

© 1988 ISIJ

技術報告

ベルレス高炉の炉頂バンカーにおける 焼結鉱の粒径偏析

梶原 義雅*・網永 洋一*²・稲田 隆信*
田中 努*・佐藤 憲一*²

Size Segregation of Sinter in Top Bunker of a Bell-less Type Blast Furnace

Yoshimasa KAJIWARA, Yoichi AMINAGA, Takanobu INADA,
Tsutomu TANAKA and Ken-ichi SATO

Synopsis :

The size segregation of sinter in a top bunker of a bell-less type blast furnace was experimentally investigated by the use of a full scale model as well as a 1/10 scale model. The following results were obtained.

The size variation during discharging from the bunker was significantly reduced by the installation of a simple stone box of suitable size at the suitable vertical position in the bunker for the restraint of the size segregation during charging of burden into the bunker. On the other hand, the installation of an insert to regulate solid flow in the bunker during discharging resulted in the meager reduction of the size variation during discharging. Accordingly, it was proved that the restraint of the size segregation in the bunker was of prime importance for the reduction of the size variation during discharging.

The increase of the charging rate of burden into the bunker decreased the size segregation in the bunker and, as a result, the size variation during discharging was reduced.

In case of two bunkers in series, the size variation during discharging from the lower bunker significantly depended on the re-segregation of burden in the lower bunker during discharging from the upper bunker.

Key words : ironmaking ; blast furnace process ; bell-less top bunker ; size segregation.

1. 緒 言

高炉炉頂への原料の装入法は、炉内におけるガス流分布、化学反応、伝熱を適正に制御するための重要な制御手段である。原料装入法の制御項目として、従来は主に半径方向の鉱石とコークスの重量比分布が研究されてきたが、近年、粒度別装入法¹⁾等にみられるように、半径方向粒径分布が注目されてきた。

ベルレス式高炉炉内の半径方向粒径分布形成に大きな影響を与える炉頂バンカー内の粒径偏析およびバンカーから排出中の粒径変動については既報告がある^{2)~7)}。

しかし、これらの現象に影響を及ぼす要因に関する検討は不十分である。特に、バンカーへの原料装入速度は、バンカー内の粒径偏析に大きな影響を与えると推察され

るが、装入速度の影響に関する研究は見当たらない。

またバンカー内の粒径偏析と排出時の粒径変動の抑制対策の検討も不十分である。奥村ら²⁾はバンカーへの装入原料が全量ストーンボックスに衝突するようにバンカー内のストーンボックス位置を変更し、ガス利用率を1.5%改善した。福武ら⁴⁾はバンカー内にインサートや装入シュートを設置して、排出時の粒径変動を抑制した。しかし、いずれの報告もストーンボックス・インサート・装入シュート設置時におけるバンカー内の粒径偏析および排出時のバンカー内の固体流れを同時には検討していない。従つて、装入時の粒径偏析および排出時の粒径変動を抑制する有効かつ簡素な対策は未確立である。

さらに、近年、円周方向偏差是正と設備費低減を目的として、バンカーを並列横置き (PB) としないで直列

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 7 月 31 日受付 (Received July 31, 1987)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*² 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

縦置き (CF) としたベルレス装入装置が開発された。CF 型ベルレスにおいては、下段バンカー内の粒径偏析は上段バンカーの排出時の粒径変動の影響を受けるので、下段バンカーの排出時の粒径変動は従来の PB 型ベルレスとは異なると推察されるが、CF 型ベルレスの粒径偏析および粒径変動に関する研究は単段バンカーの場合に限定されていた³⁾。

従つて本報告では、ベルレスバンカーの粒径偏析と粒径変動に関する前記 3 点一すなわち装入速度の影響、有効かつ簡素な対策の確立、CF 型ベルレスの粒径変動—について 1/10 縮尺模型装置および実物大模型装置を用いて検討した。

2. 実験方法

使用した実験装置は Fig. 1 に示す 1/10 縮尺模型装置と既報⁵⁾の実物大模型装置である。

1/10 縮尺模型実験の相似則は、系に働く支配的な力を考慮して決定した⁸⁾。

バンカーへの原料装入中の支配的な力は、コンベア輸送で生じる慣性力 (F_b)、原料が重力落下して堆積原料表面へ衝突する際の衝撃力 (F_g)、堆積原料表面からの反作用力 (F_s) および堆積原料表面での摩擦力 (F_f) で

