

# 高炉の高精度・高自由度装入物分布制御技術の開発

野内 泰平\*・武田 幹治\*・板谷 宏\*

Development of High Precision Burden Distribution Control Technology with Wide Flexibility at Blast Furnace

Taihei NOUCHI, Kanji TAKEDA and Hiroshi ITAYA

**Synopsis :** A new concept of burden distribution control and charging system have been developed for a stable operation under the high productivity, high pulverized coal rate and high small sized ratio operation condition.

A safety factor analysis based on the soil mechanics was carried out. Reduction of charging weight at a unit area and inclination angle are effective to avoid the layer collapse. The fluidization index indicates that the optimization of particle diameter at the wall is necessary for the stability of burden at the lumpy zone and the dropping zone.

According to these results, multi batch charging, flat burden surface profile and vertical falling trajectory were proposed for a new charging system. Stabilizer, multi-paralleled bunker and high speed rotation chute were applied to No.6 blast furnace at Chiba Works to realize the new charging system.

To improve the controllability of the burden distribution, new methods to calculate surface profile and falling trajectory were incorporated to No.6 blast furnace burden distribution simulator.

**Key words :** blast furnace; bell-less chute; bell-less charging system; surface profile; burden distribution control; safety factor; fluidization index; falling trajectory; scaled model; burden distribution simulator; soil mechanics; simulator.

## 1. 緒言

近年の高炉には、(1)基数集約に伴う高出銑比、(2)コストダウンのための低コークス比(高微粉炭比)操業、(3)原料スペックダウンに伴う小塊焼結鉱多量使用等、いずれも炉内の通気抵抗を上昇させる操業が要求されている。高炉の半径方向のガス流分布を制御する装入物分布制御により通気性の改善を行っているが、炉内通気性の確保と安定的な原料降下の維持が次第に困難となってきた<sup>1-3)</sup>。

装入物分布制御はシャフトガスサンプラーのガス利用率( $\eta_{CO}$ )や固定ゾンデ温度等の分布を指標にして試行錯誤的に制御されている。例えば同じ200 kg/t以上の高微粉炭(PC)比操業でも、炉中心部の $\eta_{CO}$ が炉壁部より約15%低い中心流強化型のガス分布パターンや<sup>4)</sup>、約14%高い炉壁流強化型のガス分布パターンがある<sup>5)</sup>。今後の更なる高出銑比、高微粉炭比操業、安価細粒原料の多量使用には従来の半経験的な分布調整に替わり、理論に基づく装入物分布の設計とそれを実現するための高精度な分布制御装置が必要である。また、複雑化する装入パターンに対応して装入物分布モデルの高精度化も必要であると考えられる。

理論的に装入物分布を検討した例としては、Poveromoらの報告がある<sup>6)</sup>。炉壁 $L_w/(L_o+L_w)$ 上昇時に燃料比が低下

することを示し、低燃料比、高ガス利用率を達成する装入物分布として、粒度、鉱石層厚比ともに、中心部と炉壁を除くほとんどの炉断面でフラットな分布を提案している。また岡部らは通気性を改善するのに鉱石の2分割が有効であることを模型実験により示している<sup>7)</sup>。また、2次元融着帯モデルにより装入物分布制御が炉頂ガスの利用率に及ぼす影響を計算しそれに基づく分布調整を行うことも可能である<sup>8)</sup>。しかし操業上最も重要な装入物の堆積と降下の安定性を指標として装入物分布の評価を行った例は少ない。

佐藤らは炉内のシャフト部では圧力損失が原料の垂直荷重より大きくなると原料降下が不安定化することを示している<sup>9)</sup>。また、武田らは細粒原料使用時の堆積層の崩れを斜面安定性理論により説明している<sup>10)</sup>。一定の操業条件下での装入物分布の目標を理論的に導くには、これら個々の不安定化現象を総合的に評価する研究が必要となる。

本研究では安全率や流動化指数を用いて装入物分布を理論的に評価し、高出銑比、高微粉炭比操業という操業条件に対応した目標分布を明らかにした上で、その分布を実現するための炉頂装入装置のコンセプトを提案する。また、目標分布を高精度に作り込む上で炉頂装入装置(ハード)と同様に重要である装入物分布シミュレーター(ソフト)の機能強化を目的として、落下軌跡、堆積形状の予測精度向上を行ったので報告する。

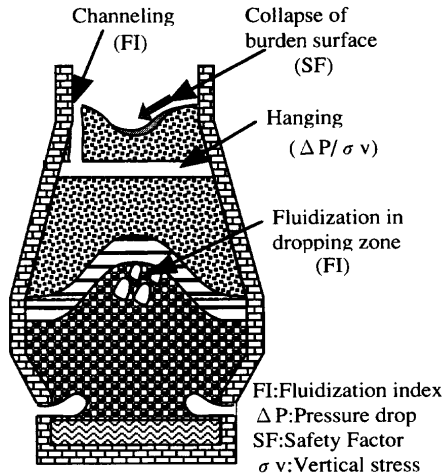


Fig. 1. Instability of blast furnace operation and indexes to evaluate burden distribution.

