

© 1987 ISIJ

ベルレス装入法における装入物分布推定 モデルの開発

論文

奥野 嘉雄*・松崎 真六*・国友 和也*²
磯山 正*³・草野 祥昌*³

Development of a Mathematical Model to Estimate Burden Distribution in Bell-less Type Charging for Blast Furnace

Yoshio OKUNO, Shinroku MATSUZAKI, Kazuya KUNITOMO,
Mashashi ISOYAMA and Yoshiaki KUSANO

Synopsis:

Many types of burden distributions can be produced by bell-less type charging equipment for BF. However, the change in configuration of burden layer occurs in a furnace top. Therefore, the accumulated state of burden has been investigated by using an experimental apparatus built on a scale of one third of Muroran No. 1 blast furnace, and a mathematical model to estimate the burden distribution has been developed.

1) Materials charged at each turn of rotating chute form the burden layer with convex surface on the landing area.

2) Ore layer formed after each turn of rotating chute shows different configuration before and after occurrence of the coke layer collapse.

3) Change in particle size distribution depends on the charging conditions and gas flow. A regression equation expressing these relations has been obtained.

4) On the basis of the findings, a mathematical model in which the in-furnace parameters affecting burden distribution are taken into consideration has been developed. This model has a feature in regard to introduction of the idea that the imaginary unit volume is given by dividing one dump volume of materials into many pieces and burden distribution is constructed by accumulation of the unit volume.

By applying the mathematical model to Muroran No. 1 blast furnace, the suitable furnace operation has been obtained.

1. 緒 言

多くの高炉で採用されつつある旋回シュート型ベルレス装入装置は、装入物投入位置の選定や装入量の配分により種々の装入物分布形状をつくることことができる。しかし、この装置では装入条件（装入方式、装入量、装入深さなど）に幾通りもの組合せがあるので、操業に適した装入条件を従来の経験的知見のみで選定することは難しくなっている。このため、適正な装入条件が容易に選定できる精度の高い装入物分布推定モデルの開発が強く望まれている。装入物分布を精度よく推定するには、装入物の性状や装入条件だけでなく、装入物が高炉内の堆積

層表面に積みあがる途上で示す堆積層形態の変化をも考慮する必要がある。この変化は投入される装入物の堆積面での力学的作用、ガス流分布や装入物降下速度分布による堆積層形状の変化に由来して生じる。梶原ら¹⁾や山本ら²⁾が報告している推定モデルでも混合層の形成やガス流分布の堆積層形状への影響が考慮されている。筆者らも精度の高い推定モデルを得るためには、装入物の高炉内での堆積過程を定量的にとらえることが重要であると考え、模型実験により装入物の落下点付近における堆積状況、コークス層崩れを伴って炉芯側に流入する鉱石の堆積状況、さらには堆積層の形成に伴って生じる炉半径方向の粒度偏析状況を調べた。この知見を基にベルレ

昭和 59 年 4 月・60 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 7 月 12 日受付 (Received July 12, 1985)

* 新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 (Murooran R & D Lab., Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Murooran 050)

*² 新日本製鉄(株)製鉄研究センター日吉分室 (Ironmaking Technology Lab., stationed at Hiyoshi, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Murooran Works, Nippon Steel Corp.)

ス装入法の装入物分布推定モデルを開発した。また、本モデルの高炉への適用により良好な操業成績が得られた。

2. 実験方法

装入物の堆積状況を調べるために、Fig. 1 に示す実験装置を作成した。本装置は室蘭第1高炉（炉頂径 6.55 m）の炉上部を約 1/3 に縮尺した円筒形模型である。炉頂部の巡回シュートは上記の高炉に合わせて角形で内面は平滑である。シュート傾動角は HEYNERT³⁾ と同一とした。また、空気は装置下部より流すことができる。装入物は装置下端の4組のテーブルフィーダーから連続的に排出される。炉頂部の堆積層表面は排出装置により影響されないことを確かめている。標準の実験条件は、送風量 200 Nm³/min（空塔速度 0.84 Nm/s）、鉱石とコークスの装入量比率（O/C と以後記す）3.5、コークスの装入量 345 kg/ch である。装入物粒径はコークス 5~30 mm、鉱石（焼結鉱）1~18 mm で、それぞれの算術平均粒径は 18 mm, 6.7 mm である。送風量は高炉炉頂部ガスの温度、成分から求まるガス流量と装入物の平均供給粒径とを用いて FROUDE 数を計算し、この値が実験装置においても同一となるように与えた。シュートの巡回速度は高炉と同じく 8 rpm とした。また、各シュート傾動角での巡回数も高炉と同一とした。シュート巡回速度に関係する相似条件を満足させるべく、巡回速度を大きくして堆積層形状の変化を調べた。しかし、栗原⁴⁾ が報告するように、巡回速度を増すと稜線形成位置が炉壁側に移るという変化はほとんど認められなかった。これは、シュート断面形状が従来のU形とは異なる角形のシュートを用いたためと考えられる。したがって、巡回速度は 8 rpm とした。装入物の落下軌跡は軌跡を横切るように検知棒を設け、装入物が衝突する

範囲を測定することにより求めた。また、落下層内での装入物の重量分布は数室に区切られた容器を装置内に設置し、各室に入る装入物重量を測定することにより得た。堆積層の表面形状は重錘型検尺計により求め、鉱石とコークスの層境界面形状は電気抵抗式層厚計⁵⁾により求めた。一方、堆積層の粒径分布は、円筒形サンプラー（径 110 mm, 長さ 320 mm）を層中に挿入し、筒内試料を吸引採取して測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 装入物の落下軌跡と着地面での堆積状況