ある。バンカーから原料排出中の支配的な力は F_g 、 F_s および F_f である。定数を省略すると、これらの力は次式のように記述できる。

$$F_b = \dot{m} V \dots\dots\dots (1)$$

$$F_g = \dot{m} \sqrt{gD} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_s = \rho g D^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$F_f = f(\phi_i, F_b, F_g, F_s) \dots\dots\dots (4)$$

ここで \dot{m} : 質量速度 (kg/s)

V : コンベア速度 (m/s)

D : 代表長さ (m)

g : 重力加速度 (m/s²)

f : 関数を示す (—)

ϕ_i : 内部摩擦角 (°)

ほぼ同一の ϕ_i の原料を使用する場合、1/10 縮尺模型実験では次の二つの無次元数を実炉と一致させれば良い。

$$\Pi_1 = \frac{F_b}{F_g} = \frac{V}{\sqrt{gD}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\Pi_2 = \frac{F_g}{F_s} = \frac{\dot{m}}{\rho g^{0.5} D^{2.5}} \dots\dots\dots (6)$$

従つて縮尺模型実験におけるコンベア速度 (V') と質量速度 (\dot{m}') を次式に基づいて選定した。

$$V' = V \left(\frac{D'}{D} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (7)$$

$$\dot{m}' = \dot{m} \left(\frac{D'}{D} \right)^{2.5} \dots\dots\dots (8)$$

なお、ベルトコンベア上の原料の幾何学的堆積状態も相似できる場合には $\Pi_1 = \Pi_2$ となり、 Π_1 は Froude 数と呼称されている無次元数である。

決定した実験条件を Table 1 に示す。既報⁵⁾に述べたように、バンカーから排出時の粒径変動はコークスよりも焼結鉄の方が顕著であつたので、原料は焼結鉄のみを使用した。実物大模型実験に使用した焼結鉄は、実炉使用品であり、1/10 縮尺模型実験に使用した焼結鉄の粒度構成は 1~2 mm が 10 wt%、3~5 mm が 45 wt%、7~10 mm が 45 wt% である。

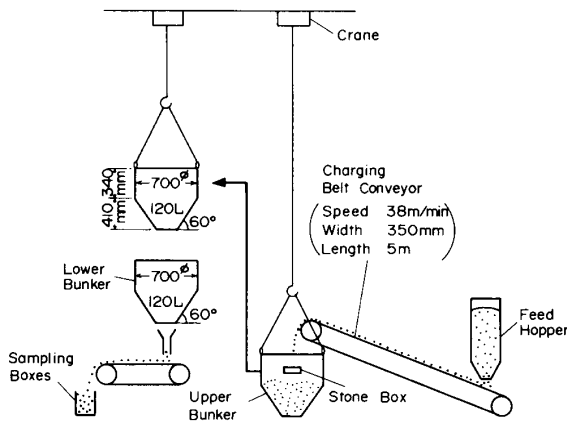


Fig. 1. Experimental apparatus of 1/10 scale model.

Table 1. Experimental conditions.

	Full scale model	1/10 scale model
Kind of burden	Sinter	Sinter
Diameter of bunker	6 000 mm	700 mm*
Effective volume of bunker	95 m ³	120 L*
Amount of charging	148 t/ch	260 kg/ch
Charging belt conveyor speed	120 m/min	38 m/min
Charging rate	0.04, 1.1 t/s	0.076, 2.1, 4.4 kg/s
Discharging rate	1.41 t/s	3.7 kg/s

* 1/10 scale of an actual bunker

3. 実験結果と考察

3-1 装入速度の影響

バンカーにおける粒径偏析および粒径変動に影響を及ぼす主要因の中では、装入速度に関する研究が不十分であった。

既報⁵⁾の実物大模型実験においては、バケットコンベアを使用したため、バンカーへの焼結鉱装入速度は 0.04 t/s に制限されていた。この値は鹿島 2 高炉の設計値 (1.1 t/s) の約 1/30 である。

