

高炉コールドモデルにおける炉芯充填粒子の更新運動

高橋 洋志*・河合 秀樹*

Deadman Renewal Motion in a Cold Model of Blast Furnace

Hiroshi TAKAHASHI and Hideki KAWAI

Synopsis : Permeability in coke bed in the lower part of blast furnace is believed to have important functions to affect the operation. Accordingly, elucidation of the renewal mechanism and packed structure of deadman coke is expected. The renewal motion may be related with such a motion that the coke bed floats due to the buoyancy force when the molten liquid is stored beyond a critical depth in the hearth. In the present study, a semi-three dimensional model of blast furnace with semicircular cross section was used. The model can approximate more adequately practical furnace in the stress field than two-dimensional model. The moving trajectory of individual particle of deadman packed bed was observed under the repetition of floating to sinking motion of the bed, using water and model particles in place of molten liquid, coke and ore, respectively. The following results were obtained. The height of particle-free space formed above the hearth when the bed floated, had a close correlation with the total depth of water within the bed. The particle renewal did not take place in the whole deadman region, but was restricted within a particular region determined depending on the free space height. The two renewal paths were recognized. First, the particles forced up due to buoyancy towards the deadman surface, joined with the fast moving particles in the funnel flow region to move into the raceway. Second, the particles which descended within the deadman, turned gradually to the direction to move towards the raceway.

Key words : blast furnace; hearth; deadman renewal motion; cold model; semi-three dimensional model; bed floating and sinking; buoyancy.

1. 緒言

高炉炉下部の炉芯～炉床における充填コークス層の通気性・通液性は高炉の安定操業にとって重要な役割を持つとされ、充填コークスの更新機構の解明、充填構造の推定、炉床環状流の解明などに対する検討が盛んになされている。炉芯更新の駆動力はレースウェイにおけるコークスの燃焼反応、溶融FeOの還元反応¹⁾、メタルへの浸炭などであるが、更新挙動には貯銑時の浮力による炉床コークス層の上昇運動が深く関与するものと考えられている^{2,3)}。

筆者ら³⁾はレースウェイでのコークスの燃焼と貯銑・出銑を模擬した二次元水モデルを用い、注水・排水に伴う炉芯粒子の移動経路を詳細に検討した。これによると、注水時に炉底フリースペース（粒子非充填領域）²⁾の形成に伴う粒子のレースウェイへの移動と消費、排水時に炉芯上部から新しい粒子の供給を伴うフリースペースの再充填・降下を基本とする運動の繰り返しによって、炉芯～炉床のすべての粒子が更新される挙動が観察された。しかし、二次元装置では平行平面間に粒子が束縛されるために、粒子運動は壁面摩擦の影響を受ける。また、レースウェイでのガス流による粒子の旋回運動も二次元固有のものである。したがって、得られた力学的挙動に関する知見がそのまま実炉に適用できるとは限らない。

本研究は応力場においてより実炉に近い半裁コールドモ

デルを用いて、炉芯の浮沈運動に伴う粒子個々の挙動を調べたものであり、二次元モデルの結果と総合して炉芯コークスの更新運動を明確にすることを目的とした。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置をFig. 1に示した。半裁モデル（アルミニウム製、厚さ10mm）は全周モデルの中心軸を通る断面で装置を2分割したモデルである。ボッシュ下部の半周方向に12本の粒子排出パイプが下向き45度の角度で取り付けられており、密閉箱に格納された6台の電磁フィーダーにより粒子を排出した。排出パイプの角度は電磁フィーダーへの粒子の供給を保證する角度として設定した。各々の排出パイプには羽口（内径4mm）が水平に対して8度の角度で、内部に10mm突き出して取り付けられている。羽口から吹き込まれた空気はシャフト方向に流れ、粒子と向流接触して大気に放出された。貯銑・出銑は水を用いて模擬し、注水・排水は炉底に設けた小孔から流量を制御して行った。観察面は厚さ10mmの透明アクリル板である。