## 2. 装入物分布の評価指数と検討課題

装入物分布に起因する操業トラブルとそれを評価するための装入物分布評価指数を Fig. 1 に示す。高炉を安定的に操業するには、装入物堆積層の崩れ、シャフト中上部の棚吊りとそれに伴うスリップ、炉下部コークス流動化、吹き抜けなどを発生させないように各評価指数をコントロールする必要がある。

本研究では、各評価指数に基づき理想（目標）とする装入物分布、粒径分布と装入方法を導きだし、次にそれを実現する装入装置の概念設計を行った。

## 3. 装入物分布評価指数による装入物の安定性の評価

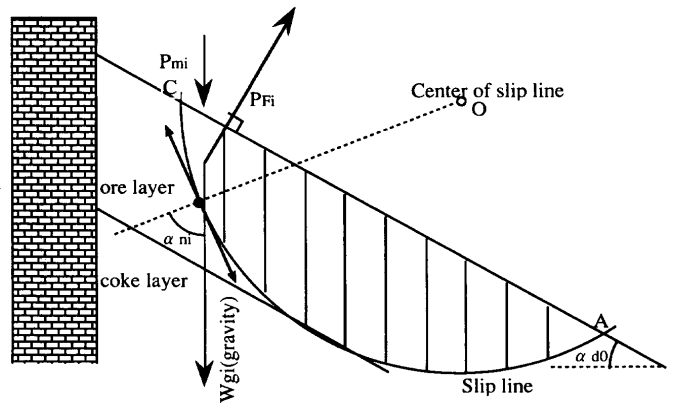
### 3.1 原料堆積時の安定性

土質力学で使われている斜面崩壊に関する解析手法の適用により、ベル高炉での鉍石層崩壊についての検討が行われている<sup>10)</sup>。今回はこの手法を拡張し、堆積層の表面形状、装入速度、通気性が装入物の安定性に及ぼす影響を検討した。

Fig. 2 に鉍石層に働く力の釣合いを示す。コークス層上に鉍石層が堆積し、装入物の自重、ガス浮力、装入物の落下に伴う力が鉍石層に加わり釣合っていると仮定する。このような層の安定性は鉍石層内の滑り面に沿って働く滑り力と、滑り面と垂直な方向に働く力によって生じる摩擦抗力の釣り合いで検討できる。O を中心とした円弧 AC を滑り面として仮定した。クーロンの法則によれば滑り面におけるせん断強さ S は (1) 式で与えられる。

$$S = \sigma \tan \phi_o + C_o \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $\sigma$  は滑り面に垂直な有効圧力、 $C_o$ ,  $\phi_o$  はそれぞれ固有な粘着力、内部摩擦角であり、鉍石の場合通常は



- $P_{mi}$ : Momentum of charged ore at i cell
- $P_{Fi}$ : Pressure drop of gas at i cell
- $W_{gi}$ : Weight of ore at i cell
- $i$ : Cell number
- $\alpha_{d0}$ : Surface angle
- $\alpha_{ni}$ : Angle between gravity and direction of slip line center

Fig. 2. Schematic diagram on calculation method of safety factor of ore layer.

$C_o = 0$  である。この状態での円弧 AC 面のせん断応力を  $\tau$  とすれば、斜面の崩壊に関する安全率 (SF) は (2) 式で定義できる。

$$SF(-) = \sigma \tan \phi_o / \tau \dots \dots \dots (2)$$

SF は円弧 AC のとり方により種々の値が求まる。一般にコークス層の内部摩擦角は、鉍石層の内部摩擦角に比べて 5~6 度大きいのでコークス層が安定層として作用するものと考え、滑り面をコークス層に接する円弧で近似した。したがって滑り面は O 点を仮定すると、コークス表面に接する円弧で一意的に与えられる。中心点 O の位置を少しずつ変えて円弧を仮定し、その度ごとに SF を計算する。このうち、SF が最小となる滑り面を求め、このときの SF が 1 より小さい場合に斜面が不安定となる。

$i$  番目の要素の円弧滑り面に沿うせん断力  $\tau_i$  は (3) 式、面に垂直な抗力  $\sigma_i$  は (4) 式で与えられ、各要素について和を求めると、SF として (5) 式が得られる。ただし、落下原料による荷重  $P_{mi}$  は装入位置でのみ値を持ち、その他では 0 である。

$$\tau_i = (W_{gi} + P_{mi}) \sin \alpha_{ni} + P_{Fi} \sin(\alpha_{d0} - \alpha_{ni}) \dots \dots \dots (3)$$

$$\sigma_i = (W_{gi} + P_{mi}) \cos \alpha_{ni} + P_{Fi} \cos(\alpha_{d0} - \alpha_{ni}) \dots \dots \dots (4)$$

$$SF = \frac{\sum_i \sigma_i r_c \tan \phi_o}{\sum_i \tau_i r_c} \dots \dots \dots (5)$$

$P_{Fi}$  (N): ガスによる抗力,  $P_{mi}$  ( $\text{kg m/sec}^2$ ): 落下原料による荷重,  $P_{gi}$  (N): 自重,  $\alpha_{d0}$  (rad): 斜面の角度  
旋回シュートから落下する装入物により斜面に与えられ

Table 1. Base conditions for ore layer slide simulation.

Falling position from center	5m
Charging rate	1.0t/s
Rotation speed	8rpm
Falling width	0.5m
Falling speed	5.0m/s
Pressure drop	300kg/m <sup>3</sup>
Cell width	5mm
Surface angle	30°
Internal friction angle of ore	38.6°

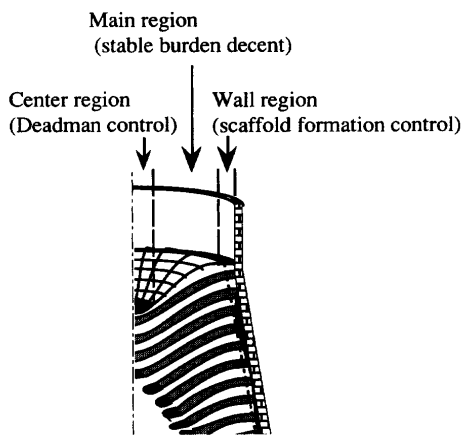


Fig. 3. Purposes of burden distribution control in three regions.

