

微粉炭多量吹込み時の高炉下部における 液および微粉の流動特性

村井 亮太*・村尾 明紀*・後藤 和也*・佐藤 道貴*・有山 達郎*

Flow Characteristics of Liquid and Fine Particles in the Lower Part of Blast Furnace

Ryota MURAI, Akinori MURAO, Kazuya GOTO, Michitaka SATO and Tatsuro ARIYAMA

Synopsis : Cold model experiments on the fine particles movement, fine particles accumulation and liquid flow in the lower part of blast furnace at the high rate injection of pulverized coal were carried out. From the experimental results of the cold model on the liquid flow, it was found that the accumulation of fine particles on the surface of deadman caused liquid flow channeling along the surface of deadman. Two-dimensional cold model on the two phase flow of gas and solid indicated that shell layer formation at the depth of raceway was conducive to accumulation of fine particles on the surface of deadman. By the one-dimensional cold model experiment of the moving bed on the two phase flow of gas and solid, it became clear that fine particles hold-up in packed bed decreased as the increase in bed descending velocity as well as decrease in fine particles feed rate or increase in superficial gas velocity.

On the basis of above results, control methods of lower part permeability at higher injection rate of pulverized coal were discussed. Consequently, it was estimated that decrease in coke degradation in raceway and removal of shell layer were effective to ensure the gas flow through deadman.

Key words : ironmaking; blast furnace; pulverized coal injection; cold model; hold-up; fine particles; deadman; dropping zone; packed bed.

1. 緒言

高炉への微粉炭吹込みは、製鉄工程でのコスト低減、コークス炉の寿命延長などの観点から近年急速に普及し、現在では高炉操業の基幹技術となっている。しかしながら、微粉炭多量吹込み条件下では、炉下部通気性の悪化傾向が指摘されるなど¹⁻³⁾、安定操業を達成する上で技術的課題も多く残されている。

微粉炭吹込み高炉の炉下部現象に注目すると、炉芯採取試料にはコークス粉の増大が認められている⁴⁾。また、稼働中の羽口ゾンデ測定によって、溶銑滓は羽口レベルにおいてレースウェイ奥の狭い範囲に集中して滴下し、炉芯内部にはほとんど滴下していないことも観察されている⁵⁾。この液滴の偏流と、コークス粉の蓄積などによる炉芯通気性の悪化が引き起こす周辺ガス流化は、局所的なフラッキングを招き、安定操業を阻害する要因となりやすい。

上記の現象は、微粉炭の吹込み量の増加とともに、レースウェイ内で発生するコークス粉が増大し⁶⁾、炉下部でのコークス粉の蓄積を招き、結果的に炉下部のガス流れ、液流れ、通気性に影響を与えているものと推定される。しかし、これら粉の移動・蓄積および液流れの総合的關係を明らかにした報告は少ない。

ここで、炉下部における粉の移動・蓄積に関する基礎的

挙動については従来から充填層を対象とした固気二相流の挙動研究が多数報告されているが⁷⁻⁹⁾、これらの検討は充填粒子の降下の無い系についてのものである。実際の炉内のように移動層内での粉の挙動、さらには炉芯とレースウェイ直上部の領域のように大きな降下速度分布を持つ系で検討された例はない。

本論文では、まず炉下部の充填構造が液流れ挙動に及ぼす影響を明確化するため、高炉下部液流れモデルを用い、液の滴下実験を行った。次に、充填粒子の降下を考慮した一次元、二次元冷間モデルによる実験を行い、レースウェイ発生粉の移動・滞留挙動、ならびに炉下部充填構造の変化について検討を行った。その結果、微粉炭多量吹込み高炉における炉下部充填構造と液、粉の相互作用に基づく炉下部現象に関して重要な知見が得られたので報告する。

2. 高炉下部液流れモデル実験

2.1 実験装置および実験方法

Fig. 1に炉下部液流れモデルの模式図を示す。装置はアクリル樹脂製で幅300 mm、奥行50 mm、高さ600 mmの二次元平板モデルとし、充填粒子には3 mmφ、5 mmφのガラスビーズを用いた。高炉炉芯の領域には3 mmφ粒子を充填し、炉芯表層における細粒粉蓄積の影響を見る場合には

