

高炉炉芯・滴下帯における粉体の移動と蓄積

杉山 喬*

Experimental and Numerical Analysis on the Movement and the Accumulation of Powder in the Deadman and the Dripping Zone of Blast Furnace

Takashi SUGIYAMA

Synopsis : The powder-gas 2 phases flow experiment using parallel packed beds was carried out in order to quantitatively analyze the powder movement and the accumulation in the lower part of blast furnace, and powder penetration to the deadman. The powder mass velocity and powder hold-up are strongly influenced by the gas velocity, the powder diameter and the injection amount. Especially, in the low gas velocity condition, the powder mass velocity decreases and powder hold-up increases.

Powder accumulation is so much in the coke powder of the larger diameter, rather than the pulverized coal.

The new equation of motion concerning the powder movement was derived. Which is taken into account of the friction as a interaction force between powder and coke. Furthermore, new numerical equation which can estimate powder hold-up under the blast furnace operating conditions was proposed.

Key words : powder velocity ; powder hold-up, coke powder, powder penetration, pulverized coal injection, deadman, dripping zone, hold up, gas velocity.

1. 粉体の移動・蓄積に関する高炉内現象

高炉への微粉炭の吹き込み量の増大に伴い、未燃焼チャーやレースウェイでは強力な旋回運動によって発生したコークス微粉はガスとともに高炉下部を移動し、蓄積する。(Fig. 1) 微粉の蓄積は高炉内の通気を悪化させるので微粉がレースウェイから充填層になるべく入らないようにすることが望ましい。しかし現実にはかなりの微粉が炉芯に存在していることが羽口サンプラーの情報から確認されている。微粉は充填層内を固気二相流として流れるが、充填層の状況やガスの流速、微粉の粒径や量によって異なる流れ挙動を呈する。これらの特性を定量的に明らかにすることが、高炉下部の通気や熱のコントロールに有機的につながるものと考えられる。本研究ではレースウェイから炉芯への粉の侵入、粉の移動・蓄積現象を解析するために並列固気二相流実験装置を考案し、高炉への適用を可能とする定量化実験を行った。

固気二相流に関する従来の研究は山岡^{1,2)}、柴田ら³⁾、草壁ら⁴⁾によってなされているが、本研究の主な違いは次の通りである。

(1) 通気性の異なる炉芯充填層と滴下帯充填層の並列2層を設定し、充填層の下部にレースウェイを置くことによって炉芯・滴下帯への粉の侵入挙動をも調査した。

(2) 粉体の移動速度、ホールドアップを定量化した。

(3) 粉体は微粉炭のみならず粒径の大きなコークス粉も対象にした。

2. 実験方法

2-1 実験装置

実高炉のレースウェイ周辺の状況 (Fig. 1) をモデル化し

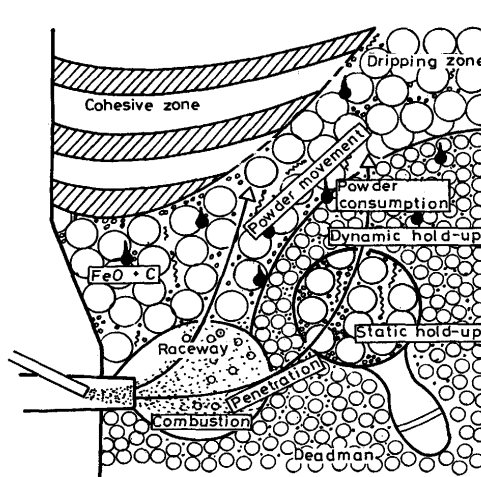


Fig. 1. Schematic aspects for the powder movement and accumulation in the lower part of blast furnace.

平成7年7月25日受付 平成7年11月29日受理 (Received on July 25, 1995; Accepted on Nov. 29, 1995)

* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (現:(株)日鐵テクノリサーチ) (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., now Nippon Steel Techno Research Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

