

三相流動層の粒子ホールドアップ

—連続並流操作下の懸濁気泡塔—

小 島 博 光・栗 原 秀 人・望 月 正 留

Solid Hold-up in Three Phase Fluidized Bed, In the Case
of Continuous Operation in the Bubble Column with
Suspended Solid Particle.

KOJIMA, H., H. KURIHARA and M. MOCHIZUKI

Abstract

Equation for predicting the solid hold-up in the bubble column was proposed on the condition of continuous operation with suspended solid particle, applying the one dimensional dispersion model (Sedimentation-Dispersion Model).

The effect of longitudinal position of slurry inlet and outlet on the solid hold-up was discussed numerically over a certain range of the dimensionless parameters, which were defined to allow simplification of design procedure of the equipment.

Increasing the height from the bottom to the position of slurry inlet, solid hold-up was found to increase considerably.

On the other hand, the effect of the position slurry outlet on the solid hold-up was found negligible.

緒 言

三相流動層は気・液・固系反応装置として石炭液北、廃水処理などにおいて有用である。三相流動層は固体粒子の流動化に必要なエネルギーが主に液相から伝達される気・液流動層と気相（気泡）から伝達される懸濁気泡塔とに分類される。前者の気液流動層の場合には、比較的粒径が大きく沈降速度の速い粒子が用いられ、粒子は流動化するが塔内に滞った状態で操作される。この場合の粒子ホールドアップについてはすでに多くの研究がなされている⁸⁾。一方、後者の懸濁気泡塔の場合には比較的粒径が小さく沈降速度の小さい粒子が用いられ、塔底付近からスラリーが供給され塔頂部から排出される連続操作がとられることが多い。

懸濁気泡塔内の粒子濃度分布については、沈降・拡散モデル⁹⁾に従うとする報告^{1,2,3,5,7)}が多く出されている。

本研究では連続操作下の懸濁気泡塔内の粒子ホールドアップにおよぼすスラリー供給口および排出口の位置の影響について、沈降・拡散モデルに基づいて数値的検討を加えた。その結果、装置設計上有用な知見を得たので報告する。

1. 基礎的考察

1.1 基礎式

Fig. 1 の状況を考える。すなわちガスは塔底よりガス分散板をへて塔内に送入される。またスラリーはガスと並流に塔底から y_1 の位置で供給され塔頂から y_2 の位置で連続的に排出される。

懸濁気泡塔の高さを L 、塔底から塔頂に向う座標を y とし、i) $0 \leq y \leq y_1$, ii) $y_1 \leq y \leq L - y_2$, iii) $L - y_2 \leq y \leq L$ の領域に分けて定常状態の沈降・拡散モデル⁹⁾を適用する。

i) $0 \leq y \leq y_1$, この領域では平均液流速はみかけ上存在しないので、懸濁粒子の収支式は

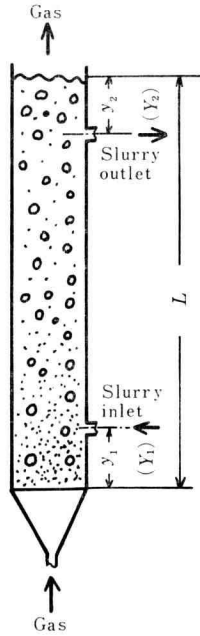


Fig. 1 Arrangement for calculation of solid hold-up in the bubble column with suspended solid particle.

$$E_p \frac{d^2 c}{dy^2} + v_p \frac{dc}{dy} = 0 \quad (1)$$

となる。塔底での境界条件は

$$y = 0: \quad E_p \frac{dc}{dy} + v_p c = 0 \quad (2)$$

となる。Eqs. (1) (2) で E_p は粒子の軸方向の混合拡散係数、 v_p は粒子の沈降速度である。スラリー供給位置 $y=y_1$ での境界条件は、この点が不連続点であるため、 $y_1 \leq y \leq L-y_2$ の領域に対する収支式の解で決定される $y=y_1$ での粒子濃度 c_1 を用いて

$$y = y_1: \quad c = c_1 \quad (3)$$

と近似する。

ii) $y_1 \leq y \leq L-y_2$ の領域では、液流速 v_L の存在を考慮に入れて、懸濁粒子の収支式は

$$(1-\varepsilon_G) E_p \frac{d^2 c}{dy^2} + \{(1-\varepsilon_G) v_p - v_L\} \frac{dc}{dy} = 0 \quad (4)$$

