

© 1985 ISIJ

実物大模型実験に基づくベルレス装入物分布 シミュレーションモデルの開発

論 文

梶原 義雅*・神保 高生*²・上甲 忠嗣*³網永 洋一*³・稲田 隆信*

Development of a Simulation Model for Burden Distribution in Bell-less Charging Based on Full Scale Model Experiments

Yoshimasa KAJIWARA, Takao JIMBO, Tadatsugu JOKO,
Yo-ichi AMINAGA and Takanobu INADA

Synopsis :

The burden distribution in bell-less charging was investigated by the use of a full scale experimental apparatus and simulation models were developed on the basis of experimental results.

The discharge behavior of burden from the bunker was found to be primarily funnel flow and was quantitatively evaluated by the simulation model considering the velocity distribution of particles in the flow region above discharge hole. Sinter showed a stronger tendency to be funnel flow than coke.

The burden trajectory in and outside the chute was successively estimated by solving the equation of motion on a single particle.

The mixed layer formation was observed in bell-less charging as well as bell-armor charging. The extent of the mixed layer in bell-less charging was found to be expressed by the same experimental formula for bell-armor charging through the proper evaluation of "formation energy of mixed layer".

The validity of the simulation model was confirmed by the comparison with experimental results in various charging schedules. The simulation model was successfully applied to the flat profile charging.

1. 緒 言

高炉炉頂部における装入物分布は、炉内のガス流れを支配する主要因であるとともに、ガス流れを介して炉内における化学反応および気体-固・液体間の伝熱に大きな影響を与える。装入物分布の制御性を向上するため、傾動角度が可変な分配シュートを用いたベルレス装入装置が採用され、この装入物分布に関する研究が実験的^{1)~3)}にあるいは理論的⁴⁾⁵⁾に進められてきた。しかしベルレス装入時の混合層の形成と炉頂バンカーからの装入物の排出挙動に関する研究はまだまだ不十分なままである。

鉱石装入時のコークスの“流れ込み”による混合層の形成に関しては、ベル・アーマ装入法ではその重要性が報告されている⁶⁾⁷⁾が、ベルレス装入法では予備実験的な報告がある⁸⁾のみで、定量的な研究はみあたらない。

炉頂バンカーからの装入物排出挙動に関しては、実験

的アプローチの報告はある⁹⁾が、バンカーからの粒径の経時変化に対する理論的な解析手法は確立しておらず、高炉内における粒径分布の推定にまで適用した例はない。

そこでこれらの現象を解明するため、鹿島製鉄所の石炭ヤードにベルレス実物大実験装置を設置し、その実験結果の解析に基づいて、ベルレス装入物分布シミュレーションモデルを開発した。

2. 実験装置

使用した実物大実験装置の概要を Fig. 1 に示す。装置の主な特徴は次のとおりである。

1) 混合層形成現象を研究するため最低 2 チャージの装入が可能な炉口高さとした。

2) 炉頂バンカーからの装入物排出挙動を研究するためベルレス装入装置を採用する予定である鹿島 2 高炉 (2 次) と同一のバンカー形状 (バンカー径 6.0m) と

昭和 57 年 9 月・昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 3 月 22 日受付 (Received Mar. 22, 1984)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*² 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

Table 1. Standard charging schedule.

Chute position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Chute angle (°)	53	51	49	47	45	42	39	36	33	30	27			
Burden	Chute position													
Coke	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	7	
Sinter	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7

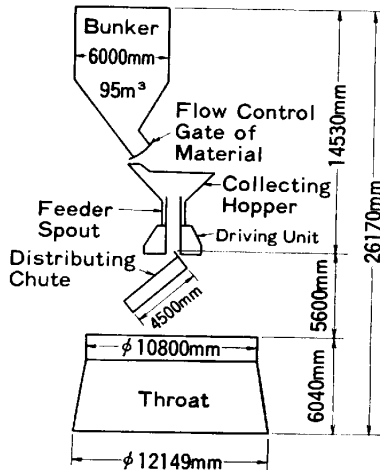


Fig. 1. Full scale experimental apparatus.

し、1回の装入量が全量入る容積とした。

Table 1 に標準の多重リング装入スケジュールを示す。計測項目として、通常の機械式サウンディング法による装入物表面形状の測定に加えて、混合層形成量を定量的に把握するため磁気センサー⁷⁾による真の鉱石とコークスの重量比 (O/C) 分布を測定した。塊鉱石やペレットの偏析による磁気センサー測定値の変動を防止するため、装入鉱石は全量焼結鉱とした。炉頂バンカーからの装入物排出挙動の測定には、装入物全量をペンキで色分けしてトレーサーとし、バンカー内に装入、バンカーから排出されるトレーサーを落下途中で試料缶に採取する方法を用いた。装入物落下軌跡の測定もこの方法で実施した。

実験に供した原料は、コークス・焼結鉱とも実炉使用品である。

3. 実験結果と考察

実験結果を考察も含めて、装入物の流れにしたがって述べる。

3.1 炉頂バンカーからの装入物排出挙動

炉頂バンカー内で装入物の粒径偏析が生じている場合、バンカーから排出される装入物粒径に経時変化を生じ、高炉内に堆積する際、半径方向の粒径偏析が助長されて炉内のガス流分布が変化することが報告されてい