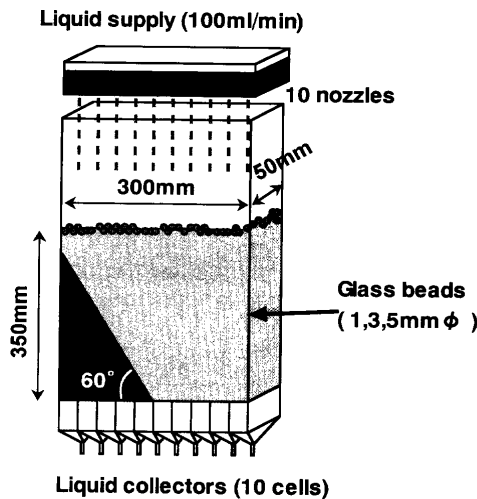


Fig. 1. Experimental apparatus on liquid flow in lower part of blast furnace.

Table 1. Experimental condition of two-dimensional cold model on liquid flow in lower part of blast furnace.

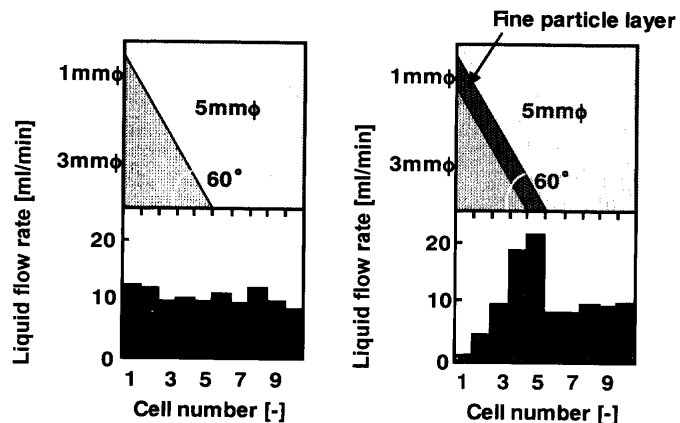
	Two-dimensional cold model	Blast furnace	
		Metal	Slag
d_p (mm)	5, 3, 1	30	
ρ_L (kg/m ³)	1210	6600	2600
U_L (m/sec)	1.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}	2.0×10^{-4}
μ_L (Pa · s)	0.05	0.005	0.4
Fr_L (-)	2.5×10^{-7}	3.4×10^{-8}	1.3×10^{-7}
Re (-)	1.3×10^{-2}	3.96	3.8×10^{-2}

1 mmφ粒子を表層に設置した。

高炉下部の液流れに関しては、液流れに関する無次元数を高炉とモデル実験で一致させるように決定する必要がある。碓井らは液ホールドアップがFroude数(Fr_L)に大きく依存することを示し¹⁰⁾、福武らはReynolds数(Re)、Galilei数、Capillary数、無次元界面張力を相似条件として採用している¹¹⁾。しかしながら、これらすべての無次元数を完全に一致させることは困難である。本実験では、巨視的な液流れを重視し Fr_L と Re を考慮して液の粘度、流量を決定した。すなわち粘度を50 mPa·sに調整したグリセリン水溶液を100 cm³/minで供給した。液の供給は、上部から10本のノズルを介して均一に供給し、下部の10個の受水槽で滴下量を測定し、充填層内を通過後の液流れ分布を測定した。Table 1に実験条件を示す。

2.2 実験結果

Fig. 2に高炉下部液流れモデルの測定結果を示す。Fig. 2a)の炉芯が3 mmφ、周囲が5 mmφから成る場合には、充填層下部の液流量分布は炉芯とその周囲を問わず径方向に均一である。中村らの実験と同様に小径の粒子側に液が集中する傾向は観察されない¹²⁾。次に、表層への粉の堆積を模



a) Without fine particles on deadman surface.

b) With fine particles on deadman surface.

Fig. 2. Liquid flow distribution in the lower part of blast furnace measured by experimental apparatus.

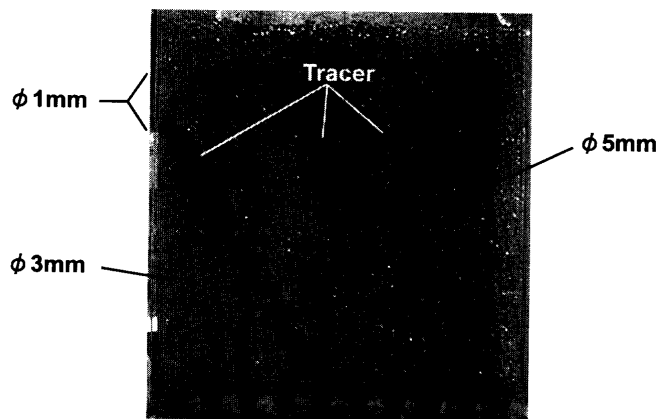


Fig. 3. Direct observation of liquid flow behavior in the experimental apparatus.