装入速度のバンカー装入時の粒径偏析に及ぼす影響を検討するため、実物大模型のバンカー上部に 20 m³ のフィードホッパーを新設し、バケットコンベアでフィードホッパーに装入し、フィードホッパーからバンカー内に間欠装入して、バンカーへの原料装入速度を増加させた。

Fig. 2 に装入速度変更時の実物大模型バンカーからの粒径変動を示す。装入速度を増加すると、排出初期の焼結鉱粒径が増加し、排出末期の粒径が減少した。従って装入速度を増加すると排出時の粒径変動は抑制された。同様の現象は 1/10 縮尺模型実験でも観察された (Fig. 3)。

Fig. 2 と Fig. 3 の装入速度変更時の粒径変動の傾向は良く一致しており、1/10 縮尺模型実験の有用性が確認された。

バンカーへの装入速度が増加してバンカー内の原料堆積状況が変化したとしても、排出時のバンカー内の固体流れに及ぼす影響は少ないと考えられるので、装入速度

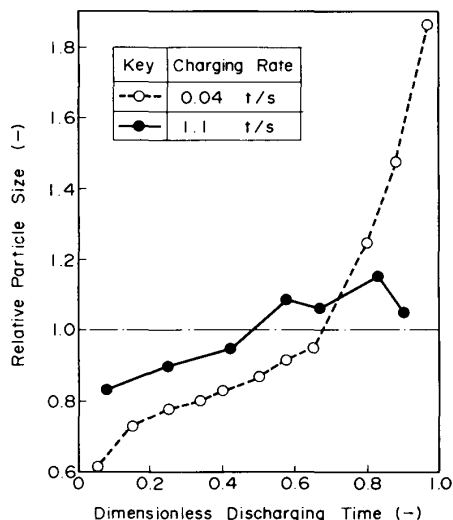


Fig. 2. Influence of charging rate on the size variation during discharging in the full scale model experiment.

の増加による粒径変動の減少は、バンカーへの原料装入時の粒径偏析変化に起因すると思われる。バンカー内の半径方向粒径分布を調査した。Fig. 4 に示すように、実物大模型実験で装入速度を増加するとバンカー内の粒径偏析は減少した。バンカー内の半径方向粒径分布はバンカーに原料を 1/3 装入した時 (Lower level) および全原料装入時 (Upper level) に測定した。原料装入速度増加時にバンカー内の粒径偏析が減少する現象は 1/10 縮尺模型実験でも確認された⁹⁾。

バンカーへの原料装入速度を増加すると、高炉の場合と同様に¹⁰⁾、バンカー内の原料堆積角が 3° 低下した。この現象も、原料堆積表面での分級を抑制し、粒径偏析

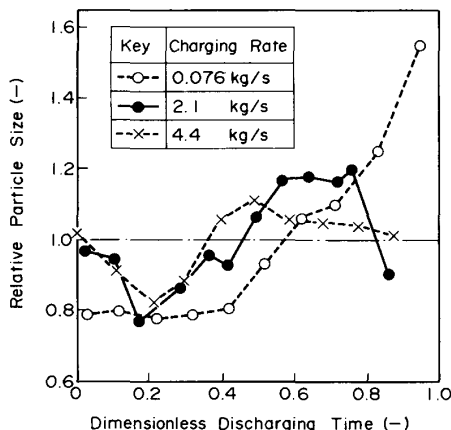


Fig. 3. Influence of charging rate on the size variation during discharging in the 1/10 scale model experiment.

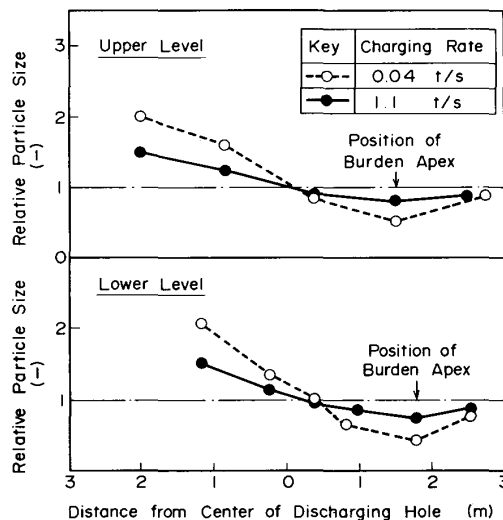


Fig. 4. Change of the size segregation in the bunker under different charging rate in the full scale model experiment.

