

# 液ホールドアップの特性に及ぼす 充填層初期乾湿状態の影響

川端 弘俊\*・劉 志剛\*<sup>2</sup>・藤田 文雄\*<sup>3</sup>・碓井 建夫\*

Characteristics of Liquid Hold-ups in a Soaked and Unsoaked Fixed Bed

Hiroto KAWABATA, Zhigang LIU, Fumio FUJITA and Tateo USUI

**Synopsis** : In most previous works, liquid hold-ups were studied by using a cold model of a fixed bed soaked prior to experiments. However, they did not consider that the dripping zone of a blast furnace is saturated with liquids or with evenly distributed droplets. In the present study, the characteristics of liquid hold-ups and liquid flow were investigated by using a one-dimensional cold model of a fixed bed soaked and unsoaked prior to experiments (initially soaked and unsoaked beds). Packed balls were five kinds, the diameters ( $D_p$ ) of which ranged from 5.4 to 30 mm. Tap water was used as liquid. Contact angles ( $\theta$ ) for these particle/liquid systems were about  $70^\circ$  and  $10^\circ$  for fluorine-coated particles and non-coated particles, respectively.

Although, under bad wettability condition ( $\theta=70^\circ$ ), total and static hold-ups for initially unsoaked bed packed with small balls are remarkably smaller than those for initially soaked bed, the difference in their hold-ups between initially unsoaked and soaked beds decreases with increasing ball size in the bed. In initially soaked bed, total and static hold-ups increase monotonically as ball size decreases, which means the specific surface area increases. On the other hand, in initially unsoaked bed, total and static hold-ups under bad wettability condition indicate maximum values at about  $D_p=10$  mm and decrease abruptly in proportion to a decrease in particle size, despite an increase in the specific surface area. Only restricted liquid droplets and/or liquid rivulets are formed within the packed bed with good wettability condition ( $\theta=10^\circ$ ) for initially unsoaked bed, nevertheless liquid is easy to spread out on the solid surface. The influence of the initial bed condition, soaked or unsoaked bed, on liquid hold-ups is great under bad wettability condition.

**Key words**: ironmaking; blast furnace; dripping zone; fixed bed; liquid hold-ups; particle/liquid wettability; initially soaked and unsoaked beds.

## 1. 緒言

高炉下部においては、ガス（気相）、コークス（固相）、溶融メタル・スラグ（液相）および粉コークス・微粉炭（粉相）の4相が高温場で存在する<sup>1)</sup>。滴下帯、レースウェイ近傍および炉芯におけるそれらの流動特性は、4流体が互いに複雑に影響・反応するために、まだまだ不明な点が多々残っている。

これまで液ホールドアップに関する多くの実験・研究<sup>2-6)</sup>は、実験前の充填層内が十分湿潤した状態すなわち初期湿潤充填層(Initially soaked bed)における固定層コールドモデルに基づいて行われてきた。高炉下部では、充填物がゆっくりと降下し、かつ十分濡れた状態でない。したがって、高炉下部の液流れおよび液ホールドアップをより正確に模擬するためには、実験前の充填層が乾燥した初期乾燥充填層(Initially unsoaked bed)で、かつ粒子がゆっくりと移動す

る移動層を用いて行うべきである。初期乾燥充填層における液流れ挙動や液ホールドアップに関する実験・研究<sup>7,8)</sup>は、著者らの1次元(1D)移動層<sup>9)</sup>・固定層モデル<sup>10)</sup>、2次元(2D)移動層<sup>11)</sup>・固定層モデル<sup>10)</sup>を含めてもまだまだ少ない。

2D固定層コールドモデル<sup>10,11)</sup>における液流れ挙動ならびに液ホールドアップは、充填層初期乾湿状態の影響が大きい。その初期乾湿状態の影響を以下に要約する。著者らの2D固定層コールドモデルの充填塔は高さ655 mm、幅500 mm、奥行き60 mmである。液体にはフィルターを通した水道水を用いた。使用した粒子は、フッ素被覆した直径6.4 mmのステンレス球であり、固液の濡れ性は接触角 $\theta=90^\circ$ である。初期乾燥充填層における全ホールドアップ( $H_t$ ; ○)と静的ホールドアップ( $H_S$ ; △)は初期湿潤充填層の値( $H_t$ ; ●,  $H_S$ ; ▲)よりかなり小さい (Fig. 1参照)。一方、初期乾湿どちらの充填層の動的ホールドアップ( $H_d$ ; □, ■)も

原著論文: ISIJ Int. Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1466-1473

平成18年4月27日受付 平成18年6月5日受理 (Received on Apr. 27, 2006; Accepted on June 5, 2006; originally published in ISIJ Int. Vol 45, 2005, No. 10, pp. 1466-1473)

\* 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (Department of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565-0871)

\* 2 大阪大学大学院生 (現: (株) アルコア・クロージャー・システムズ) (Graduate Student of Osaka University, now Alcoa Closure Systems Japan, Ltd.)

\* 3 大阪大学大学院生 (現: (株) NTTドコモ) (Graduate Student of Osaka University, now NTT DoCoMo, Inc.)