測定した落下軌跡とその層幅を Fig. 2 に示す。コークスよりも鉱石の落下流量を大きくしているので、鉱石は広い落下層幅を示す。このため、層幅方向の中央位置を結ぶ軌跡線は鉱石の方がコークスよりもいくらか上側にきている。巡回シュートからの落下軌跡は、シュート面上で装入物粒子が相互に作用せずにシュート先端の中央位置から飛び出すとすれば、(1)式により推定される。計算で求めた軌跡を同じく Fig. 2 に示すが、実験値とはほぼ一致している。Fig. 3 に座標の説明を示す。

$$y = \frac{g}{2V^2 \sin^2 \theta} \left(x - \frac{T}{2} \cos \theta \right)^2 - \left(\frac{gl}{V^4} - \frac{\cos \theta}{V^2} \right) v \sqrt{\frac{V^2}{\sin^2 \theta} \left(x - \frac{T}{2} \cos \theta \right)^2 - \omega^2 l^4} + \left\{ \frac{gl^2 v^2}{V^4} - \frac{gl^2 + 2lv^2 \cos \theta}{2V^2} + l \cos \theta - \frac{T}{2} \sin \theta + h_0 - H_0 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $V^2 = v^2 + \omega^2 l^2$ 。y, x: 炉軸と装入線との交点を原点とした垂直、水平方向の距離 (m), v: シュート先端での粒子速度 (m/s), ω : シュート角速度 (rad/s), l:

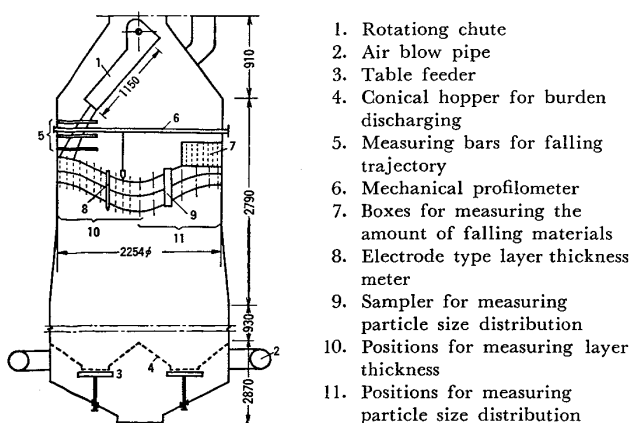


Fig. 1. Experimental apparatus.

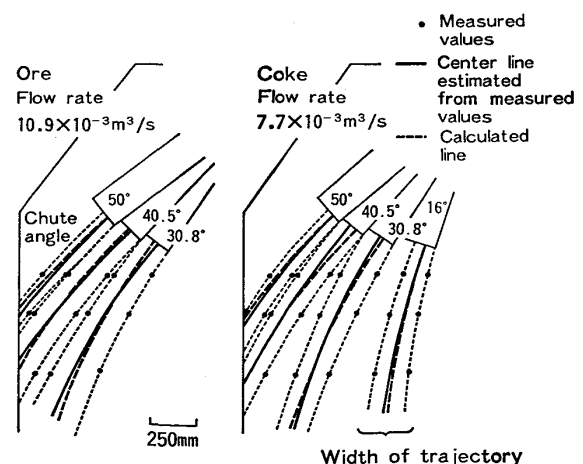


Fig. 2. Comparison of experimental results with calculated results of trajectories.

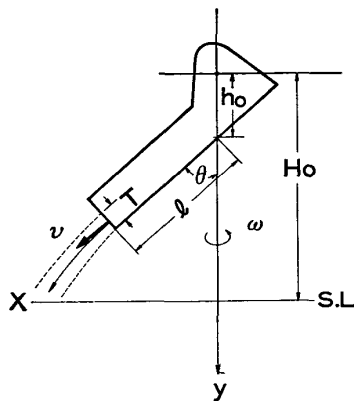


Fig. 3. Notations used for eq. (1).

シュート面上の装入物滑走距離 (m), θ : 垂直線に対するシュート傾動角 ($^{\circ}$), h_0 , H_0 : シュート支持点からシュート面上の装入物落下点までと, 装入線位置までの垂直距離 (m), T : シュート先端での体積流量から求まる装入物の落下層幅 (m), g : 重力加速度 (m/s^2)

一方, 落下層の着地点付近における堆積状況を知るために, 落下層の層幅方向における重量分布を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。重量分布はシュート傾動角が異なっても最も重量の多い位置 (主流線と呼ぶ) を中心に軸対称に近い山形分布を示している。従来の報告⁶⁾と異なり, 軸対称に近い分布を示すのは底面が平滑なシュートを用いたためと考えられる。また, 落下層の着地状況をみるために着色した鉱石をシュート 1 旋回の単位で装入した。着地点付近の堆積層形状は縦断面方向に挿入したガラス面を通して観察した。観察結果を Photo. 1† に示す。回転ごとに投入される装入物は 炉芯側に流入しつつもその着地点付近で凸面形状の堆積層をつくる。この層の頂部は次の回転で投入される装入物により

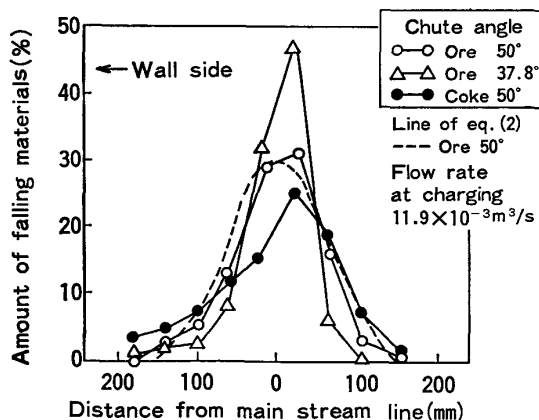


Fig. 4. Distribution of amount of falling materials.

