

2次元高炉下部コールドモデルを用いた固液移動特性

碓井 建夫*・川端 弘俊*・十河 利樹*²
森井 祥恵*³・一田 守政*⁴・森田 善一郎*⁵

Solid and Liquid Movement Characteristics in Two-dimensional Cold Model for the Dripping Zone of a Blast Furnace

Tateo USUI, Hirotohi KAWABATA, Toshiki SOGO, Sachie MORII, Morimasa ICHIDA and Zen-ichiro MORITA

Synopsis : Liquid hold-up, liquid discharge distribution and velocity vector of moving particles were measured under the fixed bed and moving bed conditions in a two-dimensional (2D) cold model of 1/10 scale for the dripping zone in a blast furnace, in which stainless steel balls and filtered water were used instead of coke and metal or slag.

At relatively small liquid flow rates and in a packed bed with scattered voids as in this cold model and a blast furnace, restricted liquid paths were formed in the packed bed, and consequently the liquid distribution became nonuniform. The liquid movement in the moving bed was much different from that in the fixed bed. In the fixed bed, total and static hold-ups of the 2D model agreed with those of a previously reported one-dimensional (1D) cold model, respectively. Each liquid hold-up in the moving bed was remarkably greater than that in the fixed bed. As liquid velocity increased, each liquid hold-up increased. In the moving bed, total and static hold-ups of the 2D model were larger than those of the 1D model, respectively.

Key words : iron making ; blast furnace ; dripping zone ; liquid discharge distribution ; liquid hold-up ; fixed bed ; moving bed ; two-dimensional cold model.

1. 緒言

高炉下部においてはガス(気)、コークス(固)、溶融メタル・スラグ(液)、微粉炭・粉コークス(粉)の4相が高温場で存在するために、レースウェイ近傍や炉芯部も含めた炉下部滴下帯におけるこれらの移動特性が明確でない。

滴下帯では、溶融した銑鉄とスラグは互いに混合せずにコークス層間を炉床へ滴下する。また液体の存在によってガスは流路を制限されるが、ある値以上のガス流速になるとガスも液体の流下に影響を与える。すなわち、充填層内の液ホールドアップが増し、ガスの圧力損失も急速に上昇し始める(ローディング点)。さらにガス流速を増すと、ついに層上部に液体が蓄積されるフラッディング状態になる。したがって、炉下部で起こる棚つりやスリップなどの異常現象を解析するには、ガスの圧力損失と液ホールドアップを測定することが必要である。

従来、気液向流充填層(固定層)における液ホールドアップなどについての研究が進められてきた¹⁻⁷⁾。また充填粒子

の降下が大きく影響すると考えられる高炉下部に近い移動層での研究は、著者らの気・固・液3相1次元高炉下部コールドモデル実験⁸⁾を含めても非常に少ない⁹⁾。

本研究では、気・固・液3相2次元高炉下部の1/10コールドモデル(気・液が交差して流れるレースウェイから向流して流れる上部領域までの縦方向断面の片側半径を模擬し、コークスに代えてステンレス鋼球、溶融メタル・スラグに代えて水を使用)を用いて、まずガス流れのない固・液2相の場合に限定して実験を行い、固定層および移動層における液体(および固体)の移動特性ならびに液ホールドアップなどについて報告する。

2. 理論(液ホールドアップの定義)

2.1 固定層の場合

液流量が大きくかつ反応を伴う流れの場合、反応に大きく寄与するのは充填層内を流動している液体であり、静止量はあまり寄与しない。しかしながら、高炉のように液流

平成8年5月14日受付 平成8年9月9日受理 (Received on May 14, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

* 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

* 2 大阪大学工学部大学院生 (Graduate Student, Faculty of Engineering, Osaka University)

* 3 大阪大学工学部学生 (現: シュルンベルジュ(株)) (Student, Faculty of Engineering, Osaka University, now Schlumberger K.K.)

