

© 1989 ISIJ

論 文

循環流動層における粉とガスの運動特性

山 岡 秀 行*

Flow Characteristics of Gas and Powders at Circulating Fluidized Bed Reactor

Hideyuki YAMAOKA

Synopsis :

In order to investigate the characteristic of the circulating fluidized bed reactor, a cold model experiment was made to evaluate the interaction force between gas and powders and a mathematical simulation model was developed to estimate the behaviors of powders and gas in the riser and the downcomer. As a result of these studies, it is predicted that the gas velocity must be set high at the riser to achieve a stable circulating flow of powders and to use raw material with larger distribution of particle size.

Key words : ironmaking ; fluidized bed reactor ; two phase flow of gas and powders ; mathematical simulation model.

1. 緒 言

従来、粉鉱石還元用の流動層としてはガス流速を比較的低位に保持し、高密度の流動状態を形成させる方式が一般的であるが、炉床生産性が低く、また、反応温度を高くすると原料が付着して操業の不安定性を誘発する問題があった。一方、近年、ガス流速を高位に維持して反応塔を気流輸送管に近い状態とし、反応塔から出た原料をふたたび反応塔へ循環させることによりガスとの反応時間を確保させようとする循環流動層方式が注目されている¹⁾。この方式では生産性、操業の安定性ともに改善できる可能性があり、粉鉱石還元への適用も考えられている²⁾。しかし、層内における粉とガスの挙動、熱伝達、化学反応等基本的なメカニズムが十分解明されているとはいえず、さらに実験的、理論的なデータを集積する必要があると考えられる。

ここでは循環流動層における粉とガスの運動支配因子を整理するとともに冷間実験を踏まえて流動層内部における粉とガスの運動記述式を導出し、粉とガスの運動特性について考察した。

2. 循環流動層の流体力学的技術要素

循環流動層の構成の1例を Fig. 1 に示す。

主要構成要素は、原料である粉が下部から吹き込まれ、

ガスと反応しながら上昇運動するライザー (Riser)、粉がガスと分離されるサイクロン、分離された粉が降下するダウンカマー (Downcomer)、粉が再度ライザーに循環する通路および製品をとりだす抜出し口である。

粉の流れに着目すると、ライザーを上昇する粉とダウンカマーを降下する粉の流量は等しく、ダウンカマーを降下した粉の一部をライザーに戻すことにより粉の循環流れが形成される。

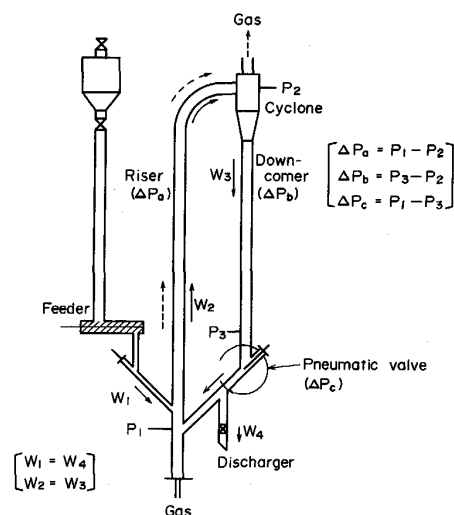


Fig. 1. A configuration of the circulating fluidized bed reactor.

昭和 63 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 4 月 13 日受付 (Received Apr. 13, 1988)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

ライザーでは粉が上方に搬送されるので下方から上方に向けて($\Delta P_a = P_1 - P_2$)で示される圧力損失が生じる。ダウンカマーでもガスは降下する粉に対して相対的に上方に流れていることになるため、やはり、下方から上方に向けて($\Delta P_b = P_3 - P_2$)で示される圧力損失が生じる。ここで、ダウンカマー下部の圧力 P_3 がライザー下部の圧力 P_1 以下になる場合を想定すると、ガスはライザー下部からダウンカマー内に流れ込むため、ダウンカマーでの粉の降下が阻害される可能性があり、このような事態に対しては、空気弁などを付加的に設置し、ガスのダウンカマーへの流れ込みを抑制する対策が必要となる。したがって、ライザーおよびダウンカマーにおける圧力損失の定量的な把握およびダウンカマーにおける粉の安定な降下が維持できる上向きガス流速の限界値の把握が必要である。また、ライザーはガスと原料の反応が進行する本体であり、粉の滞留時間すなわち流速を定量的に把握することも不可欠の要素である。

このように循環流動層の設計において必要な流体力学的要素はライザーとダウンカマーにおける粉とガスの流速および圧力損失に集約される。

3. ガスと粉の運動の記述

垂直方向の1次元流れを仮定し、ライザーとダウンカマーにおける粉とガスの運動を記述する運動方程式を導出した。

3.1 運動方程式の導出

流動層で使用する原料は必ずしも均質ではない。また、反応の進行とともに粉の粒度、密度、形状等は変化する。そこで、物理化学的性状の異なる多種類の粉とガスが共存する系を想定した。

系内には多種類の粉とガスが共存しているが、ガスと粉および種類の異なる粉同士が相互に作用をおよぼしあうものとし、粉は重力、ガスとの相互作用力および粉同士の相互作用力の合力を受け、また、ガスは圧力および粉との相互作用力の合力を受けて運動していると考えた。