2.2 モデル粒子

本実験では系の密度構成において実炉とモデルで相似となるように粒子を選んだ。すなわち、炉床部においては溶銑とコークスの密度比が水と試料粒子の密度比にほぼ等し

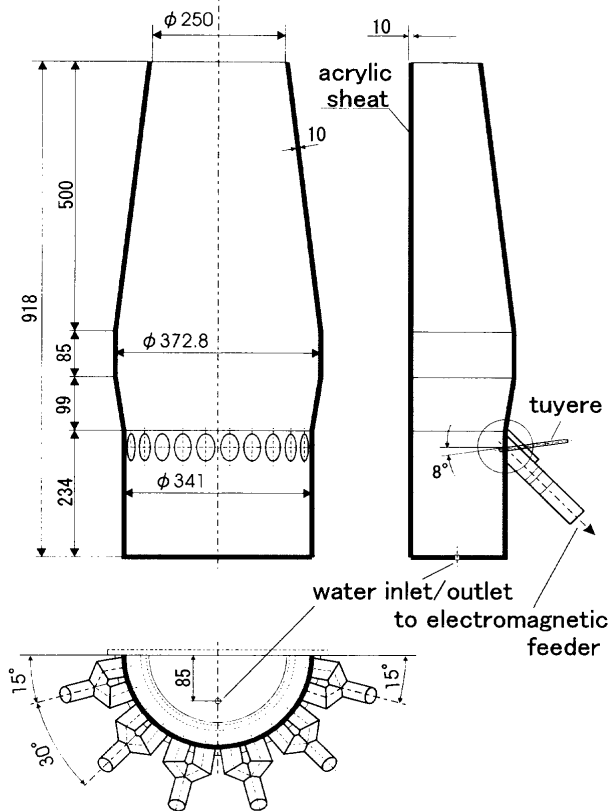


Fig. 1. Experimental apparatus with semicircular cross section.

くなるような粒子として、ポリスチレン50%・ポリプロピレン50%の15倍発泡樹脂(粒子径3.2mm)を選んだ。このコークスに相当する粒子をA粒子(A15P)と呼ぶ。シャフトへの粒子供給では、実炉における鉄鉱石とコークスの平均密度とコークス密度の比が実験においてほぼ同じ値となるように、鉄鉱石に相当する別の種類の粒子(B粒子と呼ぶ)を選び、B粒子とA粒子の配合を調整した。B粒子には先と同じ樹脂の5倍発泡樹脂(B5P, 粒子径1mm)とアルミナ球(BA, 粒子径2.6mm)を用いた。粒子の物性をTable 1に示した。B5PはA15Pに比べて約3倍の密度である。また、炉床での粒子に対する水の密度比ではモデルのほうが大きく浮力を受けやすい系となっている。

2.3 実験方法

最初にボッシュ~炉下部の所定のレベルに着色トレーサーを水平に複数個、観察面に接するように装入する。

次にA粒子を炉頂まで充填し、粒子の供給・排出とガス供給を開始する。充填層上面が炉頂から5cmまで下がったところで一度粒子の供給・排出を止め、ガスは供給したまま、次節の計算に基づき計量されたB粒子(重い粒子)を炉頂中心に設置した半裁パイプに装入する(Fig. 2, パイプの直径は装入量に応じて変える)。Fig. 2(a)のように、半裁パイプから装置壁までの残りの空間には、炉頂までA粒子(軽い粒子)を装入する。その後、粒子の排出を開始し、上記の操作を繰り返した。B5Pの場合は装入量(配合

Table 1. Physical properties of particles.

Material	Density (kg/m ³)	Particle size(mm)	Void fraction(-)	Water to particle density ratio(-)
A15P	85.6	3.2	0.42	11.7
B5P	255	1.0	0.42	-
BA	1760	2.6	0.42	-

A15P:15-polystyrene/polyethylene foam.
 B5P :5-polystyrene/polyethylene foam.
 BA :Alumina sphere

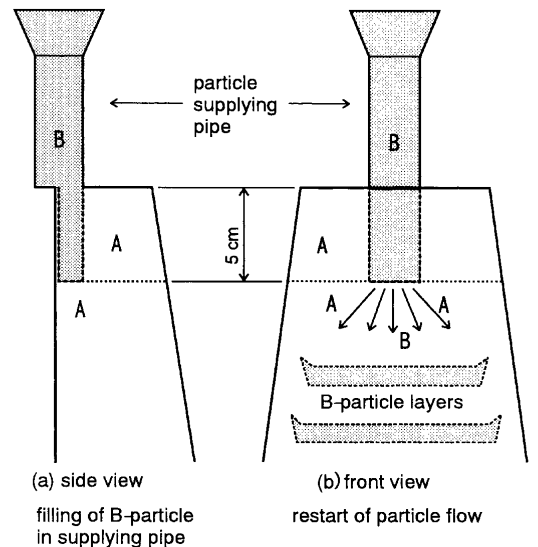


Fig. 2. Particle supplying method.

