

循環流動層におけるアニュラス流れ中の粒子 ホールドアップ測定

有馬 裕* 伊地知 和也 上村 芳三 幡手 泰雄 小波 盛佳**

Measurement of solids hold-up in the annulus flow within the circulating fluidized bed

Hiroshi ARIMA, Kazuya IJICHI, Yoshimitsu UEMURA,
Yasuo HATATE and Moriyoshi KONAMI

It is necessary to grasp the solids behavior in the riser sufficiently in order to efficiently utilize the circulating fluidized bed as a reactor. The gas-solids flow in the riser forms the core-annulus flow. Since solids hold-up near the wall affects a heat transfer, it is recognized as an important parameter when the apparatus is used as a combustor. In this study, solids hold-up measurement method in the annulus of circulating fluidized bed was proposed.

Keywords: Circulating fluidized beds, Downward solids flow, Solids hold-up, Sampling probe

1. 緒言

近年、エネルギー変換技術への流動層の応用が各国で進められている。それに伴い、大粒子流動化、安定した粒子群操作、高い信頼性の要求など、従来の気泡流動層では困難とされる新しい課題が設定されるようになってきた。このような要求に対応可能

な流動化技術として高速操作や循環操作が考えられ、代表的な装置の一つとして循環流動層が挙げられる。

循環流動層は、高ガス速度で操作するためにガスの処理能力が大きく付着性粒子や大粒子への対応能力が高いという特性がある。また、ライザー内では気泡が消失し流れの乱れが大きく、ライザー内壁近傍には下降流が形成されるので、粒子とガスの相対速度が最大では粒子の終末速度の数十倍にも達するともいわれ、気・固の接触状態が非常により反応装置である。以上のようなことから、石炭燃焼ボイラーやアルミナの焼成、造粒などの各種固気プロセス、

2000年7月 日受理

* 博士前期課程応用化学工学専攻

** 日曹エンジニアリング

廃棄物や汚染物質の無害化処理などへの利用が試みられている。

ライザー内の粒子局所濃度は循環流動層反応器の重要なパラメーターである。ボイラーの場合、内壁側の濃度は内壁に沿って置かれた熱交換器上で熱移動に強く影響を与える。ライザー内壁近傍には下降流が形成されるので循環流動層を工業化し発展させるうえで、ライザー内下降流状態の把握は不可欠である。本研究では、循環流動層におけるライザー内アニュラス流れ中の粒子ホールドアップ測定法を提案し、測定結果について検討したので報告する。

2. 測定原理

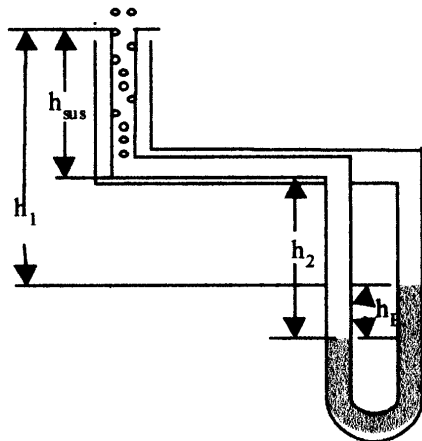


Fig.1 Probe used for measuring downward particle flux.

Fig.1 に測定プローブの概略図を示す。ライザー内を下降する粒子が粒子流れに対向して設置されたプローブ中に進入すると、粒子が導入管中で沈着するまでは封液に繋がる流体の密度は進入した粒子の量により変化する。粒子がプローブ中に進入した時の固-気サスペンション密度は、粒子が進入し、サスペンションを形成した時の空隙率を ε とすると以下の式で示される。

$$\rho_{\text{sus}} = (1 - \varepsilon) \rho_p + \varepsilon \rho_f \quad (1)$$

粒子が圧力導入管に進入していない場合の圧力バ

ランスは、U 字管の両端に繋がる流体の密度は流動化ガスと同一と見なして ρ_f とすれば

$$p_1 + \rho_f g h_1 + \rho_e g h_e = p_2 + \rho_f g h_2 + \rho_{\text{sus}} g h_{\text{sus}} \quad (2)$$

粒子が圧力導入管に進入しサスペンションを形成した場合の圧力バランスは、(3)式で表される。

$$p_1 + \rho_f g h_1 + \rho_e g h_e = p_2 + \rho_f g h_2 + \rho_{\text{sus}} g h_{\text{sus}} \quad (3)$$