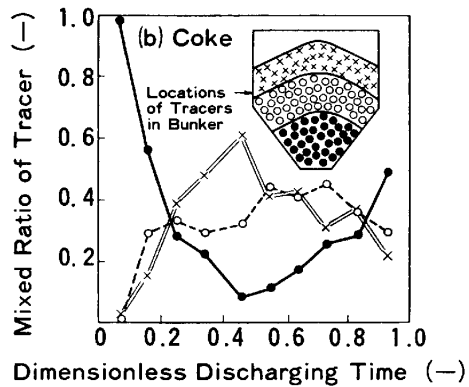
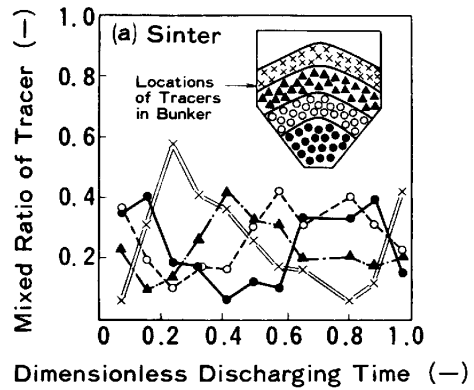


Fig. 2. Variation in mixed ratio of tracers discharged from the bunker.

る⁹⁾。

トレーサー混在率の経時変化の実験結果を Fig. 2 に示す。焼結鉱・コークスともに上層部のトレーサー混在率の最大値は中層部よりも早い時間に生じている。更に焼結鉱の上層部のトレーサー混在率の最大値はコークスよりも早い時間に生じている。この結果からバンカー内の装入物の流れは主にファネルフロー (漏斗状流れ) で

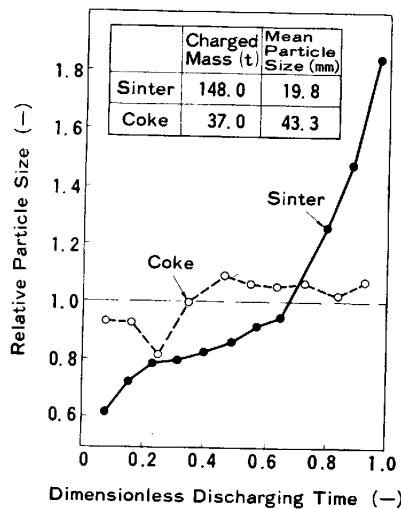


Fig. 3. Variation in particle size discharged from the bunker.

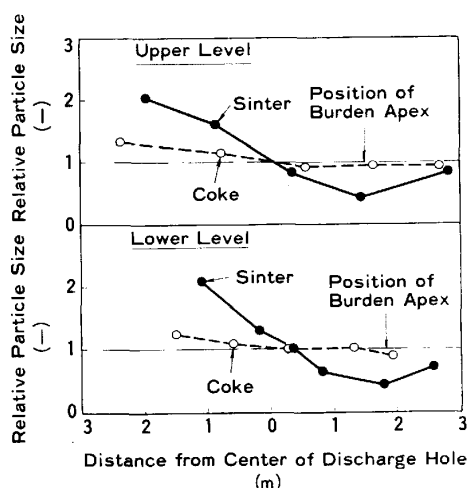


Fig. 4. Radial distribution of particle size in the bunker.

あることおよびファネルフローの傾向はコークスよりも焼結鉱の方が顕著であることがわかる。さらに Fig. 3 に示すように焼結鉱・コークスともに粒径が時間とともに増加しており、ファネルフローを裏づけている。特に焼結鉱の粒径増加が顕著な理由は、前述したファネルフロー傾向がコークスよりも強いことに加えて、バンカー内ですでに明白な粒径偏析が生じていること (Fig. 4) もあげられる。

炉頂バンカーからの装入物排出挙動を定量的に評価するため Fig. 5 に示す排出シミュレーションモデルを開発した。シミュレーションモデルの構築にあたり次に示す近似を行った。

1) バンカーの断面形状に対応した2次元モデルとした。

2) 実験結果に基づき、バンカー内の装入物表面形状および半径方向粒径分布を半径方向位置に関する1次関数で近似した。

3) バンカーからの装入物の排出は次の順に生じる。
 ① 排出口上の流動域内の装入物 (Fig. 5 (a) 中の(A)部)
 ② 流動域周辺の上層から順に角度 θ_3 で流動域内に流入する装入物 (Fig. 5 (a) 中の(B)部)。Fig. 5 (a) 中の角度の意味は次のとおり。

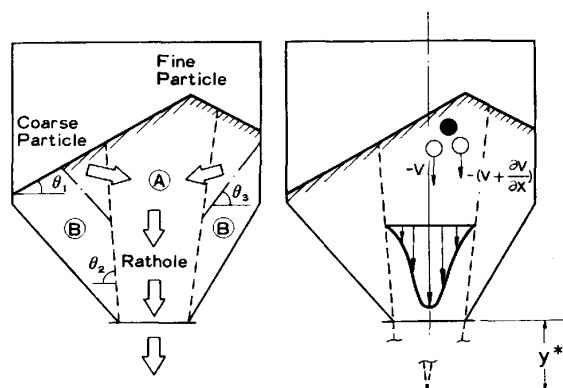
θ_1 : 装入物表面の堆積角 (°)