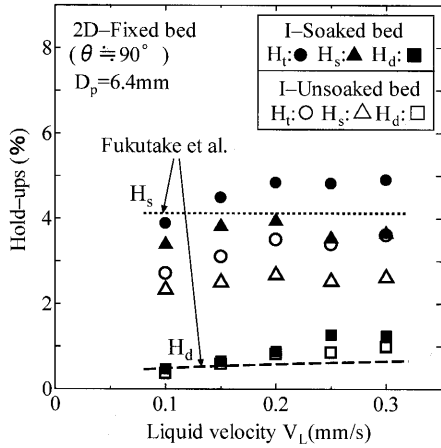


Fig. 1. Comparison between hold-ups estimated from Fukutake *et al.*'s Equation<sup>6)</sup> and present authors' ones<sup>10,11)</sup> (2D model).

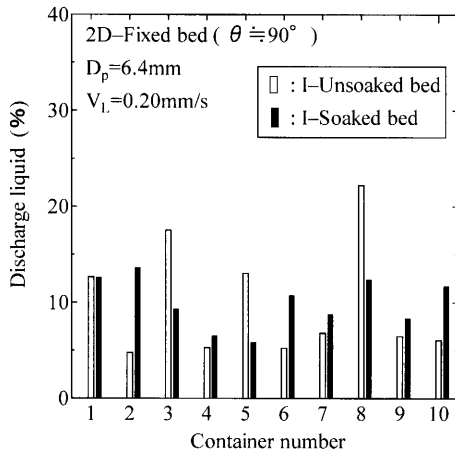


Fig. 2. Difference of liquid flow distributions through initially soaked and unsoaked fixed beds (2D model).

ほぼ同じ値である。初期湿潤充填層の $H_s$  ( $\blacktriangle$ )は、福武らの推算式<sup>6)</sup>とほぼ同じ値であり、かつ液速度（空塔液速度 $V_L$ ）に依存せずほぼ一定値を示す。ところが初期乾燥充填層の $H_s$  ( $\triangle$ )は推算値よりかなり低い値である。Fig. 2に示した幅方向の液流れ分布より、初期湿潤充填層の液流れ分布は比較的均一であるが、初期乾燥充填層のそれは不均一であることが分かる。

このように液流れ挙動および液ホールドアップに及ぼす充填層の初期乾湿状態の影響は大きい。ただし、使用した粒子径は、高炉下部のコークスサイズ(30~60mm)と比較して6.4mmと小さい。したがって、さらに大きな粒子を用いたモデル実験により、液流れ挙動に及ぼす充填層初期乾湿状態の影響を確かめる必要がある。著者らの2Dコールドモデルは奥行きが60mmであることから、6.4mmより大きな粒子の使用は壁面の影響がより強くなることから好ましくない。

本研究では、 $\phi 200\text{mm}$ と比較的大きな円筒充填容器に5種類大きさの球粒子5.4, 8.1, 10, 19と30mmを用いた1D固定層コールドモデル実験により、液ホールドアップおよび

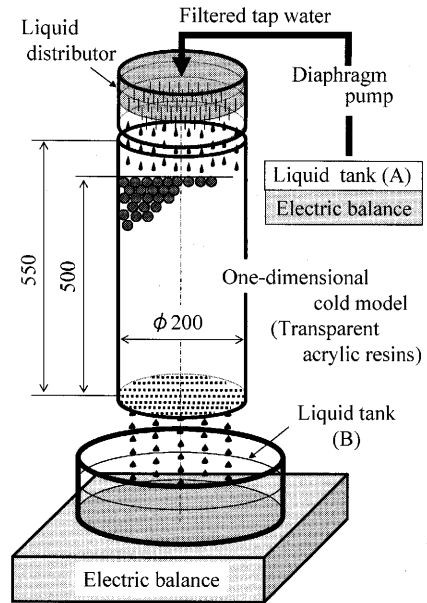


Fig. 3. Schematic layout of the one-dimensional cold model: dimensions in mm.

液流れ挙動の特性に及ぼす充填層初期乾湿状態の影響を詳細に調査した。液体にはフィルターを通した水道水を用い、また濡れ性の影響を調べるためにフッ素被覆した粒子と被覆していない粒子を用いた。それらの固液接触角 $\theta$ はそれぞれ $70^\circ$ と $10^\circ$ である。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

1Dコールドモデルの充填塔は、Fig. 3に示したように、内径200mm、高さ550mmの透明アクリルパイプ製である。粒子は底から500mmの高さまで充填した。空塔体積は $15700\text{cm}^3$ である。液流分布および液ホールドアップに及ぼす壁面の影響を小さくするために、内壁面はフッ素被覆した。使用した粒子は直径5.4, 8.1, 10mmのアルミナボールと直径19, 30mmのガラスボールである。本実験装置における空隙率 $\epsilon$ は、充填粒子径が5.4から30mmと大きくなるに伴って、0.36から0.42まで増加する。液ホールドアップに及ぼす固液の濡れ性の影響を調査するために、フッ素被覆した粒子と被覆していない粒子の両方を用いた。粒子と液体として用いた水との $\theta$ はフッ素被覆粒子に対して $70^\circ$ 、被覆していない粒子に対して $10^\circ$ である。なお、本研究では $\theta \approx 70^\circ$ の場合を濡れにくい系、 $\theta \approx 10^\circ$ の場合を濡れやすい系と呼ぶことにする。Fig. 3に示したように、液滴は、内径0.5mm、長さ30mmの注射針148本を持つ液分散器を用いて充填層上部から均一に分散した。フィルターを通した水道水を、液タンク(A)からダイヤフロムポンプにより液分散器に圧入した。液タンク(A)の水の質量減少量は電子天秤により連続測定した。充填層から排出される水の質量増加量も別の電子天秤により連続測定

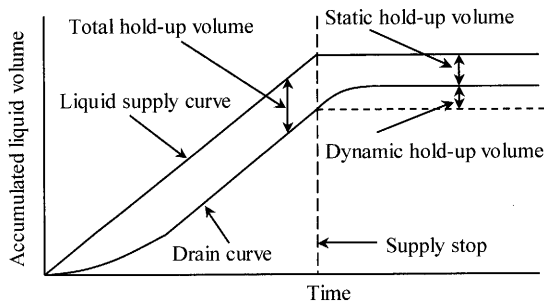


Fig. 4. Scheme of liquid supply curve, drain curve and hold-up volumes in fixed bed.