* 4 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

* 5 大阪大学工学部 (現: 住友金属工業(株)) (Faculty of Engineering, Osaka University, now Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

量が小さい場合には静止量が大きく影響する。したがって、気液向流充填層内に存在する液体の挙動を理解する上で、Shulmanら¹⁰⁾と同様に液ホールドアップすなわち充填層内に存在する液体の容積割合について次のように分類する。

(1)全液量(液体を供給し続けているとき、充填層内に存在する液体の総量)

(2)流動量(充填層内に存在する液体のうち、実際に流れている量)

(3)静止量(充填層内に液体を供給し続けているとき、粒子表面、粒子-粒子間、粒子-壁間などで静止している液量)

このように分類したものを空塔体積で除した値をそれぞれ固定層における全ホールドアップ(H_t)、動的ホールドアップ(H_d)、静的ホールドアップ(H_s)と定義する。ここで3つのホールドアップの間には次の関係がある。

$$H_t = H_d + H_s \dots\dots\dots (1)$$

模式的に固定層における液供給曲線と液排出曲線(積算値)ならびに各ホールドアップ相当体積との対応関係をFig. 1に示す。

2・2 移動層の場合

従来、液流れに関する実験は固定層で行われ、移動層における検討はあまり行われていないが、ここでは固定層で定義された分類に基づいて考える。

固定層であれば、粒子表面、粒子-粒子間、粒子-壁間などで静止すべき液体も、移動層の場合粒子が降下することにより、その粒子に伴って降下運動を行う。あるいはこれらの液体の一部は、粒子の移動により運動エネルギーを与えられて、粒子に付着しておれずに滴下してしまう。つまり、移動層では厳密に言うと静止座標系から見て静止している液体はほとんど存在しないはずであるから、固定層で行った分類はそのまま適用することはできないが、固定層の定義に沿って次のように分類して考える。

(1)全液量(液体を供給し続けているとき、充填層内に存在する液体の総量)

(2)相対流動量(充填層内に存在する液体のうち、粒子に対して正の相対速度を持って移動している量)

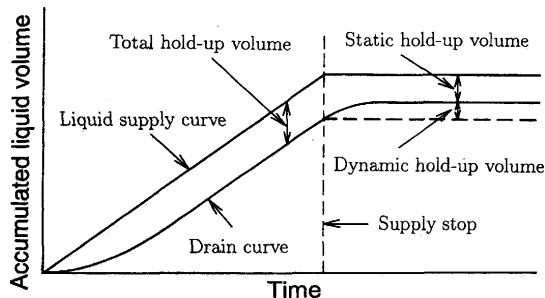


Fig. 1. Scheme of liquid supply curve, drain curve and hold-up volumes in fixed bed.

(3)相対静止量(充填層内に液体を供給し続けているとき、粒子表面、粒子-粒子間、粒子-壁間などで孤立している液量)

このように分類したものを空塔体積で除した値をそれぞれ移動層における全ホールドアップ(H_t)、動的ホールドアップ(H_d)、静的ホールドアップ(H_s)と定義する。

3. 実験条件

高炉下部滴下帯におけるコークス-溶融メタル・スラグの固・液2相流れの基礎データを得るために、前述の1/10コールドモデルによる実験を行った。充填粒子には、実際の高炉のコークス粒子径が50~60mm程度であるので、その約1/10の直径 $D_p = 6.36\text{mm}$ のステンレス鋼球(SUS 304)を用いた。また、充填粒子直径と充填層奥行の比は、1:10程度とした。国内各社の操業成績¹¹⁾に基づく高炉条件はTable 1のような範囲にある⁸⁾ので、本実験の空塔液速度(V_L)と空塔粒子降下速度(V_S)はほぼそれを含む範囲に設定した。

ただし2次元高炉下部の1/10コールドモデルと実際の高炉を相似にするためには、レイノルズ数、フルード数、ウェーバー数など多くの無次元数を一致させる必要があるが、それらを同時に満足させることは非常に難しい。参考にこれらの無次元数の値をTable 1に示しておく。しかしながら、炉下部で生じる棚つりなどの異常現象を解明するためには、液ホールドアップとガスの圧力損失が最も重要な因子であると考えられ、その液ホールドアップはフルード数(Fr_L)に大きく依存¹²⁾することから、本実験では Fr_L を高炉の炉下部

Table 1. Comparison of conditions for the present experiments and a blast furnace.