θ_2 : 排出口上の流動域の水平面となす角度 (°)

θ_3 : 排出口上の流動域への装入物の流入角度 (°)

$\theta_2 \cdot \theta_3$ はバンカーからの排出が継続する間は、常に一定であると仮定した。

4) 排出口上の流動域内において装入物降下速度は半径方向に分布をもつと仮定した。もし排出口上の流動域内で装入物の半径方向速度分布がなければ、流動域に流



(a) Discharge of material in bunker (b) Velocity distribution in rathole

Fig. 5. Outline of simulation model for the discharge of burden from the bunker.

入する装入物はプラグフローで降下し、流動域に流入した順に排出される。従つてトレーサー混在率の最大値 1.0 が下層部だけでなく、上層部・中層部でも生じるはずである。しかし Fig. 2 の結果ではトレーサー混在率の最大値は、例えば焼結鉱の場合、上層部で 0.6、中層部で 0.4 程度と小さい。そこで NEDDERMAN と Tüzün¹⁰⁾ がスリット型貯槽内の固体流れの解析に使用した手法を排出口上の流動域内の装入物流れに適用した。Fig. 5 (b) 中の●印で示す流動域内の粒子は○印で示す隣接粒子との垂直方向の速度勾配に比例した水平方向速度をもつて降下するとした¹⁰⁾。

$$U = -c \frac{\partial V}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

ここで U, V : 水平方向, 垂直方向速度成分 (m/s)
 x : 排出口中心からの水平距離 (m) c : 定数 (m)

連続の式は(2)式である。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで y : 排出口からの垂直距離 (m)

(1)(2) 式を組み合わせ、仮想的に $x = \infty$ で $V = 0$ の境界条件を入れると(4)式の解が得られる。

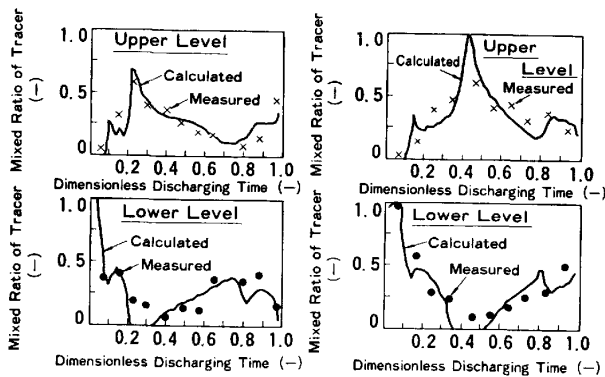
$$\frac{\partial V}{\partial y} = c \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$V = \frac{Q}{\sqrt{4\pi c(y+y^*)}} \exp\left\{-\frac{x^2}{4c(y+y^*)}\right\} \dots\dots (4)$$

ここで Q : $x=0, y=-y^*$ での排出量 (m²/s),
 y^* : 排出口と流動域円錐部の仮想頂点間の距離 (m)
 $x=0$ での垂直速度 V_c を導入すると(4)式は(5)式になる。

$$\frac{V}{V_c} = \exp\left\{-\frac{x^2}{4c(y+y^*)}\right\} \dots\dots\dots (5)$$

これらの近似に基づいて微少時間ごとの装入物の一連



(a) Discharge of sinter (b) Discharge of coke
 Fig. 6. Comparison between calculated and observed mixed ratio of tracer discharged from bunker.

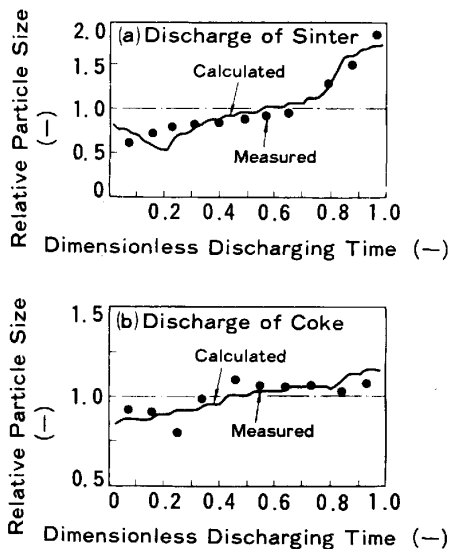


Fig. 7. Comparison of observed and calculated particle size variation.

の動き (排出口上の流動域への流入, 流動域内における降下, 排出口からの排出) を粒子にマーカーをつけてシミュレーションした. トレーサー混在率の経時変化の計算値と実験値との比較を Fig. 6 に示す. 装入物の種類, バンカー内の装入物の堆積位置によらず計算値と実験値は良く一致している. 計算に用いる θ_2, θ_3 および (5) 式中の $4c(y+y^*)$ は実験結果に基づきあらかじめパラメータフィッティングで決定した (Table 2). コークスよりも焼結鉱の θ_2, θ_3 が大きいことおよび $4c(y+y^*)$

Table 2. Characteristics of discharge behavior of burden from bunker.

