

高炉装入物分布形成過程の2次元解析

© 1989 ISIJ

論 文

梶原 義雅*・稲田 隆信*・田中 努*

Two Dimensional Analysis on the Formation Process of Burden Distribution at Blast Furnace Top

Yoshimasa KAJIWARA, Takanobu INADA and Tsutomu TANAKA

Synopsis :

The formation process of the burden distribution at blast furnace top was dynamically and quantitatively investigated by the use of a two-dimensional mathematical model, in which the equations of motion on each particle were approximated by a rheological model. In order to increase the estimation accuracy of the model, the dashpot factor, which represents the kinetic energy dissipation during the formation of the burden distribution, was experimentally determined.

The following knowledge was obtained through the application of the model.

The slope angle has significant influence on the burden deposit behavior throughout the charging. The size segregation phenomenon on the slope can be quantitatively evaluated by the model. The change of the charging condition of small particles onto the slope results in the change of the small particle distribution on the slope as well as the change of the deposit profile. The decrease of charging rate caused by the increase of charging time reduces the thickness of the flowing layer of particles to result in the enhancement of the sieving of small particles on the slope.

Key words : ironmaking ; blast furnace process ; burden distribution ; modeling ; simulation ; size segregation.

1. 緒 言

近年、高炉炉頂部の装入物分布制御性の向上を目的として、半径方向の鉱石とコークスの重量比(O/C)分布制御とともに半径方向の粒径分布制御が注目され、大ベル開速度、開ストローク制御¹⁾や粒度別装入法²⁾が開発された。

しかし、O/C分布や粒径分布などの装入物分布に及ぼす諸操作要因の影響の汎用性のある研究は依然として不十分である。縮尺模型あるいは実物大模型を用いて、装入量の装入物堆積角に及ぼす影響³⁾、ムーバブルアマノッチまたはベルレス分配シュート操作の半径方向O/C分布に及ぼす影響²⁾⁴⁾、大ベル開速度・開ストロークの半径方向粒径分布に及ぼす影響¹⁾⁵⁾が調査されているが、いずれも特定の装入条件下での調査であり、得られたデータの汎用性が限定される。また奥野ら⁶⁾は土質力学の斜面安定の理論を適用して、数式シミュレーションによる半径方向O/C分布の予測を実施しているが、

粒子間相互作用力が考慮されていないため、O/C分布形成過程の動的解析には適用できなかった。数式シミュレーションによる半径方向粒径分布の予測は更に困難であり、わずかに篩理論の適用例⁷⁾や単一粒子運動モデルによる計算例¹⁾が散見されるにとどまっている。

そこで、今回、ホッパー内の固体流れの解析用に開発した粒子ごとの運動方程式とVoigt-Kelvinレオロジー模型で表される構成方程式とからなる2次元非定常数式モデル⁸⁾を装入物分布解析用に改良し、2次元系における装入物分布形成過程の検討および装入速度の半径方向粒径分布に及ぼす影響の検討に適用した。装入物分布に関する課題の理論的検討は、本来、3次元系を対象とすべきであるが、計算機能力の制約から、本研究では2次元系を対象とした。このため実際の高炉で生じている装入物分布形成の詳細な解明に、直ちに本モデルを適用できるわけではないが、粒子間相互作用による斜面でのエネルギー散逸を考慮した装入物分布形成過程に関する基礎的な知見を得ることを本研究の目的とした。

昭和62年4月本会講演大会にて発表 昭和63年2月19日受付 (Received Feb. 19, 1988)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

2. 数式シミュレーションモデルの概要

使用した数式モデルの構成は前報⁸⁾と同じであり、粒子間相互作用をスライダーを持つ Voigt-Kelvin レオロジーモデルで近似した (Fig. 1). 炉頂部における装入物分布形成とホッパー内の原料流れとは Table 1 に示すように、運動エネルギーの散逸過程に顕著な差異がある。すなわち、装入物分布形成過程は、原料の運動エネルギー

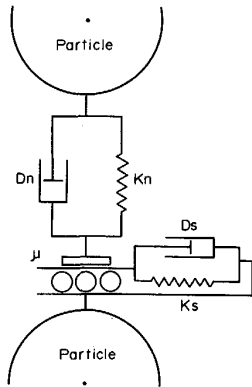


Fig. 1. Rheological model for the interaction between particles.

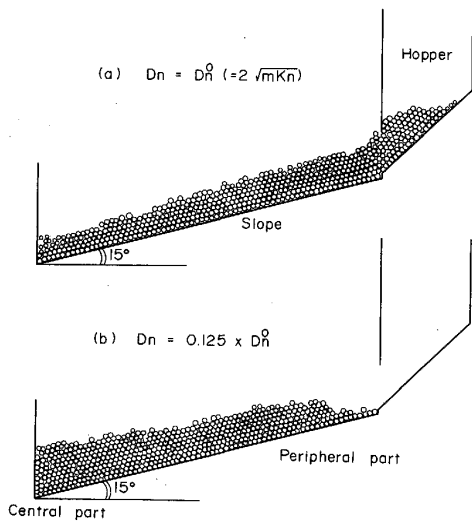


Fig. 2. Effect of dashpot factor on the deposit profile of particles.