量)が多い。この充填方法を採用したのは、粒子の移動開始と同時に、密度の大きいB粒子はA粒子層の下側へ進入し、半円錐状態を経て水平に広がり、炉頂から5cm降下する段階で、壁近くを除いて、A粒子層とB粒子層の水平充填状態が容易に形成されることがわかったためである(Fig. 2(b))。これによりシャフト内の粒子充填構造としては、見かけ上、鉄鉱石とコークスの層状交互堆積構造に類似した状況を模擬することができた。

B粒子層がベリー先端に到達した時点で、注水を開始した。その後の注水・排水に伴うトレーサーの位置を所定時間ごとに記録して、トレーサーの移動軌跡を求めた。用いた水は水道水であるが粒子-壁面の摩擦低減のため微量の界面活性剤を注入し、かつ水位を確認しやすいように着色してある。

なお、粒子の降下速度(炉頂基準)は $u_s=2.42$ cm/min, ガス速度は炉頂基準で $u_r=0\sim0.397$ m/s, 羽口基準で $u_b=0\sim64.5$ m/s, 注水・排水速度 $=1.39\times10^{-6}$ m³/sで実験を行った。ここで、粒子径を代表長さにとり、フルード数に基づく相似則から上記の操作条件を推定した結果を示すと以下のようである。粒子系として先に述べたA粒子とB粒子の配合系を考える。スケール比を20と仮定し、炉頂条件として温度200°Cを設定すると、ガス速度のスケールファクター $F_g=0.06$ を得る。炉頂ガス空塔速度を1.5~2 m/sとすると、モデルでは $u_r=0.09\sim0.12$ m/sとなる。また、羽口条件とし

て圧力 500 kPa, 温度 1200°C を設定すると $F_g \approx 0.065$, したがって、モデルの u_b は 11 m/s 前後となる。実験ではガス速度の影響を調べるために相似則からの値を超えた範囲を含めて考察の対象とした。同様に、粒子速度のスケールファクターは $F_s \approx 0.22$ となり、実速度を 10~12 cm/min とすると $u_s = 2.2 \sim 2.6$ cm/min となる。

2.4 炉頂における A 粒子と B 粒子の供給量の見積もり

$\rho_{b,A}$ = A 粒子の充填密度, $\rho_{b,B}$ = B 粒子の充填密度, $\rho_{b,A/B}$ = A, B 環状充填層の平均密度 (=A, B 水平交互充填状態の平均密度), $\rho_{b,coke}$ および $\rho_{b,ore}$ = コークスおよび鉄鉱石の充填密度, $\rho_{b,coke/ore}$ = コークス, 鉄鉱石の交互充填層の平均密度とする。2.2 節で示したように、A 粒子と B 粒子の装入割合 R は次式から見積もった。

$$R = \frac{\rho_{b,A/B}}{\rho_{b,A}} = \frac{\rho_{b,coke/ore}}{\rho_{b,coke}} \dots\dots\dots (1)$$

$\rho_{b,coke} = 500 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{b,ore} = 1500 \text{ kg/m}^3$ を仮定した。近似的にコークスと鉄鉱石の装入体積を同一と見なして、 $\rho_{b,coke/ore} = (500 + 1500) / 2 = 1000 \text{ kg/m}^3$ と見積もると $R = 2$ を得る。A 粒子層と B 粒子層の空間率も等しいと仮定すると次式が成り立つ。

$$R = \frac{\rho_A x + \rho_B (1-x)}{\rho_A} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ_A , ρ_B はそれぞれ A, B 粒子の見かけ密度, x は A 粒子の体積割合である。充填割合の目安として、B 粒子がアルミナ球 (BA) の時 $x = 0.95$, 5 倍発泡粒子 (B5P) の時 $x = 0.5$ を得る。

3. 実験結果

炉底フリースペース (粒子非充填領域) と浮上充填層の境界の形状は、二次元モデル^{2,3)}では V 字型の傾向となることが示されているが、本半裁モデルではすべての条件で、ほぼ水平となることが確かめられた。粒子層が浮上を開始する限界水位 Z_c , 注水水位 Z (すべての実験で 14 cm) におけるフリースペース高さを H_f として、 Z_c , $Z - Z_c$, H_f を実験条件とともに Table 2 に示した。表中 ρ_{av} は平均見かけ密度 ($= \rho_A x + \rho_B (1-x)$) である。

3.1 フリースペース高さに与える密度, 操作条件の影響

B 粒子なしの Run 2 に比べてアルミナ球を 10% ($x = 0.9$) 加えた Run 3 では、平均粒子密度が約 3 倍であり、フリースペース高さ H_f が大幅に減少している。炉上部充填層の密度の増加, したがって、炉芯に作用する荷重の増加の影響が現れているものと考えられる。また、Run 6 は Run 3 のガス流速を減少させ、かつ B 粒子の充填率を 6% と小さくした結果である。Run 3 よりも粒子平均密度が小さいにもかかわらずフリースペースの高さは $H_f = 1 \text{ cm}$ に減少し

Table 2. Experimental condition and results.