る力は、単位時間単位面積あたりに装入される重量  $w$  (kg/sec), 装入される面積  $S$  (m<sup>2</sup>), 原料の落下速度  $v$  (m/sec), 装入物斜面と装入物の反発係数を  $e$  として(6)式のように与えられる。

$$P_m = \frac{wv(1+e)}{S} \dots\dots\dots(6)$$

落下時の装入物の運動を観察した結果、鉍石の跳ね上がりがほとんど無いことから、 $e=0$ と近似した。また原料の落下速度  $v$  は装入物分布シミュレーターによる計算から、単位時間の装入面積  $S$  は模型実験から求めた。計算に用いた条件を Table 1 に示す。

3.2 塊状帯での装入物の降下

高炉の塊状帯を向流充填層還元反応容器と見なした場合、フラットなガス分布が最も反応効率が高い。しかし、圧力損失変動に対する装入物安定降下からは炉中心部に強い中心流を確保する必要がある。また、炉中心に装入されたコークスによる炉芯制御が行われることから<sup>11)</sup>、中心部のガス分布は独立に制御する必要がある。また、炉壁近傍のガス流についても、付着物管理のため他領域と独立に制御する必要がある<sup>12)</sup>。したがって、塊状帯での装入物分布は Fig. 3 に示すように、中心部を炉芯制御領域、炉壁部を熱負荷管理領域、中間部を主領域に分けて装入物分布を評価する必要があると考えられる。

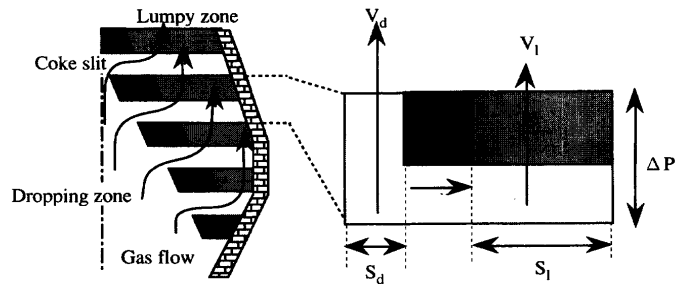


Fig. 4. Gas distribution at cohesive zone.

Table 2. Calculation condition.

Bosh gas volume	12100 Nm <sup>3</sup> /min
Temp.	1000℃
$\rho$ (ore)	1800kg/m <sup>3</sup>
$\rho$ (coke)	500kg/m <sup>3</sup>
Dp(ore)	7mm
Dp(coke)	35mm
$\epsilon$ (ore)	0.37
$\epsilon$ (coke)	0.48

装入物降下の不安定性は局所での原料の自重( $\rho$ )と上昇してくるガスの抗力( $\Delta P/L$ )との比、(7)式の流動化指数(FI)で評価できることが提案されている<sup>13)</sup>。

$$FI(-) = (\Delta P/L) / \rho \dots\dots\dots(7)$$

本検討ではこの流動化指数を用いて中間~炉壁部にかけての半径方向粒度分布の評価を行った。

3.3 炉下部コークス流動化の防止

滴下帯の流動化は炉下部から炉頂に至る大きな吹き抜けを発生させ、高炉操業に重大な支障を来すことがあり、その発生を未然に防ぐことは非常に重要である。レースウェイから出たガスは、滴下帯から融着層間のコークススリットを通して外周部の塊状帯に流出する。滴下帯におけるFIを計算するために、Fig. 4に示す簡単なガス流れモデルを設定した。高さによらず水平断面を通過するガス流量の総量  $V_{Bosh}$  は一定であり、滴下帯と塊状帯とで圧力損失  $\Delta P/L$  が等しくなるようにガスが分配されると仮定する。この仮定ではスリットを通過するガスの圧力損失は無視され、圧力分布の定量的な評価を行う事は困難であるが、流動化指数の定性的な傾向を計算することは可能であると考えた。滴下帯と塊状帯の圧力損失はそれぞれのガス流速  $V_d, V_l$  を用いて、エルガン式に基づき(8), (9)式で表現される。

$$\Delta P/L = K_{1d} V_d + K_{2d} V_d^2 \quad (\text{Dropping zone}) \dots\dots\dots(8)$$

$$\Delta P/L = K_{1l} V_l + K_{2l} V_l^2 \quad (\text{Lumpy zone}) \dots\dots\dots(9)$$

ここで  $K_{1d}, K_{2d}, K_{1l}, K_{2l}$  は定数であり、コークス、鉍石については粒径の関数として求めることができる<sup>14)</sup>。また、滴下帯と塊状帯の断面積をそれぞれ  $S_d, S_l$  とすると(10)式が成り立ち、(8), (9)式と合わせて  $\Delta P, V_d, V_l$  を求めることができる。計算条件を Table 2 に示す。

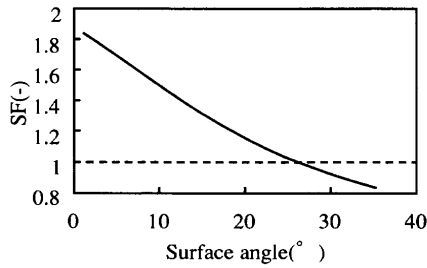


Fig. 5. Effect of surface angle on SF.