	θ_2	θ_3	Velocity distribution in flow region
Sinter	90°	60°	$\frac{V}{V_c} = \exp\left(-\frac{x^2}{0.3}\right)$
Coke	80°	50°	$\frac{V}{V_c} = \exp\left(-\frac{x^2}{0.5}\right)$

Table 3. Calculating conditions in the single particle model.

Items	Sinter	Coke
Charged mass (t/ch)	148	37
Apparent density (t/m ³)	3.50	1.00
Charging time (s)	105	105
Angular velocity (rad/s)	0.838	0.838
Charging velocity (cm/s)*	120	100
Friction coefficient (-)*	0.550	0.625

* Model parameters

が小さいことは明白であり, 焼結鉱のファネルフロー傾向がコークスよりも強いことを定量的に記述できた.

Table 2 の計算条件を用いて粒径の経時変化を推定し, 実験値と比較した結果を Fig. 7 に示す. 焼結鉱・コークスともに粒径推移を標準偏差 2 mm で推定可能であり, 排出シミュレーションモデルの有用性が検証された.

3.2 装入物落下軌跡

分配シュート内の装入物の軌跡は従来研究^{11)~13)} と同様に粒子間相互作用を無視した単一粒子の運動として推定した.

$$m\vec{a} = m\vec{g} - 2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) - m(\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})) + \vec{T} + \vec{F} \dots (6)$$

ここで m : 粒子質量 (g) \vec{a} : 粒子加速度 (cm/s²)
 \vec{g} : 重力加速度 (cm/s²) $\vec{\omega}$: シュート角速度 (rad/s)
 \vec{v} : 粒子速度 (cm/s) \vec{r} : 粒子位置 (cm) \vec{T} : シュート壁面からの抗力 (gcm/s²) \vec{F} : シュート内面の摩擦力 (gcm/s²)
 \rightarrow : ベクトル量

鹿島 2 高炉 (2 次) を対象とした Table 3 の条件下での粒子速度, 加速度, “振り上げ角” (θ : シュート長手方向に垂直なシュート断面内において粒子位置でたてた法線とシュート底でたてた法線のなす角度) の計算結果を Fig. 8 に示す. θ 方向の加速度は重力および Coriolis 力に主に支配されている. 鹿島 2 高炉のシュート長さ 4.5m の場合, シュート先端での“振り上げ角”は 36° にも達する. θ 方向の速度変化を詳細にみると, シュート長さ 1.5m 近傍で最大値をとつた後, 3.5m 近傍で最小値を示す. この理由は“振り上げ角”が 30° 以下の場合, θ 方向加速度に及ぼす重力の寄与が大きいが, “振り上げ角”が 30° を越すと重力による寄与よりも Coriolis 力と遠心力による寄与の方が大きくなるためである.

シュートをでた後の装入物落下軌跡の推定は, 前述のシュート内の装入物軌跡シミュレーションモデルで計算されたシュート先端での粒子速度と粒子位置を初期条件とし, 送風項を除外した重力場計算で行った. 計算値と実験値との比較を Fig. 9 に示す. シュート角度 39° 以

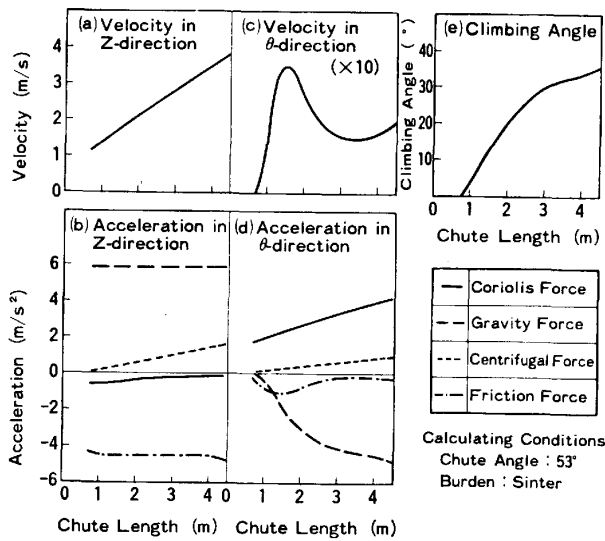


Fig. 8. Change of velocities, accelerations, and climbing angle along chute length calculated by the single particle model.

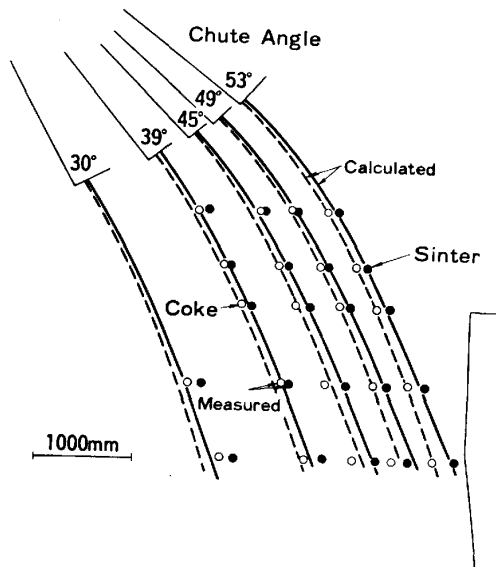


Fig. 9. Comparison of measured and calculated trajectories.