Run No.	No. of storage	B-particle	u_r (m/s)	u_b (m/s)	$1-x$ (-)	ρ_{av} (kg/m ³)	Z_c (cm)	$Z-Z_c$ (cm)	H_f (cm)
1	1	BA	0	0	0	85.6	10	4	4.5
2	2		0.397	64.5	0	85.6	8	6	6.5
3	2		0.397	64.5	0.1	253	11.5	2.5	2.5
4	2		0.306	49.7	0.1	253	12	2	2
5	2		0.215	35	0.06	186	11.5	2.5	1
6	6		0.215	35	0.06	186	13	1	1
7	6		0.306	49.7	0.03	136	11	3	3
8	2	B5P	0.306	49.7	0.5	170	8	6	7.5
9	3		0	0	0.25	128	11	3	2.5
10	4		0.306	49.7	0.5	170	9	5	7
11	4		0.306	49.7	0.5	170	6.7	7.3	8.8
12	4		0.2	32.5	0.5	170	9	6	7.2
13	4		0.1	16.2	0.5	170	10.5	3.5	3.5
14*	4		0.306	49.7	0.5	170	6.2	7.8	8.5

*) $u_s = 4.84 \text{ cm/min}$

た。ガス流速の減少, すなわち炉上部充填層への流体抗力の減少の影響 (浮上に対しては阻害効果) が大きいことを示している。この流体抵抗の影響は Run 11~Run 13 に明瞭に示されている。ガス流速が大きいほど H_f は大きい。以上より、炉上部充填層の密度が大きく、流体抗力が小さい場合は炉芯に作用する粒子荷重が大きくなり、フリースペースの形成が抑制されることがわかる。実操業と照らし合わせると、発生ガス量増による高出銑時には浮上の可能性が高いことになる。Run 14 は粒子降下速度を 2 倍の $u_s = 4.84 \text{ cm/min}$ にした場合であるが、Run 11 と比べるとわかるように、粒子降下速度の影響は顕著でない。

ガス流速が同一の Run 7 と Run 8 を比較してわかるように、BA より B5P を用いた時の平均密度が大きいにもかかわらず B5P の H_f が大きい。このことは、単にガス流速と平均密度の観点からだけで説明ができないことを示す。モデル粒子の構成に関する、以下の因子が原因の一つと考えられる。Table 1 に示されるように、アルミナ粒子と A15P との密度差が極めて大きいことに起因する密度差偏析が否定できないことである。実験的には明らかにできなかったが、密度の大きいアルミナ粒子が A15P 粒子に対して先行降下することにより次第に偏析が生じ、特に炉芯表層部では当初想定した粒子構成に比べてアルミナ粒子堆積層の割合が増加したものと考え、実験結果の解釈が可能である。

3.2 炉芯の浮沈に伴う炉下部粒子のフローパターン

Fig. 3 に Run 8 の 1 回の注水・排水操作における粒子のフローパターンを示した。X, Y は座標である。大きい印が各操作の起点を示す。すなわち、注水の終点 (黒印) が排出の起点となっている。矢印はレースウェイに流入した粒子、または観測不能となった粒子を表す。図中破線は粒子層の浮上が停止した時の最大注水レベルであり、図にはこの時のフリースペースの形状も示されている。また時間は各操作に要した時間である。フリースペースと粒子層の境界はほぼ水平である。各レベルに装入されたトレーサー粒子は、