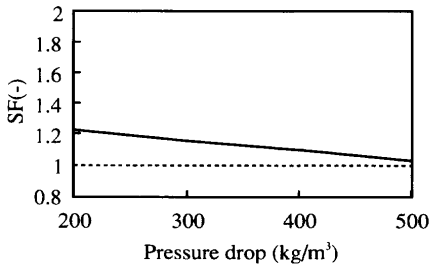


Fig. 6. Effect of permeability on SF.

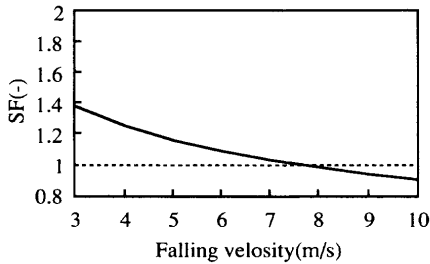


Fig. 7. Effect of falling velocity on SF.

$$V_{Bosh} = S_d V_d + S_l V_l \dots \dots \dots (10)$$

#### 4. 限界操業に対応した装入物分布

##### 4.1 堆積形状および装入方法

堆積角とSFの関係をFig. 5示す。堆積角の低下とともにSFは上昇し堆積が安定化することを示している。一方、Fig. 6に示すように、鉱石圧力損失とSFの関係では通気抵抗の増大に伴いSFが低下する。従って堆積形状はフラットな方が安定し、特に細粒原料等の圧力損失が大きく流動化しやすい原料は炉壁近傍の水平な場所（テラス）に装入する必要がある。

原料の落下速度とSFの関係をFig. 7に示す。原料落下速度の上昇により衝撃力が増加するため、落下速度は小さいほうが堆積面は安定する。回転速度と落下幅のSFへの影響をFig. 8, Fig. 9示す。回転速度と落下幅の増加は単位時間に装入される面積を増加させるため、原料の衝撃力が分散されて堆積面を安定させる効果がある。回転速度上昇が原料の崩れを防止する現象についてはコークス層崩れを対象としてはあるが、落藤らにより縮尺模型実験により確認されている<sup>15)</sup>。

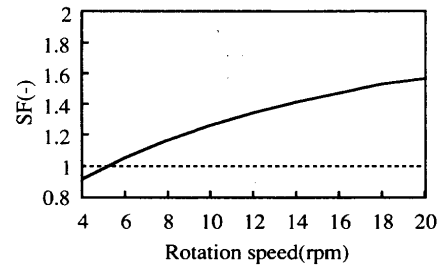


Fig. 8. Effect of rotation speed on SF.

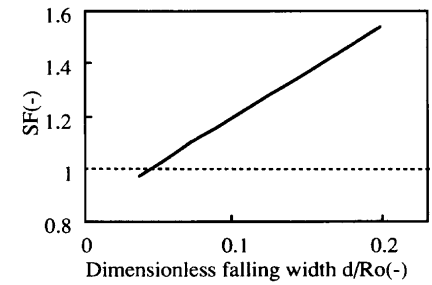


Fig. 9. Effect of falling width on SF.

##### 4.2 塊状帯粒度分布

先の滴下帯と塊状帯のガス分配で使用した計算法を塊状帯に適用することにより、炉壁側と中心側に異なる粒径の原料を配置したときのガス速度、熱流比(HFR)、圧力損失、流動化指数(FI)を計算することができる。

粒径幅が1~60mm、調和平均径8.5mmの焼結鉱を分級し、粗粒を中心側、細粒を炉壁側に装入した場合の炉壁側の細粒のFI, HFRの計算結果をFig.10に示す。分割径を小さくしていくと炉壁側の原料の粒径は低下しガス速度が減少するため、FIは低下し熱流比は上昇する。

実際の操業では炉壁附着物生成防止ため一定の炉壁流が必要であり、炉壁部粒径低下時には分布調整により炉壁  $L_o/(L_o+L_c)$  を低下させ炉壁流を維持する。Fig.10に示したように仮に炉壁HFRの上限(1.4)を設定して炉壁  $L_o/(L_o+L_c)$  を調節した場合、FIを最低にする炉壁粒径は平均径の0.6~0.8倍となることがわかる。

安価原料である細粒焼結鉱を使用する際は原料の通気性維持の観点から粒度別分割装入を行い炉壁側に細粒を装入するのが一般的であるが、この計算結果は炉壁粒径の過度の細粒化は炉壁部の原料の不安定化を招くことを示している。なお、鉱石の嵩密度は分級径に依存しないことからFIの最低な炉壁粒径では塊状帯の圧力損失も最低となる。

##### 4.3 滴下帯流動化防止方法

逆V型融着帯形状の滴下帯コークスの垂直方向FI分布をFig.11に示す。滴下帯上部では炉断面積の大部分が通気抵抗の大きな塊状帯となり、ガスが滴下帯に集中するため流動化しやすい。塊状帯の圧力損失の変化が滴下帯最上部のFI (FI<sub>max</sub>)に与える影響を計算しFig.12に示す。塊状帯圧力損失の増大とともにFI<sub>max</sub>も上昇することがわかる。こ

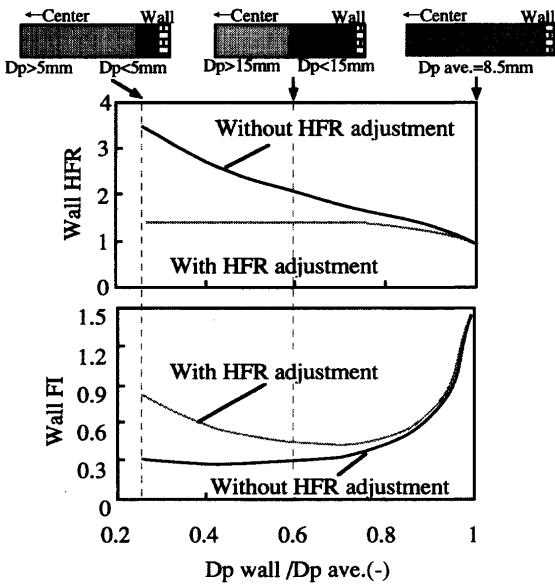


Fig. 10. Effect of wall Dp on HFR and FI.