が自由空間を落下中に増加し、原料堆積面に衝突時および原料堆積斜面を降下中に急速にエネルギーを散逸する過程であるのに対し、ホッパー内の原料流れの過程は、重力流動による運動エネルギーの緩慢な単調増加過程である。従つて、装入物分布形成過程を高精度にシミュレートするためには、エネルギー散逸過程(本モデルではダッシュポット係数)を適正に評価する必要がある。

ダッシュポット係数の装入物堆積プロファイルに及ぼす影響を直径 8 mm の鉛筆、斜面角度 15° の場合について検討した (Fig. 2). ダッシュポット係数を過大評価すると (Fig. 2(a)), 堆積斜面でのエネルギー散逸が過大になり、原料の堆積角が過大になるだけでなく、ホッパー内にも原料が残存する。逆にダッシュポット係数を過小評価すると (Fig. 2(b)), 堆積斜面でのエネルギー散逸が過小となり、装入された原料は容易に斜面を移動して、中心部での原料層厚の増加、炉壁部での原料層厚の減少が顕著となる。

このように装入物分布形成においてはダッシュポット係数を介して粒子間相互作用力が働いていることがわかる。

2.1 ダッシュポット係数の決定

数式モデル計算に使用するダッシュポット係数を決定するため、Fig. 3 に示す 2 粒子衝突実験を直径 8 mm の丸棒について実施した。丸棒 (1) の振り上げ角 θ_0 を設定し、垂直に吊り下げた丸棒 (2) と衝突させ、衝突

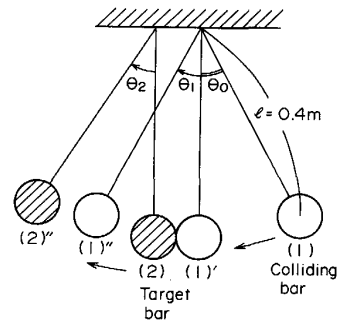


Fig. 3. Experimental method of two-bar collision for the evaluation of dashpot factor.

Table 1. Comparison of burden distribution at blast furnace top with burden flow in hoppers.

	Burden distribution at blast furnace top	Burden flow in hoppers
Phenomenon	<ul style="list-style-type: none"> Free fall from bell or chute Collision against slope Movement on the slope 	<ul style="list-style-type: none"> Formation of sliding surface Gravitational flow
Kinetic energy of burden	<ul style="list-style-type: none"> Increase during falling Rapid dissipation on the slope 	<ul style="list-style-type: none"> Monotonous and slow increase
Important factor	<ul style="list-style-type: none"> Energy dissipation process 	<ul style="list-style-type: none"> Stress distribution

後の各丸棒の最大振れ角 θ_1, θ_2 を計測した。本系では、衝突時の丸棒の回転および接線方向の相互作用は無視できるので、丸棒(1)に関する運動方程式として次式を得る。

$$ml \frac{d^2\theta}{dt^2} = -F_n \cos \phi_1 - mg \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{初期条件: } t=0 \text{ で } \theta = -\theta_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで F_n : 丸棒間の相互作用力 (N)

$$F_n = \begin{cases} D_n \frac{dr}{dt} + K_n(2R - r) & r \leq 2R \\ 0 & r > 2R \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

R : 丸棒半径 (m)

m : 丸棒質量 (kg)

K_n : 法線方向弾性ばね定数 (N/m)

D_n : 法線方向ダッシュポット係数 (kg/s)

ϕ_1 : 丸棒(1)の速度ベクトルと相互作用力のベクトルのなす角度 ($^\circ$)

l : Fig. 3 中のひもの長さ (m)

(1)~(4)式に基づく衝突後の最大振れ角の計算結果が実測値 θ_1 と一致するようにダッシュポット係数 D_n を決定する。同様に丸棒(2)についても D_n が決まる。アクリル棒の D_n の決定値を Fig. 4 に示す。Fig. 4 からアクリルの適正ダッシュポット係数を $0.1 \times D_n^0$ と決定した。鉛筆については $0.5 \times D_n^0$ を得た。ここで、 D_n^0 は、ばねとダッシュポットを有する減衰振動系において臨界減衰振動を与えるダッシュポット係数値で $D_n^0 = 2\sqrt{mK_n}$ より計算される。ここで K_n はばね定数。

一方、接線方向のダッシュポット係数 D_s は $K_s/K_n = 1/4^8$ を仮定して求めた接線方向弾性ばね定数 K_s の推

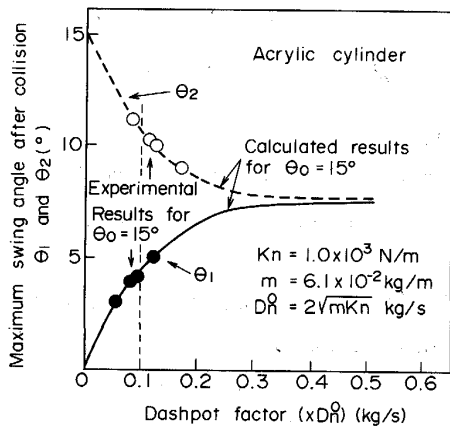


Fig. 4. Determination method of dashpot factor based on two-bar collision experiments.