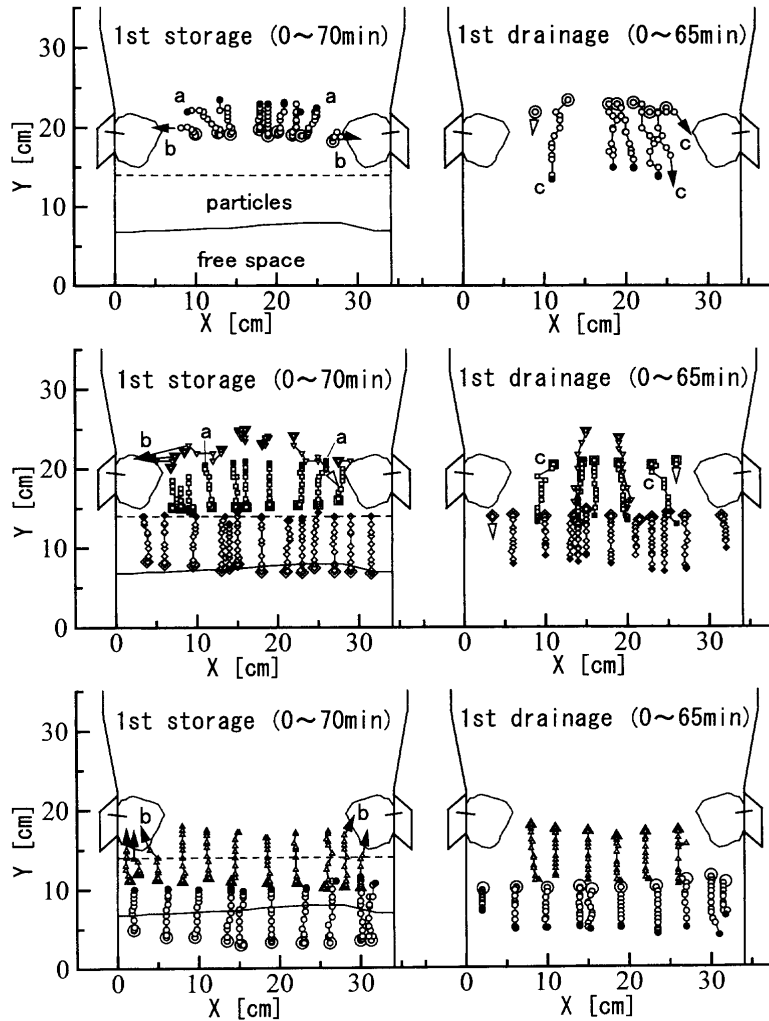


Fig. 3. Flow pattern of tracer particles during 1st storage and drainage of water (Run 8).

注水によって上昇する。この過程でレースウェイ寄りに上昇する粒子 (a) あるいはレースウェイで消滅する粒子 (b) が認められる。排水においても、レースウェイ側に経路を取って降下する粒子 (c) が認められる。

注水時には、炉芯粒子は浮力によって、シャフトを降下する粒子とは反対方向の運動を行う。したがって、シャフト粒子と炉芯の間には力学的に釣り合いの条件を満足する炉芯境界が存在する。浮力によって炉芯境界まで押し上げられた粒子は、炉芯表層へと押し出され、炉芯表層に沿ってレースウェイへと移動するものと考えられる。Fig. 3, 炉芯上部の○印、▽印の粒子の挙動はこのように解釈できる。

このRun 8における2回の注水・排水でのトレーサー粒子の移動軌跡をFig. 4に示した。ただし、煩雑さを避けるため軌跡の経時変化は無視し、各注水・排水過程での起点と終点を直線で結んで移動過程を示してある。なお、1回目の注水開始と2回目の排水終了の位置は、それぞれ大きな白抜きと黒色の印で示されている。以下、Fig. 4によって粒子の挙動を検討する。

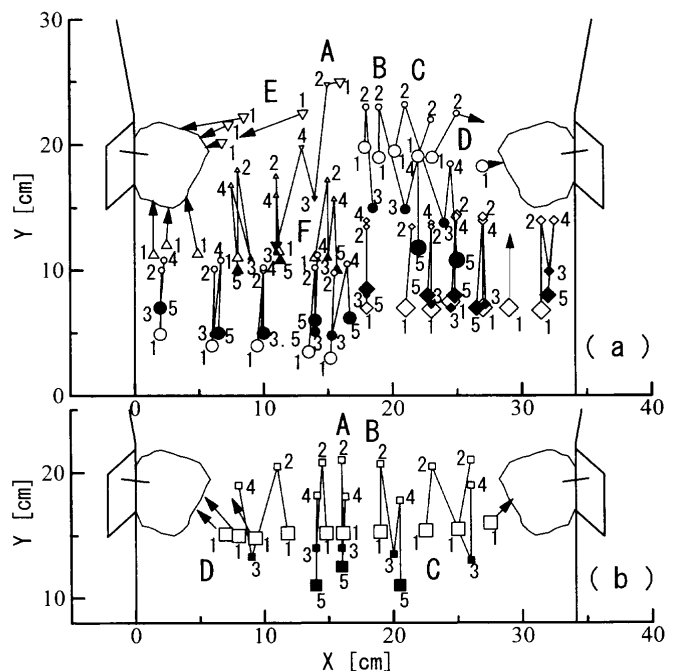


Fig. 4. Trajectory of tracer particles with repetition of storage and drainage of water (Run 8).

(1) 炉芯境界近傍の粒子 (▽)

粒子(Fig. 4(a), E)は、注水による炉床部粒子層の浮上により押出され、炉芯表層をレースウェイへと移動、消滅している。中心軸近傍の炉芯表層粒子((a), A)は、排水時に形成される動的炉芯境界⁴⁾を越えて炉芯内部へ取り込まれ、その後の注水・排水により上下運動を行いながら炉芯内をレースウェイ側に移動しつつ降下することが示されている。炉頂中心部に供給され、シャフトを降下してきたコークスは出銑時に炉芯に進入することを意味する。炉芯~炉床粒子の下向き流れを付加したモデル実験の結果^{4,5)}と一致する。なお、動的炉芯境界とは、レースウェイに向かって流れる主流動域(ファンネルフロー)と極めて遅い速度で降下する炉芯との間に形成され、動的平衡状態にある領域で、この境界を粒子が横切る時は速度が不連続的に変化する領域を意味している。