の減少に寄与したと考えられる。

従つて、装入速度増加時には、バンカー内の粒径偏析が抑制され、排出初期には排出孔上の堆積原料の頂点近傍に堆積しているやや大きな細粒が排出され、一方、排出末期にはバンカー壁近傍のやや小さな粗粒が排出される。その結果、Fig. 2 と Fig. 3 に示したように、装入速度増加時に、粒径変動が減少する。

3.2 粒径偏析および粒径変動の抑制対策

3.2.1 対策の基本的な考え方

高炉炉内の半径方向粒径分布の支配要因は、バンカーから排出時（すなわち分配シュートから排出時）の粒径変動であつて、バンカーへの原料装入時の粒径偏析ではないと思われる。しかしバンカーから排出時の粒径変動は、バンカーへ装入時の粒径偏析と排出時のバンカー内の固体流れの二つの過程で構成されているので、各過程の影響度を評価し、より支配的な過程に対する抑制対策を検討した。

3.2.2 排出時のバンカー内の固体流れ制御の効果

既報⁵⁾に述べたようにバンカー内の固体流れはほとんどファネルフロー（漏斗状流れ）であり、排出初期に堆積原料の頂点近傍に堆積している細粒が排出され、排出末期にはバンカー壁近傍に堆積している粗粒が排出される。バンカー内にインサートを設置してマスフロー化を図る方法が実施されているが、インサートの大きさが不十分であれば、ファネルフローの改善効果が少ないことも知られている。

従つて JOHANSON¹¹⁾の研究に基づいて最適なコーン型インサートを設計し（Fig. 5）、実物大模型装置に設置した。設計に際し、18~20 mm 焼結鉱の内部摩擦角として 3 軸圧縮試験機で測定した 42° を採用した。この

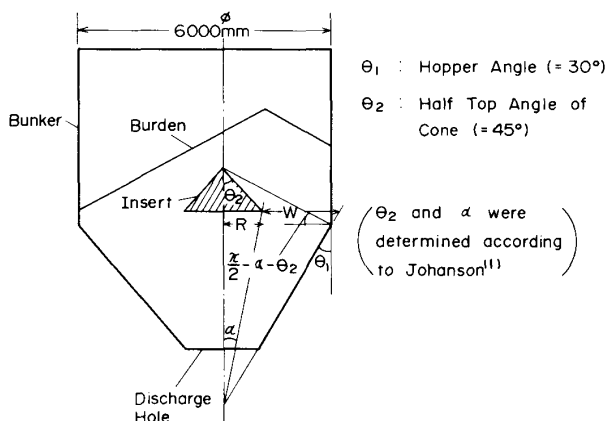


Fig. 5. Design method of the suitable cone type insert in the bunker in the full scale model experiment.

内部摩擦角測定値を基に JOHANSON¹¹⁾の提案した部分マスフロー条件を満足するようにコーンの半裁角 (θ_2) を決定する。次に α を (9) 式で計算する。

$$\alpha = \tan^{-1}\{\tan \theta_1 / (1 + W/R)\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 θ_1 , W , R は Fig. 5 中に定義する。 W/R は JOHANSON¹¹⁾の提案図に基づいて評価する。 θ_2 と α の値から Fig. 5 に示すように最適なコーン型インサートの大きさと位置を幾何学的に決定できる。

コーン型インサート設置によるバンカーからの粒径変動の変化を Fig. 6 に示す。粒径変動の変化が顕著にできるように低装入速度条件で実験した。直径 2 m の大型のコーン型インサートを設置したにもかかわらず、バンカーからの粒径変動は顕著には改善されなかつた。排出初期に細粒が排出され、排出末期に粗粒が排出されて、排出中の粒径は単調に増加した。