した。著者らは液分散器に摩擦抵抗の大きな細い注射針を使用しているため、液供給ポンプのスイッチを切ると同時に液分散器からの液の滴下は素早く止まり、液供給量は精度良く測定することができる。

2.2 液ホールドアップの定義と測定方法

2.2.1 初期乾燥充填層

液分散器から充填層層頂に均一滴下した水は、やがて充填層下部から液タンク(B)に排出される。液タンク(B)に排出された水の質量変化を連続測定した。ある時間経過すると、充填層からの排出液速度が一定になる。すなわち、充填層内の液流れが定常状態になり、液の供給速度と排出速度は同じになる。その約5min後に液分散器から層頂部への液の滴下を止め、充填層からの排出液量を液の排出が止まるまで連続測定した。液の供給曲線と排出曲線と3つの液ホールドアップ体積を模式的にFig. 4に示す。充填層内に存在する液体積は次のように分類される<sup>12)</sup>。

- (1) 全液体積 (充填層に液滴を供給し続けている時に充填層内に存在している全ての液体積、すなわち供給液量と排出液量との差)
- (2) 流動液体積 (充填層を流れている液体積、すなわち液滴の供給を止めた後、充填層から排出される液体積)
- (3) 静止液体積 (充填層内に留まっている液体積、すなわち粒子表面、粒子-粒子間の隙間、粒子-壁間の隙間に滞留している液体積)

これらの液体積を充填層の空塔体積で割った値を、それぞれ全ホールドアップ( $H_t$ )、動的ホールドアップ( $H_d$ )、静的ホールドアップ( $H_s$ )と定義し百分率で表した。なお、上記の方法で測定した静的ホールドアップ値には、粒子が充填されていない場合でも内壁面や充填容器底面に留まる液体量も含まれており、その値は充填塔の大きさに依存する。したがって、それらの液体量は測定値から減じるべきである。本実験装置でのその値は0.41%であるので、上記の測定値から0.41%を減じた値を $H_s$ と定義した。

これらの3つの液ホールドアップには次式の関係がある。

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

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

|                               | One-dimensional cold model   | Blast furnace                |                              |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                               | Fixed bed                    | Metal                        | Slag                         |
| $D_p$ (mm)                    | 5.4, 8.1, 10, 19, 30         | 30~60                        |                              |
| $\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1000                         | 6600                         | 2600                         |
| $V_G$ (m/s)                   | 0                            | 1.2~1.7                      |                              |
| $V_L$ (mm/s)                  | 0.07~0.35                    | 0.09~0.15                    |                              |
| $V_S$ (mm/s)                  | 0                            | 0.10~0.60                    |                              |
| $\mu_L$ (Pa·s)                | 0.0010                       | 0.005                        | 0.3                          |
| $\sigma_L$ (N/m)              | 0.072                        | 1.1                          | 0.48                         |
| $\theta$ (deg)                | 10°, 70°                     | 125°                         | 105°                         |
| $Re_L$ (-)                    | 0.38~11                      | 3.6~12                       | 0.023~0.078                  |
| $Ga_L$ (-)                    | $(1.5\sim260)\times 10^6$    | $(460\sim3700)\times 10^6$   | $(0.02\sim0.16)\times 10^6$  |
| $Cp_L$ (-)                    | 4.0~120                      | 50~200                       | 48~190                       |
| $We_L$ (-)                    | $(0.37\sim51)\times 10^{-6}$ | $(1.5\sim8.1)\times 10^{-6}$ | $(1.3\sim7.3)\times 10^{-6}$ |
| $Fr_G$ (-)                    | 0                            | 2.4~9.8                      |                              |
| $Fr_L$ (-)                    | $(1.7\sim230)\times 10^{-8}$ | $(1.4\sim7.7)\times 10^{-8}$ |                              |

Note  $D_p$ : diameter of packed particle,  $V_G, V_L, V_S$ : superficial velocity based on empty column for gas, liquid, and solid, respectively,  $\theta$ : contact angle,  $\mu_L$ : viscosity coefficient of liquid,  $\rho_L$ : liquid density,  $\sigma_L$ : surface tension,  $Re_L = V_L \cdot D_p \cdot \rho_L / \mu_L$ ,  $Ga_L = g \cdot D_p^3 \cdot \rho_L^2 / \mu_L^2$ ,  $Cp_L = \rho_L \cdot g \cdot D_p^2 / \sigma_L$ ,  $We_L = \rho_L \cdot V_L^2 \cdot D_p / \sigma_L$ ,  $Fr_G = V_G^2 / (g \cdot D_p)$

2.2.2 初期湿潤充填層

液の滴下実験を始める前に、充填層空塔体積の半分の水を層頂から充填層に素早く供給し、充填層全体を水で予め十分濡らした。この場合、供給液量と充填層下部からの排出液量を測定することにより、予め充填層内に滞留している液量を計算した。その後、初期乾燥充填層の場合と同様に、液分散器から充填層層頂に液滴を滴下し実験を開始した。供給液量、排出液量、滞留液量の測定方法は初期乾燥充填層の場合と同様であり、液ホールドアップの測定方法も同様である。

