

初期乾燥充填層における液ホールドアップに及ぼす チャネリングファクターの影響 —初期乾燥充填層における液ホールドアップの推算式—

川端 弘俊*・新名 和也*²・原田 武士*³・碓井 建夫*

Influence of Channeling Factor on Liquid Hold-ups in an Initially Unsoaked Bed

Hiroto KAWABATA, Kazuya SHINMYOU, Takeshi HARADA and Tateo USUI

Synopsis : One of the important factors for minimum energy consumption and CO₂ emission of a blast furnace (BF) is to elucidate the liquid flow phenomena and liquid hold-ups in the dripping zone of BF. Liquid hold-ups were studied by using a cold model of a fixed bed soaked prior to experiments (hereinafter called initially soaked bed), but the existing correlation equations derived from liquid hold-ups under initially soaked bed do not agree with liquid hold-ups under initially unsoaked bed such as the dripping zone of BF.

In the present study, correlation equations for liquid hold-ups in initially unsoaked bed were experimentally derived by a new approach, in which channeling factor (F_C) was proposed and defined as follows: F_C is the ratio of the number of liquid paths per one horizontal line to the number of voids between particles per the same horizontal line, and was measured by using the moving image of liquid paths photographed by a CCD video camera.

By using empirical equation for F_C , hold-ups in initially unsoaked bed were described as the following correlation equations.

$$\text{Static hold-up } H_{S(I-UB)} (\%) = 0.9 \cdot H_{S(I-SB)} \cdot F_C^{0.8} \cdot N_{c_m}^{-1}$$

$$\text{Dynamic hold-up } H_{d(I-UB)} (\%) = 0.9 \cdot H_{d(I-SB)} \cdot F_C^{0.5}$$

$$\text{Total hold-up is the sum of } H_S \text{ and } H_d \quad H_t (\%) = H_S + H_d$$

where, $N_{c_m} = 1 + (\cos \theta)^3$, and subscripts I-SB and I-UB designate quantities associated with initially soaked and unsoaked beds, respectively.

The comparison with the previous liquid hold-ups shows that the estimated hold-ups are in good agreement with the experimental values for any particle diameters used and both contact angles of 10° and 70° under initially unsoaked bed.

Key words : channeling factor; empirical equation; initially unsoaked bed; liquid hold-up; liquid path; blast furnace.

1. 緒言

エネルギー使用・CO₂排出極少化の革新高炉開発を目指して多くの研究が行われている。高炉滴下帯における液流れ現象や液ホールドアップの解明もそれらの開発には欠かせない重要な要素研究の一つである。

これまで液ホールドアップに関する多くの実験・研究は、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¹⁻⁵⁾に基づいて行われてきた。しかしながら、高炉滴下帯では充填物が十分濡れた状態でないことから実験前の充填層が乾燥している初期乾燥充填層 (Initially unsoaked bed) を用いて実験を行うべきであり、初期乾燥充填層における

液ホールドアップ⁶⁻¹⁰⁾は初期湿潤充填層の値と異なることも判明されつつある。また著者ら^{8,10)}が1次元コールドモデル (1Dモデル) を用いて行った実験結果から、以下のようなことが判明した。濡れにくい系の初期湿潤充填層においては、全ホールドアップ、静的ホールドアップ、動的ホールドアップは充填粒子径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。また、初期湿潤充填層の液ホールドアップの測定値は液ホールドアップの推算式、例えばFukutakeとRajakumar³⁾の式から計算した値と一致する。一方、濡れにくい系の初期乾燥充填層においては、全ホールドアップと静的ホールドアップは粒子径の減少とともに増加し、粒子径が10mm付近で最大値を取る。さらに粒子径が減少すると比表面積がさらに増加するにも関わ

原著論文: ISIJ Int., Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1474-1481

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. 1474-1481)

* 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) 豊田自動織機) (Graduate Student of Osaka University, now Toyota Industries Corporation)

* 3 大阪大学大学院生 (現: 新日本製鐵 (株)) (Graduate Student of Osaka University, now Nippon Steel Corp.)

らず全ホールドアップと静的ホールドアップが急激に減少する特異な現象を示す。このように濡れにくい系の液ホールドアップに及ぼす充填層初期乾湿状態の影響は非常に大きく、また、既存の液ホールドアップの推算式³⁾では初期乾燥充填層の液ホールドアップ値を推算できない。

本研究では、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するために、充填層内液流れ挙動に関する詳細な可視化実験結果からチャネリングファクター(F_c : 液流れの偏流度合すなわち液滴と粒子との接触効率に関する因子)を提案し、かつ F_c をCCDビデオカメラを用いた可視化実験により求めた。その F_c と初期乾燥充填層における多くの液ホールドアップデータを用いて回帰解析により液ホールドアップの推算式を導出した。

2. 実験

2.1 初期乾燥充填層における液流路の可視化

初期乾燥充填層における F_c を実験的に導出する目的、および液流れ挙動を詳細に調査するために可視化方法を用いた。可視化実験に用いた充填容器は、Fig. 1に示したように内寸法が幅400mm、奥行き100mm、高さ400mmの直方体で、透明アクリル製の2次元可視化コールドモデル(2D可視化モデル)である。粒子は175mmの高さまで充填した。液体は、ダイヤフラムポンプを用いて内径0.5mm、長さ25mmの注射針773本を持つ液分散器に圧入し、充填層層頂から均一に滴下した。液体には、液流路を見やすくするために赤インクで着色した水道水を用いた。液流れ挙動と液流路は充填層前面からCCDビデオカメラで連続撮影した。またデジタルカメラも併用した。