擬したFig. 2b)の場合には、液滴は1 mmφの炉芯表層部位に比較的集中している。

Fig. 3に着色トレーサーを用いた液流れの可視化実験結果を示す。液中にトレーサーを混入し、充填層上部から均一に滴下させ側面から液流れ挙動を観察した。液は1 mmφの層を伝わって偏流する傾向がある。福武らは、液の静的ホールドアップがキャピラリー数の低下に伴い増加することを示したが¹¹⁾、この場合粉の堆積層(φ 1 mm層)ではキャピラリー数がφ 5 mm層、φ 3 mm層に比較して小さくなり、φ 1 mm層の静的ホールドアップ量が増加し、安定な液流路が生じ、選択的に液がこの領域を伝ったものと推定される。炉芯表層に細粒粉の滞留層がある場合には液は選択的に表層を流下し、レースウェイ奥の狭い領域に集中して流れることになる。

炉下部における液滴の偏流を防止し、均一な滴下分布を実現するためには、炉芯表層部への粉の蓄積を防止することが不可欠であると考えられる。

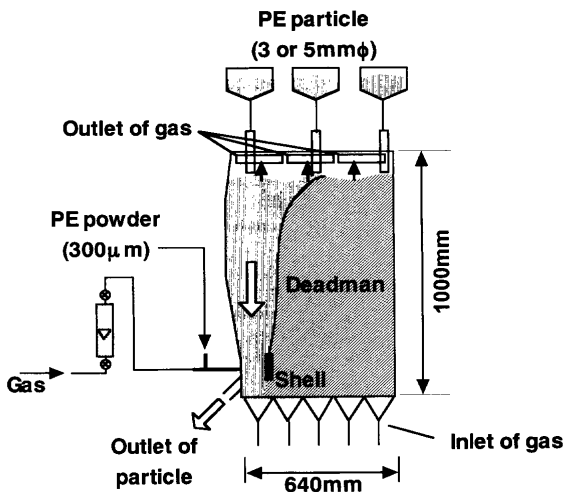


Fig. 4. Schematic drawing of two-dimensional cold model on the two phase flow of gas and solid.

Table 2. Similarity in the two-dimensional cold model on the two phase flow of gas and solid.

		BF	Cold Model
Raceway	F_g (Nm^3/s)	75	0.011
	d_p (m)	0.03	0.005
	ρ_p (kg/m^3)	1000	930
	Fr_p (-)	12.2	11.3
Shaft	F_g (Nm^3/s)	85	0.023
	d_f (m)	0.003	0.0003
	ρ_f (kg/m^3)	1000	930
	Fr_f (-)	0.32	0.31

Table 3. Experimental condition of two-dimensional cold model on the two phase flow of gas and solid.

Gas volume	Tuyere (Nm^3/s)	0.011
	Bottom (Nm^3/s)	0.012
Particle	d_p ($\times 10^{-3}\text{m}$)	3.0, 5.0
	V_d (m/s)	3.1×10^{-5}
Fine particle	d_f ($\times 10^{-4}\text{m}$)	3.0
	G_f (kg/s)	8.5×10^{-4}

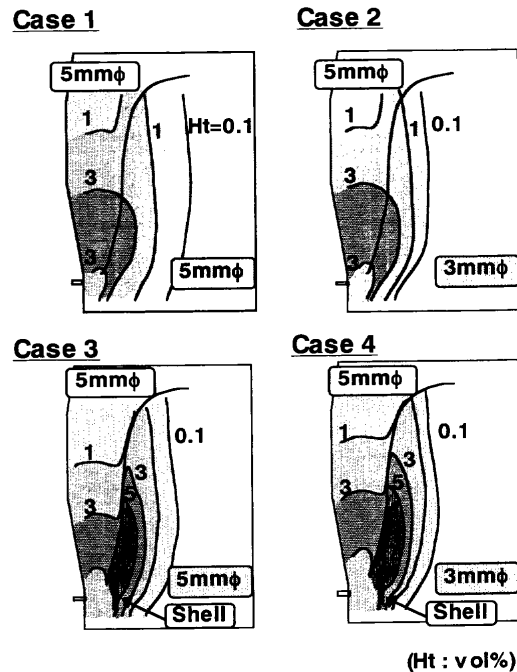


Fig 5. Fine particles hold-up distribution.