2.3 実験条件

本実験条件および日本の高炉操業<sup>13)</sup>に基づいた種々の条件と無次元数の比較をTable 1に示す。

コールドモデルにおいて、種々の無次元数を高炉の無次元数と合わせることが望ましいが、それらを同時に満足させるのは非常に困難である。したがって、本研究では液ホールドアップがフルード数 $Fr_L$ の影響を強く受ける<sup>14)</sup>ことから、 $Fr_L$ を高炉条件を含む広い範囲に設定し実験を行った。

3. 結果と考察

3.1 濡れにくい系( $\theta=70^\circ$ )における液ホールドアップに及ぼす充填層初期乾湿状態の影響

Fig. 5~9は液ホールドアップに及ぼす初期湿潤充填層(Initially soaked bed)と初期乾燥充填層(Initially unsoaked bed)の影響を、充填粒子径( $D_p$ ) 5.4, 8.1, 10, 19, 30 mmの5種類それぞれに対して示している。濡れにくい系( $\theta=70^\circ$ )の場合、小さな充填粒子径に対して、初期乾燥充填層における全ホールドアップ $H_t$  (○)と静的ホールドアップ $H_s$  (△)は

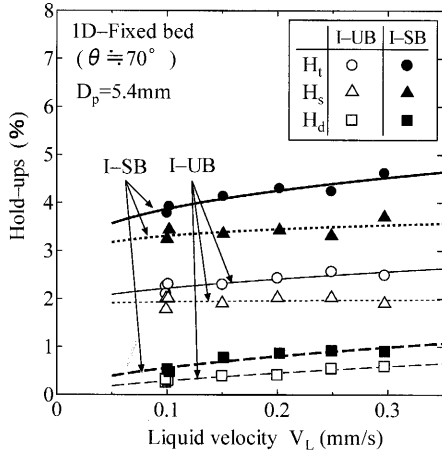


Fig. 5. Influence of initial conditions with unsoaked (I-UB) and soaked beds (I-SB) on hold-ups under bad wettability ( $D_p = 5.4 \text{ mm}$ ).

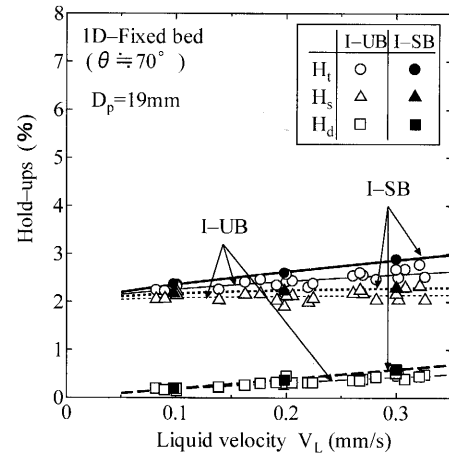


Fig. 8. Influence of initial conditions with unsoaked (I-UB) and soaked beds (I-SB) on hold-ups under bad wettability ( $D_p = 19 \text{ mm}$ ).

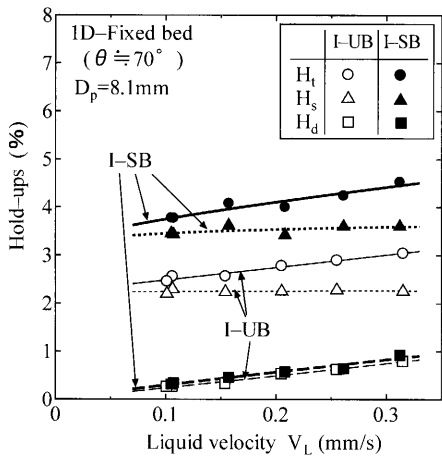


Fig. 6. Influence of initial conditions with unsoaked (I-UB) and soaked beds (I-SB) on hold-ups under bad wettability ( $D_p = 8.1 \text{ mm}$ ).

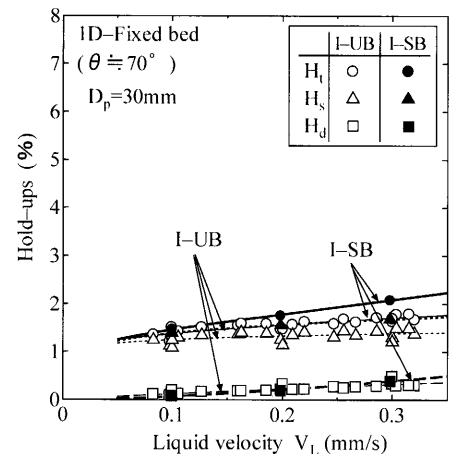


Fig. 9. Influence of initial conditions with unsoaked (I-UB) and soaked beds (I-SB) on hold-ups under bad wettability ( $D_p = 30 \text{ mm}$ ).