液流れ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

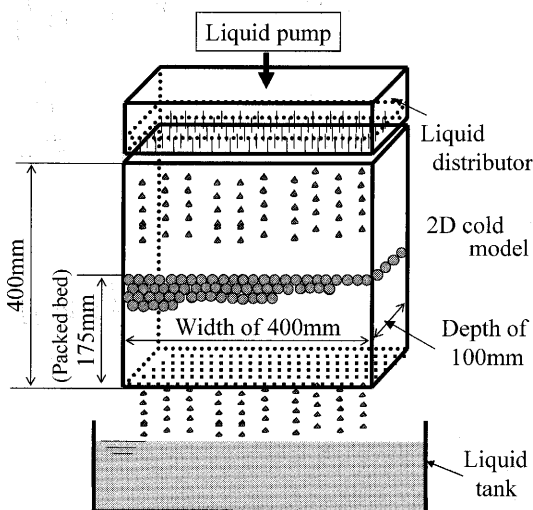


Fig. 1. Schematic layout of the two-dimensional model for visualization of liquid flow behavior and measurement of channeling factor (transparent acrylic resins).

充填粒子の大きさは6種類で、直径(D_p) 2.8, 5.0, 8.1, 10.3, 15.1と19.4mmのアルミナ球である。固液接触角(θ)は、フッ素被覆した粒子を用いた濡れにくい系が 65° であり、フッ素被覆していない粒子を用いた濡れやすい系が 5° である。Table 1に示したように、これらの粒子を2D可視化モデルに充填した時の空隙率(ϵ)は、 D_p が2.8から19.4mmへと大きくなるとともに $\epsilon=0.35(-)$ から0.40まで増加する。また平均空隙直径($d_v=[\epsilon/(1-\epsilon)]^{1/3} \cdot D_p$)も2.3から16.9mmへと大きくなる。

2.2 チャネリングファクターの定義と測定方法

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くために提案したチャネリングファクター(F_c)は次のように定義した。 F_c は、充填層の一つの水平断面上に形成される液流路(液滴や細流流れ)の本数と同じ水平断面上における粒子-粒子間の隙間の数との比(Fig. 2参照)であり、液と接触する有効粒子割合を意味する。 F_c の測定方法は有効接触面積の直接測定と比較して非常に簡単である。Fig. 2に示したように、充填層を水平に4分割した3つの水平線A, B, Cにおいて、液流路の本数と粒子間の空隙の数(ほぼ粒子数と同じ)を測定した(カラー写真を白黒変換しているため、ピンク色の液滴や細流は灰色から黒く見え、白っぽく丸いのが球形の充填粒子である)。3つの水平ライン上における F_c の平均値を F_c 値(≤ 1)と定義した。

初期乾燥充填層における F_c を測定するために、液の滴下開始と同時にCCDビデオカメラで充填層の液流れ挙動を2D可視化モデル前面から10min間連続撮影した。また、静止画像もデジタルカメラで撮影した。実際の F_c 測定は、CCDビデオカメラで撮影した動画をパーソナルコンピュータの画面上で4倍速に再生し、液の滴下開始から5min後すなわち充填層内の液流れが定常状態に到達した後から10minまでの5min間に液滴や細流が通過するか否かを(繰り返し同じ所を液が流下しても1本、一度でも流下すれば1本)、充填層を水平に4分割した3つの水平線上において計数した。測定制度を向上させるために、その計数

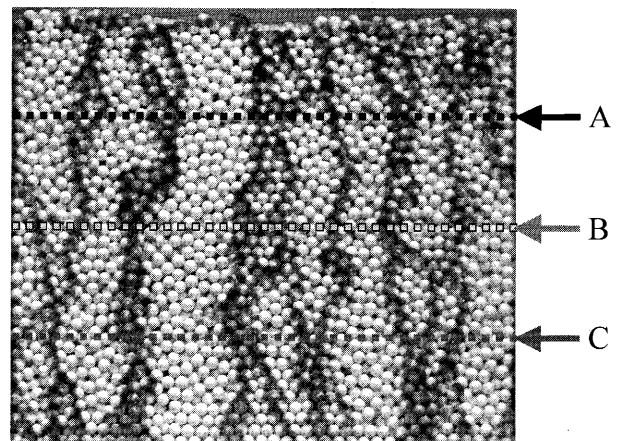


Fig. 2. Measurement method of channeling factor.

を2, 3回繰り返して、3つの水平線上での計数值の平均値を F_C 値とした。

3. 結果

3.1 初期乾燥充填層における液流れ挙動の可視化

Fig. 3は、初期乾燥充填層において、濡れにくい系($\theta \approx 65^\circ$)の $D_p=2.8, 5.0, 10.3$ と 15.1 mm球充填層における可視化写真の一例を示している。なお、空塔液速度(V_L)は 0.1 mm/s一定である。Fig. 3より、 $D_p=2.8$ と 5.0 mmの充填層内において、充填層頂部より均一分散した液滴が特定の液流路や細流を形成しており^{7,10}、 $D_p=2.8$ では3, 4本、 $D_p=5.0$ mmでは10本程度の流路が確認できる。一方、 $D_p=10.3$ と 15.1 mmの充填層では、液滴や細流は充填層全体に渡り粒子間や粒子表面上にほぼ均一に分散している。

Fig. 4は、初期乾燥充填層の濡れやすい系($\theta \approx 5^\circ$)における可視化写真の一例である。 $D_p=5.0, 10.3, 15.1$ と 19.4 mmであり、 $V_L=0.1$ mm/s一定である。濡れやすい系の充填層上部においては、液滴が充填粒子と十分濡れており、粒子間や粒子表面上によく広がっているのが分かる。充填層内における $D_p=5.0$ mmの液流路は3, 4本、 $D_p=10.3$ mmは7本程度であり、初期乾燥充填層における液流路の数より少ない。さらに、 $D_p=15.1$ あるいは 19.4 mmと充填粒子が大きくなっても、液滴や細流は特定の流路を形成しながら流下し、充填層全体に広がっていないことがよく分かる。