3. 二次元冷間モデル実験

3.1 二次元冷間モデル装置および実験条件

次に、Fig. 4に示す二次元冷間モデル実験装置を用い、微粉炭多量吹込み時の高炉下部における粉の移動・蓄積挙動を明らかにすることを試みた。本装置は実稼動高炉（福山第3高炉）の1/10スケール平板二次元モデルとして設計した。高炉内における装入物の降下挙動を再現し、装置内部に移動層領域と炉芯（固定層）を形成させるため、羽口下部の排出口から充填粒子（ポリエチレン粒子：PE）を排出させた。羽口と装置下部からそれぞれ圧縮空気により送風し、レースウェイおよびシャフト部でのガス流速を制御可能とした。また、レースウェイ発生粉を模擬するため、粒径300μmのポリエチレン粉を羽口送風に同伴させた。

高炉との相似条件をTable 2に示す。羽口先における充填粒子径基準のFroude数(Fr_p)とシャフト部における粉基準のFroude数(Fr_f)を共に一致させた。

$$Fr_p = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_p}} \cdot \frac{U_{g0}}{\sqrt{g \cdot d_p}} \dots\dots\dots(1)$$

$$Fr_f = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \cdot \frac{U_{g0}}{\sqrt{g \cdot d_f}} \dots\dots\dots(2)$$

Table 3に、送風条件、および実験に使用した充填粒子および粉の特性を示す。充填粒子の降下速度は実炉の1/10に設定し、粉の吹込み量は30kg/t相当とした。

粉滞留量の測定は、充填粒子の排出とガス・粉の供給を所定時間行った後、排出・供給を同時に停止し、装置を解体して20箇所から充填粒子と粉を採取し、各位置における粉の滞留量 Ht （充填層体積基準の粉の体積％、トータルホールドアップに相当）を求めた。粉体の吹込み時間は、吹込み時間を変更しても Ht の分布がほとんど変わらない2時間とした。

3.2 二次元冷間モデル実験結果

Fig. 5に、粉滞留量 Ht の測定値をもとに作成した Ht の二次元分布図を示す。Case 1とCase 2は、炉芯の充填構造が粉の滞留量に及ぼす影響を評価するため充填粒子の粒径を変更（5mmφおよび3mmφ）した場合である。微粉炭多量吹込み時には、レースウェイ先端部に微粉炭の灰分と粉コークスから成る低空隙率の領域（シェル）が形成され、

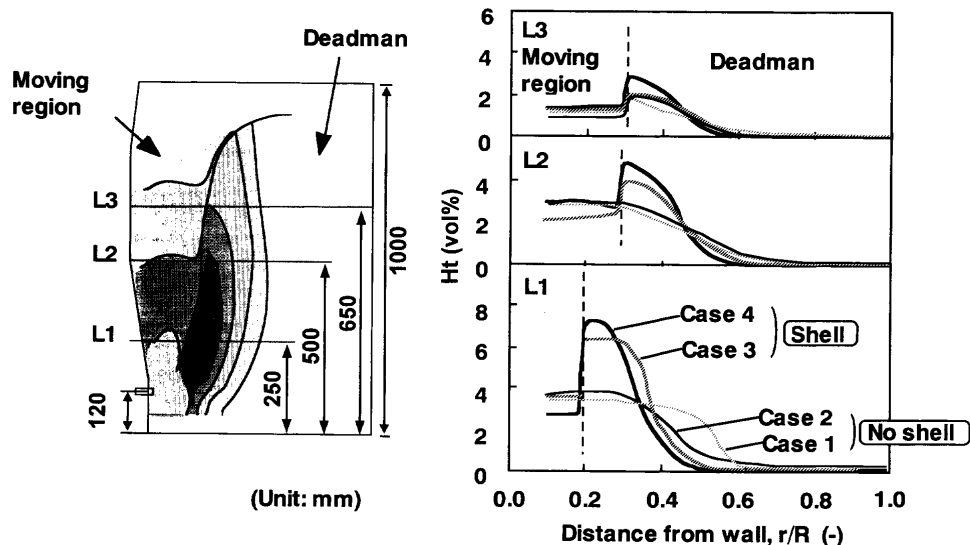


Fig. 6. Radial distribution of fine particles hold-up.