(2) レースウェイ中心軸レベルの粒子 (○)

中心軸近傍の粒子は注水・排水で、ほぼ垂直上下運動を行っている。注水時の上昇距離よりも排水時の降下距離が大きいので、結果的に炉芯内を鉛直降下する。しかし、中心軸から少し離れると((a), B, C)、このような垂直運動にかわって、注水時、排水時ともにレースウェイ側に移動することが示されている。そして次第にレースウェイの下部領域へと移動している。これは排水に伴って粒子層が降下する時に、二次元モデル³⁾で観察されたようなレースウェイ内部からの粒子の流出(湧き出し)がないため、レースウェイ下部に形成される空間を補充しようとする運動によるものと考えられる。この現象は二次元モデル実験との大きな差異であった。注水開始の起点よりも排水終了の終点がかかり下方に位置し、相対的には大きな下方への移動が認められる。粒子((a), D)は1回の注水で直ちに炉芯表層流れと合一する。

(3) レースウェイ下端レベルの粒子 (□)

○印粒子と同様に、中心軸近傍の粒子((b), A)は上下運動をしながら鉛直下方に、他の粒子((b), B, C)はレースウェイ側に移動する。ただし、注水開始から排水終了時点までの下方への相対的な移動量は○印粒子より少ない。レースウェイ近くの粒子((b), D)については、途中経路を省略し、2回目の排水終了時点でレースウェイにとり込まれたことを示した。

(4) レースウェイ下方レベルの粒子 (△)

レースウェイ下の粒子は1回の注水でレースウェイに押出されている。中心側の粒子((a), F)は上下運動により、ごく微量ではあるが下方に移動することが認められる。

(5) 炉下部、炉床部の粒子 (◇, ○)

(a)に示すように、単に上下運動のみで本質的な位置の変化は見られない。初期位置(起点)に対して排水時の位置(3, 5)が少し上方に位置する傾向が見られるが、これは排水終了時の充填状態が初期よりも、若干疎充填になるた

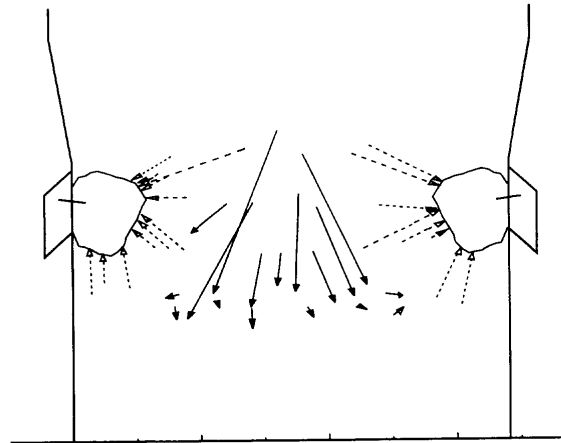


Fig. 5. Particle moving path for deadman renewal.

め(目視)と考えられる。

Fig. 5にRun 8における1回目注水開始を起点とし、2回目の排水終了時に炉芯内に残留していたトレーサー粒子について、途中の経路は省略して、その位置変化を直線で結んで示した。破線はレースウェイ内部に移動、消滅した粒子を示す。炉芯上部から炉芯に進入してきた粒子は、おおむね、1) 羽口レベルより上部の領域で、比較的早くレースウェイに向かう経路をとる粒子と、2) 炉芯中心軸近傍を降下した後、方向を変えてレースウェイに向かう経路をとる粒子から構成されることが理解できる。炉芯コークスの更新速度の点では前者は後者よりも早いことになる。またFig. 5から、炉床のあるレベルより下方の粒子は、このような炉芯・炉床更新運動には関与しないという重要な知見を得ることができる。

3.3 粒子層の浮上が小さい場合の粒子運動

B粒子にアルミナ球を用いたRun 6の結果をFig. 6に示す。フリースペース高さは1 cmで、粒子層の浮上が極めて小さい場合であるが、注水・排水を繰り返すことにより(6回)、3.2節での運動と本質的に同じ結果が得られている。ただ、更新に関与しない上下運動のみの領域が炉下部の大半を占めている。Fig. 6は粒子層が浮上する場合は必ず更新領域が形成されることを示している。