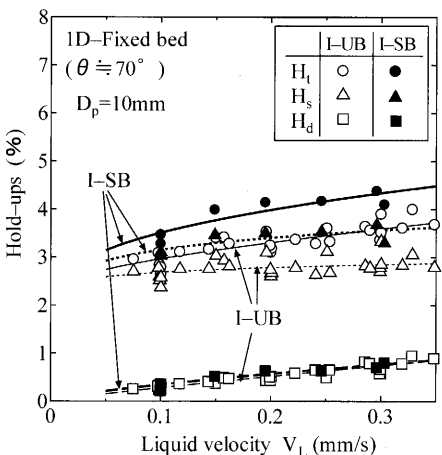


Fig. 7. Influence of initial conditions with unsoaked (I-UB) and soaked beds (I-SB) on hold-ups under bad wettability ( $D_p = 10 \text{ mm}$ ).

初期湿潤充填層の値(●, ▲)<sup>7,10</sup>よりもかなり小さい。粒子径の増加とともに充填層初期乾湿状態における各ホールドアップの差は小さくなり、 $D_p$ が19 mm以上では、初期乾

燥充填層の  $H_t$  (○)と  $H_s$  (△)は初期湿潤充填層の値の約80~90%になる。充填粒子径が高炉滴下帯における大きさ40, 50 mmにまで大きくなった場合、著者らの初期乾燥充填層における液ホールドアップの推算式<sup>15)</sup>から、初期乾燥充填層の  $H_t$ と  $H_s$ は初期湿潤充填層の値の約90%であると見積もられる。一方、動的ホールドアップ  $H_d$ に関しては、初期乾湿状態の影響はほとんど無くほぼ同程度の値である。

このように充填層初期乾湿状態により  $H_t$ と  $H_s$ に差がでた主な原因は、充填層内を流下する液滴や細流のチャネリングフローであると考えられる。すなわち、初期乾燥充填層内における不連続液流れの場合、液滴や細流は局所的に空隙率の高い同じ経路を流下しやすい<sup>10)</sup>ので、液は限られた流路を繰り返し優先的に流下する<sup>7)</sup>。Husslageら<sup>8)</sup>も「一度充填層内に液の流れる経路が形成されると、新たな流路を形成するよりも一度濡れた場所を流下する方がエネルギー的に優位であることから、その次の液もまた同じ経路を流れやすい。したがって、多くの充填粒子は濡れない

ままである。」と報告している。したがって、小さな粒子を充填した初期乾燥充填層においては、液滴や細流と接触する粒子の有効接触面積は初期湿潤充填層の有効接触面積よりもかなり小さくなる。

### 3.2 初期乾燥充填層における液ホールドアップに及ぼす接触角の影響

Fig.10~14は、初期乾燥充填層における液ホールドアップに及ぼす接触角( $\theta$ )の影響を $D_p=5.4, 8.1, 10, 19, 30$  mmそれぞれに対して示している。フッ素被覆した粒子と水との $\theta$ は $70^\circ$ 、フッ素被覆していない場合の $\theta$ は $10^\circ$ である。濡れにくい系( $70^\circ$ )の $H_t$  (○)と $H_s$  (△)は濡れやすい系( $10^\circ$ )の値(●, ▲)よりもかなり高い。一方、濡れにくい系および濡れやすい系の $H_d$ はほぼ同じ値である。

濡れやすい系の液滴は固体表面上に広がりやすいので、一般的には液滴と固体との有効接触面積は増加する<sup>6)</sup>。しかしながら、層頂から均一に分散滴下した液滴が充填層内ではあまり広がらずに、液滴や細流としてごく少ない特定の流路を流下する。その液滴や細流は、お互いの表面張力により合流したり、液膜や液滴に引っ張られながら一度形

成した同じ流路を流下しやすい。したがって、初期乾燥充填層の濡れやすい系の場合、液流れはごく少ない流路を形成し流下する(後掲 3.3 液流れ挙動の可視化 参照)。

このように、初期乾燥充填層における固液の接触角は液

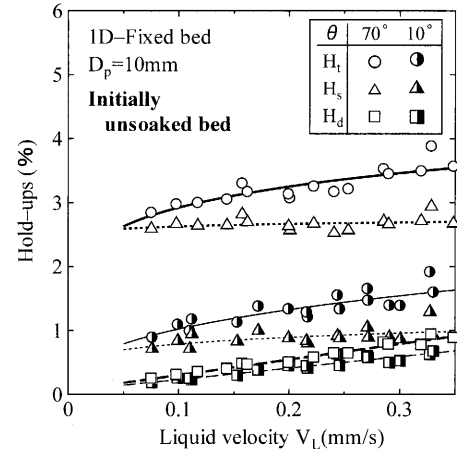


Fig. 12. Effect of contact angle on hold-ups for initially unsoaked bed ( $D_p=10$  mm).

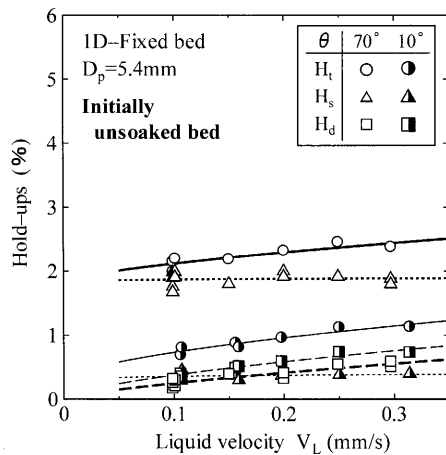


Fig. 10. Effect of contact angle on hold-ups for initially unsoaked bed ( $D_p=5.4$  mm).

