要とする。この原料の落下軌跡の算出式は、山本ら<sup>2)</sup>の論文を参考に作成した。このモデルは分配シュートからの飛び出し速度を計算する部分とその飛び出し速度をもとに落下軌跡を計算する部分にわかれている。Fig. 6に火入れ填充時の測定結果とシミュレーションモデルによる計算結果との比較を示す。実測は径方向4か所、高さ方向3か所の測定を行ったが、良い一致を示している。すなわち、分配シュートの長さのみを考慮すれば、原料落下軌跡は推定可能である。

#### 3.2.2 原料の排出挙動

炉頂バンカー内で原料の粒度偏析が生じる場合、バンカーから排出される粒度に経時変化を生じ、高炉内に堆積する際、半径方向や円周方向での粒度偏析が影響を受け、ガス流分布が変化することが報告されている<sup>6)</sup>。京浜第1高炉の1/10規模模型を用いた実験においても、

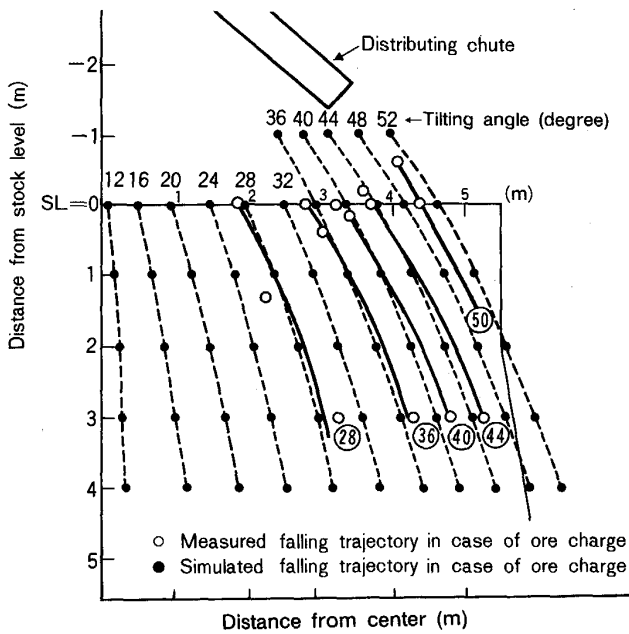


Fig. 6. Comparison of falling trajectory between measured and simulated ones in Keihin No. 1 BF.

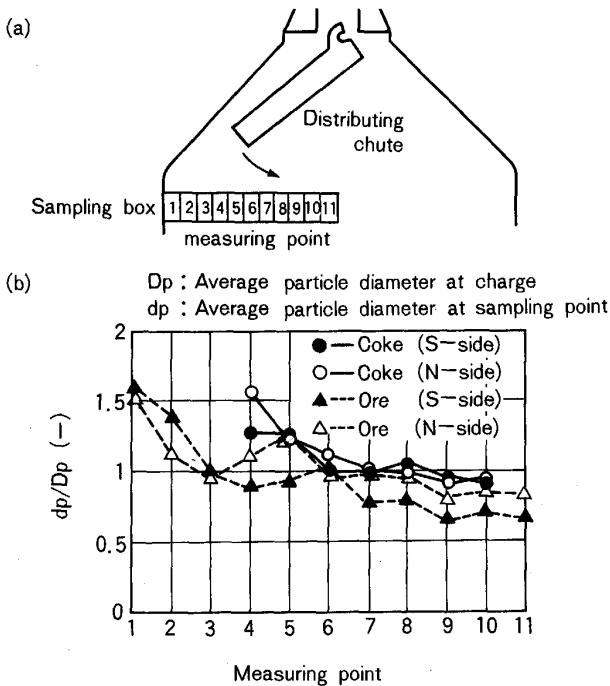


Fig. 7. Changes in diameter of particle discharged from lower hopper in Keihin No. 1 BF.