	Two-dimensional cold model		Blast furnace	
	Fixed bed	Moving bed	Metal	Slag
$D_p(\text{mm})$	6.36	6.36	30~60	
$\epsilon (-)$	0.37~0.38	0.42	0.45	
$\rho_L(\text{kg/m}^3)$	1000		6600	2600
$V_G(\text{m/s})$	0		1.2~1.7	
$V_L(\text{mm/s})$	0.018~0.22		0.090~0.15	
$V_S(\text{mm/s})$	0	0.12~0.60	0.10~0.60	
$\mu_L(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.001		0.005	0.3
$Re_L(-)$	0.11~1.4		3.6~12	0.023~0.078
$Ga_L(-)$	2.5×10^6		$(4.6 \sim 37) \times 10^8$	$(2.0 \sim 16) \times 10^4$
$C_{pL}(-)$	5.4		49~190	46~180
$We_L(-)$	$2.8 \times 10^{-8} \sim 4.2 \times 10^{-6}$		$(1.3 \sim 7.4) \times 10^{-6}$	$(1.3 \sim 7.0) \times 10^{-6}$
$Fr_L(-)$	$5.2 \times 10^{-9} \sim 7.8 \times 10^{-7}$		$(1.4 \sim 7.7) \times 10^{-8}$	

Note D_p : diameter of spheres packed, V_G, V_L, V_S : superficial velocities based on empty column for gas, liquid, and solid, respectively, ϵ : void fraction of bed, μ_L : viscosity coefficient of liquid, ρ_L : density of liquid, σ_L : surface tension.
 $Re_L = V_L \cdot D_p \cdot \rho_L / \mu_L$, $Ga_L = g \cdot D_p^3 \cdot \rho_L^2 / \mu_L^2$,
 $C_{pL} = \rho_L \cdot g \cdot D_p^2 / \sigma_L$,
 $We_L = \rho_L \cdot V_L^2 \cdot D_p / \sigma_L$, $Fr_L = V_L^2 / (g \cdot D_p)$

と相似になる範囲を含むように設定した。

4. 実験装置および測定方法

実験装置の概要をFig. 2に示す。充填容器は側面と裏面が6 mm厚の真鍮製であり、前面は30mm厚の亚克力製である。また充填容器内部は、液流分布や液ホールドアップに及ぼす影響を少なくするために、テフロンコーティングした。充填容器内部は高さ655mm、幅500mm、奥行60mmである。その中に直径6.36mmのステンレス鋼球を通常530mmの高さまで充填した。その場合の充填個数は約7.2万個(約80kg)である。充填方法は充填層上部後方に設置した自動粒子供給装置を用いて、自由落下により行った。

充填層下部は、Fig. 2に示したように、液流分布を測定するために、等間隔に左側からNo. 1～No.10の10箇所仕切っている。下記の液分散器を用いて一定流量の水を充填層上部から注入し、それぞれの排出量を電子天秤を用いて5 min間隔で測定して、液流分布を求めた。No. 1の仕切りは、移動層の場合粒子の排出口を兼ねており、内径84mmの円筒部に連なり、水槽(高さ685mm、幅500mm、奥行327mm)中に浸漬してある。この円筒内の粒子はターンテーブルにより支えられており、粒子降下速度はターンテーブルの回転速度(ギヤードモーター、15～90rpm)および円筒とのすき間を変えることにより調節した。また粒子降下と同時に、自動粒子供給装置により粒子降下量と同等の粒子を充填層上部から供給した。用いた液体はフィルターを通した水道水で、それを充填層上部から均一分散するために液分散器(注射針：外径0.55mm、長さ30mm、200本)を設置してある。液の注入にはソレノイド・ドライブポンプ(max.100, 300 cm³/min)を用いた。なお液分散器直下に上記仕切りと同様に10分割した容器を設置した予備実験により、液は±8%以内の誤差範囲で均一に分散することを確かめている。