† 写真, 図中に示す装入モード内の数字はシュート傾動位置を示す番号で, 小さい値ほど原料は炉壁近傍に装入される。

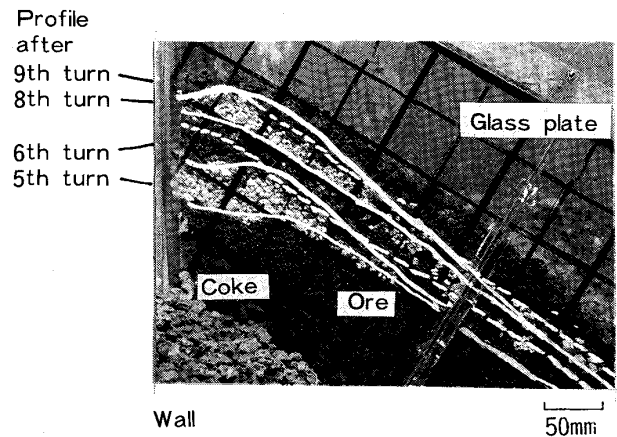
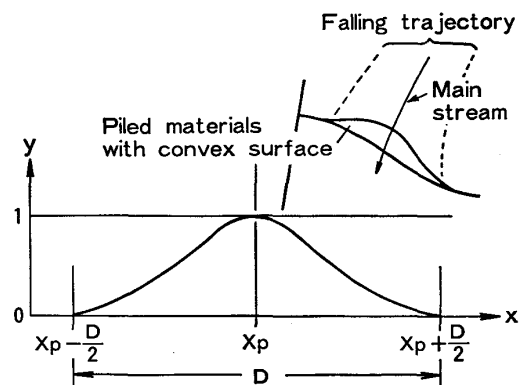

 Photo. 1. Change in profile of ore layer during charging (Charging mode CC_8OO_8).


Fig. 5. Distribution of falling material for calculation of profile with convex surface.

炉芯方向へ押し出されるようにして崩される。この状況は鉱石の方が明瞭にみられる。ただし, 最終旋回の装入物, または次旋回の装入物落下地点が落下層幅以上に離れ, かつ, 着地面が平坦な場合, この凸面形状は保持される。したがって, 推定モデルでは凸面形状の堆積層がまず落下層の着地範囲内でつくり (Fig. 5 の右上図), 次いでこの層が安息角以上の傾斜面角度であれば崩れて着地範囲外に流出し, 新たな堆積層をつくると考える。推定モデルでの凸面形状は (2) 式で表示する。この式は落下層内で山形の重量分布を示す装入物がそのまま着地面に堆積されるとして与えるものである。(2) 式の説明図を Fig. 5 に示す。計算結果の一例を Fig. 4 に示す。

$$\eta = (\cos \zeta + 1) / 2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで, $\zeta = \pi(x - x_p) / (D/2)$ ($-\pi \leq \zeta \leq \pi$, それ以外は 0) η : 主流線位置の堆積層高さを 1 とする相対値 (-), D : 着地面での落下層の層幅 (m), x : 炉軸からの距離 (m), x_p : 炉軸から主流線位置までの距離 (m)

3.2 落下点と稜線形成位置

堆積層が示す凸面形状の頂点, すなわち, 傾斜面角度

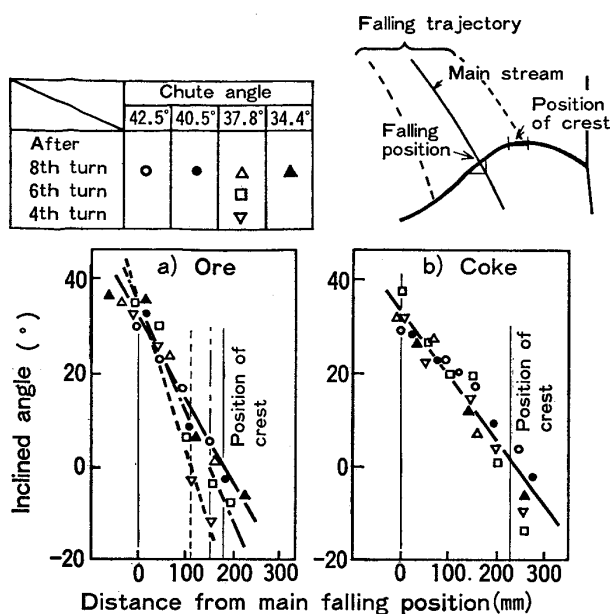


Fig. 6. Changes in inclined angle of burden profile between falling position of materials and position of crest.