定値を用いて、 $D_s = 2\sqrt{mK_s}$ の関係式から推定した。

2.2 計算結果の妥当性の検討

本モデルによる計算結果の妥当性を検証するため、Fig. 5 に示す2次元模型実験を実施した。装置奥行は150 mm とした。装入ホッパーに丸棒を装入し、排出ゲートを開いて斜面上に丸棒を堆積させた。ホッパーおよび斜面は側壁を設けず、丸棒端面と側壁との摩擦の影響を回避した。実験の装入条件を Table 2 に、計算に使用した粒子性状を Table 3 に示す。Table 3 中の内部摩擦角、壁面摩擦角は一軸剪断試験の実測値である。

妥当性の検討は三つの観点から実施した。第1にホッ

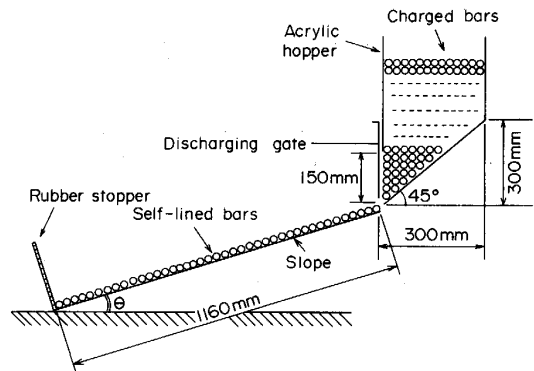


Fig. 5. Experimental apparatus used for verification of the validity of the mathematical model.

Table 2. Charging conditions used in the experiment.

Case	Kind of bar	Diameter of bar	Number of bars	Slope angle	Remarks
1	Cylindrical pencil	8 mm	2 000	15°	
2	Cylindrical pencil	8 mm	2 000	20°	
3	Acrylic cylinder	(*) 8 mm 3 mm	1 816 1 292	15°	Small bars were set at the top of hopper
4	Acrylic cylinder	(*) 8 mm 3 mm	1 816 1 292	15°	Small bars were set at the bottom of hopper

(*) Volume ratio=(large):(small) = 10:1

Table 3. Particle properties used in the mathematical model.

Properties	Cylindrical pencil	Acrylic cylinder
Particle-particle friction angle ($^\circ$)	20	19
Particle-wall friction angle ($^\circ$)	23	15
Elastic spring coeff. K_n (N/m)	1.0×10^3	1.0×10^3
Dashpot factor D_n (kg/m)	$0.5 \times 2\sqrt{mK_n}$	$0.1 \times 2\sqrt{mK_n}$
Density (kg/m^3)	955	1 216

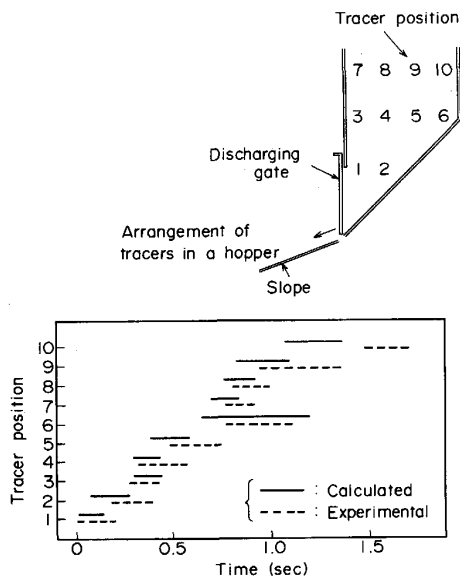


Fig. 6. Comparison of the calculated transition of discharged tracers with the experimental one.

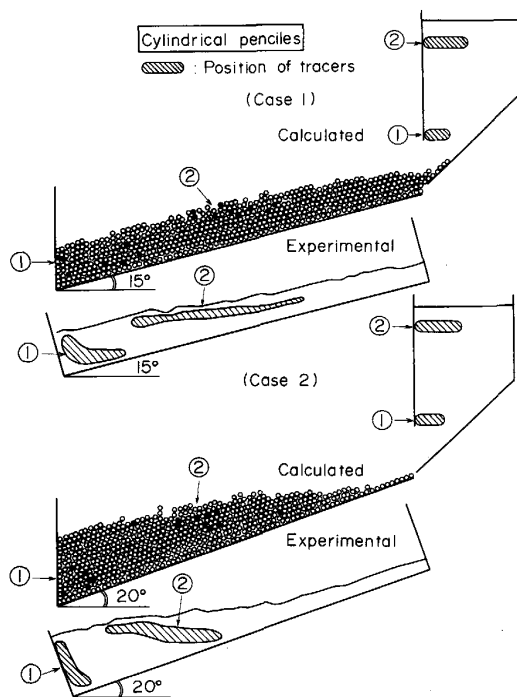


Fig. 7. Comparison of the calculated tracer distribution with the experimental one under different slope angles.