炉芯部へのガス流れを阻害することが指摘されている¹³⁾。Case 3とCase 4では、上記の炉芯粒径の影響に加え、シェル生成の影響について検討した。

シェルが無く、炉芯粒子径を変えたCase 1, Case 2の結果では、粉のHtは炉芯と移動層領域に区別なく比較的一様な分布を示した。炉芯粒径の影響として、粒径の小さいCase 2では、炉芯内部への粉の侵入が抑制される傾向が認められた。シェルを設置したCase 3, Case 4の場合、炉芯表層部分に5%程度の高濃度領域が現れ、移動層領域と炉芯の境界部が不連続となることが特徴的であった。この傾向はとくに炉芯粒径が小さいCase 4で顕著に現れる。

Fig. 6に、これらの粉の濃度分布を相互に比較するため炉芯の高さ方向3箇所(L1~L3)でのHtの径方向分布を図示した。下部のL1, L2レベルでは、シェルの無いCase 1, 2の場合、炉芯と移動層領域の区別なく比較的均一に粉体が滞留するが、シェルを有するCase 3, 4の場合、移動層領域と炉芯の境界部にHtの不連続面が生じ、炉芯表層部に局所的に高Ht領域が現れる。一方、上部L3においては、シェルの有無に関係なくCase 1~4のすべての場合において炉芯でのHtがやや高くなる傾向が認められた。

4. 一次元冷間モデル実験

二次元冷間モデルの結果から、レースウェイ先端部にシェルが形成されることにより、発生粉の炉芯表層への蓄積が進行し、溶銑滓の偏流などの現象を引き起こすことが推定される。このような炉下部の粉の移動・蓄積挙動を検討するため、一次元冷間モデル実験を実施した。実験装置をFig. 7に示す。装置本体は、内径100mmφ×高さ800mmの円筒容器で、装置の下部から充填粒子を切り出すことにより充填物の降下速度を任意に制御できる移動層モデルとした。充填粒子、粉体、ガスは前述の二次元冷間モデル実

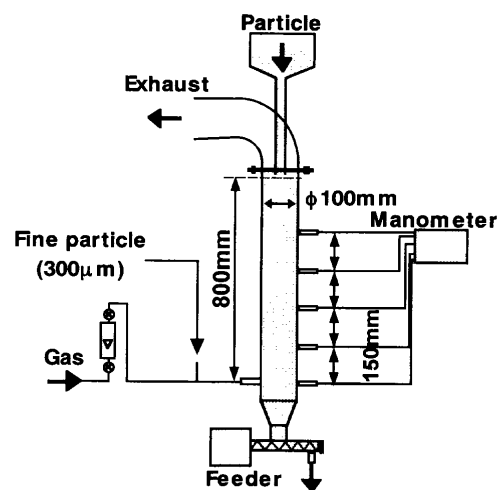


Fig. 7. Schematic drawing of one-dimensional cold model on the two phase flow of gas and solid.

Table 4. Experimental condition of one-dimensional cold model on the two phase flow of gas and solid.

Particle	d_p ($\times 10^{-3}$ m)	3.0, 5.0
	V_d (m/s)	$0 \sim 4.8 \times 10^{-4}$
Fine particle	d_f ($\times 10^{-4}$ m)	3.0
	G_f ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)	$0 \sim 7.8 \times 10^{-2}$
Gas	U_{g0} (m/s)	0.42 - 0.85

験と同一のものを用いた。粒子は上部から、ガスおよび粉は装置下部に設置した羽根部から供給した。

Table 4に実験条件を示す。充填粒子径、粒子降下速度、粉供給量を変更し、装置本体の側面に高さ方向に5点(150mmピッチ)設置した圧力検出孔により装置内の圧力測定を行った。粉の供給を開始後、一定時間ごとに圧力を測定し、圧力変化がほぼ0となった時点を実常状態と判断し、粉の供給、粒子の切り出し、および送風を同時に停止