原料排出時の下部バンカー内を観察すると顕著なファンネルフローが生じているのが認められた。これらの現象をさらに定量的に把握するため、下部バンカーから排出される原料粒度の変化を火入れ填充時に測定した。Fig. 7 (a) に示す試料採取箱を用いて測定を行ったが、原料の排出初期は平均粒度の約 1.5 倍の粒度の原料が排出

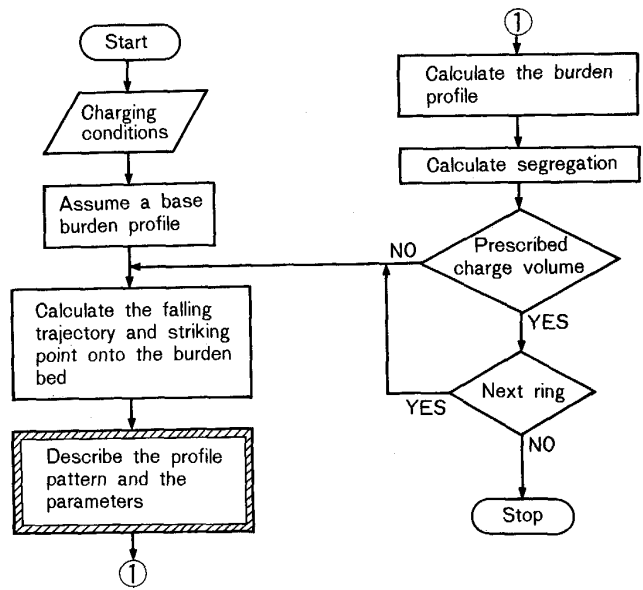


Fig. 8. Calculation flow of simulation model for bell-less top of Fukuyama No. 2 BF.

されていることがわかった (Fig. 7 (b)). 京浜第 1 高炉の下部バンカーは 4 ポートであり、下部バンカーの中心部に大塊の原料が堆積し易いことを考え合わせると、実炉においても顕著なファンネルフローが生じていると推定される。したがって本装入物分布シミュレーションモデルにおいても、精度向上のため、下部バンカーからの原料排出時の粒度変化を考慮する必要があると判断された。

### 3.3 装入物分布シミュレーションモデルの構築

Fig. 8 に福山第 2 高炉の装入物分布シミュレーションモデル<sup>2)</sup>のフローを示す。本モデルは、炉内における装入物分布、粒度偏析、層厚比分布、相対ガス流束分布を求めることができる。以下に、その計算手順を示す。

- (1) 既堆積層の形状を仮定する。
- (2) 原料の旋回シュートからの落下軌跡を計算する。
- (3) 落下した原料を既に堆積している層上に積み上げ、新しい層形状を求める。
- (4) 形成される層は、分配シュートの傾動角と装入物 SL レベルによって分類された分布形状をとる。同時に、分布形状を決定するパラメータも自動的に選択される。
- (5) ガス流速の影響を考慮し、層の傾斜角を補正する。
- (6) 下層の影響を考慮した新しい層形状を求める。
- (7) 堆積した層の体積がその装入量に一致するまで (3) からの計算を繰り返す。
- (8) 1 チャージ分の装入物分布が求まった後、その層を降下させ、(1) の既堆積層の形状を更新し、さらに新しい装入物分布を求める。

(9)新たに求めた装入物分布が、前回の分布と一定の誤差範囲内で収束するまで、全体の計算を繰り返す。

(10)収束後、最終的な装入物分布、粒度偏析、層厚比分布および相対ガス流速分布を求める。

京浜第1高炉の装入物分布シミュレーションモデルの再構築にあたっては以下の点を考慮した。分布形状の分類・パラメータについては、福山第2高炉の実物大模型実験をもとに3・1・2項2)の関係をを用いて決定した。また、下部バンカーからの原料粒度の経時変化については、分配シュートの各旋回毎に3・2・2項の調査結果を取り込んだ。ガス流速、下層面形状、装入物降下の分布形状におよぼす影響、および粒度偏析については、福山第2高炉の装入物分布シミュレーションモデルと同様とした。