が0となる稜線形成位置は装入物の落下点（主流線と堆積面との交点）とは一致せず、常に炉壁側にずれる。正確な稜線形成位置を求めることはこの位置付近の鉱石とコークスの層厚比やコークスの崩れ層深さを精度よく推定するために重要である。そこで、落下点から稜線形成位置に向う傾斜面の角度を50 mm 間隔で測定した。測定はシュート傾動角を変えて得られる最終の8旋回目の堆積層について行つた。また、同一の傾動角で4, 6, 8旋回目の装入後に現れる堆積層についても測定した。その結果を Fig. 6. に示す。落下点と稜線形成位置との間で変化する傾斜面角度は距離との対応ではほぼ直線関係を示す。稜線形成位置のずれは落下層の入射角度と堆積層の傾斜面角度とに依存すると考えられる。しかし、これらの角度が異なるようにシュート傾動角を変化させた実験では、稜線形成位置のずれ、すなわち、落下点からの距離はほとんど変化しなかつた。むしろ、鉱石層では4, 6 旋回目の少ない旋回時点での値の方が角度変化の勾配は大きく、落下点からの距離が短くなる傾向を示した。この変化は鉱石の落下エネルギーや堆積層の充填状況に関連する問題であると考えられるので今後別途に検討したい。落下点から稜線形成位置までの距離と傾斜面角度との関係は厳密には直線で示せないが、推定モデルでは直線近似ができるとして稜線形成位置までの距離と同位置近傍の堆積層形状を推定することとした。

3.3 コークス層崩れと鉱石層の堆積形状

鉱石がコークス層表面に積載されるとその荷重力を受

けてコークス表層部は崩れる⁷⁾。シュート1旋回ごとに装入される鉱石が崩れを伴うなかでどのような堆積層形状を示すかは、鉱石の堆積過程をモデル化する場合に重要である。そこで、コークス層表面に積みあがる鉱石層の表面形状をシュート1旋回ごとに測定した。また、鉱石全量装入後に鉱石とコークスの層境界面形状を測定し、鉱石装入前のコークス層表面形状との差からコークス層の崩れ発生領域と崩れ後の堆積領域を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。鉱石層の堆積状況はコークス層崩れが生じる前後で異なっている。すなわち、2旋回目までの装入ではコークス層崩れがなく、鉱石の堆積層は炉壁部だけに形成されている。3旋回目の装入でコークス層の崩れが生じている。炉壁部と中間部のコークス表層部は炉芯側に押し出されるようにして崩れている。鉱石自身も中間部にまで流入して堆積層を形成している。なお、2旋回目までの鉱石層も一部はコークスの崩れ領域にあとから流入している。崩れたコークスは緩やかな傾斜面を示して炉芯部に多く堆積している。4旋回目の装入鉱石はコークスの崩れ層表面上に流れ込み、その表面の大部分と接しながら堆積層を形成している。5旋回目以降の装入鉱石は炉芯にまで流れ込んで堆積層を形成している。このような堆積状況は装入モードが異なつた場合にも認められる。したがって、推定モデルにおいて、鉱石の各堆積層はコークス層崩れが生じる以前では鉱石装入前のコークス層表面に積みあがり、それ以降（崩れ時も含む）ではコークスの崩れ層表面に積みあがるとして取り扱う。なお、崩れによるコークス層形状の変化は、すでに筆者らが報告⁸⁾した土質力学の斜面安定理論に基づく考え方でモデル化することとした。

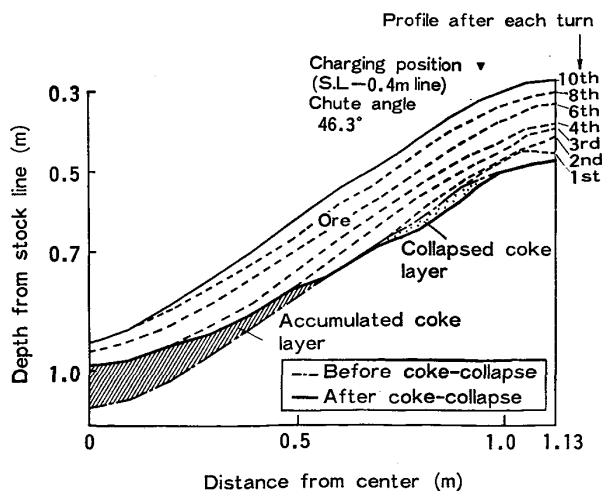


Fig. 7. Profile of ore layer measured at each turn of chute (Charging mode CC_4OO_4 , gas velocity 0.84 Nm/s).

3.4 堆積層の粒度偏析状況

堆積層が炉半径方向で示す粒度偏析は、シュート1旋回当たりの装入量や装入深さ、堆積層厚、ガス流速などにより変化すると考えられる。そこで、これらの条件を変えて粒度偏析を測定した。この測定ではシュート傾動角を一定にして旋回数を変化させた。測定値は近藤ら⁹⁾によって報告されている(3)式を用いて整理した。

$$\ln X_n / (1 - X_n) = -\alpha l_m + \beta \quad (3)$$

X_n : 注目する粒径以下の装入物重量比率 (-), l_m : 装入物流れ方向への距離 (m), α , β : 比例係数と定数 (1/m)

10 mm 以下の鉱石の篩分け量を X_n として求めた結果を Fig. 8 に示す。粒度偏析状況は装入物流れ方向の距離に対してほぼ直線関係で表示され、(3)式の適用が可能であることを示している。図中の勾配、すなわち、比例定数 α は装入物落下点付近を境に炉芯側と炉壁側で異なる。両直線の交点は炉中間部にあるが、これは装入深さの小さい装入条件を選んだことによる。なお、篩目を変えて異なる X_n の場合の勾配を比較したが、大きな差異は認められなかった(勾配の平均標準偏差 0.19)。炉芯側と炉壁側の勾配について装入条件およびガス流速との関係を重回帰解析によって調べ、鉱石とコークスのいずれにも適用できる(4)式と(5)式を得た。重相関係数はそれぞれ 0.85 と 0.90 である。これらの式を得るために、実験値のみならず火入れ前の高炉内で測定した値も用いた。勾配は、前者の場合は 10 mm 以下の鉱石と 20 mm 以下のコークスの篩分け量から求め、後者の