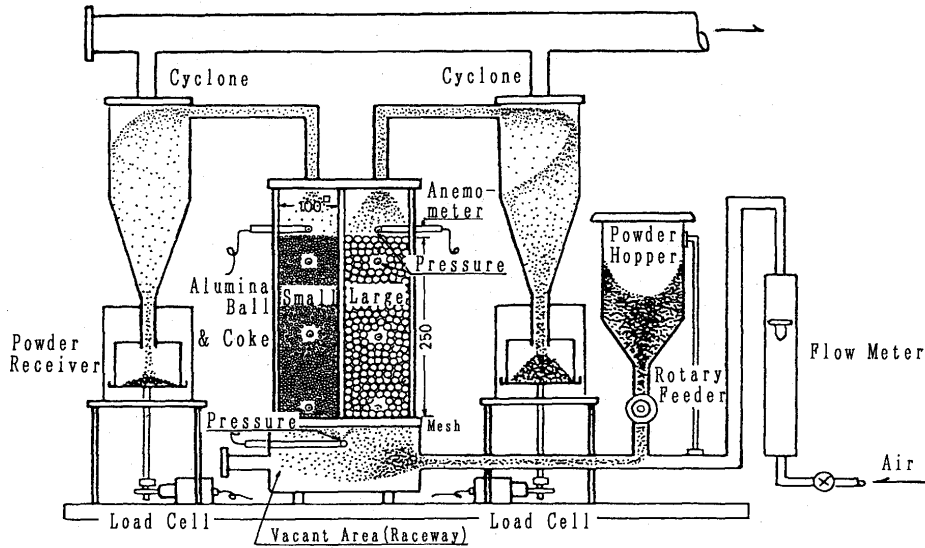


Fig. 2. Experimental apparatus for the powder-gas 2 phases flow through parallel packed bed.

た実験装置をFig. 2 に示した。

巾・厚さ100mm, 高さ250mmの亚克力製の充填層を並列に2層設置し, コークス粒子またはアルミナ球を金網の上に充填した。高さについては高炉内で等圧と見なされる無次元高さまでを想定している。その下にレースウェイを設置し, 粉体は常温空気によってレースウェイで旋回し, 各充填層の流通抵抗にしたがって充填層に侵入する。粉体は中空のSiO₂球, コークス粉を用い, ロータリーフィーダーによって所定の供給速度にコントロールされて羽口からガスと一緒にレースウェイに送り込まれる。充填層から出た粉体はサイクロンによって回収され, その重量が下部のロードセルによって連続測定される。また充填層のガス流速は上部の熱線風速計, 圧力が充填層の下部と上部で計測される。

充填粒子径は $D_p = 2, 3, 4, 6$ mm, 粉体粒子径は $D_k = 0.12, 0.19, 0.35$ mmである。

高炉の操業条件と本実験との相似条件は粉体粒子密度 ρ_{pk} , 固気比 γ , 粉/塊の粒径比 α を一致させるように設定した。すなわち $\rho_{pk} = 950 \sim 1000$ kg/m³, 実高炉の固気比 γ レベルは微粉炭比PCR200kg/t, 燃焼率 $\eta_{pc} = 0.5$ で $\gamma = 0.054$ であるので $\gamma = 0.01 \sim 0.09$ と設定した。粉/塊の粒径比 α は微粉炭より大きいコークス粉も対象にし, $\alpha = 0.05 \sim 0.12$ の範囲である。

2.2 粉体の質量速度とホールドアップ

空気と粉体を240秒間連続して吹き込んだ。粉体の平均質量速度 G_k は定常状態に最も近いと思われる180~240sec間の時間 ($dt = 60$ sec) の通過量 dW を用いて(1)式で表した。Aを充填層断面積とすると

$$G_k = (1/A) \cdot (dW/dt) \dots\dots\dots (1)$$

ホールドアップの測定は各実験ごとに描かれた一本のCarry

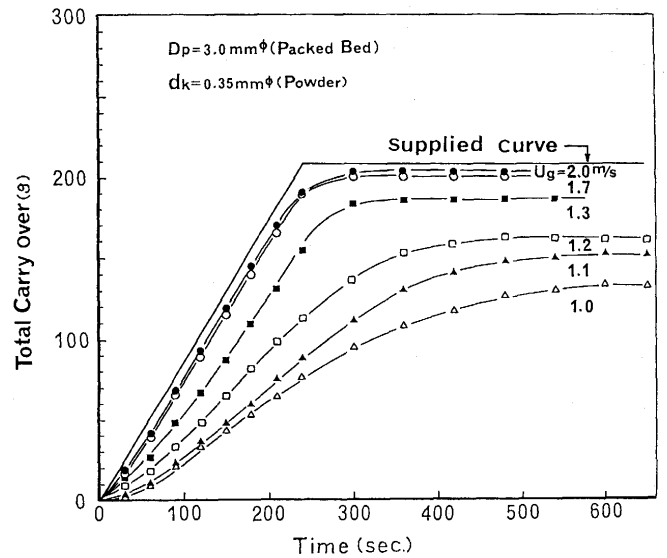


Fig. 3. Powder carry over curves for the single packed bed.