4. 操業へのシミュレーションモデルの適用

4.1 分布制御の考え方

操業における分布制御は福山第2高炉の実績を参考にした。Fig. 9に福山第2高炉の火入れ時およびその後の装入物分布シミュレーションによる分布形状の計算結果を示す。火入れ時((a)図)は、ベルレス特有の半径方向の粒度偏析を少なくするためにコークス・鉱石とも3重リング装入を行い、ベル型装入装置を用いた高炉に類似した分布形状を指向した結果、順調に立ち上がった。次に、2 m程度のコークスのフラットな分布形状(以下テラスと記す)を周辺部に形成させたが((b)図)、周辺部での鉱石とコークスの層厚比が増加し、中心ガス流が強くなり過ぎ、炉況の安定性に欠けた。その後、鉱石についても2 m程度のテラスを形成させた結果((c)図)、

再現性のある安定した分布形状が得られ、中心ガス流・周辺ガス流の適度な確保により、燃料比、鉄中Siの低下が見られ、炉況は大幅に改善された。これらの結果を京浜第1高炉に適用するため、Fig. 10(a)に示すような、鉱石分布指数(IOS)、コークス分布指数(ICS)を導入し、分布形状を定量的に評価した。これらの指数は、原料の平均落下軌跡のSL=0mとの交点と炉壁からの距離を炉口半径で除したのもある。原料の平均落下軌跡は、分配シュートの傾動角とその回転数を考慮して求めている。福山第2高炉の鉱石分布指数・コークス分布指数の火入れ後半年の推移をFig. 10(b)に示す。図中の数字は、分布変更の経過を表しているが、鉱石分布指数・コークス分布指数を大きくする、また鉱石分布指数をコークス分布指数より0.04~0.07程度大きくすることにより、炉況が安定した。これらより、ベルレス装入装置を用いた場合には、分布形状は鉱石、コークスとも多重リングによりフラットな分布形状を指向すること、鉱石をコークスより分布指数で0.04~0.07程度炉中心側に分配することが重要であることが推定される。

4.2 操業への適用実績

京浜第1高炉の火入れ時の装入物分布を設計するために、まず分配シュートの傾動角の設定について検討を行った。分配シュートの傾動の設定は、設備的に0~52°までの範囲で15ポイント設定可能であるが、この設定に当たっては、4.1節の解析結果をもとに鉱石・コークスとも分配シュートが炉中心側に傾動できるように、また装入物の制御性を考慮し、24~52°の幅で落下軌跡とSL=0mとの交点で囲まれた断面積が一定になるよ

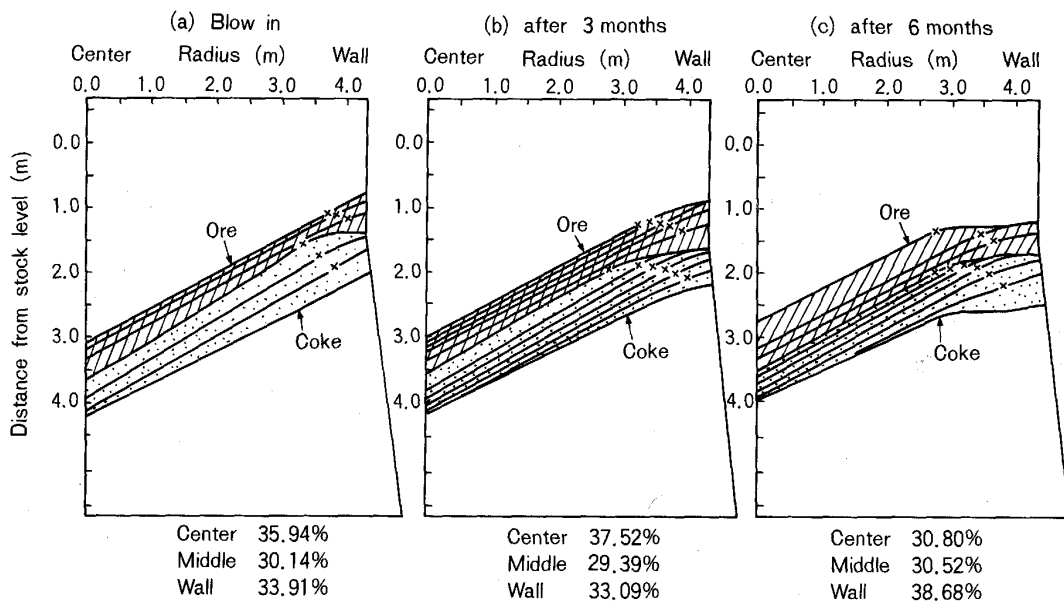


Fig. 9. Transition of burden distribution by simulation model at Fukuyama No. 2 BF.