場合は同じく 20 mm 以下と 50 mm 以下の篩分け量から求めた。

$$\alpha_c L = 8.70 \times 10^{-3} (V_s^2 / Lg)^{-0.50} (d_p / L)^{-0.59} (H/L)^{0.17} \tan \phi^{0.46} (1 - u/u_{mf})^{0.46} \quad (4)$$

$$\alpha_w L = 4.59 \times 10^{-3} (V_s^2 / Lg)^{-0.57} (d_p / L)^{-0.58} (H/L)^{0.19} \tan \phi^{0.69} (1 - u/u_{mf})^{0.55} \quad (5)$$

ここで、 $V_s = W / (2\pi RL)$ 、 α_c , α_w : 炉芯側と炉壁側に向う勾配 (1/m), L : 1 旋回の装入量が示す平均堆積層厚 (m), d_p : 装入物算術平均粒径 (m), H : 装入線からの深さ (m), ϕ : 装入物の安息角 (°), u , u_{mf} : ガス空塔速度および流動化開始速度 (m/s), W : 装入物供給速度 (m^3/s), R : 炉軸から装入物落下点までの水平距離 (m), g : 重力加速度 (m/s^2)

両式から粒度偏析状況を推定するには、両直線の交点位置を与える必要がある。この位置は落下点とは一致せず、常に炉芯側にずれる。この理由は、旋回シュート上で粒度分級が生じて細粒部分が落下層の下面側で多くなることや装入物が落下点付近で局所的に堆積したあと次旋回の装入物により炉芯側に押し出されることによる。押し出しの長さは堆積層が押し出される時の加速度と比例関係にあるとして推定モデルでは計算することとした。

4. 数式モデルの考え方と構成

数式モデルの作成にあたり次の仮定をおいた。計算は 1 チャージの装入をサイクルとして行つた。

1) 装入物の堆積は全投入量を小分割して得られる仮想の単位量(シュート旋回数またはそれ以上の数で分割する量)が逐次積みあがることにより進む。

2) 仮想単位量の堆積層が示す粒度偏析は炉半径方向のみで生じ、高さ方向では生じない。

3) ガスはプラグフローで流れる。

鉱石堆積層の形成過程の考え方を Fig. 9 に示す。第 1 段階として、旋回シュートからの落下軌跡線(落下層幅の中央に位置する線)と前装入の堆積層表面との交点を落下点として、その点上に仮想単位量をつみあげる。単位量ごとにつくられる堆積層の凸面形状(一次形状と呼ぶ)は(2)式で与える。なお、鉱石装入前のコークス層表面形状はガス流速分布と装入物降下速度分布による変化を考慮して決定する。ガス流速分布は計算の初めに仮りの値を与える。堆積層形状のガス流速分布による変化は西尾らの式によって計算する²⁾。また、降下速度分布は高炉内測定値を与える。第 2 段階として、一次形状を示す堆積層を仮想単位量ごとに崩れ前のコークス層表面に積みあげる。この堆積層の荷重力によって下側のコークス層内に円弧状のすべり面が生じる状態を考え、一

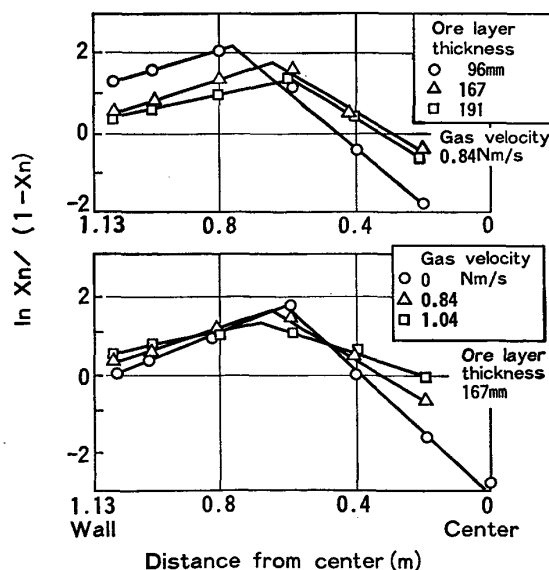


Fig. 8. Effects of ore layer thickness and gas velocity on particles size segregation in the radial direction (Charging mode $\text{C}_4\text{C}_4\text{OO}_4$).

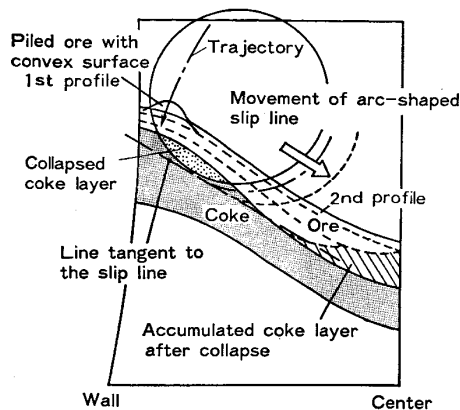


Fig. 9. Schematic diagram for formation of ore layer involving coke-collapse.