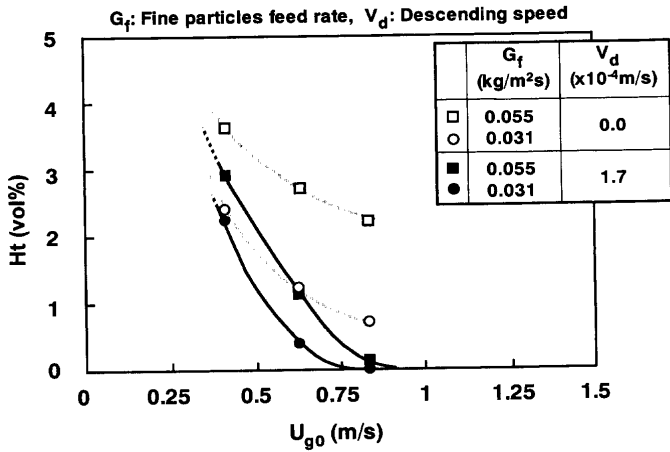


Fig. 8. Experimental results of one-dimensional cold model.

し、装置を解体して粉の滞留量 H_t を実測した。

Fig. 8にガス空塔速度と H_t の関係について粉供給量と粒子降下速度を変えた4水準の結果を示す。従来の報告のように、ガス速度の上昇により H_t は低下する⁹⁾。とくに充填粒子が降下する移動層の場合、静止層に比べて H_t の低下が顕著であることが確認された。また粉供給量が低下すると H_t は低下傾向にある。

5. 高炉炉下部における粉、液、充填粒子の相互作用に関する考察

5.1 高炉炉下部における粉の滞留挙動推定

一次元冷間モデルによる基礎的実験結果から、高炉炉下部を模擬した二次元冷間モデルでの粉の滞留現象は以下のように説明される。

一次元冷間モデルの結果より、粉の滞留量は、ガス流れ、充填粒子の移動および粉の供給量により決定される。Fig. 9は、二次元冷間モデル下部（羽口直上部）における粉の滞留挙動を模式的に示したものである。シェルが無い場合、羽口に近い移動層領域のc領域は、炉芯のd領域に比較してやや粉の供給量が多く、ガス速度も速いものと推定される。したがってcとdでの H_t の関係はFig. 9中の図示された位置関係にあると想定できる。シェルが存在する場合、炉芯方向へのガス流れは阻害され周辺流となり、移動層領域eの部位におけるガス流れは大きくなる。グラフ上でcに対してガス高流速側にシフトする。一方、炉芯側のfの領域はシェル層によりガス流れは小さくなり、グラフ上で左上方へシフトすると考えられる。とくに、シェルが存在する場合、炉芯内を移動する粉がいったん蓄積を開始すると空隙率低下とガス流速低下が連鎖的に生じ、急激な滞留量の増加につながると推定される。レースウェイ直上の移動層領域では、炉芯の通気性悪化に伴う周辺ガス流速の上昇や粒子降下に伴う粉の再飛散により、粉滞留量が低く抑

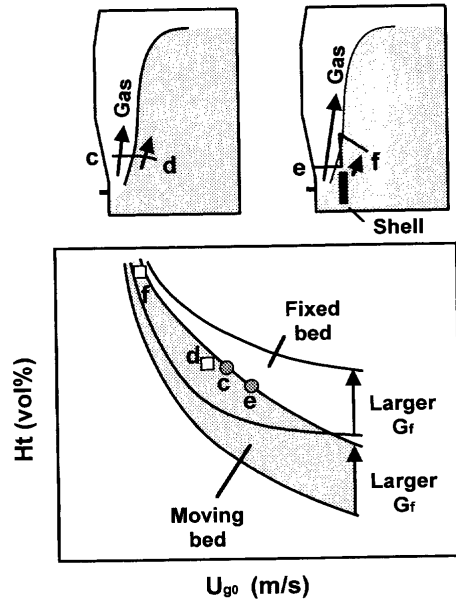


Fig. 9. Estimation of fine particles hold-up behavior at lower part of two-dimensional cold model.

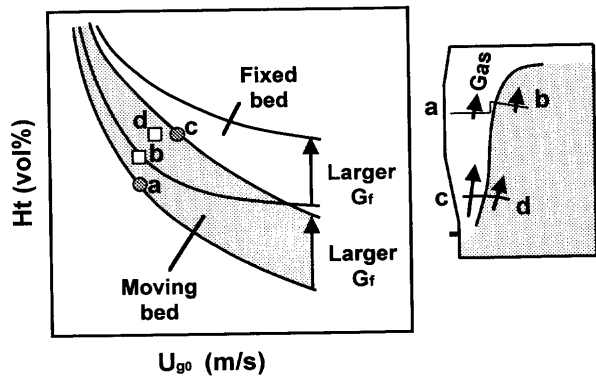


Fig. 10. Estimation of fine particles hold-up behavior at upper part of two-dimensional cold model.