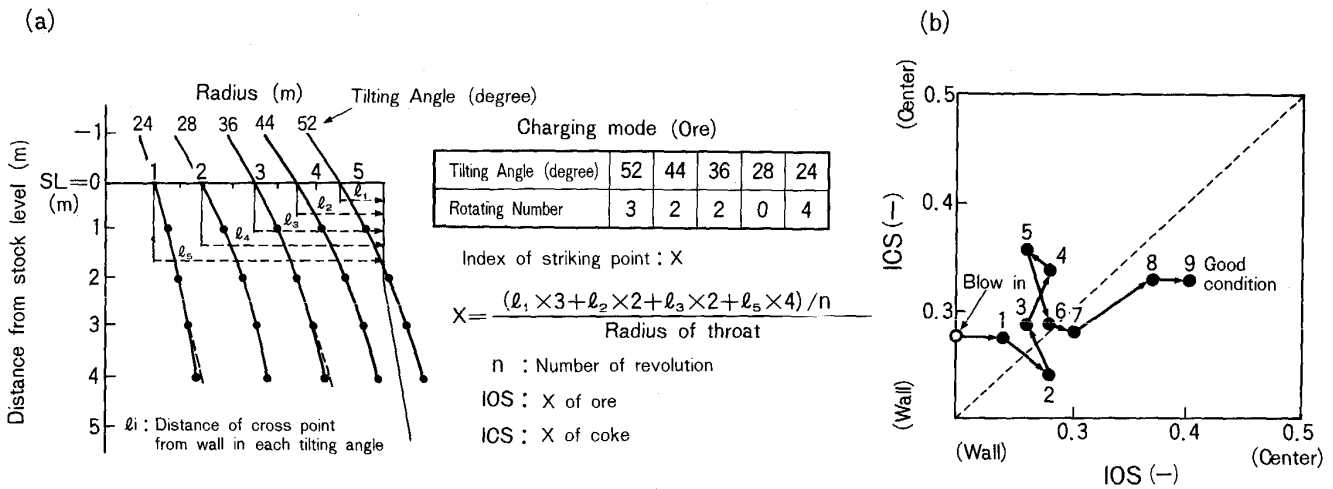


Fig. 10. Transition of relation between ICS and IOS at Fukuyama No. 2 BF.