パーからの丸棒の排出順を比較した。Fig. 6 に示すようにホッパー内の所定位置に配置したトレーサーのホッパーからの排出経時変化の計算結果は、排出末期を除いて実験結果と良い対応があつた。

第2に斜面での粒子の堆積状況を比較した (Fig. 7)。

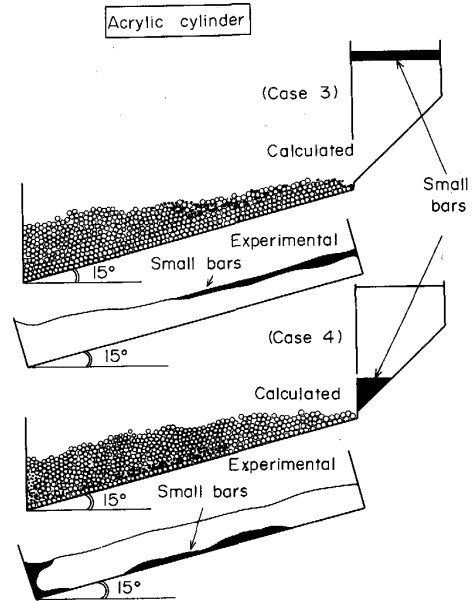


Fig. 8. Comparison of the calculated results of small particle distribution with the experimental one under different location of small bars in the hopper.

いずれの斜面角度においても、ホッパー底部に配置したトレーサー①は中心部に、ホッパー上部に配置したトレーサー②が中間部に堆積する状況は計算結果と実験結果とでは良く一致している。

第3に細棒と太棒を同時に装入した時の細棒の堆積パターンを比較した。細棒をホッパー上部に配置して装入した場合、細棒は中間部から炉壁部の表層近傍に堆積する傾向および細棒をホッパー下部に配置して装入した場合、細棒は中心部から中間部の底層近傍に堆積する傾向は、計算結果と実験結果とでは良く一致している (Fig. 8)。

以上の結果から、本モデルが装入物分布形成過程の定量解析に使用可能であることが検証された。

3. 数式モデルの適用例と考察

3.1 装入物分布形成過程

高炉内に装入された原料が、最終堆積プロファイルを形成するまでの過程を本数式モデルを用いて動的に検討した。計算条件を Table 4 に示す。ムーバブルアーマを使用しない場合を想定し、焼結鉱粒子は炉壁部コークス表層へ重力落下で垂直に装入されるものとし、装入粒径は 3.1 節では均一粒径、3.2 節では粗粒と細粒の 4:1 混合とした。縮尺比は粒径を除いて実高炉の 1/10 とし、装入時間は、装置寸法基準の Froude 数一致の条件で決定した。

Table 4. Calculation condition.

	Calculation	Actual BF	Note
Particle size (large) (small)	5.86 mm 6.25 mm 2.2 mm	17 mm 20 mm 7 mm	Volume ratio ; large/small=4 : 1
Charging time (1) (2)	3.8 s 1.6 s	12 s 5 s	
Density Particle-particle friction angle Dashpot factor Slope angle before charge		3.0 g/cm ³ 45° 1.0 × D _n ⁰ 10°, 20°, 30°	Sinter Sinter Sinter