えられると考えられる。

Fig.10は、二次元冷間モデル上部における粉の滞留挙動を模式的に示したものである。この領域では、Fig. 6のようにシェルの有無によらず炉芯側の滞留量がやや多くなる。Fig.10の移動層のa、固定層のbともにレースウェイから距離があるため、ガス流れはほぼ一緒になっており、ガス速度、粉供給量の差異は小さい。ただし、粒子移動速度が影響し、移動層側のaの粉滞留量が小さくなる。つまり上部では粒子降下の影響を受け、移動層領域での H_t がやや低い傾向が認められるものと推定される。

5.2 微粉炭多量吹込み時の炉下部状況の推定

上記の冷間モデルによる基礎的な知見を基に、微粉炭多量吹込み時の炉下部の状況を推定すると、Fig.11のように表される。

微粉炭吹込み時にはレースウェイ奥に通気性不良層が生じやすい。炉芯ゾンドで検知されたシェル層がこれに相当する¹³⁾。レースウェイからのガスは炉芯中心方向には流入

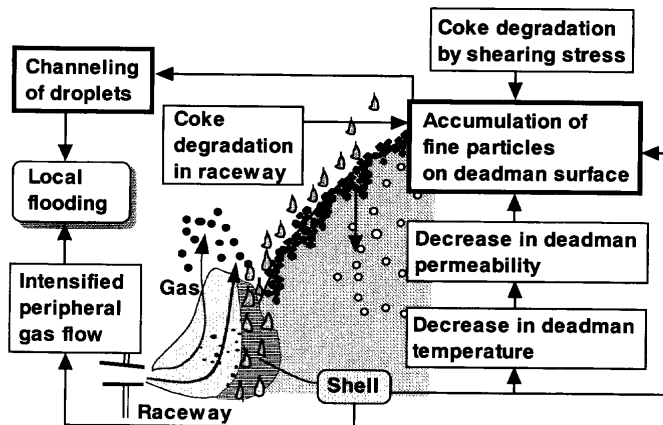


Fig. 11. Schematic drawing of lower part of blast furnace in the case of high rate injection of pulverized coal.

しにくく、周辺流をとりやすい。よって炉芯に熱は活発に供給されず、炉芯温度は低下傾向となる⁵⁾。融着層から滴下したスラグは低温部で粘性が低下し炉芯から排出されず、炉芯の通液性を悪化させる。また移動層領域においては周辺ガス流の影響ならびに粒子降下運動によって滞留粉が再飛散しやすく、粉のホールドアップは小さい。固定層に近い炉芯ではガス流れが不活発であり、粉が滞留しやすい。最終的に二次元冷間実験のように炉芯表層部へ蓄積していくものと推定される。この炉芯表層の粉蓄積の効果と炉芯温度の低下によって、冷間の液流れ実験で確認されたように銑滓は炉芯を迂回し、炉芯表層を伝って流れる偏流現象が生じやすくなる。

総合的に微粉炭多量吹込み時には、ガス流れの不均一化、液の偏流を招き、局所的なフラッシングなどが生じやすく、通気性が不安定になりやすいことになる。さらには液流れがレースウェイ奥に集中して流れることにより、気相中SiO₂の溶銑への移行が活発化し、溶銑中Si濃度の上昇を引き起こしやすいことも考えられる¹⁴⁾。

6. 炉下部制御手段への展開

上記のような現象を避ける手段として、レースウェイ奥に生じやすい通気性不良層、いわゆるシェルの除去、成長抑制が有効であると推定される。同時にレースウェイ内におけるコークス粉の発生を抑制するため耐粉化、耐磨耗性に優れたコークスの使用も有効な対策である。そのために、コークス反応性の向上により微粉炭多量吹込み時のコークス粉化を抑制する技術¹⁵⁾や、微粉炭の燃焼率向上によりコークスの粉化を抑制する技術⁶⁾も有効な対策となる。また、レースウェイシェルの成長抑制あるいは除去手段として、ブローパイプ/レースウェイ内で微粉炭の分散性を強化することにより、微粉炭の灰分がレースウェイ端へ集中的に蓄積してシェルが成長するのを抑制する方法⁵⁾、お