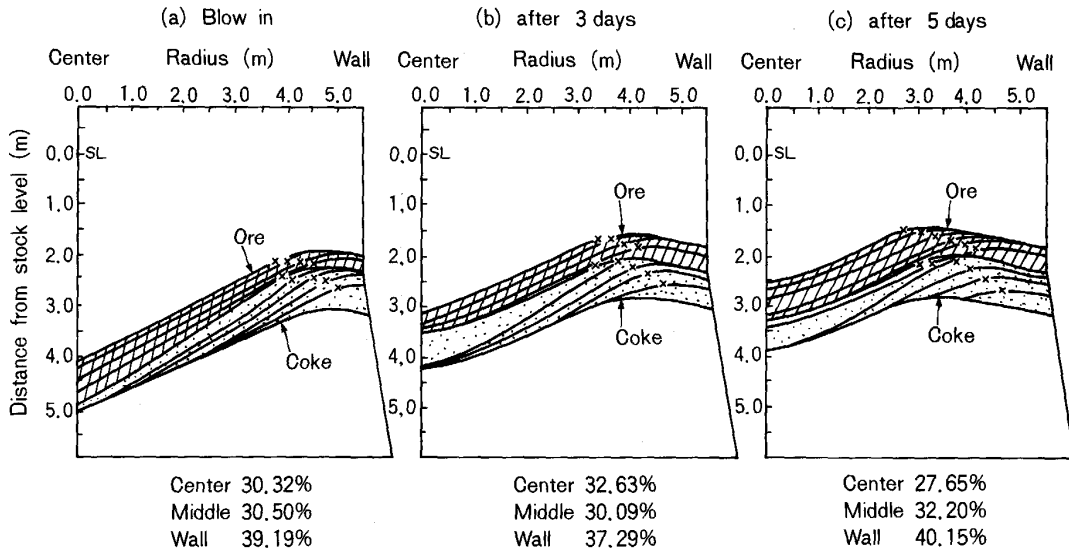


Fig. 11. Transition of burden distribution by simulation model at Keihin No. 1 BF.

うに 15 ポイントの傾動角を設定した。次に、福山第 2 高炉の実績をもとにシミュレーションモデルを用い、京浜第 1 高炉の火入れ時の装入物分布を設計した。Fig. 11 にその結果を示す。周辺部に 2m~2.5m 程度のテラスをもつ分布形状を形成させるために、火入れ直後から多重リング装入を指向、すなわちコークスについては火入れ直後から 5 重リング装入、鉱石については 4 重リング装入から始め、コークス比の低減とともにリング数を増加させ 6 重リング装入を採用することとした。さらに、分布指数についても鉱石は 0.40、コークスは 0.33 と、福山第 2 高炉の安定操業時の値と同様になるように設計した。京浜第 1 高炉は 1989 年 11 月 28 日に火入れを行ったが、この計画に従い装入物分布制御を変更した結果、火入れ後、約 2 週間で出銑比 1.90 t/d・m<sup>3</sup> を達成で

きた。火入れ後の代表的マイクロ波プロフィールメーターによる分布形状および上部水平ゾンデによる径方向のガス流分布の測定結果を Fig. 12 に示す。この分布形状の測定結果は Fig. 11 (c) の装入物分布シミュレーションモデルによる計算結果と比較すると良く一致しており、実炉においても周辺部に 2m~2.5m 程度のテラスが形成されていることが、また、上部水平ゾンデのガス流分布は福山第 2 高炉の安定操業時と同様、周辺部だけでなく中心部のガス流も確保できていることが明らかとなった。これらの測定結果は、測定による変動が少なく、分布制御の再現性についても優れていると推定された。

京浜第 1 高炉は、火入れ後、約 2 週間で出銑比 1.90 t/d・m<sup>3</sup> を達成したが、その後も今回検討した分布制御をもとに、さらに分配シュートを炉中心側に傾動し、コー

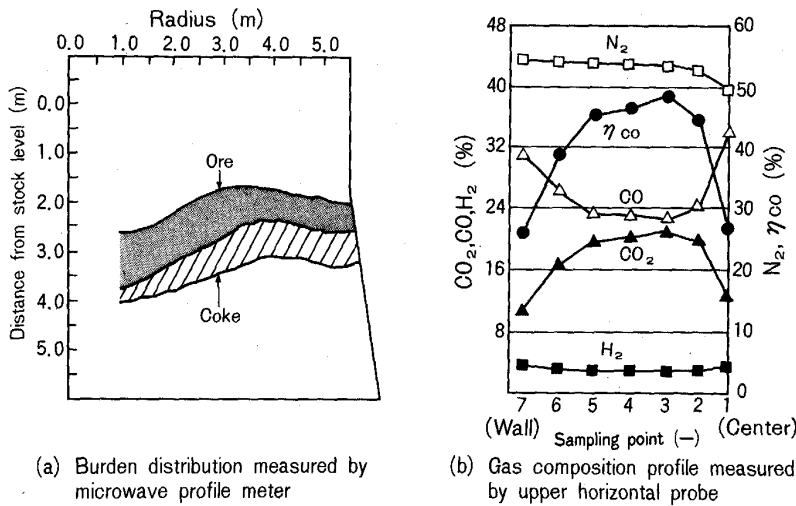


Fig. 12. Typical pattern of burden distribution and gas composition profile at Keihin No. 1 BF.