となる。Eq. (4) に対する境界条件は

$$y = y_1: \quad v_L c_F = -E_p (1-\varepsilon_G) \frac{dc}{dy} - \{(1-\varepsilon_G) v_p - v_L\} c \quad (5)$$

$$y = L-y_2: \quad c = c_F \quad (6)$$

となる。Eqs. (5) および (6) で c_F は供給スラリー中の粒子濃度である。

iii) $L-y_2 \leq y \leq L$ 、この領域では i) の領域と同様に液流速が存在しないので、懸濁粒子の収支式は、

$$E_p \frac{d^2 c}{dy^2} + v_p \frac{dc}{dy} = 0 \quad (7)$$

となる。また境界条件は、

$$y = L-y_2, \quad c = c_F \quad (8)$$

$$y = L, \quad E_p \frac{dc}{dy} + v_p c = 0 \quad (9)$$

となる。

1.2. 粒子濃度分布式

Eqs. (1) ~ (9) の各式に対して、以下の Eqs. (10) ~ (13) で定義した無次元座標 Y 無次元粒子濃度 C 、無次元変数 ψ , ϕ を導入する。

$$Y \equiv y/L \quad (10)$$

$$C \equiv c/c_F \quad (11)$$

$$\psi \equiv \frac{E_p}{L \{(1-\varepsilon_G) v_p - v_L\}} \quad (12)$$

$$\phi \equiv \frac{v_L}{E_p} L \quad (13)$$

無次元化された基礎式は以下の Eqs. (14) ~ (22) となる。

$$i) \quad 0 \leq Y \leq Y_1$$

$$\psi \frac{d^2 C}{dY^2} + \frac{1+\phi\psi}{1-\varepsilon_G} \frac{dC}{dY} = 0 \quad (14)$$

$$Y = 0; \quad \frac{\psi}{1+\phi\psi} (1-\varepsilon_G) \frac{dC}{dY} + C = 0 \quad (15)$$

$$Y = Y_1; \quad C = C_1 \quad (16)$$

$$ii) \quad Y_1 \leq Y \leq 1-Y_2$$

$$\psi \frac{d^2 C}{dY^2} + \frac{1}{1-\varepsilon_G} \frac{dC}{dY} = 0 \quad (17)$$

$$Y = Y_1; \quad \phi = -(1-\varepsilon_G) \frac{dC}{dY} - \frac{1}{\psi} C \quad (18)$$

$$Y = 1-Y_2; \quad C \left(1 + \frac{1}{\phi\psi}\right) = -(1-\varepsilon_G) \frac{1}{\phi} \frac{dC}{dY} \quad (19)$$

$$\text{iii)} \quad 1-Y_2 \leq Y \leq 1$$

$$\psi \frac{d^2C}{dY^2} + \frac{1+\phi\psi}{1-\varepsilon_G} \frac{dC}{dY} = 0 \quad (20)$$

$$Y = 1-Y_2; \quad C = 1 \quad (21)$$

$$Y = 1; \quad \frac{\psi}{1+\phi\psi} (1-\varepsilon_G) \frac{dC}{dY} + C = 0 \quad (22)$$

塔内の懸濁粒子濃度が比較的低く、粒子の沈降速度 v_p が粒子濃度に依存しないとすると、 ψ, ϕ は定数となるので Eqs. (14), (17) および (20) は容易に積分でき、各領域の粒子濃度分布式として Eqs. (23), (24) および (25) が得られる。

$$\text{i)} \quad 0 \leq Y \leq Y_1$$

$$C = \left[(1+\phi\psi) \exp \left\{ \frac{1-Y_1-Y_2}{(1-\varepsilon_G)\psi} \right\} - \phi\psi \right] \times \exp \left\{ \frac{1+\phi\psi}{\psi(1-\varepsilon_G)} (Y_1-Y) \right\} \quad (23)$$

$$\text{ii)} \quad Y_1 \leq Y \leq 1-Y$$

$$C = (1+\phi\psi) \exp \left\{ \frac{1-Y_2-Y}{(1-\varepsilon_G)\psi} \right\} - \phi\psi \quad (24)$$

$$\text{iii)} \quad 1-Y_2 \leq Y \leq 1$$

$$C = \exp \left\{ \frac{1+\phi\psi}{\psi(1-\varepsilon_G)} (1-Y_2-Y) \right\} \quad (25)$$