液ホールドアップの測定方法は、充填層下部から排出さ

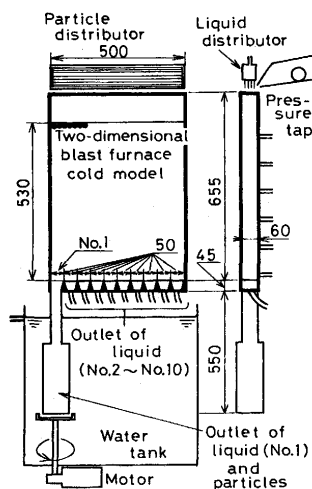


Fig. 2. Experimental apparatus; dimensions in mm.

れる総液量を電子天秤を用いて測定し、Fig. 1に模式的に示したように、その排出液流量が定常状態になった時、総供給液量と総排出液量の差が充填層内に存在する総滞留量(トータルホールドアップ体積)であり、それを静止量(静的ホールドアップ体積)と流動量(動的ホールドアップ体積)に区別するために、液の供給を停止した後充填層内から排出される液量を測定し、それを流動量と見なした。また充填層内に残された液量が静止量である。それらを空塔体積で除した値を液ホールドアップとして求めた。

5. 実験結果および考察

5・1 固定層の液流分布

充填層高さ h_b が530mmで、 V_L が0.082mm/sの場合の各仕切りでの排出液量の測定例をFig. 3に示す。図中のエラーバーおよび●印は、総排出液量が定常状態に達した後の5 minから30minまでの5min毎の各排出液量の最大値と最小値の幅および平均値をそれぞれ示している。No. 1とNo.10以外は側面がないので壁面積が同じであり、液が粒子で等しく分岐されると考えると、ある程度均一な液分散が得られると予想される。しかしながらNo. 7の液量は平均値よりかなり多く、No. 8と10の液量は非常に少ない。また液速度を変えた実験や粒子径を1/2にした実験においても同様な結果となり、非常に不均一な液流分布が得られた。

このような不均一な液流分布となった原因は、前面における観察の結果および小型固定層(高さ90mm、幅100mm、奥行20mm、 $D_p=6.36$ mm)を用いた可視化実験の結果から、液は比較的空間の広い部分において、前に液が通った後(つまりよく濡れた部分)を引張られるように流れており、この流路がたとえば垂直方向から45°程度傾斜していても、斜向した流路が形成されている(以後、斜向流路と呼ぶ)。同様のことが充填層内部についても考えられ、このことが不均一な液流分布となる主な原因であると考えられる。

次に液流分布に及ぼす壁面の影響および粒子と液体の濡れ性の影響を調べた。まず始めに充填層内に均一に分散し

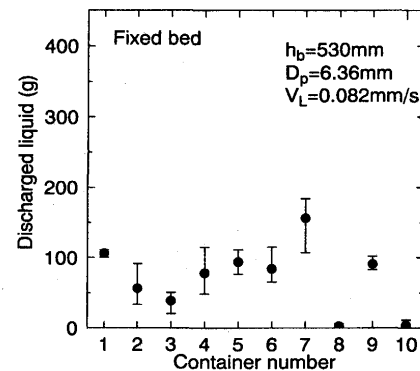


Fig. 3. Liquid distribution in fixed bed, where h_b is the height of the bed.

た液体が、充填層高さが高いために壁面を液流れが発達しながら偏流して不均一な液流分布になったかどうかを調べるために、充填層高さを530mmから50mmに低くした。その実測例をFig. 4に示す。液速度は0.115mm/sである。充填層高さが非常に低いにもかかわらず、あまり均一な液流分布は得られていない。前面から観察を行った結果、すでにこの高さで斜向流路を形成していることが分かった。さらに $h_b=25\text{mm}$ とした場合も同様の結果が得られた。したがって、液流分布の不均一さに及ぼす壁面の影響は小さいと考えられる。