Overの曲線から, 粉の供給を停止してから排出される粉の量を動的ホールドアップ (Dynamic hold-up), 粉の供給を停止しても充填層中に留まる粉の量を静的ホールドアップ (Static hold-up) と定義した。

3. 粉体の移動速度 (単層実験)

3.1 粉体の通過量曲線

Fig. 3 は粉の通過量パターンを示している。ガス流速を下げていくと粉の通過量が低下し, 粉の供給を止めても飛び出しは停止しない。このことはそのガス流速条件に適合した粉の通過限界量が存在することを示している。

3.2 粉体の通過量とガス流速の関係

粉の通過挙動は次の二つのパターンに分類される。高ガス流速域では粉の供給速度 G_{ko} によって G_k が律速される。

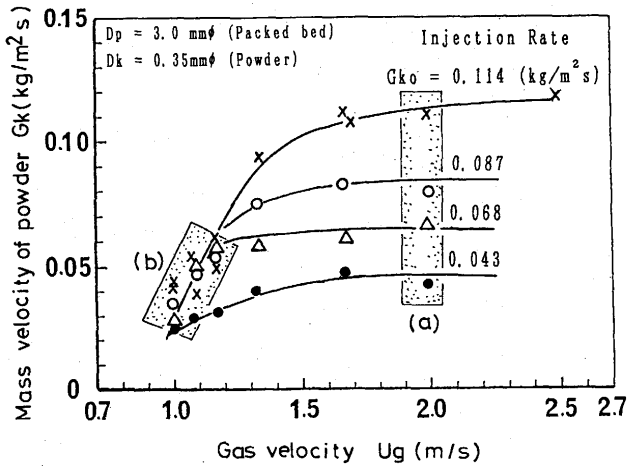


Fig. 4. Relationship between gas velocity and mass velocity of powder.

(Fig. 4 のa) 一方低ガス流速域では G_{ko} を増加させても粉の通過量 G_k は増加せず、ガス流速 U_g を増加させる条件下のみ G_k が増加する。(Fig. 4 のb) このように G_k は粉の供給律速(領域a)とガス流速律速(領域b)とに分けられる。一般に粉が最大質量速度に達するガス流速は粉の終端速度 U_t の1.5~2倍となることがわかった。

充填層の粒子径 D_p の粉体質量速度への影響は炉芯のような低ガス流速域に特徴が見られ、 D_p が大きいほど粉体質量速度は上昇する傾向になった。

4. 粉体のホールドアップ(単層実験)

4.1 粉体のホールドアップに及ぼす諸因子

粉体のホールドアップを増加させる因子としては①ガス流速の減少、②粉供給量の増加、③充填粒子径の減少、④粉体粒径の拡大等であった。特にFig. 5に示すように低ガス流速で過剰な粉が侵入したときに大きなホールドアップ増につながり、支配因子は固気比とガス流速である。また当実験では別途充填粒子径の減少はホールドアップの増加につながるということが明かとなっており、この面からも炉芯のコークス粒径の維持は重要と考える。

4.2 動的ホールドアップと静的ホールドアップ

静的ホールドアップと動的ホールドアップの比率はガス流速域、粉/塊の粒径比によって異なる挙動を示す。(Fig. 6) 粉体粒径増加の効果は低ガス領域で静的ホールドアップの増加につながる。このことから高炉では炉芯内でガス流速が低下した場合には静的ホールドアップすなわち粉の蓄積につながるものと考えられる。粉体粒径が小さいときは動的ホールドアップが主体となる。