この原因は、インサート設置によるバンカー内のファネルフロー改善効果が小さく、バンカーへ装入時に生じた粒径偏析を十分には補償できなかつたためと考えられる。インサートをさらに下方に移動すれば、マスフロー化を促進できるが、インサート周辺でブリッジを形成し、排出の安定性が損なわれる。従つて実操業において、インサートをさらに下方に移動することは困難である。

3.2.3 装入時のバンカー内の粒径偏析制御の効果

バンカーへの原料装入時のバンカー内の粒径偏析を抑制するため、バンカー上方に旋回シュートを設置する方法が考えられるが、設置スペース、設備費の点で制約がある。そこで有効かつ簡素な対策の一つとしてストーン

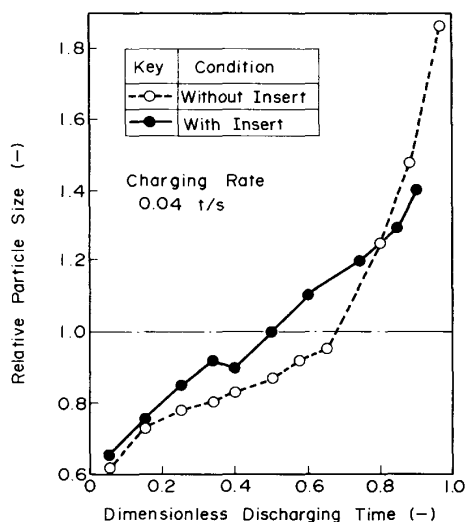


Fig. 6. Effect of the installation of the cone type insert on the size variation during discharging in the full scale model experiment.

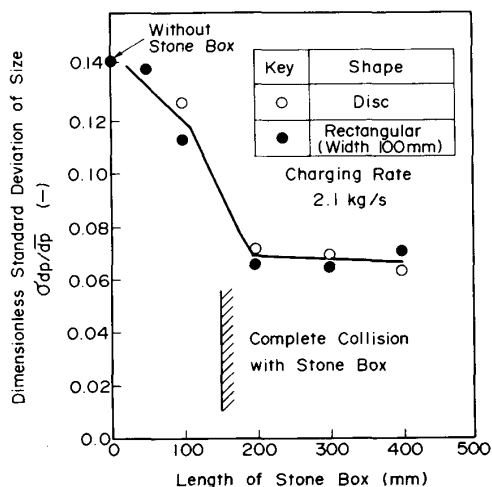


Fig. 7: Effect of size and shape of the stone box on the standard deviation of size during discharging in the 1/10 scale model experiment.

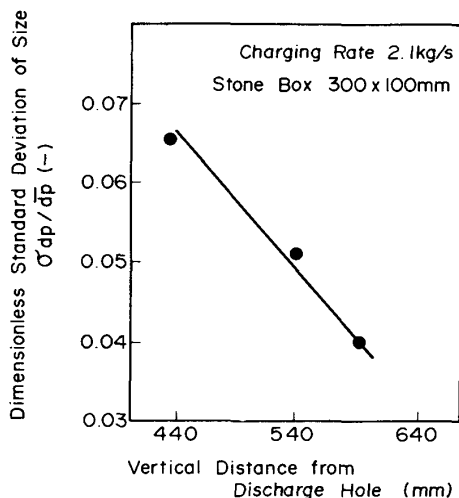


Fig. 8: Effect of vertical position of the stone box on the standard deviation of size during discharging in the 1/10 scale model experiment.

ボックスを選定し、その有効性を 1/10 縮尺模型および実物大模型を用いて検討した。

まず、ストーンボックスの形状と大きさの影響を 1/10 縮尺模型で調査した (Fig. 7)。ストーンボックス設置位置は、各ケースとも排出孔上 440 mm とした。Fig. 7 の縦軸 (σ_{dp}/\bar{d}_p) は排出粒径の標準偏差 (σ_{dp}) を装入焼結鉱の平均粒径 (\bar{d}_p) で割った商である。ストーンボックスが小さく装入焼結鉱がストーンボックスに衝突しない場合には、 σ_{dp}/\bar{d}_p の値はストーンボックスを設置しない場合の値から顕著には低下しない。バンカーに装入された焼結鉱が全量ストーンボックスに衝突する場合には、 σ_{dp}/\bar{d}_p はストーンボックスの形状、大きさによらず大幅に低下し、かつその値はほぼ一定となった。