サスペンションの静圧ヘッドは、 p_1 と p_2 との静圧差が少ないので $p_1 = p_2$ と置き、プローブに接続されたマノメーターの封液高さ h_e の示す圧力差が測定できれば(4)式で計算可能となる。

$$\rho_{\text{sus}} g h_{\text{sus}} = p_1 - p_2 + \rho_f g h_1 - \rho_f g h_2 + \rho_e g h_e \quad (4)$$

ρ_{sus} と粒子ホールドアップ $1 - \varepsilon$ との関係は、(1)式で示され、粒子ホールドアップが求められる。

3. 実験方法

循環流動層におけるライザー内下降流を想定し、電磁フィーダーを用いて下降流を作り出した。粒子下降流に対向させてプローブを挿入して下降流粒子をサンプリングし、測定原理に示した方法で、静圧と背圧の差をもとに固-気サスペンション密度を導き下降流の粒子ホールドアップを求めた。粒子下降流近傍のガス流れは無く、下降粒子がそのまゝの状態ですべてプローブ中に進入することを仮定する。粒子には、FCC 粒子、ガラスビーズ 2 種類を用い、一定供給量のもとで測定を行い、粒子供給量を変化させて実験を行った。ここで、粒子供給量はサンプリングした粒子量をプローブ断面積と測定時間で除して求めた。

4. 粒子物性

本実験で使用した粒子の物性を Table.1 に示す。平均粒子径は、粒子径測定器コールター LS130 により測定した。粒子密度は、液浸法であるピクノメーター法により測定した。終末速度については、使

用粒体を等しい粒径をもつ球形粒子と仮定した時、アルキメデス数によって以下の領域がある。

Stokes 領域 ($Ar \leq 104$)

$$U = g(\rho_P - \rho_F)dp^2 / (18\mu) \quad (5)$$

Allen 領域 ($104 < Ar \leq 8.78 \times 10^4$)

$$U = dp[4g^2(\rho_P - \rho_F)^2 / (225\rho_F\mu)]^{1/3} \quad (6)$$

Newton 領域 ($8.78 \times 10^4 < Ar \leq 3 \times 10^9$)

$$U = [3g(\rho_P - \rho_F)dp / \rho_F]^{1/2} \quad (7)$$

$$Ar = dp^3 \rho_F (\rho_P - \rho_F) g / \mu^2 \quad (8)$$

FCC 粒子のアルキメデス数は(8)式から $Ar=35.6$ で $Ar \leq 104$ であるから、終末速度は stokes 領域における計算値を用いた。ガラスビーズ 1,2 のアルキメデス数はそれぞれ $Ar=1.51 \times 10^3$ $Ar=5.41 \times 10^3$ でともに $104 < Ar \leq 8.78 \times 10^4$ であるから、終末速度は Allen 領域における計算値を用いた。Fig.2 に、FCC 粒子の場合の落下距離に対する粒子速度を示す。本実験において、粒子速度は、粒子供給口から

プローブ測定管の中間までを落下距離とした。0.3m 程度の値に設定したので Fig.2 より、粒子速度を終末速度と仮定した。ガラスビーズ 1,2 については、本実験では終末速度に達していないことから、ガラスビーズが均一に落下していると仮定して、落下距離に対する単一粒子の粒子速度より、設定した落下距離に対する粒子速度を用いた。

5. 実験結果及び考察

5.1 ガラス管プローブによる差圧変化測定

粒子がプローブに進入したときの静圧と背圧との差圧変化の様子を詳しく観察するために、L 型ガラス管プローブを用いて粒子供給量 $1.51 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の条件で実験を行った。粒子には FCC 粒子を使用した。粒子供給時間と差圧変化の関係を Fig.3 に示す。粒子がプローブに進入すると同時に差圧が生じ、粒子によりプローブが閉塞するまで一定の差圧を示した。このことから、粒子がプローブに進入するのに伴う圧力変化を確かめられた。

Table.1 Physical properties of powders used.

Material	FCC	Glass beads 1	Glass beads 2
Mean diameter [μm]	74.6	256.4	392.2
Density [kg/m^3]	2390	2500	2500
Terminal velocity [m/s]	0.40	2.02	3.09

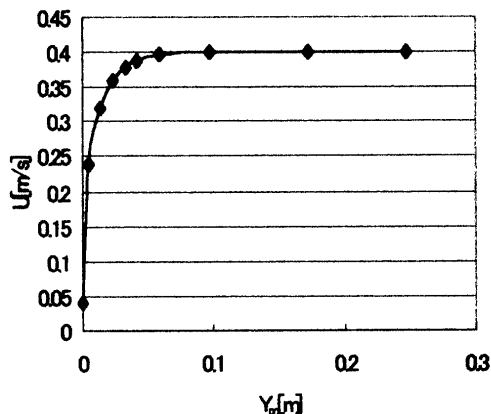


Fig.2 Particle velocity changed by falling length.