5. レースウェイから炉芯・滴下帯への粉の侵入

並列充填層によってレースウェイから炉芯(細粒側)と滴

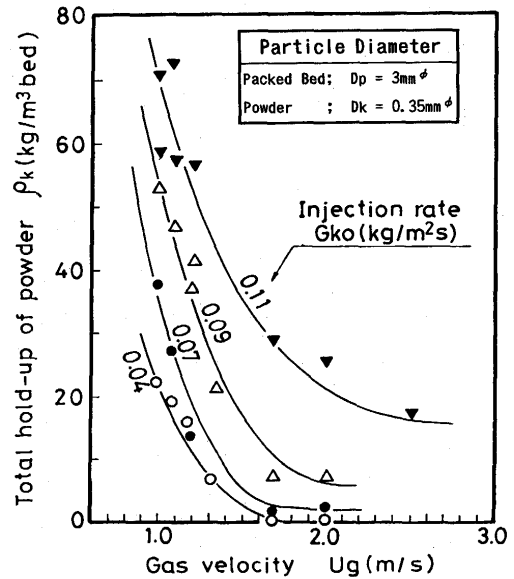


Fig. 5. Effect of gas velocity and powder injection rate on the powder hold-up in the packed bed.

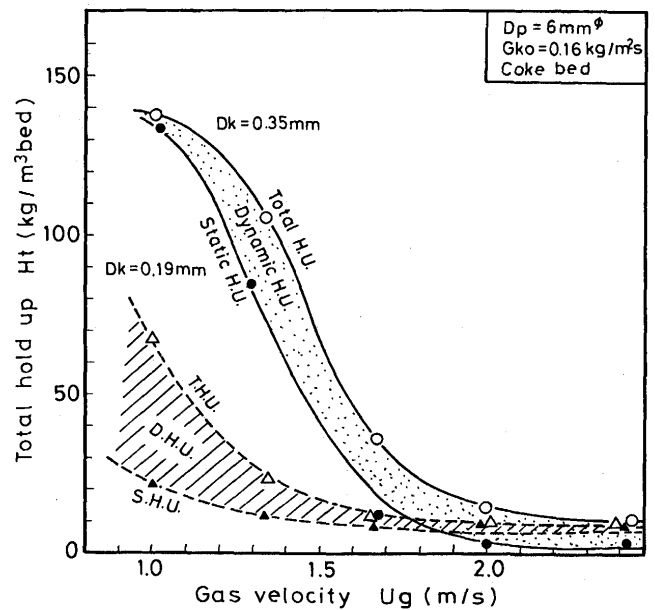


Fig. 6. Effect of powder size on the static hold-up and the dynamic hold-up.

下帯(粗粒側)への粉の侵入挙動を調べた。粉の侵入量は炉芯側の方に多く分配される傾向にありこれはレースウェイにおける粉の加速効果と考えられる。炉芯の充填粒子径を小さくすると分配比は滴下帯側へシフトする。粗粒側6mm、細粒側3mmの充填層(以下3-6)と2-6充填層で粉体粒径を大きくすると細粒側への粉の侵入が抑制される閉塞現象が観察された。この閉塞現象は粉/塊の粒径比が1/6~1/8以上で起こることがわかった。(Fig. 7) ホールドアップはガス流速の低い炉芯側の方が多く、ガス流速の減少は双方のホールドアップを拡大する。(Fig. 8)

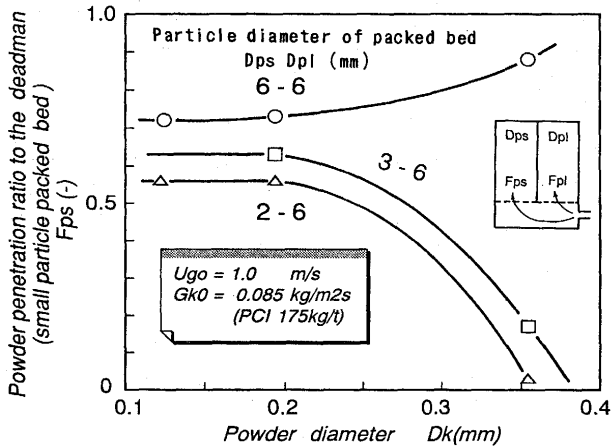


Fig. 7. Effect of powder size on the penetration ratio.