次にストーンボックスの高さ方向の設置位置の影響を 1/10 縮尺模型実験で検討した。ストーンボックスの高さ方向設置位置と σ_{dp}/\bar{d}_p の関係を Fig. 8 に示す。ストーンボックス設置位置が高いほど、粒径変動は減少した。これは装入時の粒径偏析の減少が主原因であつて排出時のファンネルフローの改善によるものではないと考えられた。その根拠として、バンカー内の固体流れのトレーサー実験結果を Fig. 9 に示す。ストーンボックスを設置した b) の場合でもファンネルフローは改善されていない。すなわちストーンボックス直上に堆積していた原料 (Fig. 9 b) 中の●印) は、ストーンボックスなしの場合と同様、排出初期に排出されている。この現象は大型のコーン型インサートを設置してもマスフロー化促進が実現できなかった現象と同じである。もう一つの根拠は、実物大模型実験において、バンカー内の粒径偏析がス

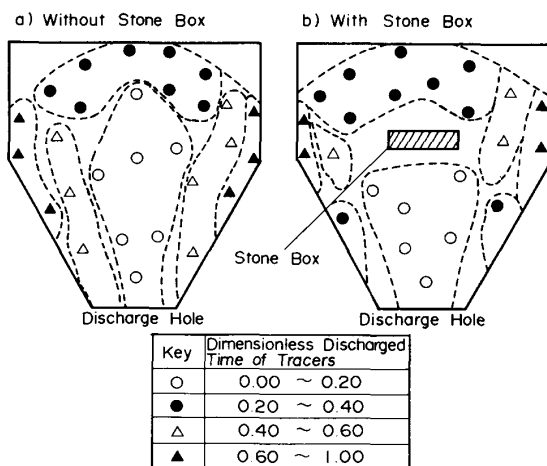


Fig. 9: Effect of the installation of the stone box on the discharge behavior in the 1/10 scale model experiment.

ストーンボックスを高い位置に設置するほど減少したことである (Fig. 10)。

バンカー内にストーンボックスを設置して、装入時の粒径偏析を抑制すれば、排出時の粒径変動を抑制できることは実物大模型実験でも確認された (Fig. 11)。

3.3 CF 型ベルレスの粒径変動

前述のように下段バンカー内の粒径偏析は明らかに上段バンカーからの粒径変動に依存するので、CF 型ベルレスの下段バンカーから原料排出時の粒径変動は、従来の PB 型ベルレスの粒径変動とは異なると思われた。実操業における関心は、CF 型ベルレス下段バンカーの粒径変動が、上段バンカーの粒径変動より増加するかど

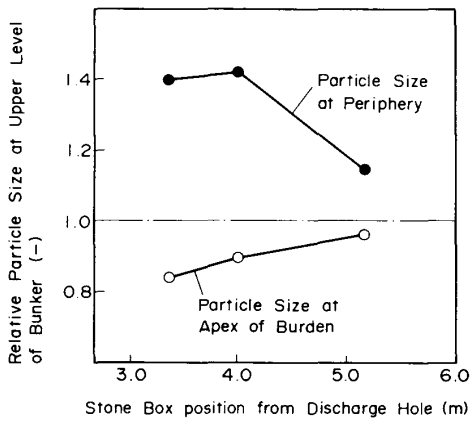


Fig. 10. Effect of vertical position of the stone box on the size segregation in the bunker in the full scale model experiment.

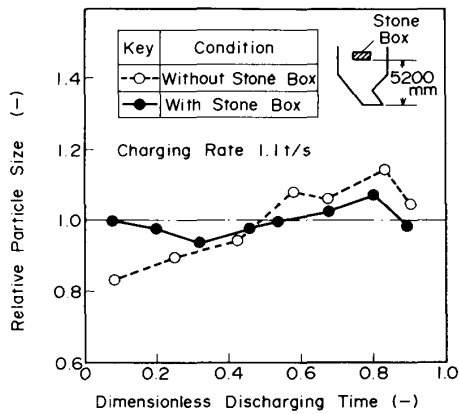


Fig. 11. Effect of the installation of the stone box on the size variation during discharging in the full scale model experiment.