濡れる系では液滴は粒子表面に広がりやすいにも関わらず、初期乾燥充填層の層頂から充填層に均一分散した液滴は、充填層全体には広がらずに局所的な流路を形成しながら流下している。Liら^{11,12}も「親水系の小粒子充填層の場合、毛細管力の増加により液流れは簡単に合流し、チャネリングフローが形成される。」と報告している。このよう

に、初期乾燥充填層の液流れ挙動に及ぼす濡れ性の影響は非常に大きい^{8,10}。

3.2 初期乾燥充填層における F_C に及ぼす濡れ性の影響

通常、容器径が粒子径より十分大きくない場合、壁面近傍の空隙率 ε は充填層内部の ε より大きいので、液流れが壁面近傍に集中し液流分布は不均一になる(いわゆる壁効果)。本実験装置において F_C に及ぼす壁効果の影響を調べるために、充填層を支えるために設置した底板に開けた全ての穴(幅方向に33ヶ所×奥行き方向に10ヶ所の穴)から液滴が滴下するか否かを観察し、奥行き方向の滴下分布を滴下する穴の数と全ての穴の数との割合として求めた。滴下穴の割合(Dripping hole rate)とは、横方向の穴の数33に対する液が滴下している穴の数の割合である。縦の列はNo. 1からNo. 10まで10ヶ所奥行き方向に並んでいる。滴

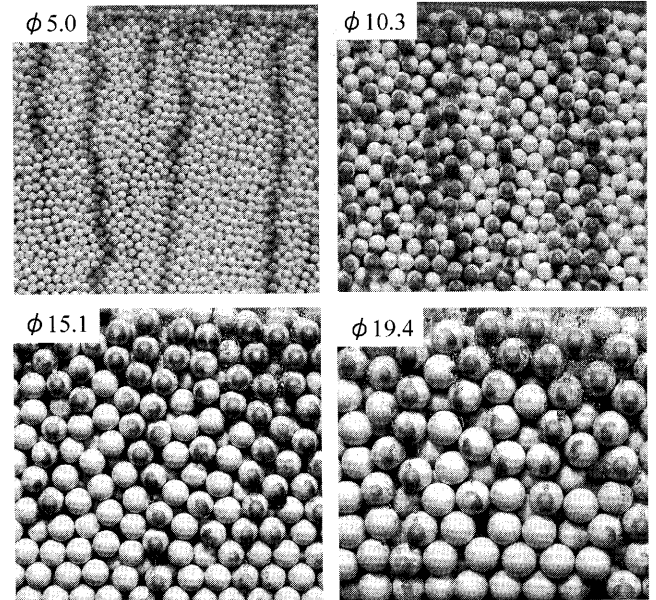


Fig. 4. Visualization of liquid flow behavior under initially unsoaked bed with good wettability ($\theta \approx 5^\circ$).

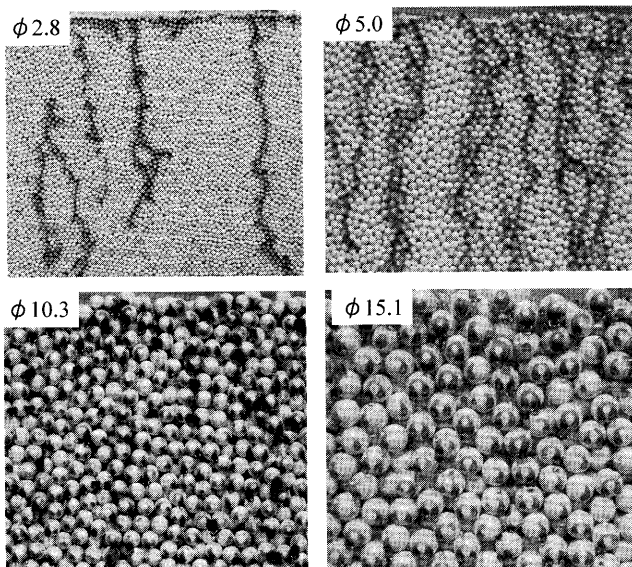


Fig. 3. Visualization of liquid flow behavior under initially unsoaked bed with bad wettability ($\theta \approx 65^\circ$).

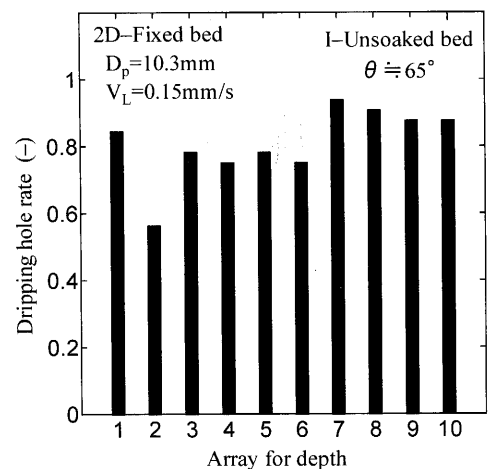


Fig. 5. Influence of wall surface on liquid dripping distribution (1: front side, 10: back side). Where, dripping hole rate is the ratio of the number of dripping holes to the number of all holes for an array in the width direction.