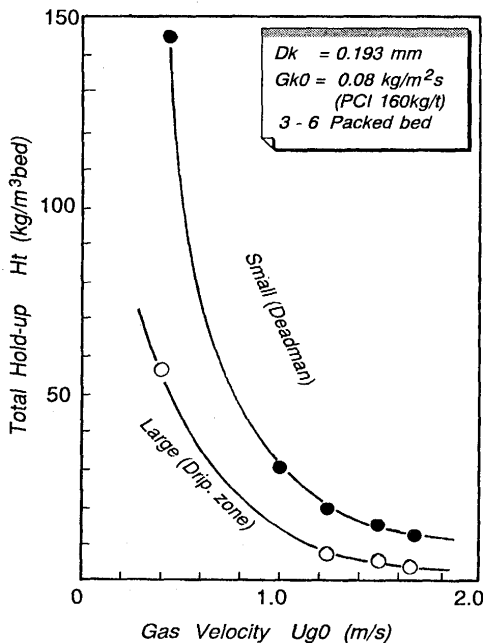


Fig. 8. Effect of gas velocity on the total hold-up.

細粒側と粗粒側へのガス量の分配を充填層上部で熱線風速計によって測定した。両層の圧力損失，ガス量の関係をErgunの圧力損失式を用いて検証したところ，層の上下を等圧と仮定し，層の空間率，粒子径をあてはめて計算したガス量分配と一致することがわかった。

6. 粉体の移動・蓄積の数式化

6.1 粉体移動に関する運動方程式

高炉内部の粉の上昇速度は化学反応を考察する上で滞留時間を決定することから欠くべからざる因子となる。

粉体の上昇速度に関する運動方程式は(2)式のように表せる。粉体質量をmkとすると

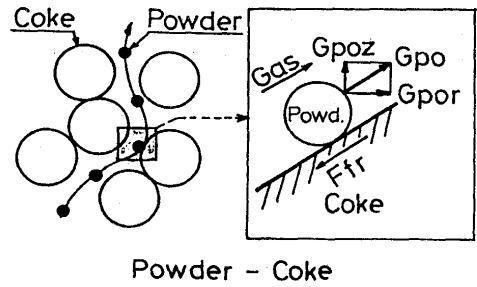


Fig. 9. Interaction force between coke and powder.

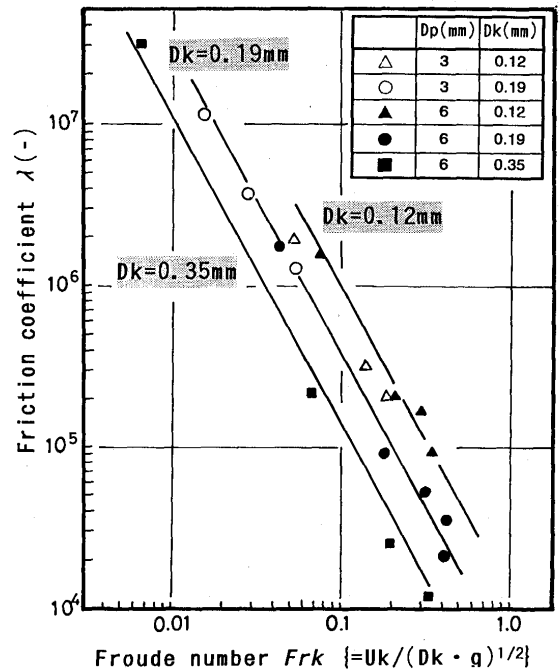


Fig. 10. Relationship between Froude number and friction coefficient of powder-packed bed.

$$mk \left(\frac{dUk}{dt} \right) = Fkg + Fg + Fpk \dots \dots \dots (2)$$

Fgは粉体の重力，Fkgはガスによって粉体が加速される力を表しており，Fanningの式から導出される。

充填粒子と粉体との相互作用力Fpkについて従来の研究^{1,3,4,8)}の多くは粉体の衝突によるものとし，そのマクロ挙動として表されている。本実験で充填層中の粉体の動きを観察すると，粉体粒子は充填粒子への衝突するというよりも，ガス流線とほぼ同様な動き，すなわち粉は充填粒子表面を迂回する動きのように観測される。そこでFpkの主体は充填粒子と粉体との摩擦力と考えた。(Fig. 9)

粉体輸送において固気混合流体と管壁との摩擦損失から導水半径の概念を取り入れてコークス表面を管壁と置換して充填層に拡張して使用した。粉体粒子と充填粒子表面との摩擦力は(3)式で表される。

$$Fpk = mk \cdot \lambda s \cdot (3/4) \left\{ \frac{(1-\epsilon)}{(\phi Dp \epsilon)} \right\} \cdot Uk^2 \dots \dots (3)$$