次形状の堆積層を積みあげるたびにそのすべり面の最小安全率を計算し、この値が限界安全率に達する時点でコークス層崩れが生じるとする⁸⁾。その崩れ領域は円弧状のすべり面がコークスの内部摩擦角に相当する角度で炉芯側に移動して作る面とその面上の崩れ前に示すコークス層表面で仕切られる領域とする。コークス層が崩れて流れ込む領域は炉芯に近い最終位置のすべり面とそのすべり面の下側に位置する崩れ前のコークス層表面で仕切られる領域とする。ただし、後者の領域は第3段階でさらに修正される。すべり面の最終位置は崩れ量と流れ込み量とが等しくなる条件を満足させることにより決定する。これらの取扱いにより、崩れ後のコークス層表面形状が求められる。なお、崩れに伴う鉱石のコークス層内への混入は無視した。第3段階として、崩れ後のコークス層表面に鉱石の一次形状の堆積層を初めから積みあげるとともに、その堆積層の炉芯側への流入によつて新たにつくられる堆積層の形状（二次形状と呼ぶ）を単位量ごとに求める。その求め方は、一次形状の堆積層が単位量ごとに安息角以上の傾斜面角度であるかを調べ、安息角以上であれば安息角と等しくなる形状に修正する。また、コークス層崩れ時に流入する鉱石堆積層の表面と炉芯部を主体に堆積するコークスの崩れ層表面とが不連続にならないようにすべり面の最終位置を修正する。この場合もコークスの崩れ量と流れ込んで堆積する量とが等しくなる条件を満足させる。崩れを生じさせた鉱石の層表面と接続する状態で堆積するコークス崩れ層の表面形状は安息角（ガス流の影響を考慮）によつて決まるものとする。これらの修正はいずれも Fig. 7 に示した実験からの知見に基づく。第4段階として、二次形状の堆積層について炉半径方向の粒径方向の粒径分布を単位量ごとに(3)、(4)、(5)式により計算する。この粒径分布を用いて堆積層が積みあがるつどガス流速分

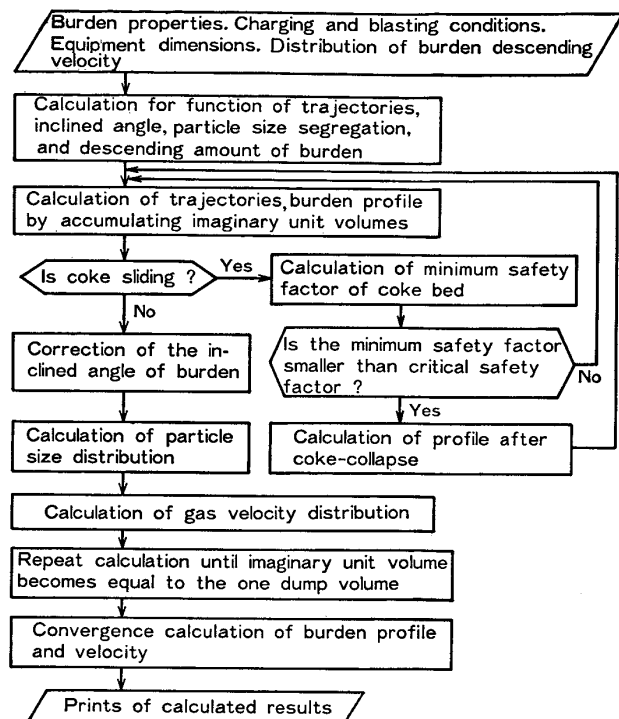


Fig. 10. Calculation flow of mathematical model.

布を計算し、ガス流速分布による表面形状の変化を修正する。計算に必要な空隙率は山田ら¹⁰⁾の式を用いた。堆積層形状の装入物降下速度分布による修正は1ダンプ量を単位として行う。ガス流速分布や降下速度分布による修正は堆積層の形状差が5mm以下となるまでの収斂計算によつて行う。

一方、コークス堆積層の形状および粒径分布の求め方は、コークス層崩れについての処理を除けば鉱石の場合と同じである。ただし、崩れ後における粒径分布は、崩れ領域のコークスがその領域で示す粒径分布（炉半径方向の分布）を保持して流れ込み領域に平行移動するとして崩れ前の値を修正する。

計算手順を Fig. 10 に示す。初期条件として装入条件、装置寸法、操業条件、装入物降下速度分布（測定値）などを与える。

5. 推定モデルの検証

操業中の高炉ではコークス流れ込み後のコークス堆積形状や層厚は測定できない。そこでモデル計算結果を検証するために、模型実験によつて装入条件を大きく変化した場合（鉱石を二分割して装入し、かつ一番目の鉱石を炉芯側に寄せて装入する条件）の実験値と計算値を比較した。その結果を Fig. 11 に示す。装入物の形状と層厚比分布 ($L_o/(L_o+L_c)$, L_o , L_c : 鉱石とコークスの層厚) は、崩れ状況を知るために崩れ前の値も示して

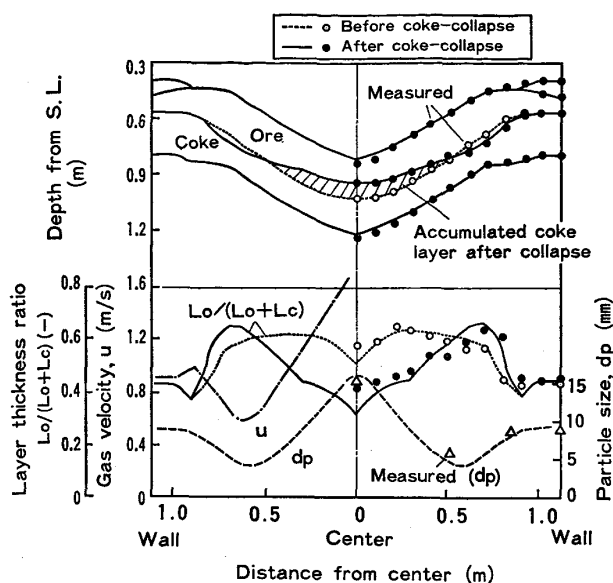


Fig. 11. Comparison of burden profile, layer thickness and particle size calculated by the model with one measured by the apparatus (Charging mode $CC_{23468}OO_{910}O_{345}$, O/C 3.3, gas velocity 0.84 Nm/s).