上では計算値と実験値は良く一致しているが、低シュート角度では梶川ら¹³⁾と同様に実験値が計算値より炉壁側に偏倚している。この原因の解明は今後更に検討を要するが、シュート入口での初速度の評価誤差よりも摩擦係数の過大評価またはシュート内での有効滑り長さの過大評価によるものと思われる。

3.3 混合層形成

Fig. 10 に示すようにペルレス装入においてもペル・アーマ装入と同様に明白な混合層形成がみられた。Fig. 10 中の混合層はコークス体積比率が 25~75% の層として示している。コークス層上に鉱石を装入すると、鉱石落下位置近傍のコークスの一部が削りとられ、炉芯方

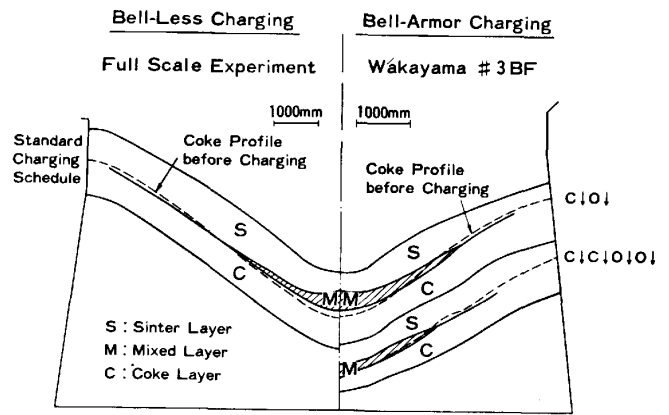


Fig. 10. Mixed layer formation in bell-less and bell-armor charging.

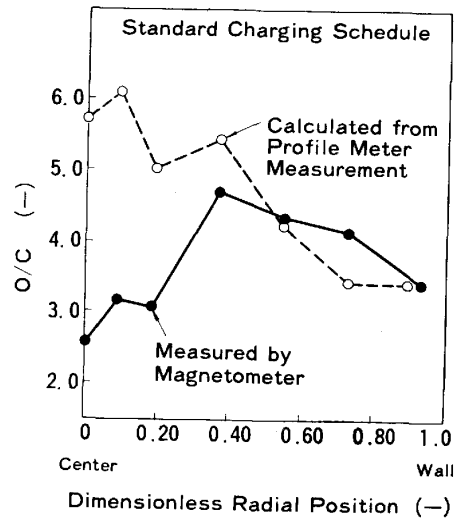


Fig. 11. Comparison of O/C distribution measured by magnetometer with calculated one from profile meter measurement.

向に運ばれて炉芯部に広範囲な混合層を形成する。この結果半径方向の真の O/C 分布は装入前後の表面形状測定から計算される O/C 分布とは異なる。標準多重リング装入スケジュールで装入した時の磁気センサーによる O/C 分布測定結果と装入前後の表面形状測定から計算した O/C 分布との比較を Fig. 11 に示す。鉱石装入時のコークスの“流れ込み”によつて炉芯部に混合層が形成され、炉芯部の真の O/C の低下が顕著になっている。一方炉壁部では鉱石装入時の衝撃によつてコークス層が削りとられる結果、コークス層厚減および鉱石層厚増となり O/C は表面形状測定からの計算値より高くなっている。

混合層形成量を定量的に評価するため、ペル・アーマ装入と同様に“混合層形成エネルギー”(E_M)⁷⁾による整理を試みた。通常のパル・アーマ装入においては 1 ダンプ中の鉱石装入量の全量が混合層形成に有効であるが、

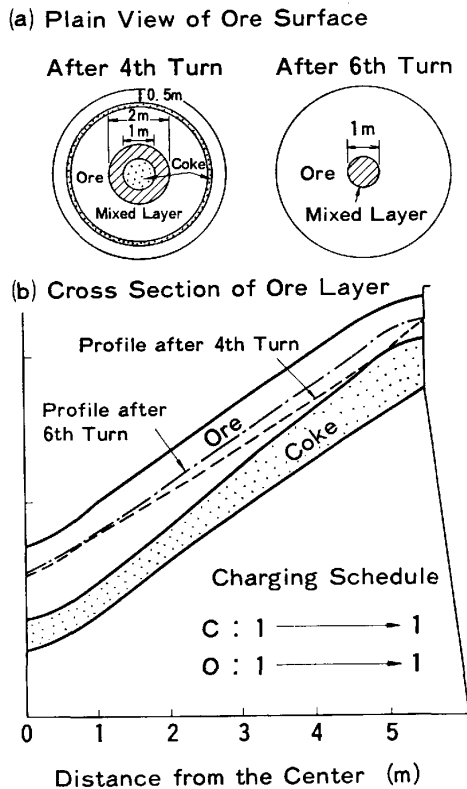


Fig. 12. Formation process of mixed layer during charging.