次に粒子の濡れの影響を調べるために、粒子にフッ素コーティングを施して濡れ性を小さくした。その平衡接触角は約 90° である。またフッ素コーティングを施していない場合が約 30° である。Fig. 5は $h_b=50\text{mm}$, $V_L=0.085\text{mm/s}$ の場合である。Fig. 4と同様に、不均一な液流分布であるがエラーバーの幅が大きくなっている。さらに $h_b=25\text{mm}$ とした場合も同様の結果が得られた。これはフッ素コーティングした粒子の充填層では、濡れの影響が小さいので特定の流路を形成しにくくなっており、液は充填層内の空間率の高いところを流路を変えながら流れているのではないかと考えられる。このことは上記小型固定層を用いて、平衡接触角が約 90° と約 30° の両方の粒子を使用した可視化実験により確認している。

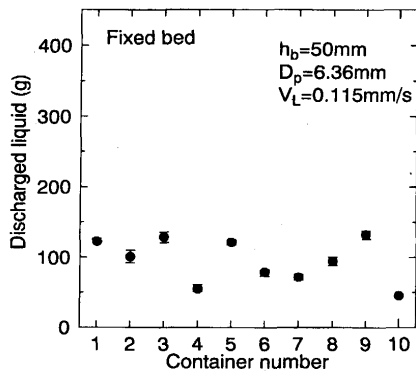


Fig. 4. Liquid distribution in fixed bed having a height of 50mm.

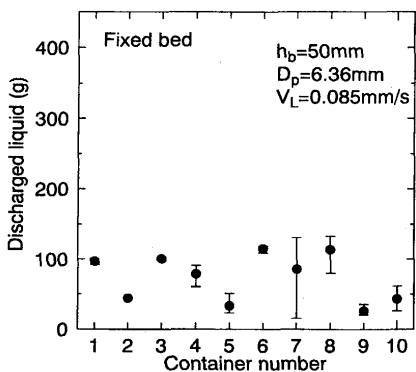


Fig. 5. Liquid distribution in fixed bed packed with fluorine-coated particles.

これらのことから、充填層下部から排出された液体の液流分布の測定結果は、充填層の最下部付近の充填形態(空間の分布)および粒子の濡れ性の影響を大きく受けていることが分かる。したがって、高炉や本実験のように液流量が比較的小さく、また充填層容器上部から粒子を自由落下させ充填した充填層(空間率が局所的に不均一な充填層)における液流分布は不均一になる。

5・2 移動層の液流分布

Fig. 6に移動層の液流分布の測定結果の一例を示す。実験条件は $V_s=0.24\text{mm/s}$, $V_L=0.081\text{mm/s}$, 平均充填高さ $h_b=530\text{mm}$ である。移動層の場合、No. 1の仕切りにおいて排出液量が非常に多くなっていることが分かる。このことはMuraiら¹³⁾が実操業において、また武田ら¹⁴⁾が高炉の解体調査により観測した結果、すなわち液滴が羽口先端周辺部に集中して流れていたという報告と一致する。その他の仕切りの部分では、均一な液流分布を持つといった傾向はなく、固定層と同様に斜向流路の形成と最下部付近の充填形態によって液流分布は決まっていると考えられる。

次に充填層下部から排出した全液量 Q_L に対するNo. 1からの排出液量 Q'_L の割合に及ぼす粒子降下速度および液速度の影響をFig. 7に示す。 $V_s=0$ には固定層の結果を示したが、平均値は10%(均一分散の場合の値)付近になっている。ど

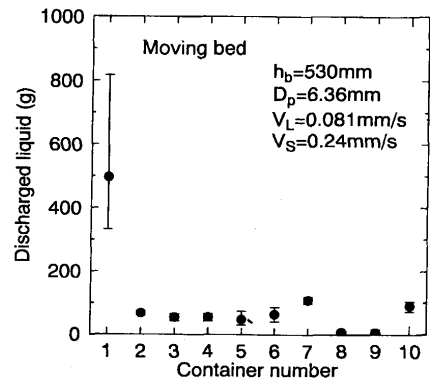


Fig. 6. Liquid distribution in moving bed.