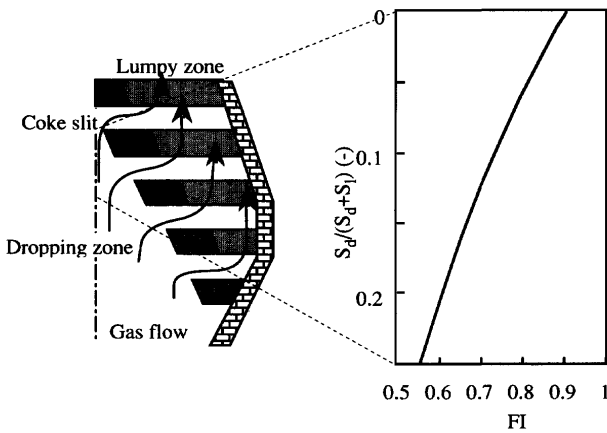


Fig. 11. Fluidization index (FI) profile in the dropping zone of a blast furnace.

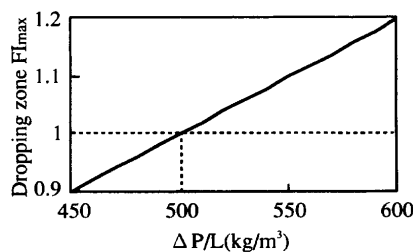


Fig. 12. Effect of lumpy zone pressure drop on dropping zone FI.

これは塊状帯の通気抵抗が大きいほど、滴下帯上部へのガスの集中が助長されるためである。従って滴下帯コークスの流動化防止には、塊状帯の圧力損失の低減が有効であると言える。

前節で述べた装入物分布による塊状帯の流動化防止により、同じ原料であっても塊状帯の圧力損失を低下させることが可能である。Fig.12は分布制御による塊状帯圧力損失低減が滴下帯コークスの流動化も防止することを示している。

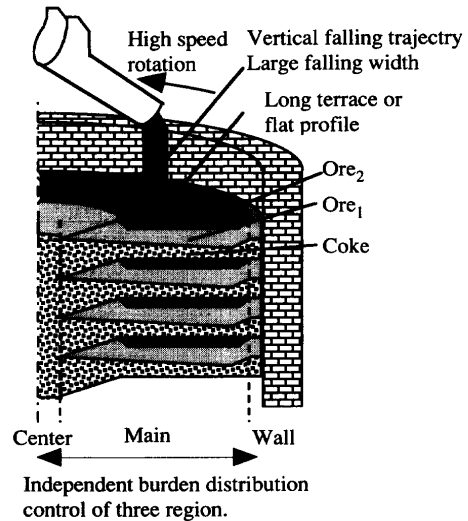


Fig. 13. Ideal burden distribution control.

### 5. 目標とする装入物分布

これまでに述べた分布評価指数に基づき提案される目標装入物分布の模式図をFig.13に示す。

原料装入については、回転速度と落下幅を増加させて単位時間あたりに原料を装入する面積を広くすることで原料装入時の衝撃を分散し斜面の崩れを防止できる。また、小さな堆積角や非常に長いテラスを持つ表面形状を形成させることも堆積表面を安定させる効果がある。

塊状帯ではコークスのみの領域を炉中心部に形成することが塊状帯全体の通気改善に最も有効であるが、さらに炉壁部の過度の細粒化を防止しつつ粒度別分割装入をすることにより圧力損失低減と装入物安定降下が可能である。中心部へのコークスの集中装入や炉壁での粒度と鉱石層厚比の高精度な制御には多バッチ装入が必要である。また、原料の落下軌跡が垂直であれば、落下位置は回転シュート先端位置のみに依存するため、原料装入面レベルに依存しない高精度な原料落下位置制御が可能である。

滴下帯コークスの流動化防止には塊状帯の通気抵抗を下げるのが有効であり、前述の塊状帯の装入物分布による流動化防止が間接的に滴下帯コークスを安定化させる。

### 6. 目標分布を再現する炉頂装入装置のコンセプト

装置イメージをFig.14に示す。3つ以上の炉頂バンカーを持つマルチパラレルバンカーにより高出鉄比時の多バッチ装入を可能とし、多種の原料の使用とその分布制御を行う。オフセンター型炉頂バンカーと内部の時系列排出粒度制御装置により排出粒度の時系列変化を制御し、炉壁部や炉中心部での粒径制御を行う。

炉頂バンカーからの原料排出速度は一定のまま旋回

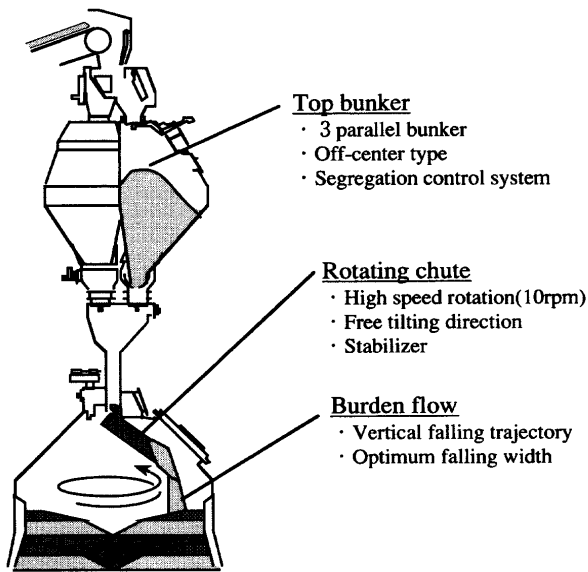


Fig. 14. Designe concept of top charging system for ideal burden distribution.