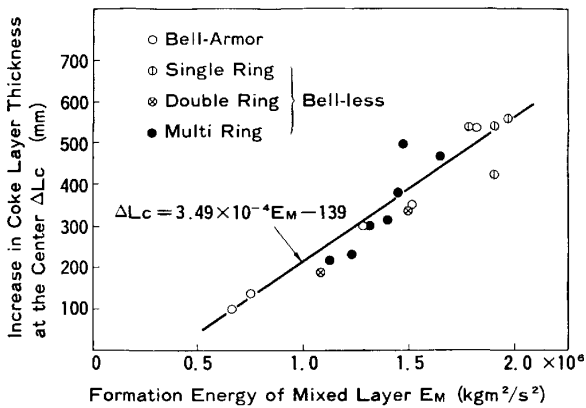


Fig. 13. Relation between formation energy of mixed layer and ΔL_c in bell-armor and bell-less charging.

ベルレス装入においてはコークス層表面が鉱石によつて完全被覆されるまでの鉱石装入量に限定されると思われた。そこで Fig. 12 に示すように装入を数巡回ごとに中断して混合層形成過程を調査した。鉱石 4 巡回装入後では炉壁部にまだ露出コークス層が残存しているが、6 巡回後にはコークス層は完全被覆されており混合層形成は完了している。

これらの実験結果に基づいてベルレス装入時の“混合層形成エネルギー”を次のように定義した。

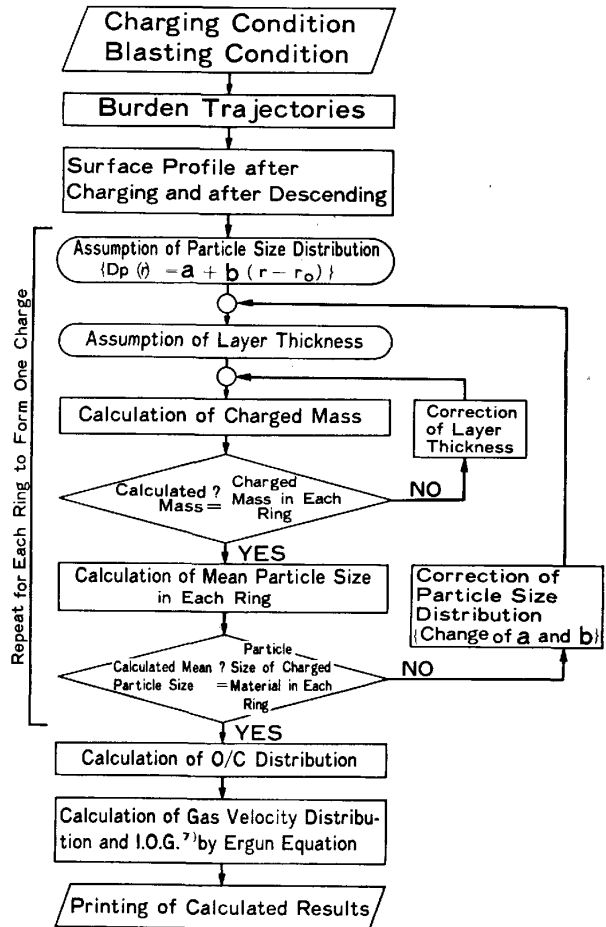


Fig. 14. Outline of the simulation model for burden distribution in bell-less charging.

$$E_M = E_K + E_P = \sum_{i=n_1}^{n_2} \frac{1}{2} m_i v_i^2 + m_i g H_i \quad \dots\dots (7)$$

ここで E_K : 鉱石の衝撃エネルギー (kgm^2/s^2) E_P : 鉱石落下位置における鉱石の位置エネルギー (kgm^2/s^2) m_i : i 巡回目の鉱石装入量 (kg) v_i : i 巡回目におけるコークス層表面への鉱石衝突速度のコークス層表面方向成分 (m/s) H_i : i 巡回目の鉱石の落下位置と炉芯のコークス表面位置との垂直距離 (m) n_1, n_2 : 混合層形成開始時および終了時の巡回数 (-)

Fig. 13 に“混合層形成エネルギー”と混合層形成量の関係を示す。ベルレス装入においてもベル・アーマ装入と同様、“流れ込み”による半径方向コークス層厚変化は半径方向位置の 1 次関数として近似できることが判明した。そこで混合層形成量の尺度として炉芯のコークス層厚変化 (ΔL_c : mm) を採用した。 ΔL_c はコークス単味層の増加と、混合層中のコークス層厚の和として求めた。ベルレス装入時においても“混合層形成エネルギー”を(7)式で評価すれば、ベル・アーマ装入と同一の(8)式で混合層形成量を定量的に評価できることが判