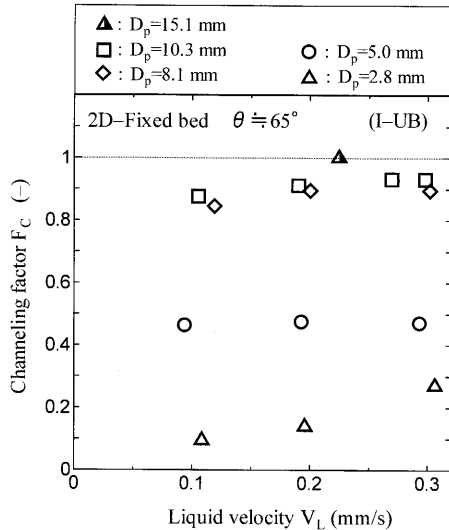


Fig. 6. Effect of liquid velocity on channeling factor under initially unsoaked bed with bad wettability ($\theta = 65^\circ$).

下穴の割合の奥行き方向分布を示したのが Fig. 5 である。列 No. 1 と No. 10 が前面と後面の壁近傍である。Fig. 5 に示したように ($D_p = 10.3 \text{ mm}$, $\theta = 65^\circ$, $V_L = 0.15 \text{ mm/s}$ の条件), 充填層下部からの液の滴下分布は前面から後面までほぼ一定であることから, 本実験装置では F_C に及ぼす壁効果の影響はほとんど無いと言える。他の粒子径の場合も壁効果の影響はほとんど無かった。したがって, 本実験装置のように比較的大きな充填容器では F_C に及ぼす壁効果の影響はほとんど無視できると考えられる。一方, $\theta = 5^\circ$ の場合, F_C 測定値のバラツキが大きく壁効果の影響は判別できなかった。

$\theta = 65^\circ$ における F_C に及ぼす V_L の影響を Fig. 6 に示す。 F_C は, D_p が 2.8 から 15.1 mm へと大きくなるとともに, 約 0.1 から 1.0 に増加する。また, $D_p = 2.8 \text{ mm}$ の場合を除いて V_L の影響はほとんど無い。 $D_p = 5.0 \text{ mm}$ の F_C は約 0.5, $D_p = 8.1$ あるいは 10.3 mm でほぼ 0.9, そして $D_p = 15.1 \text{ mm}$ での F_C は 1.0 の値である。

Fig. 7 は $\theta = 5^\circ$ の場合の F_C に及ぼす V_L の影響を示している。それぞれの F_C 値は数回実験を行った平均値であるが F_C に及ぼす V_L の影響は明らかではない。 F_C の実験式の導出過程での解析を簡単化するために, 本研究の実験範囲では F_C に及ぼす V_L の影響は無いと仮定して, それぞれの V_L における平均値を F_C 値とした。

3.3 初期乾燥充填層におけるチャネリングファクターの実験式

Fig. 8 は, 接触角 θ をパラメータとして, チャネリングファクター F_C と平均空隙径 ($d_v = [\varepsilon / (1 - \varepsilon)]^{1/3} \cdot D_p$) の関係を示している。 D_p の代わりに d_v を使用した理由は次の 2 つである。(1) 液滴や細流流れ挙動は主に充填層内の空隙径の影響を受けるので F_C は D_p よりも d_v により強く依存すると考えられる。(2) 本可視化モデル装置において ε は D_p が

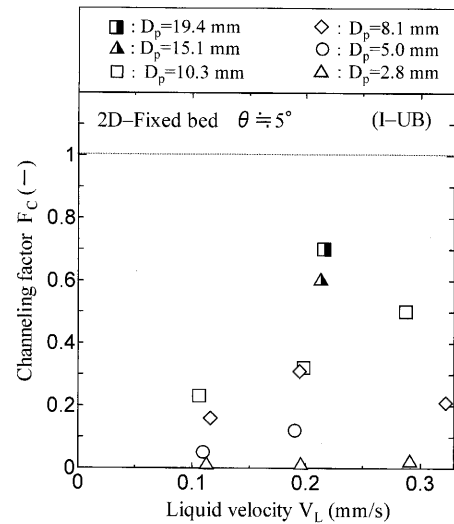


Fig. 7. Effect of liquid velocity on channeling factor under initially unsoaked bed with good wettability ($\theta = 5^\circ$).

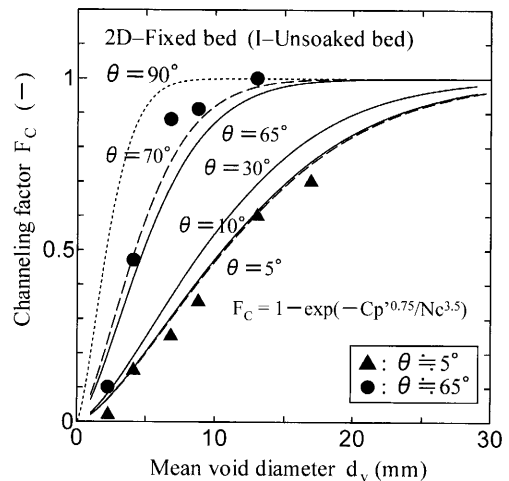


Fig. 8. Relation between channeling factor and mean void diameter under initially unsoaked bed.

Table 1. Particle diameter and void fraction of 2D visualization model (400 W × 100 D × 175 mm H).