よび羽口から焼結粉などを吹込むことによってシェルの溶解を促進する方法¹⁶⁾が有効と思われる。

7. 結言

本報告では、第一に、高炉下部の充填構造が液流れに及ぼす影響を明らかにすることを目的に、二次元の液流れ実験を行った。次いで、レースウェイからの粉の発生と移動・蓄積挙動を検討するために、充填粒子の降下を伴う一次元および二次元の冷間実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 炉芯表層に粉が堆積すると、液は細粒粉の層を選択的に流れ、偏流が生じやすい。

(2) レースウェイ先端にシェルが存在する場合、レースウェイから発生した粉はレースウェイ直上の炉芯表層部に滞留しやすい。一方、移動層領域での粉の滞留は著しく抑制される傾向にある。これはガス流れ、粉の供給速度、粒子の降下運動の相互作用に基づくものと推測された。

(3) 充填粒子の降下速度が大きいほど粉の蓄積は抑制される。同時に、粉の蓄積量は粉体の供給量が少ないほど、ガス速度が大となるほど、減少する。

(4) 微粉炭多量吹込み時にはレースウェイ奥の通気性不良層がガス流れに影響し、さらに炉芯表層への粉の蓄積、液の偏流を招き、最終的に炉下部全体の通気性に大きな影響を与えていると推察された。

(5) 炉下部の通気性を維持するためには、レースウェイ発生粉量の低減と、シェルなど通気性不良層の除去により炉芯表層への局所的な粉の滞留を抑制することが有効と思われる。

記号

d_f	: 粉体の粒径 (m)
d_p	: 充填粒子の粒径 (m)
F_g	: ガス流量 (Nm ³ /s)
Fr_p	: 充填粒子基準のフルード数 (-)
Fr_f	: 粉体基準のフルード数 (-)
Fr_L	: 液のフルード数 (-)
H_t	: トータルホールドアップ (vol%)
G_f	: 粉体の供給速度 (kg/m ² s)
g	: 重力加速度 (m/s ²)
Re	: レイノルズ数 (-)
U_{g0}	: 空塔ガス速度 (m/s)
U_L	: 空塔液速度 (m/s)
V_d	: 充填粒子の降下速度 (m/s)
μ_L	: 液粘度 (Pa·s)
ρ_f	: 粉体の密度 (kg/m ³)
ρ_g	: ガスの密度 (kg/m ³)
ρ_L	: 液の密度 (kg/m ³)
ρ_p	: 充填粒子の密度 (kg/m ³)

文献

- 1) M. Ichida, K. Kunitomo, Y. Fujiwara, H. Kamiyama and Y. Morizane: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 860.
- 2) K. Yamaguchi, S. Matsunaga, H. Ueno, K. Kakiuchi and S. Amano: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 954.
- 3) M. Shimizu, R. Ito and K. Hoshino: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 6.

- 4) T.Kamijo, N.Takahashi, K.Hoshino, Y.Yoshida, R.Ito, K.Shibata and Y.Miyakawa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 848.
- 5) R.Murai, M.Sato, T.Ariyama, A.Maki and A.Sakai: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 959.
- 6) M.Sato, R.Murai, T.Ariyama, A.Maki, A.Shimomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 717.
- 7) H.Yamaoka: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 403.
- 8) K.Shibata, M.Shimizu, S.Inaba, R.Takahashi and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **31** (1991), 434.
- 9) T.Ariyama, M.Sato and Y.Asagawa: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22** (1996), 171.
- 10) T.Usui, H.Kawabata, T.Sogo, S.Morii, M.Ichida and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 899.
- 11) T.Fukutake and V.Rajakumar: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1937.
- 12) 中村正秋, 坂東芳行, 鈴木健次, 李梅森: 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), 102.
- 13) T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, K.Miyakawa, K.Nozawa and T.Kamijo: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1114.
- 14) M.Tokuda, N.Tsuchiya and M.Ohtani: *Tetsu-to-Hagané*, **58** (1972), 219.
- 15) J.Kiguchi, M.Shimizu, R.Ito and K.Hoshino: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 639.
- 16) R.Murai, M.Sato and T.Ariyama: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 831.