うかにある。

従つて、1/10 縮尺模型実験条件として二つの極端なケースを採用した。第一のケースは、上段バンカーにストーンボックスを設置せず、上段バンカーの粒径変動が顕著に大きい場合であり、他のケースは上段バンカーの最上部にストーンボックスを設置して、上段バンカーの粒径変動を最小にした場合である。両者の粒径変動の差を顕著にするため、いずれのケースも下段バンカーにはストーンボックスを設置しなかつた。

粒径変動の実験結果を Fig. 12 に示す。上段バンカーの粒径変動が大きい場合、すなわち、上段バンカー内にストーンボックスを設置しない場合には、下段バンカーの粒径変動は上段バンカーの粒径変動より若干減少し、無次元粒径偏差は上段バンカーの 0.14 から下段バンカーの 0.11 に低下した。この原因は Fig. 13 に示す下段バンカー内の粒径偏析の変化に起因すると考えられ

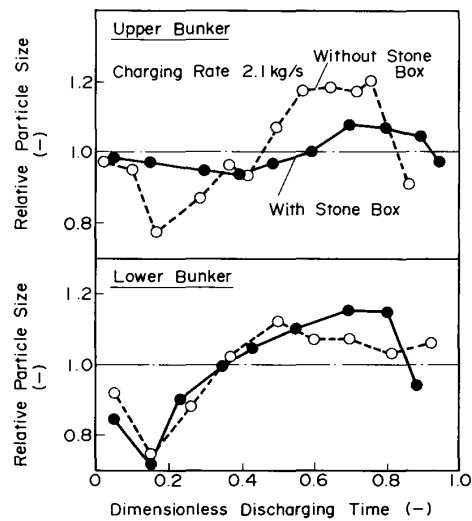


Fig. 12. Size variation during discharging from CF type bell-less bunkers in the 1/10 scale model experiment.

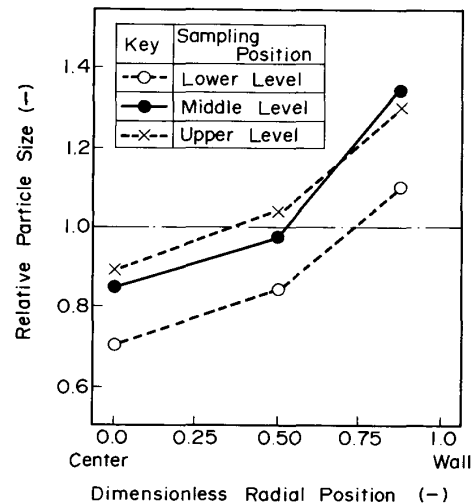


Fig. 13. Size segregation in the lower bunker in the 1/10 scale model experiment without installation of stone box in the upper bunker.

た。下段バンカーの原料装入時において、装入初期では、下段バンカーに装入された細粒焼結鉄は、堆積原料の頂点近傍のみならずバンカー壁部にも堆積し、装入末期には、下段バンカーに装入された粗粒焼結鉄は、バンカー壁部のみならず堆積原料の頂点近傍にも堆積する。その結果、下段バンカー内の粒径偏析が緩和され、排出時の固体流れがファネルフローであつても粒径変動が減少した。

上段バンカーの粒径変動が小さい場合、すなわち、上段バンカー内にストーンボックスを設置した場合には、下段バンカーの粒径変動は上段バンカーの粒径変動より

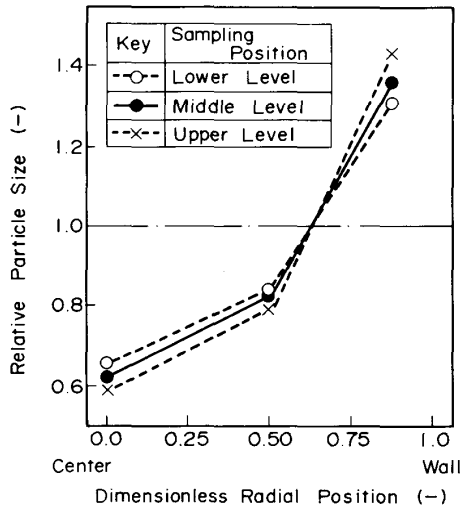


Fig. 14. Size segregation in the lower bunker in the 1/10 scale model experiment with installation of the stone box in the upper bunker.