Particle diameter D_p (mm)	Void fraction ε (-)	Mean void diameter d_v (mm)
2.8	0.35	2.3
5.0	0.36	4.1
8.1	0.375	6.8
10.3	0.385	8.8
15.1	0.39	13.0
19.4	0.40	16.9

2.8 から 19.4 mm まで変化すると 0.35 から 0.40 まで増加する (Table 1 参照)。 d_v にはその ε の影響も加味されている。

F_C に及ぼす V_L の影響は無いと仮定したので, F_C は, それぞれの D_p において, Fig. 6, 7 の値を平均し d_v の関数として $\theta = 5^\circ$ と 65° に対して Fig. 8 にプロットした。 F_C は, θ

に関わらず d_v の増加とともに 1 に漸近することを考慮し、回帰解析より d_v と θ の関数として式 (1) のように導いた。

$$F_C = 1 - \exp(-Cp^{0.75}/Nc^{3.5}) \quad (1)$$

ここで、 $Cp' = [\rho_L \cdot g \cdot (d_v)^2 / \sigma_L]$ は修正キャピラリー数 (-)、 $Nc = 1 + \cos\theta$ は無次元界面力 (-)、 $d_v = [\varepsilon / (1 - \varepsilon)]^{1/3} \cdot D_p$ は平均空隙径 (m)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 ρ_L は液体の密度 (kg/m^3)、 σ_L は表面張力 (N/m)、 θ は固液接触角 (deg)、 ε は空隙率 (-) である。

図中に示した実線、破線などの種々のラインは式 (1) から計算した値であり、 $\theta = 5^\circ$ と 65° に対する測定値は、式 (1) の計算値と比較的よく一致している。

4. 考察

4.1 初期乾燥充填層における液ホールドアップの推算式の導出

4.1.1 初期湿潤充填層における液ホールドアップの推算式の微修正

本研究で用いた液ホールドアップデータは、より正確な液ホールドアップを求めるために次のように微修正されている^{8,10}。静的ホールドアップは、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を空塔体積で除した値 (本研究では百分率表示) であるが、充填層内に留まった液の質量を測定する方法では、測定した静的ホールドアップ値に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。著者らの 1D モデル (内径 200 mm × 充填高さ 500 mm) における空塔でのその値は 0.41% であるので、粒子充填層の測定値から 0.41% を減じた値を H_S と定義した。したがって、初期湿潤充填層における液ホールドアップの推算式は、Fukutake と Rajakumar³ の推算式を以下のように微修正した。

静的ホールドアップ (初期湿潤充填層 (I-SB)),

$$H_{S(I-SB)} (\%) = 100 / (26 + 0.27 Cp_m^{0.9}) \quad (2)$$

ここで、 $Cp_m = Cp_s / Nc = [\rho_L \cdot g \cdot (D_p)^2] / [\sigma_L \cdot (1 + \cos\theta) \cdot (1 - \varepsilon)^2]$ は修正キャピラリー数 (-)、 $Cp_s = [\rho_L \cdot g \cdot (D_p)^2] / [\sigma_L \cdot (1 - \varepsilon)^2]$ も修正キャピラリー数 (-) である。

動的ホールドアップ (初期湿潤充填層 (I-SB)),

$$H_{d(I-SB)} (\%) = 100 \cdot 6 \cdot Re_m^{0.7} \cdot Ga_m^{-0.48} \cdot Cp_s^{0.1} \cdot Nc^{0.65} \quad (3)$$

ここで、 $Re_m = [\rho_L \cdot V_L \cdot D_p] / [(1 - \varepsilon) \cdot \mu_L]$ は修正レイノルズ数 (-)、 $Ga_m = [(\rho_L)^2 \cdot g \cdot (D_p)^3] / [(\mu_L)^2 \cdot (1 - \varepsilon)^3]$ は修正ガリレイ数 (-)、 μ_L は液体の粘性係数 ($Pa \cdot s$) である。

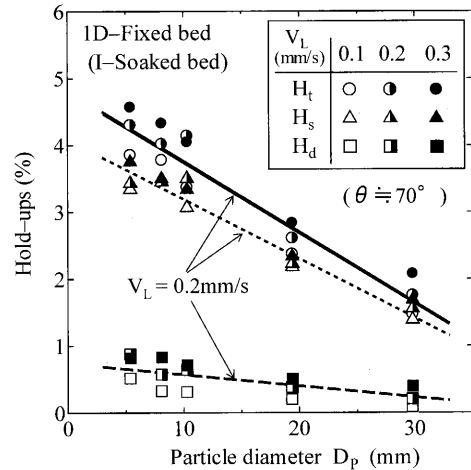


Fig. 9. Comparison between experimental and estimated hold-ups in initially soaked bed.

全ホールドアップは H_S と H_d の和である。

$$H_t (\%) = H_S + H_d \quad (4)$$

Fig. 9 は、初期湿潤充填層における濡れにくい系 ($\theta = 70^\circ$) での液ホールドアップの実験値¹⁰ と上式 (2)、(3)、(4) から計算した推算値との比較を表している。図中の実線、点線および破線は $V_L = 0.2 \text{ mm/s}$ の場合の H_t 、 H_S および H_d である。各ホールドアップの実験値と計算値はどの D_p においても良く一致している。

4.1.2 初期乾燥充填層における液ホールドアップの推算式

本研究では、初期乾燥充填層における液ホールドアップの推算式を以下のように導出した。上述したように、初期乾燥充填層における F_C は θ と d_v の影響を強く受ける。また、濡れやすい系における充填層内の液流路の数は濡れにくい系の数よりかなり少ない (Fig. 3, 4 参照)。さらに、濡れやすい系の液滴は、粒子間の空隙や粒子表面に滞留し難く、液体が互いにその表面張力で引っ張り合いながら数少ない液流路に集中して素早く流下する。したがって、濡れにくい系の静的ホールドアップと比較した濡れやすい系の静的ホールドアップの減少率は、濡れにくい系の液流路の数と比較した濡れやすい系の液流路の減少率よりも大きい。これらのことから、初期乾燥充填層における各液ホールドアップは F_C と θ の影響を強く受けると考えられる。