4. 考察

4.1 充填層浮上高さ と炉芯更新挙動の模式図

著者らの研究によると⁶⁾、注水レベル Z [cm]とフリースペース容積 V [cm³] ($=H_f S$, S は炉床断面積)の間には次のような線形な関係が認められた。

$$V = k(Z - Z_c) \dots \dots \dots (3)$$

Z_c は浮上開始の限界水位、比例定数は $k=453$ である。 V の代わりに H_f で表すと、 $S = \{(\pi/4)34.1^2\}/2 = 456.6 \text{ cm}^2$ であるので、次式が得られる。

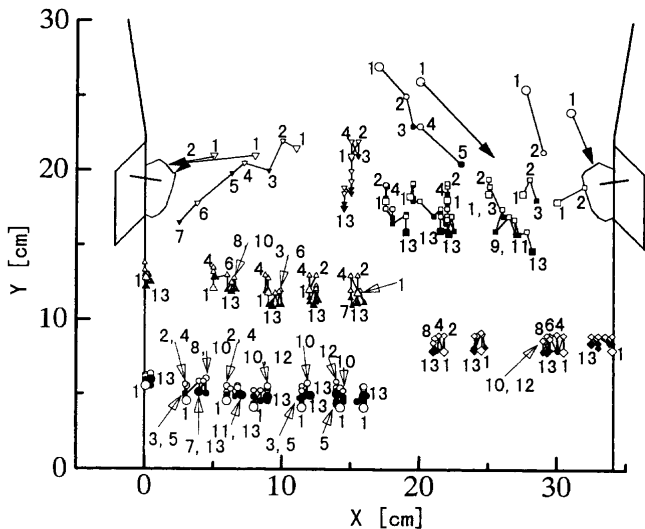


Fig. 6. Trajectory of tracer particles with repetition of storage and drainage of water (Run 6).

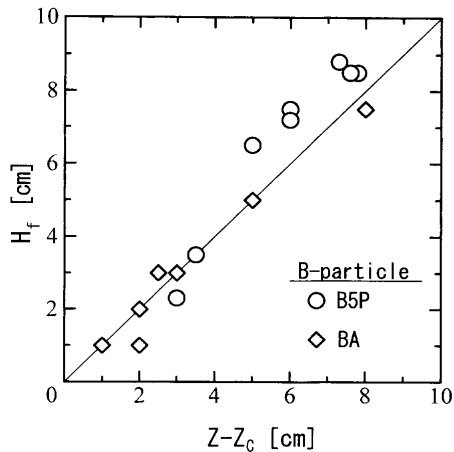


Fig. 7. Relationship between H_f and $Z-Z_c$. H_f : height of particle-free space formed on the hearth, Z : water level and Z_c : critical water level for floating particle bed.

$$H_f = (Z - Z_c) \dots \dots \dots (4)$$

この関係は、浮上開始の水位からの水位増分 ($Z-Z_c$) に相当するフリースペースが形成されることを意味しており、この時、水に濡れている部分の充填層高さは Z_c のままであることを示している。Table 2における、注水高さ Z と Z_c の差、 $Z-Z_c$ とフリースペース高さ H_f の関係を図示したのが Fig. 7 である。おおむね、(4) 式が成り立つことがわかる。したがって、浮上開始の限界水位の予測が重要な意味を持つ。実操業では、湯面レベルがこの限界レベルを超えた時にコークス充填層の浮上が可能となることが示唆される。

トレーサー粒子の運動を総合して炉下部の粒子挙動を Fig. 8 のような模式図で与えた。粒子の更新が行われる領域は、実験結果をまとめると、レースウェイ下およそ $L \cong H_f$ のレベル AB より上方の領域である。したがって、羽口-

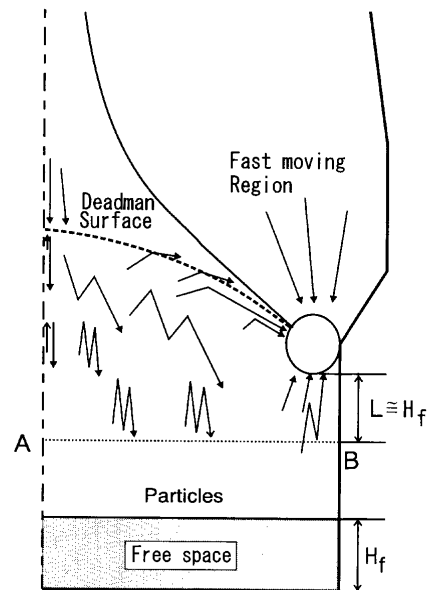


Fig. 8. Schematic diagram representing deadman renewal by repetition of floating to sinking motion of the lower part of packed bed.

Table 3. Comparison of particle behavior between two dimensional and present models.