ある。モデルから算出した堆積層形態は実験値とほぼ一致している。コークス層崩れ後の層厚比は炉壁部から中間部の範囲で高く、炉芯部でかなり小さくなっている。層厚比の最大位置は粒径が最小となる位置よりも炉壁側にあるのでガス流速が最小となる位置は粒径の最小位置よりもいくらか炉壁側にずれている。このように装入条件が大きく異なつた模型実験の結果もモデル計算の値とは良く一致している。さらに、モデルから計算されるガス流速分布と稼動中高炉のシャフト上段ゾンデによつて測定されるガス成分分布との対応性を調べた。比較しやすいように、後者については炉上部と朝顔部間のガスがプラグフローであると仮定して鉱石から奪う酸素量（炉上部ガス流量当たり）をガス成分値より求め、この値がガス流量に逆比例するとして相対ガス流速分布を求めた¹¹⁾。モデル計算とゾンデ測定に基づくガス流速分布から炉壁、中間、炉芯部の特定範囲（範囲を Fig. 12 に示す）における平均ガス流速を求め、百分率（ガス流速比と呼ぶ）にて三角ダイアグラム上に図示した。各範囲は、装入モードによる堆積層形状変化が大きい炉壁部での範囲、堆積層厚よりも粒径分布によるガス流速変化が大きい中間部での範囲、コークス層崩れによるガス流速変化が大きい炉芯部での範囲を模型実験結果から求め、決定した。計算値およびゾンデ測定値から求まるガス流速比を Fig. 12 に示す。前者にくらべ後者の中心ガス流速比が特に低い値を示しているが、これは、コークス崩れ層内への鉱石混入や中間部ガスの炉芯部への流入

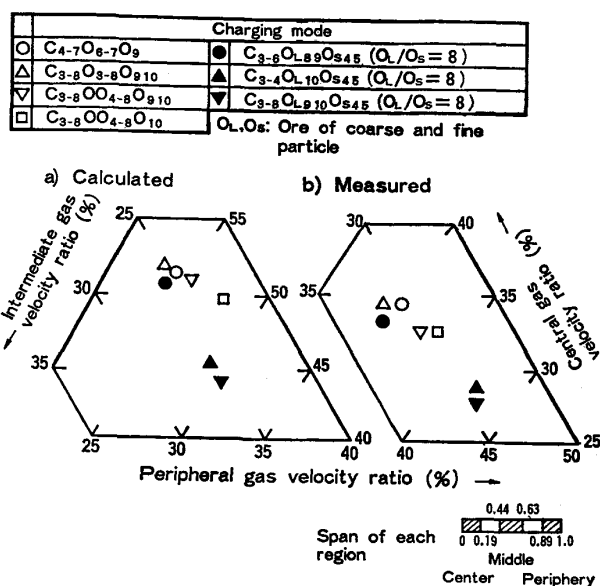


Fig. 12. Comparison of gas velocity ratios calculated by the model with those measured by the probe.

(ファネルフロー現象) により¹²⁾、炉芯部のガス中 CO_2 濃度が高く検知されることによると考えられる。しかし、装入モードによつて変化する両ガス流速比の相対位置はほぼ一致している。

6. 高炉への適用

推定モデルをベルレス式装入の室蘭第1高炉（炉容 1 245 m^3 ）に適用した。適用に際して、あらかじめ種々の装入条件下におけるガス流速分布の違いが容易にみとれるように前節で述べた手法によつてガス流速比を計算してダイアグラム上に図示した。Fig. 13 にその一例を示す。図中に示すごとく、ダイアグラム上に望ましいガス流速比の範囲が与えられれば、採用すべき装入条件はすみやかに選定できる。望ましいガス流速比範囲は過去に良好な操業成績を示した数基の高炉の装入および操

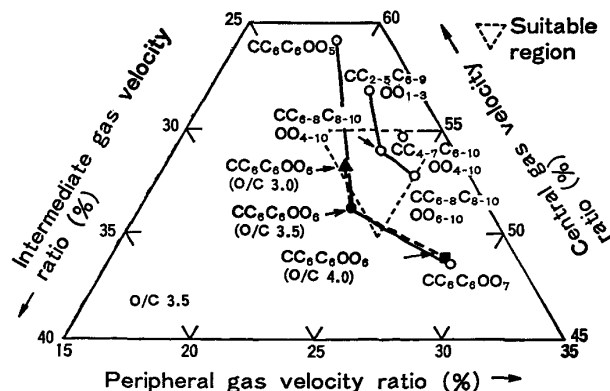


Fig. 13. Diagrams of the relation between charging conditions and gas velocity distribution.

Table 1. Performance data of Muroran No. 1 blast furnace (during all coke operation, bell-less top).