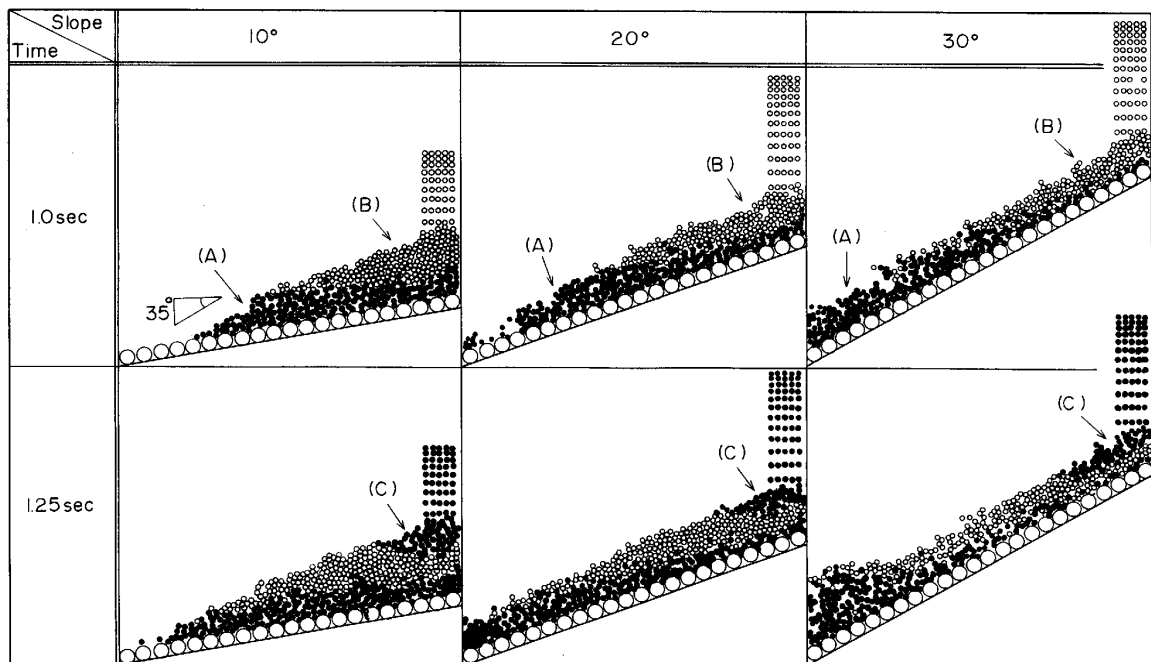


Fig. 9. Dynamic behavior of charged particles on the slope in the early stages of charge.

斜面傾斜角が 10°, 20°, 30° の場合における装入物分布形成過程を数式モデルで推定した (Fig. 9, Fig. 10).

斜面傾斜角 10° の場合, 装入初期 (装入開始から 1.0 s 後) において, 最初に装入された粒子群 (A) は, 静止層との相互作用による粒子速度の減少が大きく, 後から装入された粒子群 (B) によつて押されるようにして移動している. この結果, 斜面を流下する粒子群 (A) の先端では, 表層角度は Fig. 9 に示すように約 35° まで増加している.

装入中期 (装入開始から 1.75 s 後) では, 粒子群 (A) は斜面上の静止粒子との相互作用によつて運動エネルギーを散逸し, その速度を低下する. 粒子群 (B) の一部は粒子群 (A) を追い越して流下する. 粒子群 (A) の斜面上の最終分布は装入中期で完了する.

装入末期 (装入開始から 2.0 s 後) では, 粒子群 (B)

が中心部に堆積して中心部の装入物分布形成が終了する. 粒子群 (C) と (D) は, 中間部及び炉壁部において, 堆積した粒子群 (B) 上で流下を続けている. 最終の堆積プロファイルは, 中間部及び炉壁部の表層部において粒子群 (C) と (D) が堆積して完了する. 従つて, 斜面傾斜角が 10° の場合, 最終の装入物分布は中心部から炉壁部に向かつて形成されるのではなく, 底層から表層に向かつて形成される傾向をもつ.

斜面傾斜角を増加すると (特に斜面傾斜角 30° の場合) 堆積挙動は顕著に変化する. 装入点近傍では, 粒子の流出速度が粒子の流入速度より十分大きく, 流下している粒子の表層角度は斜面傾斜角に近くなり, その結果, 流下粒子層厚は薄い. 最初に装入された粒子群 (A) は, 容易に中心方向へ到達し中心部底部に堆積する. 粒子群 (B) は, 粒子群 (A) を追い越せない. 粒子群 (B)