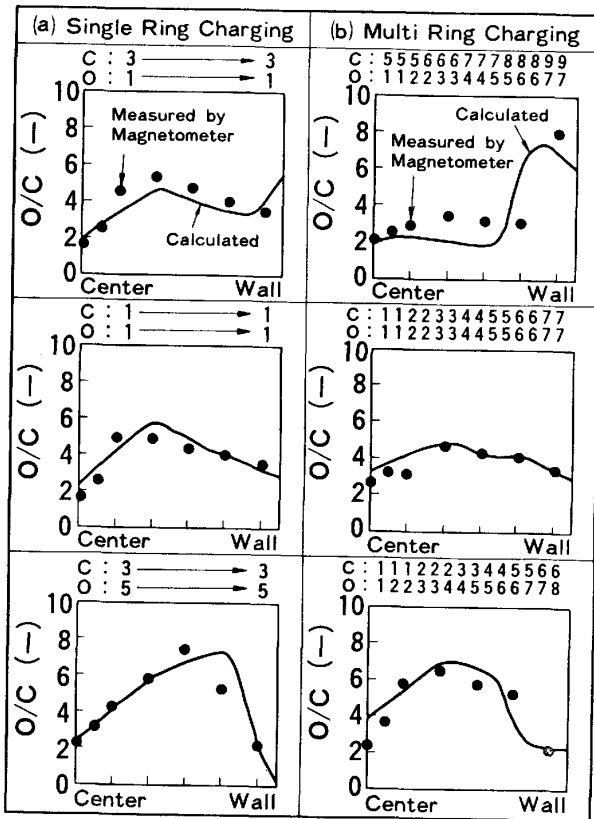


Fig. 15. Comparison of O/C distribution measured by magnetometer with calculated one.

明した。

$$\Delta L_c = 3.49 \times 10^{-4} \times E_M - 136 \dots \dots \dots (8)$$

従つて装入条件が決定されると(7)式を用いて“混合層形成エネルギー”が計算でき、(8)式に代入して ΔL_c を求め、半径方向の混合層形成量分布が推定できる。

3.4 ペルレス装入物分布シミュレーションモデル

実験結果と前述の解析に基づいて開発したペルレス装入物分布シミュレーションモデルの概要を Fig. 14 に示す。特記点は以下のとおり。

- 1) 各シュート角度における装入物落下軌跡は単一粒子モデルで推定した。
- 2) 装入物表面形状は各種装入スケジュールでの実験結果をもとに、実炉対象時には、ガス流れと半径方向の荷下がり速度分布の補正をして推定する。
- 3) 炉内堆積時の装入物の分級を定量化するため、半径方向粒径分布 $D_P(r)$ を半径方向位置 r に関する1次関数で近似した。 $D_P(r) = a + b(r - r_0)$; a, b は定数, r_0 は落下位置。定数 a, b は各旋回ごとの炉内堆積粒子の平均径が炉頂バンカー排出モデルで計算される各旋回ごとの粒子径に一致するという条件から決定した。
- 4) 半径方向の O/C 分布は(8)式で計算される混合層形成量を考慮して求める。

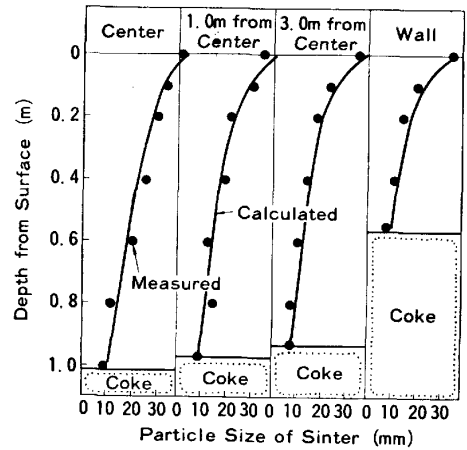


Fig. 16. Comparison of particle size distribution measured by sampling method with calculated one.

シミュレーションモデルの計算値と実験結果とを比較してシミュレーションモデルの妥当性を示す。Fig. 15 に半径方向 O/C 分布計算値と磁気センサーによる計測値との比較を示す。種々の1重リング装入, 多重リング装入において計算値と実測値は良く一致しており, O/C 分布計算値の妥当性が確認された。次に高さ方向の粒径分布についてモデル計算値と樹脂で固化して採取した試料の実測値との比較を Fig. 16 に示す。炉頂バンカーからの排出初期, すなわち 鉱石層底部では粒径が小さく, 排出末期, すなわち 鉱石層表面近傍では粒径が大きい傾向は良く一致している。

シミュレーションモデルの適用例として, ペルレス装入法を駆使して, ペル・アーマ装入法では達成できない“フラットプロフィール”(装入物表面形状が平坦の意味)の可能性を検討した。フラットプロフィール下では混合層形成, 炉内堆積時の粒径偏析が抑制され, 装入物分布制御性が改善できると考えられる。シミュレーションモデルによる試行錯誤で Fig. 17 (a) に示す装入スケジュールを選定し, 実物大実験を実施した。Fig. 17 (b) に装入物表面形状を示すが, ストックレベルにおいて“フラットプロフィール”を実現できた。装入物表面形状のモデル予測値と実験結果とは良く一致している。Fig. 17 (c) に示す半径方向 O/C 分布は荷下がりのない本実験装置では破線のように炉芯部で O/C の高い分布となる。しかし実炉のストックレベルで存在する半径方向の荷下がり速度分布を考慮すると実線で示すように半径方向でほぼ均一な O/C 分布が得られた。