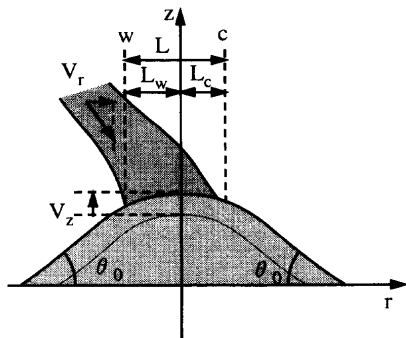


Fig. 15. Schematic diagram of material accumulation.

シュートの回転速度を上昇させることにより、1回転あたりの装入量を減らして堆積面への衝撃を抑制し、原料表面の崩れを防止する。また、原料装入中においても傾動方向を変更可能とし、先の炉頂バンカーの時系列排出粒度制御と組み合わせることにより炉壁部と炉中心部の粒度制御精度を向上させる。さらに回転シュート先端部には複数の反発板から構成されるスタビライザーを設置し、落下軌跡を鉛直化させるとともに、落下原料流の断面を炉半径方向に長軸を持つ細長い楕円形状に整えて落下幅を確保する。

## 7. 装入物分布シミュレーターの精度向上

### 7.1 動的平衡論を用いた堆積形状関数の導出

ベルレス式装入装置においては炉内の装入物分布制御はベルレスシュートの傾動パターンにより間接的に制御される。具体的な傾動パターンを決定する装入物分布シミュレーターは高炉操業にとって非常に重要なツールであるため、シミュレーターの大幅な改良を行った。

まず、原料の鉱石層厚比分布を計算するために重要な堆積形状推定式の見直しを行った。従来の堆積形状予測

式<sup>16-19)</sup>は、任意関数のパラメーターフィッティングであり、関数系に関する理論的検討は十分に行われていない。そこで「土砂の供給と運搬の動的平衡論<sup>20)</sup>」を用いて堆積形状の定式化を行い、模型実験によりその結果を評価した。

原料が堆積して行く状態の断面の模式図をFig.15に示す。zは高さ、rは半径位置、Wは表層を流れる原料の体積速度である。各半径位置における高さの上昇はそこの体積速度の変化に等しい。原料の嵩密度をρとすると(11)式が成り立つ。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dw}{dr} \dots\dots\dots(11)$$

重量速度wは各位置での原料の量Qと速度の積であり、原料の速度は斜面の勾配に比例するとすると(12)式で表すことができる。

$$w \propto Q \frac{dz}{dr} \dots\dots\dots(12)$$

ただし原料の落下幅内では原料が供給されるため、Qは一定ではなくrの一次式で近似されるため、wは(13)式で表現できる。

$$w = (\alpha r + \beta) \frac{dz}{dr} \dots\dots\dots(13)$$

(13)式を(11)式に代入すると(14)式が得られる。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{\rho} \left\{ \alpha \frac{dz}{dr} + (\alpha r + \beta) \frac{d^2z}{dr^2} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

堆積形状が定常状態であれば(14)式の左辺は常に一定値であるから、それをv<sub>z</sub>とすると(15)式が成り立つ。

$$(\alpha r + \beta) \frac{d^2z}{dr^2} + \alpha \frac{dz}{dr} \rho v_z = 0 \dots\dots\dots(15)$$

ここで(αr+β)を落下幅Lの中心の値(αL/2+β)で近似できるとすると、(15)式は解析的に解くことが可能であり、任意定数をcとすると(16)式を導くことができる。

$$\frac{dz}{dr} = \frac{\rho v_z}{\alpha} + c \exp\left(-\frac{2\alpha}{L\alpha+2\beta} r\right) \dots\dots\dots(16)$$

任意定数cは堆積形状の頂点(r=0)での傾斜角(dr/dz)を0として求めることが可能であり、最終的に指数関数(17)式が導かれる。

$$\frac{dz}{dr} = \frac{\rho v_z}{\alpha} \left\{ \exp\left(-\frac{2\alpha}{L\alpha+2\beta} r\right) - 1 \right\} \dots\dots\dots(17)$$

原料が停止する炉壁部と炉中心部については原料の上流からの流れ込み量は一定であり、(13)式でα=0として同様な方法で(18)式が得られる。

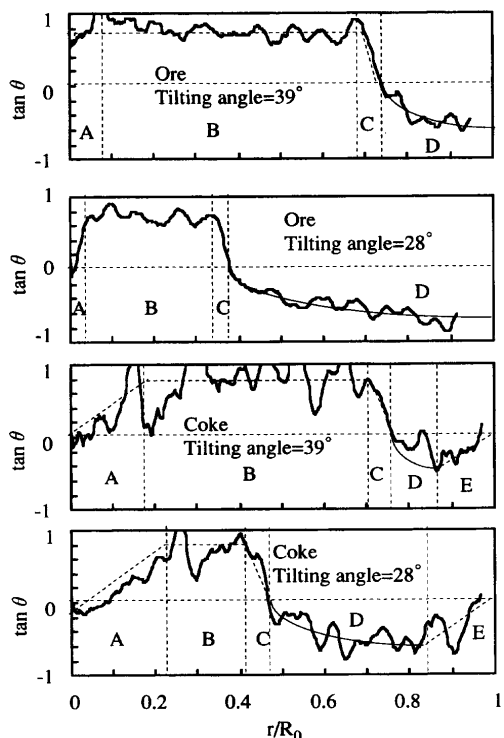


Fig. 16. Surface angle distribution.