1.3. 粒子ホールドアップ

粒子濃度 c は [kg-solid/m³-liquid] で表わした濃度であり、通常 $\rho_p \gg c$ であるので塔内平均粒子ホールドアップは Eq. (27) で近似しうる。

$$\frac{\varepsilon_P}{1-\varepsilon_G} = \int_0^1 \frac{C \cdot c_F}{C \cdot c_F + \rho_P} dY \quad (26)$$

$$\doteq \frac{c_F}{\rho_P} \int_0^1 C dY \quad (27)$$

粒子ホールドアップを含む無次元数 H を Eq. (28) で

$$H \equiv \frac{\varepsilon_P}{1-\varepsilon_G} \frac{\rho_P}{c_F} \quad (28)$$

と定義する。

Eqs. (29), (30) および (31) で ε_{P1}' , ε_{P2}' , ε_{P3}' を定義すると H は Eq. (32) のように表わされる。

$$\varepsilon_{P1}' \equiv \int_0^{Y_1} C dY = \left[(1+\phi\psi) \exp \left\{ \frac{1-Y_1-Y_2}{(1-\varepsilon_G)\psi} \right\} - \phi\psi \right] \left[\frac{\psi(1-\varepsilon_G)}{1+\phi\psi} \right] \left[\exp \left\{ \frac{1+\phi\psi}{\psi(1-\varepsilon_G)} Y_1 \right\} - 1 \right] \quad (29)$$

$$\varepsilon_{P2}' \equiv \int_{Y_1}^{1-Y_2} C dY = (1+\phi\psi) (1-\varepsilon_G) \psi \left\{ \exp \frac{1-Y_1}{(1-\varepsilon_G)\psi} - \exp \frac{Y_2}{(1-\varepsilon_G)\psi} \right\} - \phi\psi (1-Y_2-Y_1) \quad (30)$$

$$\varepsilon_{P3}' \equiv \int_{1-Y_2}^1 C dY = \frac{\psi(1-\varepsilon_G)}{1+\phi\psi} \left[1 - \exp \left\{ - \frac{1+\phi\psi}{\psi(1-\varepsilon_G)} Y_2 \right\} \right] \quad (31)$$

$$H = \varepsilon_{P1}' + \varepsilon_{P2}' + \varepsilon_{P3}' \quad (32)$$

2. 数値的検討

2.1. スラリー供給位置 (Y_1) の影響

まず比較の基準にするために、スラリーで塔底から供給され、塔頂から排出される場合、すなわち $Y_1=Y_2=0$ の場合の H ($\equiv \varepsilon_P \rho_P / c_F (1-\varepsilon_G)$) を H^* で表わし、 $\phi\psi = 0.1 \sim 80$, $(1-\varepsilon_G)\psi = 0.4 \sim 20$ の範囲で計算した結果を Fig. 2 に示した。Fig. 2 に見られるように $(1-\varepsilon_G)\psi$ が増加するにつれて H^* は減少し 1 に漸近してゆく傾向を示している。これは ψ の増加に伴い塔内の粒子濃度が均一になり、供給スラリーの濃度に近づいてゆくためである。また $(1-\varepsilon_G)\psi$ が一定の場合には ϕ の増加とともに H^* は増加し、スラリー供給速度が大きくなると粒子ホールドアップが増加する傾向を示している。

以後、粒子ホールドアップにおよぼすスラリー排出口、供給口の位置の影響は H と $Y_1=0, Y_2=0$ の場合の H^* との比 H/H^* によって検討することにする。

スラリー供給位置が塔底から塔頂方向に移動した場合について $Y_2=0$ で $Y_1=0.1 \sim 0.4$ の範囲で H/H^* を算出した。その結果を Figs. 3~5 に示した。これらの図から、スラリー供給位置が塔頂へ移動するにつれて粒