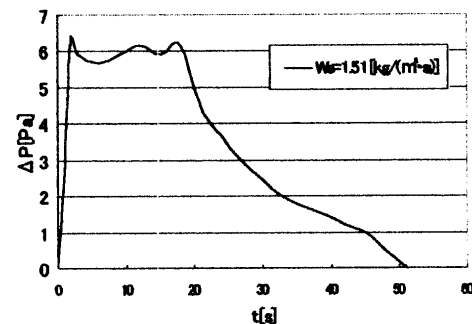


Fig.3 Measuring of differential pressure for L-type glass probe.

5.2 T 型銅管プローブによる差圧変化測定

L 型プローブでは、短時間で下降粒子によりプローブが閉塞してしまうので、粒子によるプローブの閉塞を防ぐために、L 型プローブに粒子溜めを取り付けた形の T 型プローブを用いて L 型プローブ測定と

同じ条件で連続的に実験を行った結果、継続してほぼ一定の差圧を測定することができた。粒子のプロープ進入による差圧変化は瞬間的に生じるものではないことから、差圧測定に大きな影響を与えることなくプロープ閉塞を防ぐことができれば、長時間継続して差圧測定が可能となる。

5.3 体積圧縮の影響について

粒子がプロープに進入する際に、プロープ内の空気の体積圧縮が影響しているかどうかを、粒子供給量一定で、二種類のプロープ直径(0.5cm,0.8cm)を用いてプロープ体積をかえることで比較を行った。粒子には FCC 粒子を使用した。その結果、プロープ直径の変化に対して差圧が変化していないことから、差圧はプロープの測定管体積には影響を受けないことがわかった。

5.4 FCC 粒子における粒子ホールドアップ測定

・測定管長さの差圧への影響

L 型銅管プロープを用いて、粒子供給量一定でプロープ長さを変えて実験を行った。測定管長さとの差圧変化の関係を Fig.4 に示す。どの供給量のときにも測定管長さが長くなることで差圧が大きくなっていることがわかった。このことから、測定管長さの変化に伴う差圧の変化が確認できた。

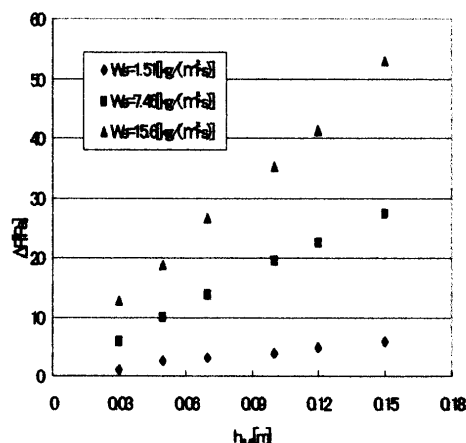


Fig.4 Differential pressure vs. probe length for different solid feed rates.

・粒子ホールドアップの測定及び測定値と計算値の比較

測定原理の方法により粒子ホールドアップを求め、測定値と計算値の比較を行った。その結果を Fig.5 に示す。本実験の測定法において一定供給量では粒子ホールドアップに変化はなく、供給量の増加に伴い粒子ホールドアップも増加した。

実測した差圧から導いた固気サスペンション密度から求めたホールドアップと実測した粒子供給量から求めたホールドアップとの比較を行った。

測定値を求める式 (1)式より

$$\rho_{\text{sus}} = (1 - \varepsilon) \rho_p + \varepsilon \rho_F$$

計算値を求める式

$$Ws = (1 - \varepsilon) \rho_p U_t \quad (9)$$

測定値と計算値は、ほぼ一致している。

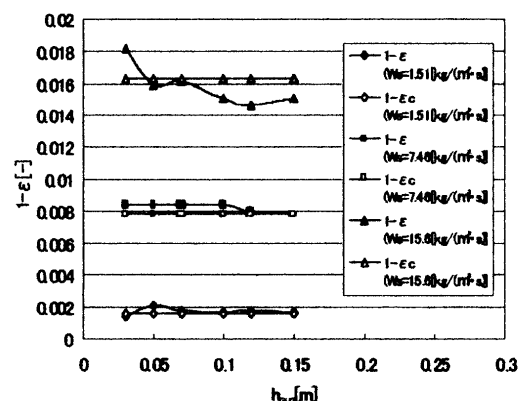


Fig.5 Comparison of measured value to calculated value for different solid feed rates.