本研究では、静的ホールドアップ $H_{S(I-UB)}$ と動的ホールドアップ $H_{d(I-UB)}$ を、以上の結果および著者らの多数の液ホールドアップの測定値^{9,10} を用いて、回帰解析により以下のように導出した。

静的ホールドアップ (初期乾燥充填層 (I-UB))

$$H_{S(I-UB)} (\%) = 0.9 \cdot H_{S(I-SB)} \cdot F_C^{0.8} \cdot Nc_m^{-1} \quad (5)$$

動的ホールドアップ (初期乾燥充填層 (I-UB))

$$H_{d(I-UB)} (\%) = 0.9 \cdot H_{d(I-SB)} \cdot F_C^{0.5} \quad (6)$$

全ホールドアップは H_s と H_d の和である。

$$H_t(\%) = H_s + H_d \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $Nc_m = 1 + (\cos\theta)^3$ であり、添え字I-SBとI-UBはそれぞれ初期湿潤充填層および初期乾燥充填層での値であることを表している。

本研究において、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するために用いたチャネリングファクター F_c には、液密度や粘度の影響が十分には考慮されていない。より正確な液ホールドアップの推算式を導出するためには、さらなる実験の積み重ね、特に液密度の依存性を熟考した F_c の導出を行わなければならない。

4.2 初期乾燥充填層における液ホールドアップの実験値と推算値との比較

Fig.10に、初期乾燥充填層における $\theta \approx 70^\circ$ の場合の液ホールドアップに及ぼす V_L の依存性を示したが、 $D_p = 5.4\text{mm}$ に対する各液ホールドアップの実験値と本推算値(実線、点線、破線)および $D_p = 29.8\text{mm}$ に対する各液ホールドアップの実験値と本推算値(実線、点線、破線)は良く一致していることが分かる。

また、Fig.11には初期乾燥充填層における液ホールドアップに及ぼす濡れ性の影響を示したが、本推算式を用いた計算値(実線、点線、破線)は $\theta = 10^\circ$ と 70° の両接触角の液ホールドアップの実験値($D_p = 10.3\text{mm}$)を良く再現していることが分かる。

4.2.1 本推算値とホットモデル実験値との比較

Husslage¹³⁾は、実験室規模のホットモデル実験(温度 1550°C 、内径 $60\text{mm} \times$ 高さ 175mm の充填層、 $8\sim 10\text{mm}$ のコークス充填粒子、スラグは高炉スラグ組成を模擬[FeOなし]、溶銑はC飽和)により溶融スラグと溶銑の液ホールドアップを測定し、「溶融スラグ、溶銑ともに静的ホールドアップは $1\sim 5\%$ の範囲であり、動的ホールドアップは低い値である」であることを示した。また佐々ら¹⁴⁾も同様なホットモデル実験(温度 1500°C 、内径 $60\text{mm} \times$ 高さ 80mm の充填層、 $11\sim 13\text{mm}$ のコークス充填粒子、スラグは高炉スラグ組成を模擬[FeOなし])により液ホールドアップを測定し、全ホールドアップ、静的ホールドアップおよび動的ホールドアップは、 CaO/SiO_2 が1.1より低い場合、それぞれ約3.7、0.7と3.0%であると報告している。この測定値に関して、一般的に静的ホールドアップの方が動的ホールドアップよりも大きいことから、静的ホールドアップの0.7%と動的ホールドアップの3.0%の測定値は逆ではないかと考えられる。

本推算式(4)、(5)、(6)から計算した全ホールドアップ、静的ホールドアップ、動的ホールドアップは、それぞれ3.6、3.0と0.6%となる。ただし、用いた条件および物理値^{10,13)}は $D_p = 10\text{mm}$ 、 $T = 1550^\circ\text{C}$ 、 $\epsilon = 0.4$ 、 $\theta = 105^\circ$ 、 $\mu_L = 0.34\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\rho_L = 2600\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $\sigma_L = 0.42\text{N}/\text{m}$ である。本推算式

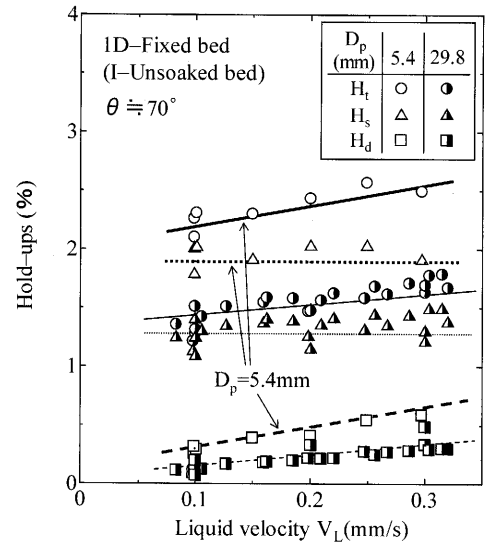


Fig. 10. Comparison between experimental and estimated hold-ups in initially unsoaked bed (influence of particle diameter).

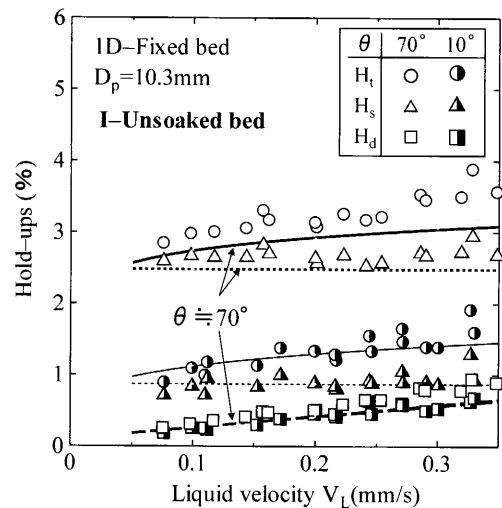


Fig. 11. Comparison between experimental and estimated hold-ups in initially unsoaked bed (influence of particle/liquid wettability).