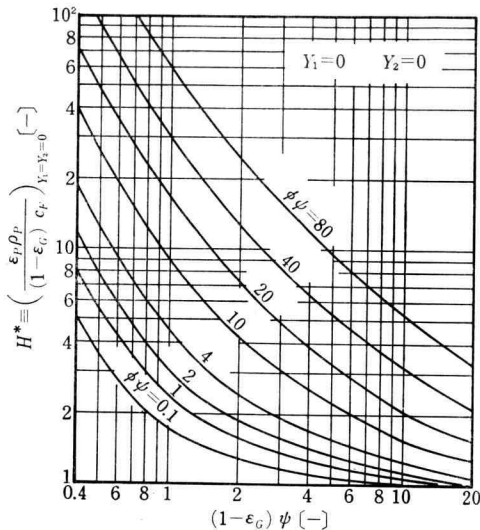


Fig. 2 Solid hold-up in the bubble column with suspended solid particle on the condition of continuous operation ($Y_1=Y_2=0$)

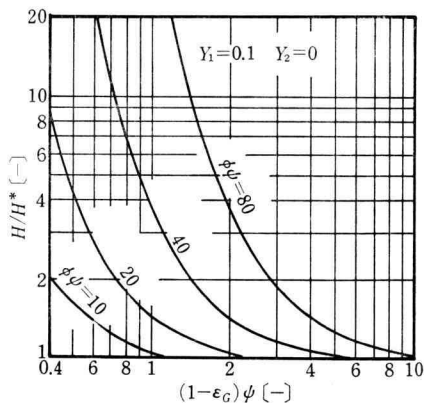


Fig. 3 Numerical example for the effect of Y_1 on Solid hold-up. ($Y_1=0.1, Y_2=0$)

子ホールドアップは増加し、 $\phi\psi$ が大きい場合ほど供給位置の影響が大きくなる傾向が認められる。

2.2. スラリー排出位置の影響

2.1) の場合と同様に、 $Y_1=0$ で $Y_2=0.1\sim 0.4$ の範囲で H/H^* を算出し、スラリー排出口の位置が粒子ホールドアップにおよぼす影響を数値的に検討した。その結果、排出口の位置が塔下方に移動すると粒子ホールド

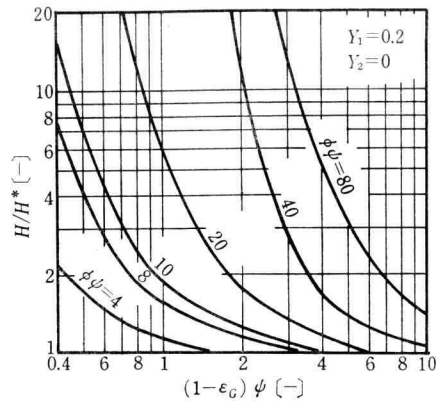


Fig. 4 Numerical example for the effect of Y_1 on solid hold-up ($Y_1=0.2, Y_2=0$)

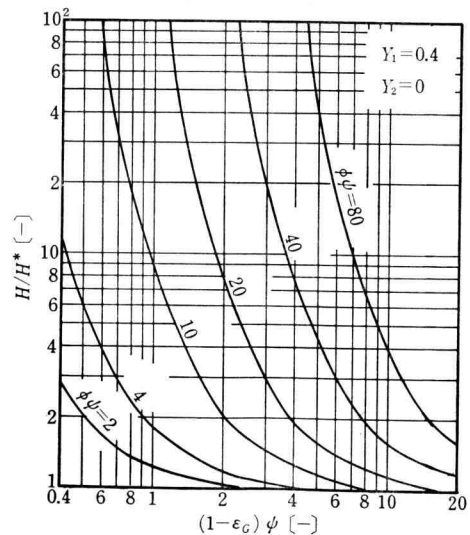


Fig. 5 Numerical example for the effect of Y_1 on solid hold-up ($Y_1=0.4, Y_2=0$)

アップがやや減少する傾向が見られたが、 H/H^* は 0.8 より小さくなることはなく、 $Y_2=0.1\sim 0.4$ の範囲では H に対する影響はほとんどないといえる。Fig. 6 に $\phi\psi=40$ で、 $Y_1=0.1\sim 0.4$ ($Y_2=0$)、 $Y_2=0.4$ ($Y_1=0$) の計算結果を示した。この図に見られるように懸濁気泡塔内の粒子ホールドアップは Y_1 によって大きく変化するが、 Y_2 の影響はほとんど受けていない。