このようにシミュレーションモデルを活用すれば“フラットプロフィール”を可能とする装入シーケンスや半径方向で均一な O/C 分布となる装入シーケンスを選定で

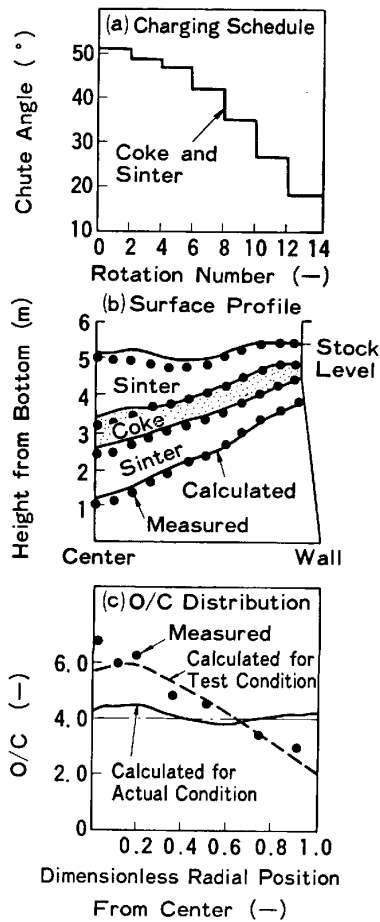


Fig. 17. Simulation test on the flat profile charging.

ることが実証された。

4. 結 論

実物大模型を使用してベルレス装入法における装入物分布を研究し、実験結果とその解析に基づいて装入物分布シミュレーションモデルを開発した。主な知見は以下のとおりである。

1) 炉頂バンカーからの装入物排出挙動は主にファンネルフローであり、排出口上の流動域内の粒子の半径方向速度分布を考慮したシミュレーションモデルで定量的に記述できる。

2) 炉頂バンカー内の流れは焼結鉱の方がコークスよりファンネルフローの傾向が強い。

3) 単一粒子モデルでシュート内およびシュート外の装入物軌跡を連続的にシミュレーションした。シュート内では θ 方向の加速度に及ぼす Coriolis 力の影響が大きいことを定量的に示し、その結果シュート先端の“振り上げ角”は本実験条件下で 36° にも達した。

4) ベルレス装入法においてもベル・アーマ装入法と

同様、鉱石装入時の混合層形成が顕著である。混合層形成量は混合層形成に有効な鉱石量を考慮するとベル・アーマ装入と全く同一の実験式で推定できる。

5) 装入物落下軌跡、バンカーから排出される粒径の経時変化を考慮した半径方向粒径分布、鉱石装入時のコークス“流れ込み”による混合層形成を定量的に取り込んだベルレス装入物分布シミュレーションモデルを開発した。

6) ベルレス装入物分布シミュレーションモデルを使用して“フラットプロフィール”を可能とする装入スケジュールを選定し、実物大実験で実証した。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始御指導を賜りました住友金属工業(株)中央技術研究所西岡邦夫所長、邦武立郎前波崎研究センター所長、羽田野道春同研究所次長に厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) T. NAGAI, J. KURIHARA, H. TAKAHASHI, K. OKUMURA, K. OKABE and M. KONDOH: McMaster Sympo. Iron Steelmaking, Proc., ed. by W.-K. LU and R. J. NIGHTINGALE, Canada (1978), p. 13-1 [McMaster University Press]
- 2) 下村泰人, 九島行正, 芦村敏克: 鉄と鋼, 65 (1979), S 589
- 3) I. F. CARMICHAEL and C. NOTMAN: Preprint of Inter. Conf. on Operation of the Blast Furnace-Theory and Practice (HF 80), 1980, p. I-1-1 Arles-France
- 4) M. GIULI, M. PALCHETTI and G. GONDOLFI: McMaster Sympo. Iron Steelmaking, Proc., ed. by W.-K. LU and R. J. NIGHTINGALE, Canada (1978), p. 14-1 [McMaster University Press]
- 5) M. KONDOH, Y. KONISHI, K. OKABE, S. TOMITA, S. HASHIZUME and J. KURIHARA: Preprint of Inter. Conf. on Operation of the Blast Furnace-Theory and Practice (HF 80), 1980, p. I-3-1 Arles-France
- 6) 西尾浩明, 有山達郎, 脇元一政, 山口 篤: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1523
- 7) Y. KAJIWARA, T. JIMBO and T. SAKAI: Trans. ISIJ, 23 (1983), p. 1045
- 8) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 54 回製鉄部会 (1979 年 5 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 9) 福武 剛, 藤田 勉, 田中康雄: 川崎製鉄技報, 14 (1982), p. 405
- 10) R. M. NEDDERMAN and U. TüzÜN: Powder Technology, 22 (1979), p. 243
- 11) B. KRCEK and L. BROZ: Hutnicke Listy, 33 (1978), p. 466
- 12) 近藤幹夫, 岡部俠児, 栗原淳作, 奥村和男, 富田貞雄: 鉄と鋼, 63 (1977), S 441
- 13) 梶川脩二, 中谷源二, 牧 章, 齊藤典生, 西尾浩明, 有山達郎, 佐藤道貴: 鉄と鋼, 69 (1983), S 52