5.5 ガラスビーズにおける粒子ホールドアップ測定

・測定管長さの差圧への影響

L 型銅管プロープを用いて、粒子供給量一定でプロープ長さを変えて実験を行った。結果を Fig.6 に示す。FCC 粒子のときと同様に、どの供給量のときにも測定管長さが長くなることで差圧が大きくな

っていることがわかった。このことから、測定管長さの変化に伴う差圧の変化が確認できた。

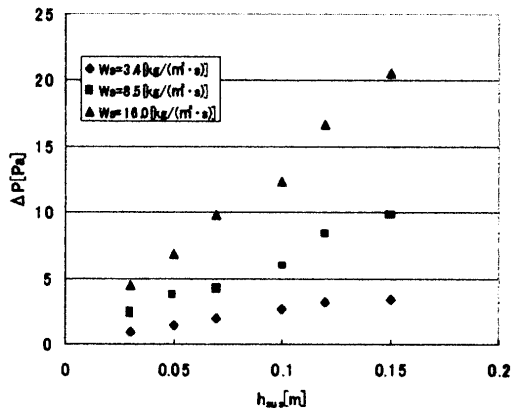


Fig.6 Differential pressure vs. probe length for different solid feed rates.

・粒子ホールドアップの測定及び測定値と計算値の比較

測定原理の方法により粒子ホールドアップを求め、測定値と計算値の比較を行った。その結果を Fig.7 に示す。本実験の測定法において一定供給量では粒子ホールドアップに変化はなく、供給量の増加に伴い粒子ホールドアップも増加した。しかし、粒子供給量が多くなるにつれて測定値と計算値の差が増加している。このことから、FCC 粒子のように Stokes

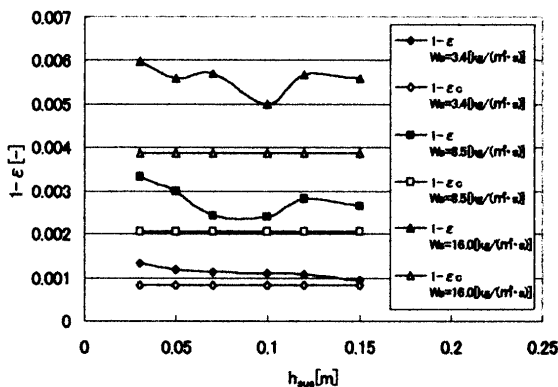


Fig.7 Differential pressure vs. probe length for different solid feed rates.

領域の微粒子では影響なかったが、Allen 領域のガラスビーズは粒子径が大きいため落下速度が大で、粒子同士の干渉及び壁面の影響を受けやすくなることから、粒子の落下速度の仮定に問題があると考えられる。

6. 結言

本実験装置では、測定管内の固気サスペンション密度から差圧を測定し、本実験の測定原理より測定した差圧から下降流の粒子ホールドアップが測定できる。

Notation

h_1, h_2 : 封液と圧力導入端の垂直距離[m]

h_g : 封液の垂直距離[m]

h_{sus} : プロブ測定管長さ[m]

ΔP : 差圧[Pa]

p_1, p_2 : プロブ圧力導入端静圧[Pa]

ρ_p : 粒子密度[kg/m³]

ρ_F : 流体密度[kg/m³]

ρ_{sus} : 固気サスペンション密度[kg/m³]

U : 粒子落下速度[m/s]

Y_m : 粒子落下距離[m]

U_t : 終末速度[m/s]

ε : 空隙率[-]

$1-\varepsilon$: 粒子ホールドアップ (測定値) [-]

$1-\varepsilon_c$: 粒子ホールドアップ (計算値) [-]

Ws : 粒子供給量[kg/(m²·s)]

t : 粒子供給時間[s]

g : 重力加速度[m/s²]

μ : 気体粘度[kg/(m·s)]

Ar : アルキメデス数[-]

References

- 1) Charles J. Coronella, Jianxun Deng: Powder Technology, 99, 211-219 (1998)
- 2) J. Aguilon, K. Shakourzadeh, P. Guigon: Powder Technology, 86, 251-255 (1996)
- 3) P.M. Herbert, A. Gauthier, C.L. Briens, M.A. Bergougnou: Powder Technology, 96, 255-261 (1998)
- 4) B. Hirschberg and J. Werther: AIChE Journal Vol. 44, No. 1, 25-34 (1998)
- 5) David M.J. Puchyr, Anil K. Mehrotra and Leo A. Behr: Can. J. Chem. Eng., 75, 317-326 (1997)