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \frac{\rho v_z}{\gamma} \dots\dots\dots(18)$$

これは二次曲線の式であり、原料の堆積形状は中心と炉壁ではそれらを頂点とする二次曲線になることが示される。

ベルレス高炉における原料の供給は垂直ではなく、通常は炉壁側への速度ベクトルを持って行われる。半径方向の速度ベクトルを  $v_r$ 、落下幅を  $L$  とする。原料の山のピークから  $L_c$ 、 $L_w$  離れた位置の原料の斜面方向重量速度はそれぞれ(19), (20)式で表現される。

$$W_c = (\alpha L_c + \beta) \left( \frac{dz}{dr} \right)_{r=L_c} - \rho v_r \dots\dots\dots(19)$$

$$W_w = (\alpha L_w + \beta) \left( \frac{dz}{dr} \right)_{r=L_w} + \rho v_r \dots\dots\dots(20)$$

原料の山が定常状態で堆積するには、 $v_r$  によらず  $W_c = W_w$  が成立する。また、落下幅の外では原料の傾斜角は堆積角  $\theta_0$  になると考えられるため連続の条件から(21)式が成り立つと考えられる。

$$\left( \frac{dz}{dr} \right)_{r=L_c} = \left( \frac{dz}{dr} \right)_{r=L_w} = \tan \theta_0 \dots\dots\dots(21)$$

ここで、(19), (20)式を(21)式に代入し、 $L_c + L_w = L$  であることから(22)式が導かれ、原料の頂点が半径方向速度ベクトルに比例して炉壁側に頂点が移動する事が示される。

$$L_c = \frac{L}{2} + \frac{\rho v_r}{\alpha} \dots\dots\dots(22)$$

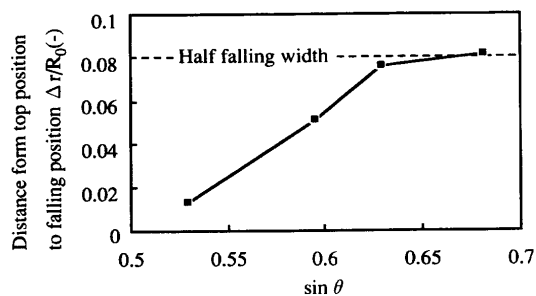


Fig. 17. Relationship of inclination angle and shift of top position.

7.2 堆積形状関数の模型による検証

堆積形状推定式の検証を行うため、炉口径( $R_0$ )が0.6mの装入装置模型を用いた実験を行った。従来と同様、Froude数が等しくなるように実験条件を設定した<sup>21)</sup>。旋回シュート傾動角を変えない14旋回の単リング装入で原料装入を行った。

旋回シュート傾動角を39°, 28°で鉱石とコークスを装入した場合の傾斜角の分布をFig.16に示す。傾斜角の変化から堆積形状は5領域に分けられることが示され、前節で述べた堆積と運搬の平衡から求めた堆積形状関数に一致することが示された。

- A: 中心部から傾斜角が直線的に増加する領域。  
堆積形状は二次関数。
- B: 傾斜角が一定の領域。堆積形状は直線。
- C: 傾斜角が減少してゆき、頂点で0°になる領域
- D: 傾斜角が指数関数で減少する範囲。
- E: 炉壁に向かい傾斜角が直線的に減少する範囲。  
堆積形状は二次関数。

次に原料の頂点位置と落下位置の関係を模型実験により確認した。Fig.17に傾動角の正弦と主流-頂点間距離の関係を示す。原料落下速度の水平成分は傾動角の正弦に比例する。(22)式の成立する落下半幅の0.08未満では式に示されたように落下原料の半径方向速度成分に主流-頂点間距離が比例するがそれ以上の傾動角にしても主流-頂点間距離は変化しない事が確認された。

7.3 高速旋回時の落下軌跡の推定

第6章で述べたように、落下原料の衝撃力緩和や多バッチ装入による装入スケジュールの短縮に対応して旋回速度の上昇が必要となる。従来の装入物分布シミュレーターでは旋回シュート長手方向のみの2次元平面での放物落下運動として原料の落下軌跡を近似していた。しかし、高速旋回では原料の落下軌跡に接線方向の成分も無視することができない。そこで、落下軌跡を3次元的に取り扱う落下軌跡関数の導入と模型実験による検証を行った。

旋回シュート上にいる観測者から観た単一粒子の運動方程式を解くことで原料流の形状を求めることができる。初期位置( $X_0, Y_0, Z_0$ )、初速度( $\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0$ )の慣性系での自由落下運動を角速度  $\omega$  で回転している回転座標系で表すと(23),

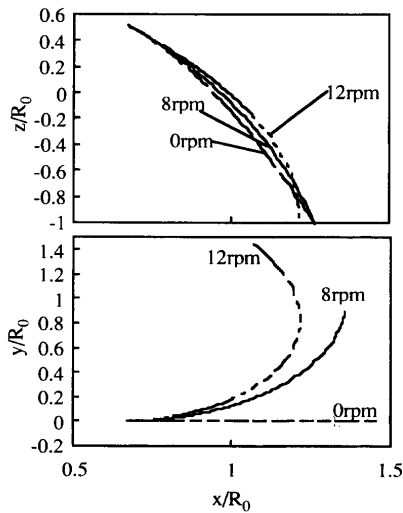


Fig. 18. Calculate result of material flow trajectory.