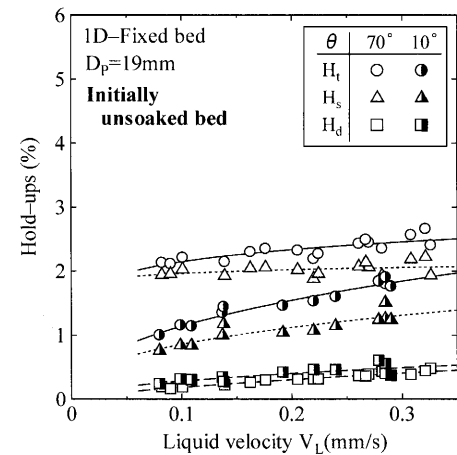


Fig. 13. Effect of contact angle on hold-ups for initially unsoaked bed ( $D_p=19$  mm).

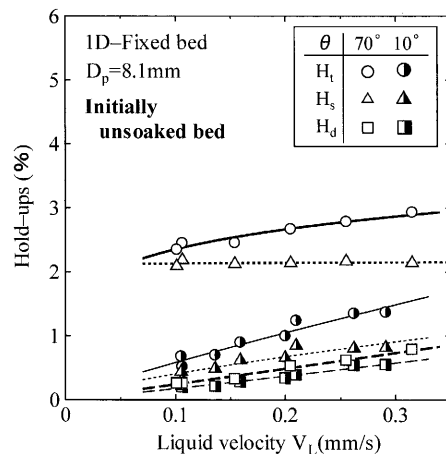


Fig. 11. Effect of contact angle on hold-ups for initially unsoaked bed ( $D_p=8.1$  mm).

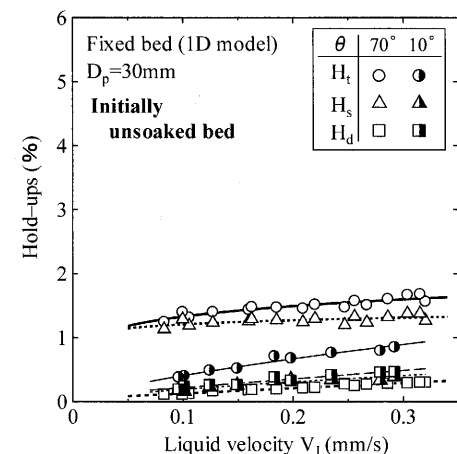


Fig. 14. Effect of contact angle on hold-ups for initially unsoaked bed ( $D_p=30$  mm).

ホールドアップに大きく影響する。この原因もまたチャネリングフローであり、特に濡れやすい系の場合、液滴や細流は一度通った同じ流路を流下しやすい<sup>10)</sup>。Liら<sup>16)</sup>も「小粒子充填層で親水系の場合、吸引力のある毛管力の増加により液流れは簡単に合流する。したがって、チャネリングフローが形成されやすい。」と報告している。したがって、濡れやすい系の場合、液滴や細流と粒子の有効接触面積は濡れにくい系の有効接触面積と比較して小さくなる。

### 3.3 液流れ挙動の可視化

充填層内のチャネリング現象あるいは液流れ挙動の調査のために可視化手法を用いた。可視化モデルの充填容器は、透明アクリル製で幅200 mm、奥行き50 mm、高さ200 mmの直方体容器であり、粒子を170 mmの高さまで充填した。可視化モデルの液分散器は内径0.5 mm、長さ30 mmの注射針179本で構成されており、その液分散器から充填層層頂に液滴を均一分散した。液滴や細流の流れを可視化しやすくするために、液体には赤インクで着色した水道水を用いた。液流れ挙動や液流路はCCDビデオカメラを用いて充填層前面から連続撮影した。また、デジタルカメラも併用した。粒子と液体との $\theta$ はフッ素被覆した粒子の場合が $65^\circ$ で、フッ素被覆していない場合が $5^\circ$ である。インクは表面活性剤であることから、液ホールドアップの測定に用いた水道水と比較して僅かに低い $\theta$ である。

濡れにくい系( $\theta=65^\circ$ )において、 $D_p=5.4$  mmの粒子充填層内液流れ挙動に及ぼす充填層初期乾湿状態の影響を比較した可視化写真をFig.15に示す(カラー写真を白黒変換している)。ピンク色の液滴や細流は灰色から黒く見え、白っぽく丸いのが充填粒子)。空塔液速度( $V_L$ )は0.1 mm/sである。また、部分拡大写真も図中の右下に示した。初期乾燥・湿潤両方の充填層とも、特定の液滴や細流流れが形成されていることが分かる。ただし、初期湿潤充填層(Fig.15(a))の液滴や細流は、初期乾燥充填層の場合(Fig.15(b))と比較して粒子間の空隙や粒子表面により幅広く濡れて広がっている。また、初期湿潤充填層においては、液流れが活発でない場所においても小さな液滴や液膜が粒子間の空隙や粒子表面に広がっている(小さな液滴や液膜の色が薄いので見難い)。ところが、初期乾燥小粒子充填層の場合、液滴や細流が流れている場所を除いてほとんど液と粒子の接触はない。このように、小粒子充填層における液流れ挙動は、充填層初期乾湿状態の影響を強く受ける。さらに、Husslage<sup>17)</sup>は、ホットモデル実験(コークスサイズ4~10 mm、温度1450~1600°C)から「熔融スラグおよび溶銑は、充填層全体に広がらずにごく限られた流路を細流として流下する。」と報告している。したがって、高炉滴下帯のように $\theta=105$ や $125^\circ$ においても、制限された特定の流路すなわちチャネリングフローが形成されると考えられる。