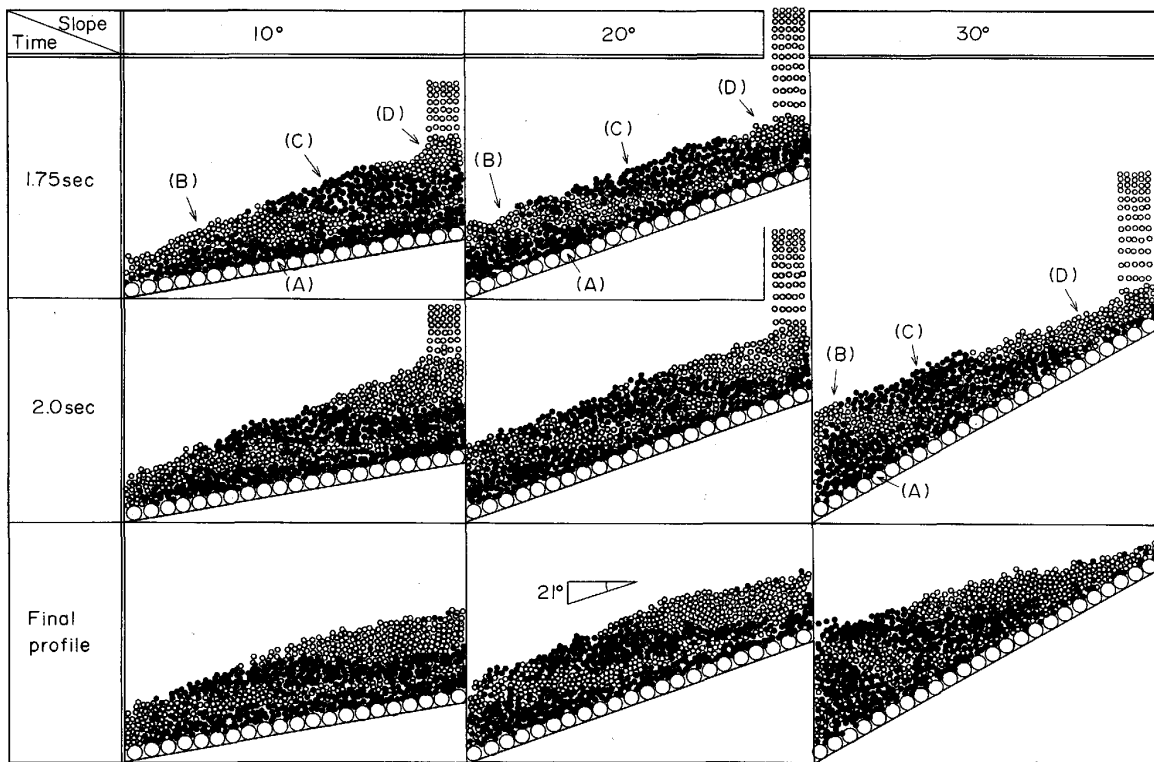


Fig. 10. Dynamic behavior of charged particles on the slope in the middle and last stages of charge.

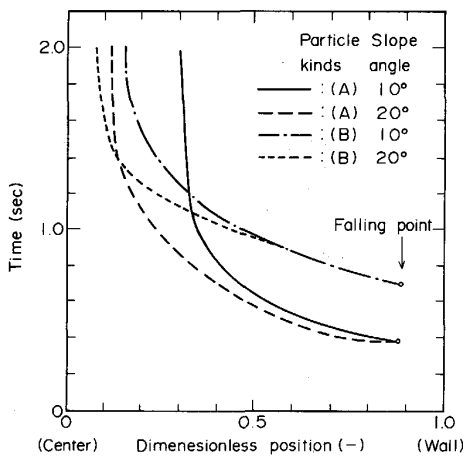


Fig. 11. Effect of slope angle on the change of particle position with time.

が主に中心部に堆積後、粒子群 (C) が中間部に堆積する。最後に装入された粒子群 (D) は、粒子群 (C) がすでに中間部に堆積しているため、主に炉壁部に堆積する。従つて、斜面傾斜角が大きい場合、最終の装入物分布は底層から表層に向かって形成されるのではなく、中心部から炉壁部に向かって形成される傾向をもつ。

これらの斜面傾斜角変化に伴う粒子の堆積挙動の変化は、斜面上静止粒子と装入物粒子の相互作用と斜面方向

の重力の分力との力のバランスに起因すると考えられた。そこで、Fig. 11 中に示す位置に装入された粒子群 (A) と (B) の代表粒子につき、その位置の時間変化を本モデルで検討した (Fig. 11)。斜面上における粒子群 (A) と (B) の速度の減少は、斜面傾斜角の増加とともに顕著ではなくなる。このことは、斜面傾斜角が大きい場合、粒子の運動エネルギーの散逸が小さくなることを意味している。

3.2 粒径分布形成過程

細粒の装入条件変更時の斜面上における粒径分布形成過程を本モデルで検討した。計算時の斜面傾斜角は、 20° とした。Fig. 12 に細粒装入条件変更時の斜面上の細粒分布の計算結果を示す。細粒を粗粒に完全混合装入した場合 (Fig. 12(a))、細粒の割合は中心に向けて単調に減少している。これは、細粒が斜面上で分級をうけるためであり、細粒は炉壁部により多く堆積する。しかし、細粒を完全混合装入する場合、細粒は中心部にも量は少ないが堆積する。

次に粗粒を先行装入し、細粒を装入末期に装入した。斜面上の細粒分布の計算結果を Fig. 12(b) に示す。細粒は炉壁部表層に偏析して堆積する。装入末期に粗粒が含まれていないので、細粒の斜面上での分級は小さい。

第3に細粒を装入初期に先行装入した。計算結果を

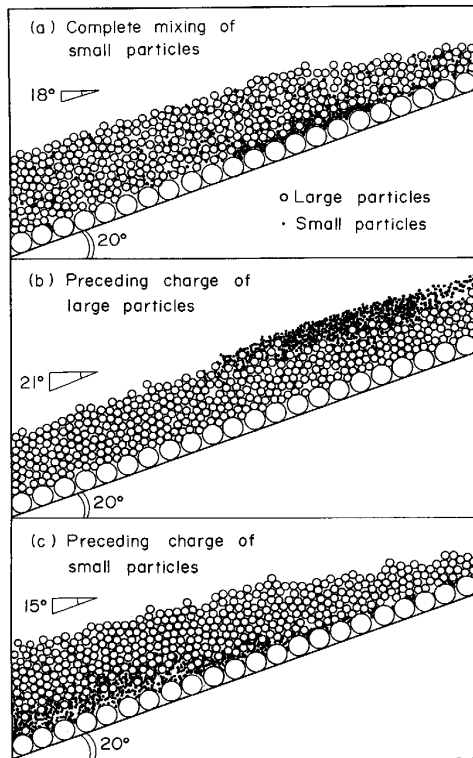


Fig. 12. Small particle distribution on the slope under different charging condition of small particles.