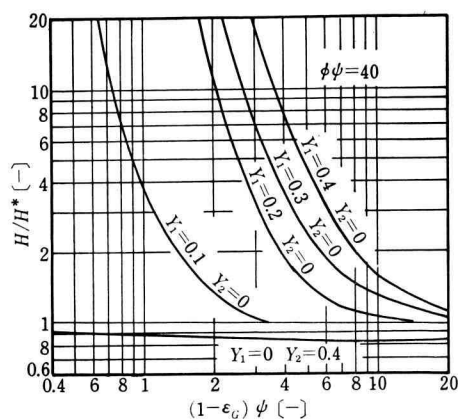


Fig. 6 Variation of solid hold-up with Y_1 and Y_2

結 言

三相流動層の一つである懸濁気泡塔の粒子濃度分布式を連続操作条件下でスラリー供給口、排出口の位置の影響を考慮して導出し、塔内平均粒子ホールドアップに対して数値的検討を加えた。その結果以下の知見を得た。

i) スラリー供給口の位置が塔頂に向って移動するにつれて、粒子ホールドアップは増加する。

ii) スラリー排出口の位置は粒子ホールドアップに対してほとんど影響を与えない。

以上の結果を操作設計に適用するには、 $\phi\psi$ および $(1-\varepsilon_G)\psi$ のパラメータを算出する必要がある。 $(1-\varepsilon_G)\psi$, $\phi\psi$ の算出に必要なガスホールドアップ ε_G , 粒子の分散係数 E_p , 沈降速度 v_p についてはすでにいくつかの研究^{1,2,3,4,5,7)} がなされている。これらの既往の研究結果の $\phi\psi$, $(1-\varepsilon_G)\psi$ の算出に対する適用性については今後実験的検討を行う予定である。

Literature cited

- 1) Cova, D.R., Ind. Eng. Chem., Process Des. Develop., **5**, 20 (1966)
- 2) Farkas, E.J. and P.F. Leblond, Can. J. Chem. Eng., **47**, 215 (1969)
- 3) Imafuku, K., T.Y. Wang, K. Koide and H. Kubota, J. Chem. Eng., Japan, **1**, 153 (1968)
- 4) Kato, Y., Kagaku Kogaku, **27**, 7 (1963)
- 5) Kato, Y., A. Nishiwaki, T. Fukuda and S.

Tanaka, J. Chem. Eng., Japan, **5**, 112 (1972)

- 6) Kato, Y., A. Nishiwaki, M. Kago, T. Fukuda and S. Tanaka, Kagaku Kogaku, **36**, 1333 (1972)
- 7) Kojima, H. and K. Asano, Kagaku Kogaku Ronbunshu, **6**, 46 (1980)
- 8) Shah, Y.T., "Gas-Liquid-Solid Reactor Design", Mc-Graw Hill (1979)
- 9) Suganuma, T. and T. Yamanishi, Kagaku Kogaku, **30**, 1136 (1966)

Nomenclature

- c : solid concentration [kg-solid / m³-liquid]
 c_F : solid concentration in the slurry supplied into the bubble column [kg-solid / m³-liquid]
 C : dimensionless concentration of solid defined by Eq. (11) [-]
 E_p : longitudinal dispersion coefficient of solid particle [m²/s]
 H : dimensionless parameter defined by Eq. (28) [-]
 H^* : H in the case, $Y_1=0$ and $Y_2=0$ [-]
 L : height of bubble column [m]
 v_L : superficial velocity of liquid [m/s]
 v_p : settling velocity of solid particle [m/s]
 y : coordinates along the axis of bubble column [m]
 y_1 : distance between the bottom of bubble column and the position of slurry inlet [m]
 y_2 : distance between the top of bubble column and the position of slurry outlet [m]
 Y : dimensionless coordinates along the axis of bubble column defined by Eq. (10) [-]
 $Y_1 = y_1/L$ [-]
 $Y_2 = y_2/L$ [-]
 ψ : dimensionless parameter defined by Eq. (12) [-]
 ϕ : dimensionless parameter defined by Eq. (13) [-]
 ε_G : gas hold-up [-]
 ε_p : solid hold-up [-]
 ε_{p1}' : dimensionless parameter defined by Eq. (29) [-]
 ε_{p2}' : dimensionless parameter defined by Eq. (30) [-]
 ε_{p3}' : dimensionless parameter defined by Eq. (31) [-]