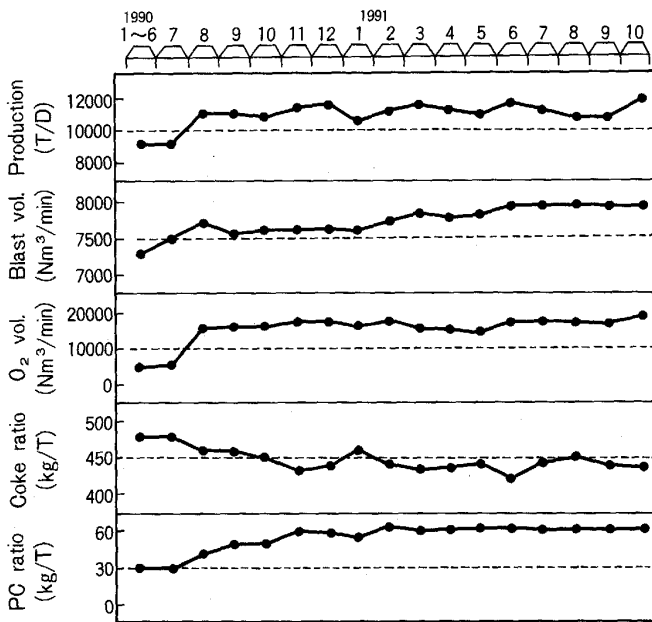


Fig. 13. Transition of Keihin No. 1 BF operation.

クス・鉱石とも7~8の多重リング化を図り、テラス長さを2.5~3.0mにすることにより、Fig. 13に示すように約1年間にわたる11000 t/dの高出銑操業を継続している<sup>7)</sup>。この高出銑操業の継続も、今回開発した装入物分布シミュレーションモデルの活用が大きく寄与していると考えられる。

### 5. 結 言

ベルレス装入装置を設置した大型高炉である京浜第1高炉において、装入物分布シミュレーションモデルを構築し、実炉に適用した。本モデルの開発および適用から得られた結論を以下に示す。

1)京浜第1高炉の1/10規模模型と福山第2高炉の実

物大模型および1/10規模模型を用いた実験により分布形状を比較した結果、ベルレス装入装置の単重リング装入時の分布形状のパターンは炉口径を問わず基本的に同一であり、またその各パターンの変化と形状を支配するパラメータは原料衝突点と炉壁との距離で決まることを見出した。さらに下部バンカーからの原料排出時の粒度変化を実炉で測定した。これらの結果に従来からの知見であるガス流速、下層面形状、装入物降下の影響を加え、京浜第1高炉用の装入物分布シミュレーションモデルを構築した。

2)福山第2高炉の火入れ操業実績を活用するため、その分布形状を鉱石分布指数・コークス分布指数を用いて解析し、本装入物分布シミュレーションモデルを介して京浜第1高炉に適用した。その結果、火入れ後、約2週間で出銑比1.90 t/d・m<sup>3</sup>を達成した。さらに本装入物分布シミュレーションモデルを操業の指針選定に用い、約1年間にわたり安定して11000 t/dの高出銑操業を継続した。

### 文 献

- 1) 山本亮二, 中島龍一, 牧 章, 炭竈隆志, 斎藤典生, 和田 隆: 鉄と鋼, **72** (1986), S74
- 2) 山本亮二, 岸本純幸, 斎藤典生, 有山達郎, 西尾浩明, 佐藤道貴: NKK 技報, **106** (1985), p. 1
- 3) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1878
- 4) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2330
- 5) 中島龍一, 岸本純幸, 堀田裕久, 下村昭夫, 炭竈隆志, 桜井雅昭: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 994
- 6) 福武 剛, 藤田 勉, 田中康夫: 川崎製鉄技報, **14** (1982), p. 405
- 7) 下村昭夫, 服部道紀, 飯野文吾, 木村康一, 脇田 茂, 築地秀明: 鉄と鋼, **78** (1982), T41