摩擦係数λsはAdam⁹⁾らによって固気比とFroude数の形で

与えられているが、本実験結果では固気比の影響は明瞭ではなく、粉体のFroude数、粉/塊の粒径比が大きく影響することがわかった。

以上の検討を加えて粉の上昇速度に関する運動方程式は(4)式のように総合化される。

$$dUk/dt = fpg - fg - fpk$$

$$= (3/4) \cdot Cdm \cdot \{ \rho g / (\rho pk \cdot Dk) \} \cdot |Ug - Uk|$$

$$\cdot (Ug - Uk) - (1 - \rho g / \rho pk) \cdot g$$

$$- \lambda s \cdot (3/4) \{ (1 - \epsilon) / (\phi Dp \epsilon) \} \cdot Uk^2 \dots \dots \dots (4)$$

ただしfpg, fg, fpkはFkg, Fg, Fpkを加速度の単位で表わしている。gは重力加速度である。

次にλsを決定するために定常状態を仮定して(4)式に実験値を当てはめ、シミュレーションによってλsを求めた。

その結果λsはFig.10のように粉体に関するFroude数Frkによってよく整理されることがわかった。以上をふまえて実験結果から得たλsの最終式を(5)式のように表した。

$$\lambda s = 18.0 \{ Uk / (Dk \cdot g) \}^{1/2}^{-1.90} (Dk / Dp)^{-1.74} \dots \dots \dots (5)$$

柴田ら³⁾の解析では粉体粒径Dkの影響は考慮されていないが、Fig.10に示すように本実験ではλsはDkの影響を無視することは困難であった。

6・2 相似則にもとづく粉滞留量の推定式

粉体の質量速度Gk, 上昇速度Uk, ホールドアップρkは(6)式のように互いに関連をもっており従来の研究からは独立にρkを決めることは困難であった。

$$Gk = Uk \rho k \dots \dots \dots (6)$$

もし操作要因からホールドアップρkを独立に決めることが

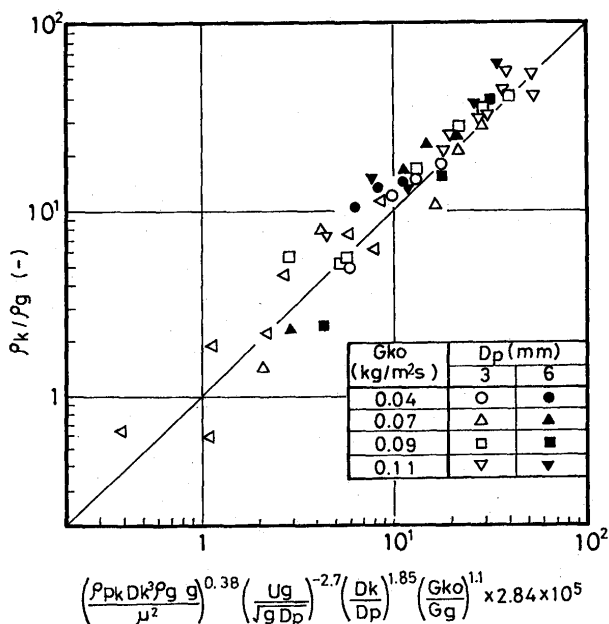


Fig. 11. Regression equation for the powder hold-up ρk.

できれば高炉内の推定を簡便に行うことが出来る。

充填層における粉体の運動に関する物理的現象は相似則として導きだされるπナンバーで表記される。ρkに関するπナンバーは、粉の重力、ガスの力、粉と粒子の粒径比、粉体の量が関係することが実験から明らかである。これらに対応するπナンバーはそれぞれArchimedes数, Froude数, 粒径比, 固気比である。これらの無次元数を使って実験データから誤差の最も小さいホールドアップ推定式を回帰式(7)式のように導いた。Fig.11に実測値との比較を示す。

ρkはガス流速の小さいほど、粉粒径の大きいほど、吹き込み量Gkoの多いほど大きくなることになる。

$$\rho k / \rho g = \{ \rho pk Dk^3 \rho g g / \mu^2 \}^{0.38} \{ Ug / (g Dp) \}^{1/2}^{-2.7}$$

$$\{ Dk / Dp \}^{1.85} \{ Gko / Gg \}^{1.1} \times 2.84 \times 10^5 \dots \dots \dots (7)$$