から計算した各ホールドアップ値とホットモデルの実験値^{13,14)}とは比較的一致していると思われる。

4.2.2 初期乾燥充填層における液ホールドアップに及ぼす2層充填構造の影響

粒子径の異なる2つの充填層の積層順を変化させて、初期乾燥充填層における液ホールドアップおよび液流れ挙動に及ぼす2層充填構造の影響を調べた。2層充填層における可視化実験はFig. 1に示した2Dモデルを用いて、液ホールドアップの測定は1Dモデル(内径 $200\text{mm} \times$ 高さ 500mm の充填層¹⁰⁾)を用いて行った。

Fig.12に示したように(初期乾燥充填層、 $\theta = 65^\circ$ の場合)、下層に $D_p = 10.3\text{mm}$ の粒子を積み、その上に $D_p = 5.0\text{mm}$ の粒子を積み上げた場合(U5-L10)とその逆の順に粒子を積み上げた場合(U10-L5)の液流れ挙動は全く異なる。

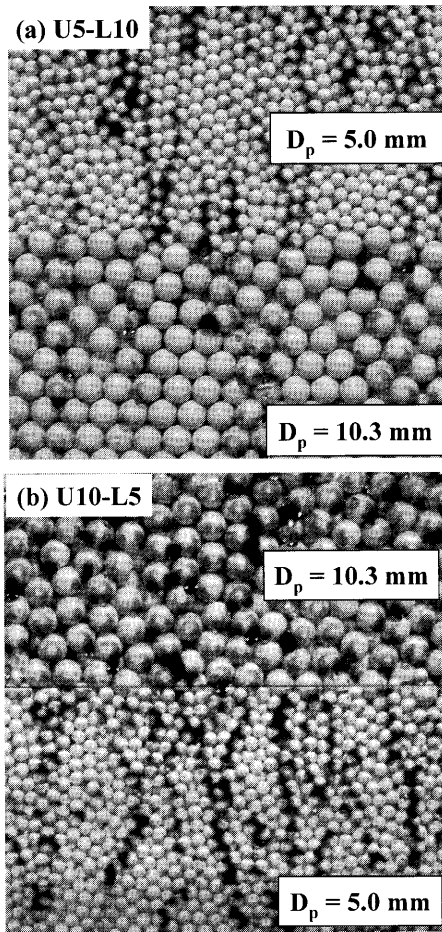


Fig. 12. Visualization of liquid flow behavior through two layer bed packed with different particle diameters in initially unsoaked bed ($\theta \simeq 65^\circ$).

(b) U10-L5の場合、10mm球粒子充填層を流下する液滴は充填層全体に広がっている。また、5mm球粒子充填層を流下する液は特定の流路を流れるチャネリングフロー^{7,10)}を形成し、それぞれの液流れ挙動は、単一の大きさの粒子充填層の場合と同じである (Fig. 3 参照)。ところが、(a) U5-L10の場合、下層の10mm球充填層における液流路の数は上層の5mm球充填層の液流路の履歴を引き継ぎ、特定の流路を流れるチャネリングフローが形成されている。このように初期乾燥充填層の場合、下層に液滴が均一に広がりやすい大粒子を充填していたとしても、そのチャネリングファクター F_c は上層の F_c の影響を強く受ける。

初期乾燥2層充填層 (濡れにくい系: $\theta \simeq 70^\circ$) における液ホールドアップに及ぼす V_L の依存性を Fig.13 に示す。U5-L10 (下層に $D_p=10.3$ mmの粒子を250mmの高さまで積み、その上に $D_p=5.0$ mmの粒子を500mmの高さまで積み上げた場合) の H_t と H_s (○, △)はU10-L5 (5.0mm球が下で10.3mm球をその上に積み上げた場合、すなわちU5-L10と逆の順に粒子を積み上げた場合) の H_t と H_s (●, ▲)よりも小さな値である。本推算式(4), (5), (6)から計算した各ホールドアップ (実線, 点線, 破線) はU5-L10およ

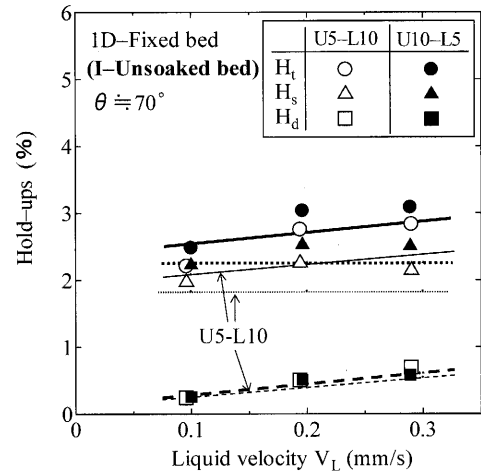


Fig. 13. Comparison between experimental and estimated hold-ups under initially unsoaked bed (influence of packing order of two layer bed packed with different particle diameters).

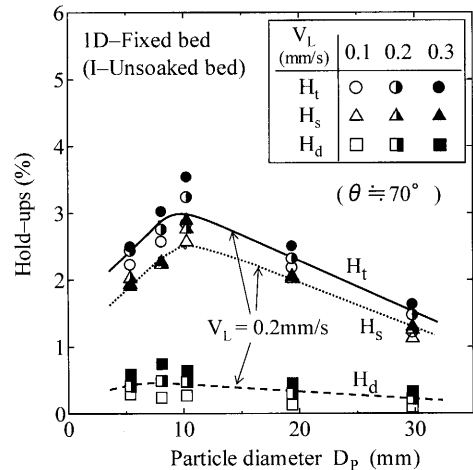


Fig. 14. Comparison between experimental and estimated hold-ups in initially unsoaked bed (influence of particle diameter).