Fig.16は $D_p=10$  mmの粒子を充填した初期乾燥充填層内

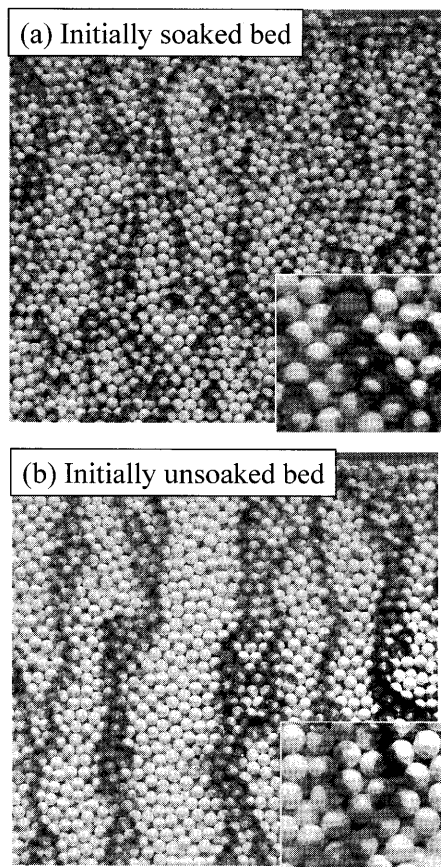


Fig. 15. Visualization of liquid paths in packed bed with bad wettability ( $\theta=65^\circ$ ,  $D_p=5$  mm).

液流れ挙動に及ぼす濡れ性の影響を示している。Fig.16(a)は濡れやすい系( $\theta=5^\circ$ )で、Fig.16(b)は濡れにくい系( $\theta=65^\circ$ )の結果である。いずれも $V_L=0.1$  mm/sである。Fig.16(a)から、濡れやすい系の場合、充填層層頂から均一分散した液滴は表層から3、4層下で既に発達した液流れとなり、特定の流路を液が流れるチャネリングフローが形成されていることが分かる。一方、濡れにくい系の場合(Fig.16(b))、液滴は充填層内ほぼ全域に均一分散して流れていることが分かる。初期乾燥充填層においては、濡れにくい系の液と充填粒子との有効接触面積は濡れやすい系の有効接触面積より遙かに大きい。一般的に、濡れやすい系の場合、固体表面上に液滴が広がりやすいので、全ホールドアップと静的ホールドアップは $\theta$ の減少に伴って増加する<sup>6)</sup>と考えられる。しかしながら、上述した液流れ挙動から分かるように、初期乾燥充填層においては $\theta$ が減少すると層頂から均一分散した液滴は特定の流路を形成し<sup>15,16)</sup>有効接触面積が減少するので、全ホールドアップと静的ホールドアップも減少することが明らかである。

### 3.4 液ホールドアップに及ぼす粒子径の影響

Fig.17と18は、濡れにくい系( $\theta=70^\circ$ )における液ホールドアップと $D_p$ の関係を初期湿潤充填層および初期乾燥充填層の場合それぞれについてまとめた(液速度は $V_L=0.1, 0.2, 0.3$  mm/sの3条件)結果である。初期湿潤充填層にお

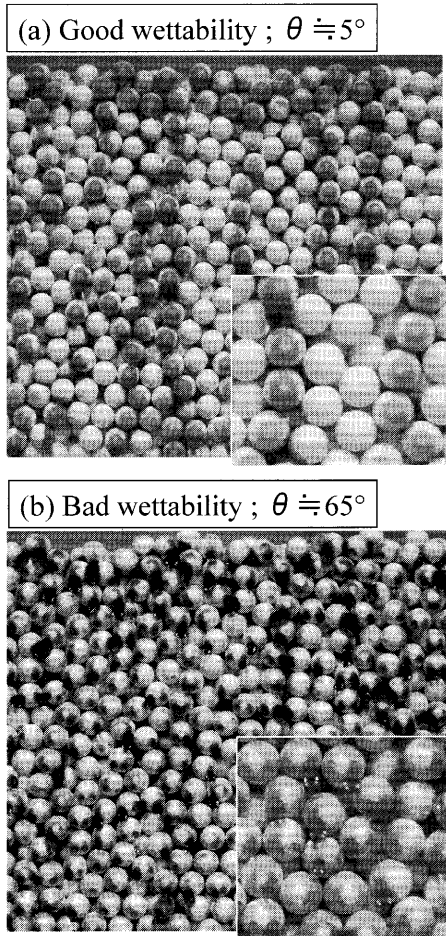


Fig. 16. Visualization of liquid paths for initially unsoaked bed ( $D_p = 10$  mm).

いては、 $H_t$ 、 $H_s$ および $H_d$ は、 $D_p$ の減少すなわち固体の比表面積の増加とともに単調に増加する。一方、初期乾燥充填層においては、 $H_t$ 、 $H_s$ および $H_d$ は $D_p = 10$  mmで最大値を持つ。すなわち、 $D_p$ が30 mmから減少するとともに $H_t$ 、 $H_s$ および $H_d$ は増加し10 mm付近で最大値を取るが、 $D_p$ がさらに減少すると比表面積がさらに増加するにも関わらず $H_t$ や $H_s$ が減少する特異な現象を示す。Fig.15から分かるように、初期乾燥充填層において小さな粒子の充填層の場合、液滴や細流は一度通った場所を優先的に流れ<sup>8,10)</sup>、特定の流路を通過する液流れすなわちチャネリングフローが形成される<sup>15,16)</sup>。しがたって、初期乾燥充填層において $D_p$ が減少すると液滴や細流と粒子が接触する有効接触面積が減少することにより、 $H_t$ や $H_s$ も減少する。