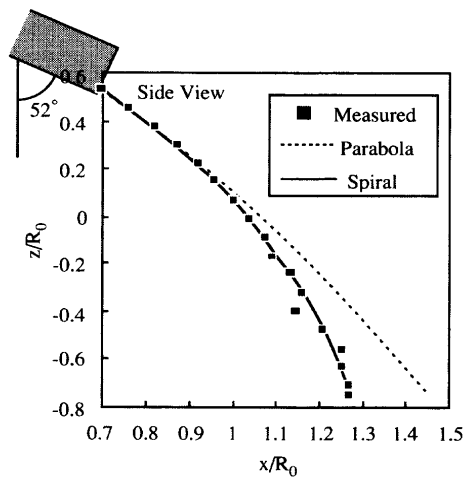


Fig. 19. Result of spiral fitting.

(24), (25)式となる。

$$x = (X_0 + \dot{X}_0 t) \cos \omega t + (Y_0 + \dot{Y}_0 t) \sin \omega t \dots\dots\dots(23)$$

$$y = -(X_0 + \dot{X}_0 t) \sin \omega t + (Y_0 + \dot{Y}_0 t) \cos \omega t \dots\dots\dots(24)$$

$$z = Z_0 + \dot{Z}_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \dots\dots\dots(25)$$

Fig.18に示されるように、(23)、(24)、(25)式で表現される落下流は回転速度とともに半径方向落下到達距離が大きくなる。

7.4 模型実験による落下軌跡の検証

前述の模型実験装置を用いて、落下軌跡の3次元的な測定を行った結果をFig.19に示す。回転シュートからの初速度をパラメータとしてフィッティングを行ったが、原料流の下端で放物線から外れてしまうが螺旋形状の落下軌跡によるフィッティングでは全領域をフィッティング可能である。

8. 結言

原料表面の安定性を維持するには低堆積角、ソフト装入が有効であり、塊状帯と滴下帯の流動化防止には半径方向での粒度別分割装入が有効であるが、過度の炉壁原料細粒化はむしろ流動化を誘発することを計算より示した。

上記目標分布を安定的、高精度に実現する装入装置として、高速旋回シュート、マルチパラレルパンカー、スタビライザー付き旋回シュートなどを提案した。また、装入パターン変更による分布制御に不可欠な装入物分布シミュレーターの精度向上を目的として、計算と模型実験に基づき堆積形状表現関数、落下軌跡関数などの見直しを行った。

以上の結果を踏まえて千葉第6高炉の炉頂装入装置の開発と装入物分布シミュレーターの開発を行った。

文 献

- 1) R.Ono, T.Goto, H.Miyatani, R.Hori, T.Yabata and K.Kuwano: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **42** (1992), 85.
- 2) T.Yamamoto, Y.Senoo, N.Yamazaki, H.Itaya, H.Kokubu and K.Ichifuji: *CAMP-ISIJ*, **9** (1993), 22.
- 3) H.Tukiji, K.Wakimoto, H.Nakamura, K.Ishii, I.Okochi and S.Shimogoryo: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 180.
- 4) K.Kakiuchi, S.Matsunaga, A.Sakamoto, H.Matsuoka, K.Ueno and K.Yamaguchi: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 126.
- 5) A.Maki, A.Sakai, N.Takagaki, K.Mori, T.Ariyama, M.Sato and R.Murai: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 650.
- 6) J.J.Poveromo: *Iron Steelmaker*, (1996) Mar., 86.
- 7) K.Okabe, S.Hamada and M.Yoneya: *Kawasaki Steel Giho*, **1** (1969), 160.
- 8) T.Sato, T.Nouchi and M.Kiguchi: *Kawasaki Steel Giho*, **29** (1997), 30.
- 9) T.Sato, K.Takeda and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 750.
- 10) K.Takeda, Y.Konishi, S.Taguchi and T.Fukutake: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 282.
- 11) T.Uenaka, H.Miyatani, R.Hori, F.Noma, M.Shimizu, Y.Kimura and S.Inaba: *Iron Steelmaker*, (1988) Nov., 34.
- 12) K.Kobayashi, H.Matsumoto and K.Yanagisawa: *Kawasaki Steel Giho*, **25** (1993), 22.
- 13) T.Sato, K.Takeda and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 750.
- 14) T.Yamada, M.Sato, S.Miyazaki, H.Shimamura and S.Taguchi: *Kawasaki Steel Giho*, **6** (1974), 16.
- 15) Y.Ochifuji, Y.Matsui, M.Shimizu, S.Kitayama and S.Ishiwaki: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 826.
- 16) S.Matsuzaki and T.Sugiyama: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1033.
- 17) S.Inaba, K.Okimoto, I.Nishida, T.Yabata and M.Takada: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **34** (1984), 42.
- 18) Y.Kajiwara, T.Jimbo and T.Sakai: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23** (1983), 1045.
- 19) R.Yamamoto, J.Kishimoto, N.Saitou, T.Ariyama, H.Nishio and M.Sato: *Nippon Kokan Tech. Rep.*, **106** (1985), 1.
- 20) 小橋澄治, 中山政一, 今村遼平, 池谷 浩, 平野昌繁, 古谷 尊彦, 奥西一夫: 地溜り・崩壊・土石流, 鹿島出版会, 東京, (1980), 147.
- 21) S.Miyagawa, K.Takeda, S.Taguchi, T.Fujimoto, M.Fujita and H.Fujimori: *Kawasaki Steel Giho*, **19** (1987), 80.