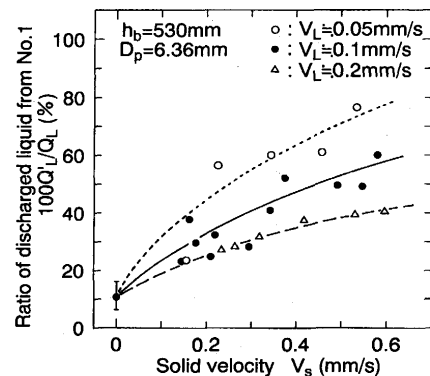


Fig. 7. Influence of solid velocity on the ratio of Q'_L (discharged liquid from No.1) to Q_L (total discharged liquid).

の V_L の場合も V_s の増加に伴って、No. 1からの排出液量は非常に大きくなる。その割合は V_L が小さくなるほど大きくなり、 $V_L=0.05\text{mm/s}$ の場合、 $V_s=0.5\text{mm/s}$ ではほぼ70%に近い。液流分布がNo. 1で突出するのは、充填層上部から均一に分散供給した多くの液体が充填層下部に十分流下する前に層上部を速く移動している粒子に伴ってNo. 1の排出口の方へ持ち去られることが主な原因であるが、充填層内で粒子移動が激しい、したがって空間率の大きい部分を液体が優先的に流下することも寄与している。なお、液流分布に及ぼす層頂の傾きの影響はほとんどないことを確かめている。一方、実操業における液滴径(d_L)と粒子径の比(d_L/D_p)は本実験に比べて数倍小さいと想定されるので、その場合の液流では、粒子-粒子間のすき間の増加による液流の増加の効果が相対的に大きくなることにより、前者の影響と比べて後者の影響がもう少し大きくなると考えられる。

5.3 移動層内の粒子移動の可視化

移動層内の粒子移動の軌跡と速度ベクトルを得るために、充填層前面の粒子の写真撮影を10s間隔で行った。実験条件は $V_s=0.13\text{mm/s}$ 、 $V_L=V_G=0\text{mm/s}$ 、 $h_b=530\text{mm}$ である。撮影した写真から個々の粒子を追跡し、1minごとに動いた距離と方向をベクトルで充填層全体を表わしたのがFig. 8である。図中の左下端(No. 1の排出口)から粒子が排出されるので、左側および層頂付近の粒子の移動速度が速いことがよく分かる。一方、右側の下層部から中層部の粒子はほとんど動いておらず、炉芯を形成している。

5.4 固定層の液ホールドアップ

充填層高さ530mmの固定層における各ホールドアップの測定結果をFig. 9に示す。 V_L の増加と共に、 H_t と H_d は徐々に増えているが、 H_s はほとんど変化していない。 H_t は $V_L=0.02\text{mm/s}$ では約1.5%、 $V_L=0.22\text{mm/s}$ で約2.7%になる。著者ら⁸⁾が以前に行った円筒(I.D.60mm)を用いた1次元コールドモデルのホールドアップの測定結果をFig. 9中に示した。使用した粒子の直径は9.52mmと本実験よりも少し大きく、 V_L も0.13mm/s以上であるが、本研究の2次元モデルの H_t

と H_s は1次元モデル⁸⁾の値とほぼ一致する。一方、 H_d については2次元モデルの方が大きくなった。なお1次元、2次元モデルとも H_d はほぼ V_L に比例して増加する。

また液体と粒子の濡れ性を考慮した(接触角 $=103^\circ\sim 121^\circ$)牛ら¹⁵⁾の円筒を用いた1次元コールドモデルの各ホールドアップとの比較では、 H_t 、 H_s 、 H_d それぞれの値は本2次元モデルの値より少し大きくなっている。これは、粒子との濡れ性を小さくしていることにより、液滴の移動・分散が比較的容易になった結果、各ホールドアップが少し大きくなったものと考えられる。