7. 高炉内条件への展開

7・1 粉の停滞する条件

充填層内での通過量が頭打ちになる現象から粉の蓄積条件は固気比γ>0.045以上(PCR200kg/T, ηpc=0.5に相当)、粉の終末速度Ut⁵⁾に対するガス流速Ugの比Ug/Ut<0.85に存在することがわかった。この条件を高炉炉芯・滴下帯各部に当てはめた結果をTable 1に示した。微粉炭, コークス粉を想定した各粉体粒子径ごとにUtを計算し、高炉トータルモデル¹⁰⁾(BRIGHT)によって推定した高炉各部のガス流速値を当てはめた。粉体粒子径Dkが500μ以上で粉の滞留が起こり、その位置は炉芯の奥、炉芯内部で滞留しやすいという結果となった。Dkが100μの微粉炭は停滞限界のUgは0.07m/sとなり滞留に関しては一応安全圏にあるが、レースウェイで粉化したDk=500μ~3mmコークス粉については炉芯のみならず滴下帯においても容易に停滞を起こしやすい条件にあることがわかる。コークス粉の蓄積に関しては今後検討を要する重要な問題である。

7・2 炉芯における粉体のホールドアップ量

(7)式によって推定した炉芯内のホールドアップ量をFig. 12に示す。粒径1mmのコークス粉はガス流速Ugが平均ガス流速(=1.2m/s)では無論のこと、3m/sあったとしても

Table 1. Condition limited by Ug and position of BF.

Powder Diameter	Terminal velocity of powder Ut(m/s)	POSITION AND ESTIMATED GAS VELOCITY (M/S)				
		Deadman (r=2.0) Ug=0.6	Deadman (r=3.0) Ug=1.0	Deadman (r=4.0) Ug=2.0	Deadman boundary Ug=3.0	Dripping Zone Ug=4.0
		Ug / Ut (-)				
50 μ	0.02	30.90	51.50	103.10	154.60	206.10
100 μ	0.08	7.72	12.90	25.70	38.60	51.40
500 μ	1.64	0.37	0.61	1.22	1.83	2.44
1 mm	3.27	0.18	0.31	0.61	0.92	1.22
3 mm	9.83	0.06	0.10	0.20	0.31	0.41
5 mm	16.39	0.04	0.06	0.12	0.18	0.24

☐ Powder accumulation

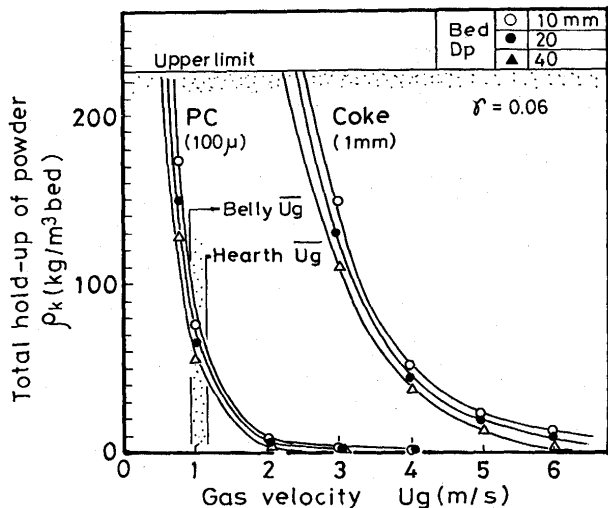


Fig. 12. Effect of gas velocity on the hold-up in the deadman zone.

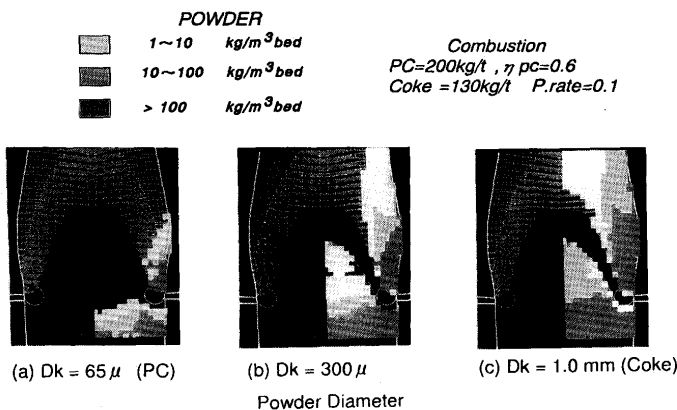


Fig. 13. Simulation of the accumulation powder distribution in the blast furnace.