明白に増加した。この現象も Fig. 14 に示すように下段バンカー内の粒径偏析の変化で説明できる。下段バンカーの原料装入時において、堆積原料の斜面上で装入された焼結鉱の再分級が生じ、下段バンカー内の粒径偏析は上段バンカー内の粒径偏析より増加する。下段バンカー内の粒径偏析の増加と排出時のファネルフローによつて下段バンカーの粒径変動は上段バンカーの粒径変動よりも増加する。このように、従来研究¹²⁾では複数バンカーを直列に連結すると粒径変動は減少すると報告されているが、本報告の后者のケースのように次のバンカー内での粒径偏析が支配的となる場合には、次のバンカーの粒径変動は必ずしも減少しない。

本報告の后者の場合の粒径変動抑制対策として、下段バンカーにもストーンボックスを設置したところ、下段バンカーの粒径変動は上段バンカーの粒径変動とほぼ同程度まで減少し、無次元粒径偏差は 0.11 まで低下した。従つて、CF 型ベルレスにおいては、下段バンカーの粒径変動を低レベルに維持するには、下段バンカー内にもストーンボックスの設置またはそれと同等の対策が必要である。

4. 結 言

ベルレス高炉の炉頂バンカー内の焼結鉱の粒径偏析お

よびバンカー排出時の粒径変動について 1/10 縮尺模型実験および実物大模型実験を実施し、以下の知見を得た。

①バンカーへの焼結鉱の装入速度を増加すると、バンカー内の粒径偏析が減少し、その結果、バンカーから焼結鉱を排出する際の粒径変動が減少する。

②バンカー内に大型インサートを設置して、バンカー内の固体流れをマスフロー化し、バンカー排出時の粒径変動を抑制することは困難である。

③バンカー排出時の粒径変動の抑制には、バンカー装入時の粒径偏析を抑制することが効果的であり、そのための有効かつ簡素な対策の一つはストーンボックスの設置である。

④粒径偏析抑制のための適正なストーンボックスの大きさは、装入原料の全量がストーンボックスと衝突する大きさであり、適正な設置高さは堆積原料表面近傍である。

⑤CF 型ベルレスの下段バンカーの粒径変動は下段バンカーへ原料装入時の粒径偏析に依存する。従つて下段バンカーの粒径変動を抑制するためには、下段バンカー内にもストーンボックスを設置するかまたはそれと同等の対策が必要である。

文 献

- 1) 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
- 2) 奥村和男, 河合隆成, 丸島弘也, 高橋洋光, 栗原淳作: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1956
- 3) 永井忠弘, 奥野嘉雄, 矢崎 尚, 長谷川順三, 沢 雅明, 近松栄二: 鉄と鋼, **68** (1982), S 694
- 4) 福武 剛, 藤田 勉, 田中康雄: 川崎製鉄技報, **14** (1982), p. 405
- 5) 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
- 6) 大塚 一, 一関貞幸, 沢井敏明, 原 義明, 中川美男, 須沢昭和, 木村春男: 鉄と鋼, **72** (1986), S 6
- 7) 奥田康介, 松倉慎一郎, 山田寛之, 栗原喜一郎, 水野葆祿, 佐藤 晃: 鉄と鋼, **72** (1986), S 917
- 8) 江守一郎, D. J. SCHURING: 模型実験の理論と応用 (1973), p. 26 [技報堂]
- 9) 佐藤憲一, 網永洋一, 梶原義雅, 稲田隆信, 射場 毅, 中村義久: 鉄と鋼, **72** (1986), S 913
- 10) 沖本憲市, 稲葉晋一, 成田貴一: 鉄と鋼, **68** (1982), S 104
- 11) J. R. JOHANSON: Powder Technology, **1** (1967, 1968), p. 328
- 12) 川合清一: 金沢大学工学部紀要, **2** (1959), p. 187