	Two dimensional model	Present model
Blast velocity(m/s)	89	36 ~ 64.5
Shape of free space boundary	wide V - type	flat
Deadman renewal region	whole deadman	depends on height of free space

炉底間の距離とフリースペースの高さ H_f に応じて、粒子非更新領域は変化することになる。

4.2 二次元モデルの粒子挙動との比較

すでに記述したように二次元モデルにおけるフリースペースの形状はやや浅いV字型を呈し³⁾、本モデルの水平形状とは異なった。両モデルの挙動を考察するために、Table 3 に実験で採用したガス速度および炉芯更新範囲をまとめてみた。2・3 節で述べたように、相似条件から計算したモデルでの羽口風速は 11 m/s 前後である。

二次元モデルの特徴としてレースウェイでの強烈な粒子旋回流の発達をあげることができる³⁾。この旋回運動は、装置の右側羽口でみると、羽口から噴出して、(1) 上方に右旋回して羽口に戻る運動と、(2) 下方に左旋回して羽口に戻る運動から構成されている。二次元モデルでは浮上限界水位を超えて注水を続けると、シャフトからの垂直荷重、浮力および壁摩擦力とのバランスにより羽口レベルより上方に炉芯不動域(静止域)が形成される。このため、浮力によって押出された炉底部粒子は、レースウェイに向かう移動を強制される。すなわちレースウェイ下方旋回領域が、注水時の主たる粒子消費域となったためV字型のフリース

ペースが形成されたものと考えることができる。Table 3に示すように注水・排水によって炉芯、炉床の全粒子が運動し、更新を受ける。

3・2節で示したように、半裁モデルでは注水時に炉芯不動域の形成はない。二次元モデルでは、大きな面積を占める平行平面での壁摩擦が大きく、粒子層の浮上が阻害されるため、不動域が形成されたものと考えられる。

半裁モデル実験のガス速度が比較的大きいにもかかわらず、水平なフリースペースとなる理由として、(1)上述のように、炉芯不動域の形成がなく、粒子は炉芯表層への移動が可能なのほか、(2)三次元構造のレースウェイでは粒子を取り込むほどの二次元状旋回流が発達しないことも考えられる。このように実験装置の特性が浮沈挙動にかなり影響することに注目すべきである。

応力場、レースウェイ構造の類似性より、実炉は本半裁モデルにより近い挙動を示すものと考えられる。しかし、フリースペース形状を支配する重要な因子として、さらに、粒子垂直荷重の水平方向分布があげられる⁷⁾。炉床部液流れを把握する上でフリースペースの挙動は極めて重要である。炉床部の応力解析に基づいて浮上限界条件やフリースペースの形状を解明していくことが必要である。

5. 結言

半裁コールド水モデルを用いて、炉芯・炉床粒子の浮沈運動に伴う粒子の更新挙動を実験的に調べた。系の密度構成はシャフト、炉下部共に実炉と相似になるように選んだ。得られた結果は以下のとおりである。

(1) ある限界水位を超えて注水を続けると、粒子層は浮上し、炉底に粒子非充填域、すなわちフリースペースが

形成される。炉底粒子の浮上速度は場所によらず等しく、フリースペースと粒子層の境界は水平である。

(2) フリースペースの高さ H_f は、ガス流速が大きく、またシャフト粒子の平均密度が小さい程増大する。 H_f と水位の間には式(4)が成り立ち、浮上限界水位がわかる時は H_f が予測できる。

(3) シャフト中心軸近傍を降下して炉芯表面に達した粒子は、排水時に炉芯内にとり込まれる。その後の注水による上昇運動、排水による下降運動の繰り返しによって、これらの粒子は、およそ次の移動経路をとり、炉芯粒子の更新が行われる。(a) 炉芯表層へ押出され、主流と合一してレースウェイへと移動する。(b) 炉芯内をレースウェイ下部領域に向かって降下し、最終的にはレースウェイへと押出される。

(4) 炉芯粒子の運動をFig. 8の模式図で与えた。炉芯更新が可能な範囲はレースウェイ下、およそ H_f のレベルより上方の領域であり、このレベル以下の粒子は同じ位置を単に上下運動するだけで更新に関与しない。

文 献

- 1) K.Takeda, T.Edo, Y.Sawa, H.Kokubu, S.Taguchi and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 868.
- 2) Y.Kimura, K.Shibata, M.Shimizu and H.Inaba: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 1072.
- 3) 高橋洋志: 高炉内における4流体の流動と伝熱, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1996), 131.
- 4) H.Takahashi, M.Tanno and J.Katayama: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 1354.
- 5) M.Shimizu, Y.Kimura, S.Inaba, R.Hori, K.Kuwano and F.Noma: *R & D Kobe Steel Eng. Rep.*, **4** (1991), 11.
- 6) 高橋洋志: 私信, (1997).
- 7) K.Katayama, S.Wakabayashi, T.Inada, K.Takatani and H.Yamaoka: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 91.