5.5 移動層の液ホールドアップ

Fig. 10に $h_b=530\text{mm}$ で、 $V_L=0.1\text{mm/s}$ 一定の場合の V_s と各ホールドアップの関係を示す。移動層においては、 H_s と H_t が $V_s=0\text{mm/s}$ の固定層の値より非常に大きくなっている。また V_L を変えた実験においても同様な傾向が得られた。これは、粒子が移動すると比較的大きな空間率の部分が別な場所へと変化することにより新たな液流路が形成され、液体と接触する粒子の割合が多くなること、および粒子移動により粒子に付着していた液体が静止状態を維持できず、炉芯部分のあまり濡れていない粒子上にも落下することによる液分散の促進が原因であると考えられる。

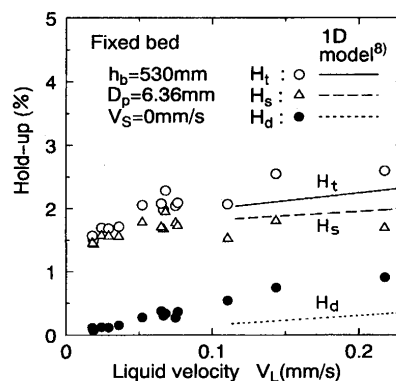


Fig. 9. Relation between liquid velocity and hold-ups in fixed bed, where H_d , H_s , and H_t are dynamic, static and total hold-ups, and 1D model is the abbreviation for one-dimensional cold model⁸⁾.

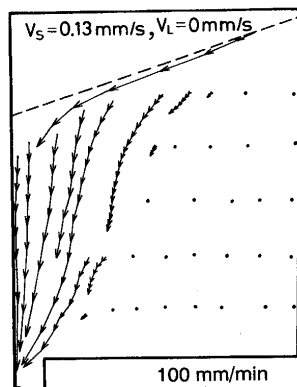


Fig. 8. Solid velocity vector in moving bed ($D_p=6.36\text{mm}$).

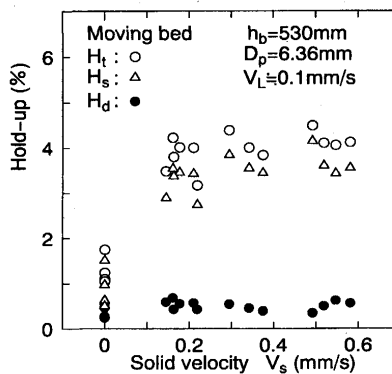


Fig. 10. Relation between solid velocity and hold-ups in moving bed.

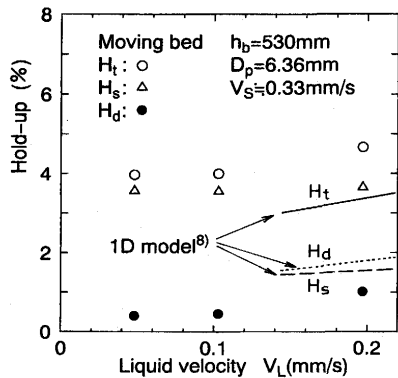


Fig. 11. Relation between liquid velocity and hold-ups in moving bed.

Fig.11に $V_s = 0.33\text{mm/s}$ 一定の場合の V_L と各ホールドアップの関係を示す。移動層の場合、 V_L の増加に伴い H_t と H_d は増加する。この結果は固定層と同様である。これは液量の増加により充填層内に流路が多く形成されるためであると思われる。このことは前記小型固定層を用いた可視化実験により確認している。また図中には著者らが以前に行った、移動層における1次元コールドモデル⁸⁾の測定結果も示してある。ただし、1次元モデルはガス吹き込みを行っているので直接の比較はできないが、ガス速度の最も小さな $V_G = 0.50\text{m/s}$ の結果と2次元モデルの本実験結果とを比べてみると、 H_t については2次元モデルの方が30%程度大きく、 H_s も2次元モデルの方がかなり大きくなっている。一方、 H_d は約半分になっている。この傾向は V_s を変えた場合も同様であった。