Fig. 12(c) に示す。細粒は、中心部及び中間部の底層に優先的に堆積する。斜面に沿った細粒の堆積範囲は、粗粒先行装入時よりも広い。これは細粒先行装入した場合、細粒は底層の大きい静止粒子と相互作用を生じ、細粒の一部は炉壁部にも堆積するためである。

3.3 細粒装入条件の堆積プロファイルに及ぼす影響

Fig. 12 に示したように、細粒装入条件を変更すると堆積プロファイルが変化する。細粒を装入末期に装入すると (Fig. 12(b)) 堆積角は大きい、細粒を装入初期に装入すると (Fig. 12(c)) 堆積角は小さい。細粒を粗粒と完全混合装入すると (Fig. 12(a)), 堆積角は前二者の中間の値をとる。これらの事実から細粒先行装入の場合、斜面上での運動エネルギー散逸が最も小さいことがわかる。

このメカニズムを検討するため、装入中期における粒子の動きを推定した (Fig. 13)。図中、各粒子中心に記す直線は粒子運動の方向を示し、その大きさは粒子速度の大きさを示す。粗粒先行装入の場合、動いている粒子の層厚はうすいが、細粒先行装入の場合、動いている粒子の層厚は厚い。この違いは、静止層にある粒子の粒径の差から生じる。粗粒先行装入の場合、静止層には粗粒が存在し、動いている粒子は静止層の粗粒と衝突して上

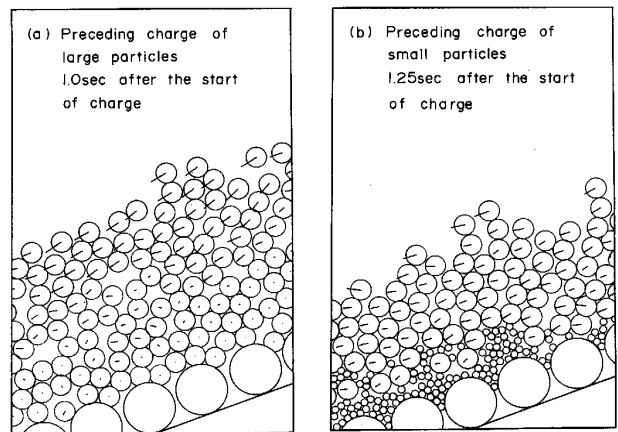


Fig. 13. Velocity distribution of charged particles in the middle stage of charge.

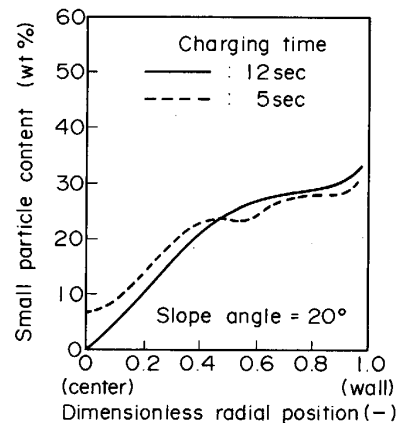


Fig. 14. Effect of charging time on the particle size distribution on the slope.

方に移動して他の流下している粗粒と再衝突し、急速に運動エネルギーを失って流下層の層厚はうすくなる。粒子は中心方向へ移動しにくく、堆積角は大きくなる。細粒先行装入の場合、静止層には細粒が存在し、動いている粗粒は静止層の細粒と衝突して、運動エネルギーをわずかだけ失い、その結果流下層の層厚は相対的に厚くなる。粒子は中心方向へ移動し易く堆積角は小さくなる。

3.4 装入速度の粒径分布に及ぼす影響

大ベル開速度や開ストローク変更の半径方向粒径分布に及ぼす影響は主に模型実験で調査されており、数式モデルによる理論的予測手法の確立が要請されていた。そこで本モデルで装入速度の半径方向細粒分布に及ぼす影響を検討した。装入時間を現状の 5 s から 12 s に延長した時の半径方向の細粒分布を Fig. 14 に示す。装入時間を延長すると炉壁の細粒分率が増加し、中心部の細粒分率が低下している。従来実験で得られていた知見、す