びU10-L5それぞれにおける実測値と比較的一致している。ただし、U10-L5の場合は5mm, 10mm単一の大きさの球充填層におけるそれぞれの F_c を用い、U5-L10の場合、下層の10mm球充填層の F_c は5mm球充填層の F_c と同じ値であると仮定して簡易計算した。

4.2.3 初期乾燥充填層における液ホールドアップに及ぼす充填粒子径の影響

濡れにくい系 ($\theta \simeq 70^\circ$) の初期乾燥充填層においては、Fig.14に示すように、どの V_L においても H_t と H_s は D_p の減少とともに増加し、 $D_p \simeq 10$ mm付近で最大値を取る。さらに D_p が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 と H_s が急激に減少する特異な現象を示している¹⁰⁾。本推算式(4), (5), (6)から計算した $V_L=0.2$ mm/sにおける H_t を実線で、 H_s を点線で、 H_d を破線で D_p に対して示している。本推算式で計算した H_t , H_s および H_d は、実測値と良く一致し、特に H_t と H_s が $D_p \simeq 10$ mm付近で急激に変

化する特異な現象も良く再現している。

5. 結論

初期乾燥充填層における液ホールドアップを推算するために、新たにチャネリングファクター F_C を提案し、CCDビデオカメラを用いた2Dモデルの可視化実験により F_C を求めた。この F_C と著者らの多くの液ホールドアップデータの回帰解析から液ホールドアップの推算式を導出し、本推算値と種々の実測値とを比較した。本研究から得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 濡れやすい系における液滴は物理的に粒子表面に広がりやすいにも関わらず、初期乾燥充填層の層頂から充填層に均一分散した液滴は、充填層全体には広がらずに局所的な流路を形成しながら特定の場所を流下する。

(2) 初期乾燥充填層におけるチャネリングファクター F_C は以下のように表される。

$$F_C = 1 - \exp(-Cp'^{0.75}/Nc^{3.5}) \quad (-)$$

ここで、 $Cp' = [\rho_L \cdot g \cdot (d_v)^2 / \sigma_L]$ は修正キャピラリー数(-)、 $Nc = 1 + \cos\theta$ は無次元界面力(-)、 $d_v = [\varepsilon / (1 - \varepsilon)]^{1/3} \cdot D_p$ は平均空隙径(m)、 g は重力加速度(m/s²)、 ρ_L は液体の密度(kg/m³)、 σ_L は表面張力(N/m)、 θ は固液接触角(deg)、 ε は空隙率(-)である。

(3) 初期乾燥充填層における静的 $H_{S(I-UB)}$ 、動的 $H_{d(I-UB)}$ 、全ホールドアップ H_t は以下の式で推算できる。

$$H_{S(I-UB)} (\%) = 0.9 \cdot H_{S(I-SB)} \cdot F_C^{0.8} \cdot Nc_m^{-1},$$

$$H_{d(I-UB)} (\%) = 0.9 \cdot H_{d(I-SB)} \cdot F_C^{0.5},$$

$$H_t (\%) = H_s + H_d$$

ここで、 $Nc_m = 1 + (\cos\theta)^3$ であり、添え字I-SBとI-UBはそ

れぞれ初期湿潤充填層および初期乾燥充填層での値である。

(4) 本推算式から計算した液ホールドアップは、粒子径あるいは接触角に関わらず、初期乾燥充填層における実測値と良く一致する。

(5) 初期乾燥充填層において、単一の大きさの粒子充填層の液流れ挙動と異なる場合の2層充填層の液ホールドアップの実測値も本推算式で良く再現できる。

本研究を遂行するに当たり貴重な討論・ご助言を頂いた名古屋大学 工学研究科助教授 坂東博士、JFEスチール(株)主任研究員 佐藤博士、新日本製鐵(株)主任研究員 篠竹博士に感謝いたします。

文 献

- 1) T.K.Sherwood, G.H.Shipley and F.A.L.Holloway: *Ind. Eng. Chem.*, **30** (1938), 765.
- 2) A.Mersmann: *Chem. Inf.-Technol.*, **37** (1965), 218.
- 3) T.Fukutake and V.Rajakumar: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **22** (1982), 355.
- 4) A.Alidilar, A.Bicer and A.Murathan: *Chem. Eng. Commun.*, **128** (1994), 95.
- 5) J.Yagi: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 619.
- 6) G.S.Gupta and S.Bhattacharyya: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1927.
- 7) W.M.Husslage, T.Bakker, A.G.S.Steeghs, R.H.Heerema and M.A.Reuter: 6th World Cong. on Chem. Eng. 2001, Melbourne, (Sep. 2001), 1643 (CD-ROM), AIChE, New York.
- 8) T.Usui, H.Kawabata and F.Fujita: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 792.
- 9) T.Usui, H.Kawabata, T.Sogo, S.Morii, M.Ichida and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 899.
- 10) H.Kawabata, Z.Liu, F.Fujita and T.Usui: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1466.
- 11) M.Li, Y.Bando, T.Tsuge, K.Yasuda and M.Nakamura: *Chem. Eng. Sci.*, **56** (2001), 5969.
- 12) M.Li, Y.Bando, T.Tsuge, K.Suzuki, K.Yasuda and M.Nakamura: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **33** (2000), 211.
- 13) W.M.Husslage: Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, (2004), 118.
- 14) Y.Sassa, K.Tanaka, Kouno and Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), S842.