2次元モデルの H_d が1次元モデルの H_d より小さくなった原因は、2次元モデルでは粒子がほとんど動かない部分(炉芯)と移動している部分に分れているので、炉芯を流れる液体が少ないために、充填層全体としての H_d が小さくなったと考えられる。一方、 H_s が大きくなった原因は、炉芯部においてすでに形成されている特定の液流路以外の部分、すなわちほとんど粒子が濡れていない部分に、その上部を十分濡れた粒子が活発に移動することにより、それらの粒子から液滴が落下してさらに新たな液流路が形成されること、および2次元モデルの粒子径が小さいので濡れ面積が増加することにあると推察される。

なお本研究の移動層における液ホールドアップは炉芯部を含む充填層全域にわたる値である。したがって局所のホールドアップについては今後の課題とする。

6. 結論

(1)本研究のコールドモデルのように液速度が比較的遅

く、また充填層容器上部から粒子を自由落下させた(空間率が局所的に不均一な)固定層においては、液は空間率の高いところを時間的に前に通った液に引張られるように流れ(液は一度濡れた部分を優先的に流れる)、特定の流路を形成するのでその液流分布は不均一になる。

(2)本2次元高炉下部コールドモデルにおいては、固定層と移動層でかなり異なった液体の流動挙動を示す。また移動層においては、多くの液体が粒子移動の激しい場所を集中的に流下し、充填層下部のNo.1の仕切りから排出される液量は、粒子降下速度の増加に伴って非常に大きくなる。

(3)固定層における、本2次元モデルの H_t と H_s は前報⁸⁾の1次元コールドモデルの値とよく一致する。

(4)移動層における H_t と H_s は固定層における各値より非常に大きくなる。また液速度の増加に伴い H_t と H_d は増加する。

おわりに、日本鉄鋼協会生産技術部門4流体の移動現象研究会(主査 東北大学教授 八木順一郎博士、液流れWG企業側世話人 川崎製鉄(株)主任研究員 武田幹治博士)において、有益なご意見をいただいた委員各位に御礼申し上げますとともに、研究助成に対しまして謝意を表します。

文 献

- 1) T.K.Sherwood, G.H.Shipley and F.A.L.Holloway: Ind. Eng. Chem., **30** (1938), 765.
- 2) A.Mersmann: Chem.Eng.-Techn., **37** (1965), 218.
- 3) M.Herskowitz and J.M.Smith: AIChE J., **24** (1978), 439.
- 4) S.P.Zimmerman and K.M.Ng: Chem. Eng. Sci., **41** (1986), 861.
- 5) 福武 剛, V.Rajakumar: 鉄と鋼, **66** (1980), 1937.
- 6) 福武 剛, 岡部俠児: 鉄と鋼, **66** (1980), 1947.
- 7) 須賀田正泰, 杉山 喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田 豊: 学振54委-No.1827 (1987.7.13).
- 8) T.Usui, K.Masamori, H.Kawabata and Z.Morita: ISIJ Int., **33** (1993), 687.
- 9) Y.Omori, Y.Shimomura, J.Yagi, M.Nakamura, T.Fukushima, M.Amatatsu, K.Ishii, S.Inaba, T.Usui, M.Ozawa, K.Ono, Y.Kuwano, M.Kuwabara, S.Kobayashi, N.Sano, T.Shimoda, N.Tsuchiya, M.Tokuda, H.Nishio, M.Hatano, T.Fukutake, M.Maekawa and A.Yoshizawa: Blast Furnace Phenomena and Modelling, Elsevier Applied Science Publisher Ltd., London, (1987), 395.
- 10) H.L.Shulman, C.F.Ullrich and N.Walls: AIChE J., **1** (1955), 247.
- 11) 田中勝博, 富田幸雄: 私信.
- 12) A.Alidilar, A.Bicer and A.Murathan: Chem. Eng. Comm., **128** (1994), 95.
- 13) R.Murai, S.Kishimoto, H.Inoue, H.Mitsufuji, M.Sakurai and H.Wakai: 1st Int. Cong. Science and Technology of Ironmaking, Sendai, ISIJ, (1994), 272.
- 14) 武田幹治, 江渡卓穂, 澤 義孝, 国分春生, 田口整司, 板谷 宏: 材料とプロセス, **6** (1993), 868.
- 15) 牛 明愷, 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 材料とプロセス, **8** (1995), 331.