Items	Shorten word	Jan.-March 1982	April-June 1982
		Application of model	
Typical charging mode		CC ₅ C ₆ OO ₅ , CC ₅ C ₅ OO ₅	CC ₅ C ₇ C ₈ OO _{7.8} , CC ₄ C ₇ C ₈ OO ₄₋₁₀
Production rate (t/m ³ ·d)		1.55	1.61
Coke rate (kg/t-p)		493	480
Corrected coke rate* (kg/t-p)		493	488
Burden			
Sinter (%)	SR	79.7	79.1
Fluxed pellet (%)	FP	4.9	3.7
Acid pellet (%)	AP	1.6	3.2
Metallic pellet (kg-Fe/t-p)	M	35	25
Lime stone (kg/t-p)	LS	11.5	9
Coke ash (%)	CA	11.1	10.1
FeO in sinter (%)	FeO	4.62	4.74
Blast			
Temperature (°C)	BT	1150	1167
Moisture (g/Nm ³)	BM	31.0	25.2
Number of slip (times/month)		2.3	0.5
Hot metal			
Si (%)	[Si]	0.78	0.64
S (%)		0.018	0.017
Temperature (°C)		1517	1505
Slag volume (kg/t-p)	SV	298	294
Top gas utilization ratio (%)		49.2	50.7

* The value corrected by the equation, $\Delta CR = -1.0\Delta SR - 0.5\Delta FP - 0.3\Delta AP - 0.36\Delta M + 0.2\Delta LS + 5.6\Delta CA - 4.0\Delta FeO - 0.12\Delta BT + 0.8\Delta BM + 30\Delta [Si] + 0.15\Delta SV$.

業の条件を推定モデルに入力してガス流速分布を計算することにより求めた。室蘭第1高炉において装入原料や操業の条件さらには装入物降下速度分布が異なるつど、望ましいガス流速比を得るための装入条件（主に装入モード）を上述のダイヤグラムから選定し、高炉に適用した。ガス流速比が望ましい範囲に保持されるとともにガス利用率向上や装入物降下の安定が得られた。推定モデル適用前後の3か月間にわたる操業成績を Table 1 に示す。モデル適用前後のコークス比を補正值と比較すると適用後の値は 5 kg/t-p 低くなっている。この主因として、推定モデルに基く装入物分布調整によつて望ましいガス流速分布が長期にわたつて得られたことがあげられる。

7. 結 言

ガス流と装入物降下の条件を与えた実験装置によりシュート1旋回ごとに積みあがる装入物の堆積状況を調べ、その知見をもとにベルレス装入法の装入物分布推定モデルを開発した。主な内容は次のとおりである。

1) 旋回シュートから落下する装入物は広い流れ層幅をもつので、その着地面では凸面形状の堆積層がつくら

れる。この堆積層の後縁形成位置は落下点と一致せず炉壁側にずれる。

2) シュートの旋回ごとにつくられる鉱石の堆積層はコークス層崩れが生じる前後でその形成状況を異にする。崩れ前の堆積層は炉壁部にとどまるが、鉱石装入によつて崩れが生じる時の堆積層は鉱石がコークスの崩れ層を押し出すようにして中間部まで流入してつくられる。また、崩れ後の堆積層は前旋回の鉱石堆積層表面上を炉芯部まで投入鉱石が流入してつくられる。

3) 堆積層が示す粒度偏析状況は装入条件やガス流速によつて変化する。これらの要因との関係をあらわす重回帰式が実験値および高炉内の測定値から求められた。

4) 実験で得られた知見をもとに、装入物の堆積が仮想の単位量の積みあげにより進むものとし、その過程で生じる堆積層形状と粒度偏析の変化を考慮した装入物分布推定モデルを開発した。

5) 本モデルの高炉への適用によつて良好な操業成績が得られ、補正コークス比で 5 kg/t-p の低減が図られた。

文 献

- 梶原義雅, 神保高生, 上甲忠嗣, 網永洋一, 稲田隆信: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 175
- 山本亮二, 岸本純幸, 斎藤典生, 有山達郎, 西尾浩明, 佐藤道貴: 日本鋼管技報, 106 (1985), p. 1
- G. HEYNERT, K. H. PETERS and G. RINGKLOFF: Stahl Eisen, 93 (1973) 12, p. 505
- 栗原淳作, 高橋洋光, 奥村和男, 菊込洋一, 岡部俠児, 近藤幹夫: 川鉄製鉄技報, 11 (1979), p. 410
- 日本特許 No. 1152592 (1983)
- 近藤幹夫, 小西行雄, 岡部俠児, 富田貞雄, 橋爪繁幸, 栗原淳作: 鉄と鋼, 65 (1979), S 592
- 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 製鉄研究 (1971) 272, p. 23
- 神坂栄治, 奥野嘉雄, 入田俊幸, 松崎真六, 国友和也: 学振 54 委-No. 1668 (昭和 58 年 11 月)
- 近藤幹夫, 小坂橋寿光, 岡部俠児, 丸島弘也, 高橋博保, 栗原淳作: 鉄と鋼, 65 (1979), S 593
- 山田孝雄, 佐藤政明, 高崎伸吉, 嶋村鏝郎, 田口整司: 川崎製鉄技報, 6 (1974), p. 16
- G. M. NIKITIN, V. N. VUKULIN, B. G. PLASTININ, V. V. EMULSHINTSEV and G. L. TSYMBAL: Steel USSR (1979) 10, p. 498
- 和栗真次郎, 金森 健, 森下紀夫, 古代 章, 梶原豊太, 川崎 篤: 鉄と鋼, 66 (1980), S 686