粉がたまりやすい状況にある。微粉炭に関しては仮に燃焼効率 $\eta_{pc}=70\%$ とすると $PCR100kg/T$, $\eta_{pc}=70\%$, $U_g=0.8m/s$ で粉のホールドアップが $30\sim40kg/m^3bed$ というのが現実的にありうる姿であろう。充填層内を粉が完全に埋めた場合、空間率 $\epsilon=0.45$ から最大 $225kg/m^3$ のホールドアップとなる。炉芯の空間率は 0.45 より小さいので上限はそれより低いものと思われる。

7.3 粉のたまりやすい位置

高炉トータルモデル¹⁰⁾(BRIGHT)によって計算したガス流速分布、充填粒子径の分布、ガス物性値の分布と結合し、(7)式を用いて高炉内のホールドアップ ρ_k の分布を推定した。粉発生量はホットモデルテストからPCRの40%、小型燃焼炉試験からコークス燃焼量の10%とした。 ρ_k 分布はガス流速の小さい箇所でも多く滞留しており、その位置は融着帯の根部、レースウェイ下部で滞留しやすい。炉芯と滴下帯に挟まれた部分はガス流速が速く、粉の滞留が少ない(Fig. 13)。粉の滞留に及ぼす粉粒径の影響は顕著であり、コーク

ス粉の大部分は滞留する。

炉芯サンプリングレベルでは粉の滞留状況は D_k や吹き込み条件によって大きく変化しており、炉況の変動によって敏感に変化する部分であることがわかる。

8. 結論

並列固気二相流実験によりレースウェイから炉芯を移動する粉体の移動速度・ホールドアップの定量化ならびにレースウェイから炉芯・滴下帯への侵入量の解析を行った。

(1) 充填層内の粉体の移動量はガスの流速、微粉の粒径や量の影響を受ける。特に低ガス流速域では滞留量の増加が顕著である。

(2) 微粉炭よりも粗粒のコークス粉が停滞の原因となりガス流速 $3m/s$ 以下でコークス粉は停滞する。

(3) 粉体の移動速度に関する運動方程式のうち充填粒子と粉体との相互作用力は摩擦力によって展開される。

(4) 高炉内での粉のホールドアップ、粉上昇速度を独立に推定できる実験式をガス流速、固気比、粉/塊粒径比を用いて表すことができた。この式から高炉内の粉堆積分布を推定したところ融着帯根部、炉芯下部で大きな堆積があることがわかった。

記号

Cdm	: 充填層内の流体に対する粉体の抵抗係数	(-)
D_k	: 粉体の直径	(m)
Fkg	: ガスと粉体との相互作用力	(kgm/s ²)
Fpk	: 充填粒子と粉体との相互作用力	(kgm/s ²)
Gko	: 質量速度基準の粉体の吹き込み量	(kg/m ² s)
Gk	: 粉体の質量速度	(kg/m ² s)
Gg	: ガスの質量速度	(kg/m ² s)
U_g	: ガスの空塔速度	(m/s)
U_k	: 粉体の上昇速度(空塔基準)	(m/s)
ϵ	: 空間率	(-)
ϕ	: 充填粒子の形状係数	(-)
λ_s	: 摩擦係数	(-)
ρ_g	: ガスの密度	(kg/m ³)
ρ_k	: 粉体のホールドアップ	(kg/m ³ bed)
ρ_{pk}	: 粉体の一粒子の密度	(kg/m ³)
μ	: ガスの粘度	(kg/ms)

文 献

- 1) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72(1986), 403.
- 2) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72(1986), 2194.
- 3) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晋一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 77(1991), 236.
- 4) 諸岡成治, 草壁克巳: 高炉下部における移動現象, 充填層中の気固液移動現象部会報告書
- 5) 籾 巖, 森 滋勝, 堀尾正朝: 流動層の反応工学, (1984), 17.
- 6) T.F.Davidson: Fluidization, ed. by D.Harison, Academic Press, (1971), Ch. 16.
- 7) L.Schiler and A.Naumann: Z.Ver.Deut. Ing., 77(1933), 318.
- 8) L.S.Fan, M.Toda and S.Satija: Powder Technology, 36(1983), 107.
- 9) O.Adam: Chemie. Ing. Techn., 29(1957), 151.
- 10) 杉山 喬, 須賀田正泰: 製鉄研究, 325(1987), 34.