このように、液流れ挙動に及ぼす充填層初期乾燥・湿潤状態の影響は大きい。初期乾燥充填層における液ホールドアップは既存の推算式から導出した値とは一致しない。したがって、チャネリング現象および液流れ挙動に及ぼす種々のファクターの影響を調査し、初期乾燥充填層における液ホールドアップの推算式を導出しなければならない。

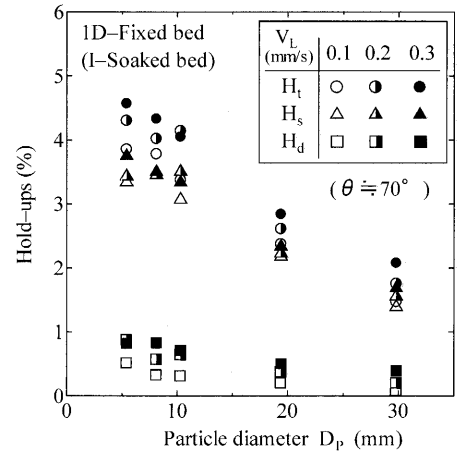


Fig. 17. Relation between hold-ups and particle diameter in initially soaked bed with bad wettability.

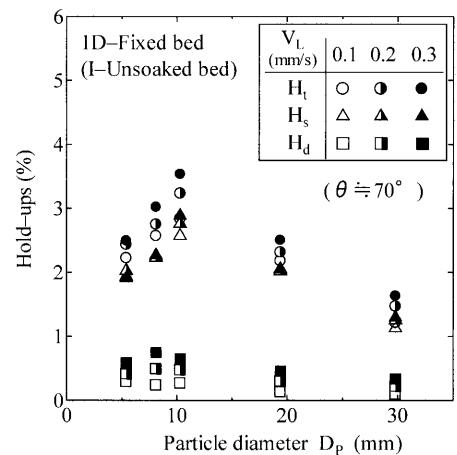


Fig. 18. Relation between hold-ups and particle diameter in initially unsoaked bed with bad wettability.

#### 4. 結論

液ホールドアップおよび液流れ特性に及ぼす充填層初期乾湿状態の影響ならびに濡れ性の影響について、直径200 mm×高さ550 mmの比較的大きな充填塔、 $\phi 5.4$  mm~30 mmの範囲の5種類の充填球粒子、粒子と液の接触角 $70^\circ$ と $10^\circ$ の条件において、詳細に調査した結果、次の結論が得られた。

(1) 濡れにくい系( $\theta \cong 70^\circ$ )の初期乾燥充填層における全ホールドアップと静的ホールドアップは粒子径が10 mm付近で最大値を示し、粒子径の減少すなわち比表面積の増加にも関わらず急激に減少する。

(2) 充填粒子径が10 mmより小さな場合、初期乾燥充填層の全ホールドアップと静的ホールドアップは、初期湿潤充填層の値よりかなり小さい。

(3) 濡れにくい系( $\theta \cong 70^\circ$ )の初期乾燥充填層における全ホールドアップと静的ホールドアップは、粒子径の大きさに関わらず濡れやすい系( $\theta \cong 10^\circ$ )の値よりかなり大きい。

(4) 濡れにくい系で初期乾燥小粒子充填層における液滴や細流と粒子との有効接触面積は、初期湿潤充填層の値よりも小さい。

(5) 初期乾燥充填層の濡れやすい系の場合、液滴が固体表面を広がりやすいにも関わらず液滴や細流はごく限られた特定の流路を流下する。すなわちごく特定のチャネリングフローを形成する。

### 文 献

- 1) J.Yagi: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 619.
- 2) T.K.Sherwood, G.H.Shipley and F.A.L.Holloway: *Ind. Eng. Chem.*, **30** (1938), 765.
- 3) A.Mersmann: *Chem. Inf.-Techno.*, **37** (1965), 218.
- 4) M.Herskowitz and J.M.Smith: *AIChE J.*, **24** (1978), 439.
- 5) S.P.Zimmerman and K.M.Ng: *Chem. Eng. Sci.*, **41** (1986), 861.
- 6) T.Fukutake and V.Rajakumar: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1937.
- 7) G.S.Gupta and S.Bhattacharyya: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1927.
- 8) W.M.Husslage, T.Bakker, A.G.S.Steeghs, R.H.Heerema and M.A.Reuter: World Conf. on Chem. Eng. 2001, Melbourne, (Sep. 2001), 1643 (CD-ROM).
- 9) T.Usui, K.Masamori, H.Kawabata and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 687.
- 10) T.Usui, H.Kawabata and F.Fujita: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 792.
- 11) T.Usui, H.Kawabata, T.Sogo, S.Morii, M.Ichida and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 899.
- 12) H.L.Shulman, C.F.Ullrich and N.Walls: *AIChE J.*, **1** (1955), 247.
- 13) M.Naito: Private communication, (2003).
- 14) A.Alidilar, A.Bicer and A.Murathan: *Chem. Eng. Commun.*, **128** (1994), 95.
- 15) H.Kawabata, K.Shinmyou, T.Harada and T.Usui: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1474.
- 16) M.Li, Y.Bando, T.Tsuge, K.Yasuda and M.Nakamura: *Chem. Eng. Sci.*, **56** (2001), 5969.
- 17) W.M.Husslage: Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, (2004).