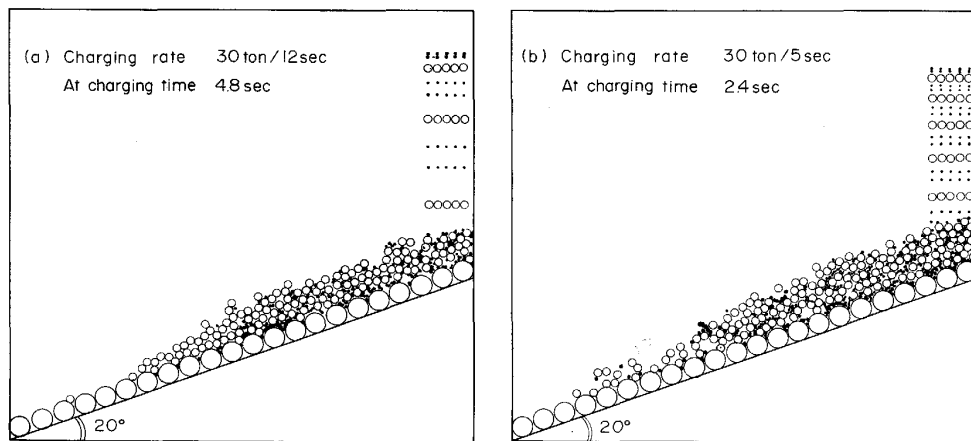


Fig. 15. Effect of charging rate on small particle distribution on the slope.

なわち大ベル開速度や開ストローク減少時に半径方向粒径偏差が拡大することが数式シミュレーションでも確認された。

装入速度変更時の細粒の挙動を詳細に検討するため、Fig. 15 に同一無次元装入時間 (= 時間/全装入時間) での斜面上の細粒分布を示す。装入速度が遅い場合 (Fig. 15(a)), 斜面上の粒子流の層厚が薄くなり、粒子流中の細粒は粗粒によつて篩おとされて炉壁部での細粒の堆積量が増加する。一方、中心部には細粒の少ない粒子流が到達するため中心部の細粒含有率が低くなる。逆に装入速度が早い場合 (Fig. 15(b)), 斜面上の粒子流の層厚が厚く、粒子流中の細粒の粗粒による分級が不十分なまま斜面を移動していく結果、中心部に到達する細粒が増加し、半径方向の粒径偏差は小さくなる。

従つて斜面角度が一定で、かつ細粒を粗粒と完全混合して装入する場合、斜面での分級は粒子流の層厚に直接依存し、装入速度はこの粒子流の層厚に影響を及ぼすと考えられる。

4. 結 言

高炉炉頂の装入物分布形成過程を、粒子ごとの運動方程式とスライダーを持つ Voigt-Kelvin 模型で表される構成方程式とからなる 2 次元数式モデルで動的かつ半定量的に検討した。数式モデルの推定精度向上のため、装入物分布形成過程における運動エネルギーの散逸を表すダッシュポット係数を丸棒衝突実験に基づいて決定した。丸棒を測壁のない模型装置に装入した実験結果とモデル計算結果との対応が良いことから、モデルの 2 次元系への適用の妥当性が検証された。

モデルを 2 次元装入物分布形成過程の解析に適用し以下の知見を得た。

1) 原料堆積挙動は斜面角度の影響を強く受け、斜面角度小の場合は、重力の斜面方向の分力が減少し、原料は斜面上に底層から表層に向けて積層し、最終堆積プロファイルは末期に装入された原料で形成される。これに対し斜面角度大の場合は、重力の斜面方向の分力が増加し原料は中心部から炉壁部に向けて最終堆積プロファイルを形成する。

2) 細粒を粗粒と完全混合装入した場合、細粒が粗粒によつて分級をうけ、炉壁部に細粒が偏析する現象を本数式モデルで半定量的に説明できた。

3) 細粒先行装入の場合、細粒は中心部底部に堆積し堆積角は小さい。逆に粗粒先行装入の場合、細粒は主に炉壁部表層に堆積し堆積角は大きい。

4) 装入時間の増加によつて生じる装入速度の低下は、流下粒子層厚を減少させ斜面上での細粒の分級が促進される。その結果、炉壁部の細粒割合が増加し中心部の細粒の割合が減少する。

文 献

- 1) T. HARU, M. SAINO, M. YASUNO, K. OKUMURA, K. KANEKO, Y. KONISHI and T. SAWADA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **24** (1984), p. 482
- 2) 奥野嘉雄, 入田俊幸, 磯山 正, 今井 徹, 原 義明, 須沢昭和: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1578
- 3) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林 勲, 沖本憲市, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 358
- 4) 西尾浩明, 有山達郎, 脇元一政, 山口 篤: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1523
- 5) 稲垣憲利, 馬場政光, 浅井謙一, 日下部信夫, 末広武臣: 鉄と鋼, **69** (1983), S 56
- 6) 奥野嘉雄, 国友和也, 入田俊幸, 松崎真六: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 783
- 7) 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
- 8) 田中 努, 梶原義雅, 稲田隆信: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 2262