多種類の粉を物理化学的性状で区分け (kj) し、ガス(添え字 g) と粉(添え字 kj , ここで k は粉を示し、 j は粉の種類を示す) との相互作用力を $F_{kj, g}$ 、種類の異なる粉同士の相互作用力を $F_{kj, kj'}$ で示せば、運動量保存と質量保存の関係から、垂直方向のガスと粉 kj の運動に対して次の方程式が成立する。

(粉 kj の運動)

$$w_{kj} \frac{du_{kj}}{dx} = F_{kj, g} - \epsilon_{kj} \rho_{kj} g_c - \sum_j F_{kj, kj'} \dots \dots \dots (1)$$

$$\epsilon_{kj} \rho_{kj} u_{kj} = w_{kj} \dots \dots \dots (2)$$

(ガスの運動)

$$w_g \frac{du_g}{dx} = - \sum_j F_{kj, g} - \frac{dP}{dx} \dots \dots \dots (3)$$

$$(1 - \sum_j \epsilon_{kj}) \rho_g u_g = w_g \dots \dots \dots (4)$$

ここに使用した記号の意味を以下に整理して示す。

- u_{kj} : 粉 kj の流速 (m/s)
- u_g : ガスの流速 (m/s)
- w_{kj} : 粉 kj の質量流速 (kg/s m²-bed)
- w_g : ガスの質量流速 (kg/s m²-bed)
- ϵ_{kj} : 粉 kj の空間占有率 (m³/m³-bed)
- ρ_{kj} : 粉 kj のみかけ密度 (kg/m³)
- ϕ_{kj} : 粉 kj の形状係数 (—)
- d_{kj} : 粉 kj の粒度 (m)
- H_{kj} : 粉 kj の滞留量 (kg/m³-bed)
- ρ_g : ガスの密度 (kg/m³)
- μ_g : ガスの粘性係数 (kg/m s)
- P : ガスの圧力 (kg/m s²)
- $F_{kj, g}$: 粉 kj とガスの相互作用力 (kg/m²s²)
- $F_{kj, kj'}$: 粉 kj と粉 kj' との相互作用力 (kg/m²s²)
- g_c : 重力加速度 (m/s²)
- x : 高さ方向座標 (m)

次に、十分に発達した流れ、すなわち、 $x = \infty$, を想定すれば、(1)から(4)式は次式のように簡素化される。

(粉 kj の運動)

$$F_{kj, g} = \epsilon_{kj} \rho_{kj} g_c + \sum_j F_{kj, kj'} \dots \dots \dots (5)$$

$$\epsilon_{kj} \rho_{kj} u_{kj} = w_{kj} \dots \dots \dots (6)$$

(ガスの運動)

$$w \frac{dP}{dx} = - \sum_j F_{kj, g} \dots \dots \dots (7)$$

$$(1 - \sum_j \epsilon_{kj}) \rho_g u_g = w_g \dots \dots \dots (8)$$

$\epsilon_{kj} \rho_{kj}$ は単位体積内に存在する粉 kj の量を示しているが、これを粉 kj の滞留量とする。

$$H_{kj} = \epsilon_{kj} \rho_{kj} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、十分に発達した流れの場合、(7)式から圧力損失はガスと粉の相互作用力の総和に等しくなる。また、(5)式に着目すると、単一種の粉のみが存在する系においては粉同士の相互作用力は無視できる。多種類の粉が共存する場合でも、粉同士の相互作用を通して粉全体としての運動量が保存される場合を想定すれば、(5)式ですべての種類の粉に対して総和をとると粉同士の相互作用力の総和である右辺第2項 $\sum_j \sum F_{kj, kj'}$ は0になる。したがって、粉の滞留量もガスと粉の相互作用力に支配されることになる。

すなわち、圧力損失と粉の滞留量を評価するポイント

は粉とガスの相互作用力 ($F_{kj, g}$) の定量化にある。

3.2 ガスと粉の相互作用力の定式化

充填層空隙内の固気2相流の研究において、粉とガスの相互作用力は粉がガス中で均一に分散していると仮定し、空間の体積を粉の全表面積で割り算して得られる水力学的直径を代表寸法 (D_e) とした次式に示すレイノルズ数 (Re) と抵抗係数 (f) の関係より ERGUN タイプの流体抵抗力と同じ形で整理し得ることが示されている³⁾。したがって、パイプ内においても粉がガス中で均一に分散していると仮定すれば、空間の全体積を粉の全表面積で割り算して与えられる水力学的直径を代表寸法とした次式に示すレイノルズ数と抵抗係数の関係により粉とガスの相互作用力を整理し得る可能性がある。

$$Re = \frac{\rho_g(u_g - u_{kj})D_e}{\mu_g} \dots\dots\dots (10)$$

$$f = \frac{g_c F_{kj, g} D_e}{\rho_g(u_g - u_{kj})^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$D_e = \frac{(1 - \epsilon_{kj})\phi_{kj}d_{kj}}{\epsilon_{kj}} \dots\dots\dots (12)$$

一方、単一種の粉体を用い、流れが十分に発達した条件でガスの圧力損失を測定すれば、(5)~(8)式の関係を用いて次式によりレイノルズ数 (Re) と抵抗係数 (f) を計算するために必要な諸数値を求め、ガスと粉の相互作用力を評価することができる。

$$F_{kj, g} = H_{kj} = -\frac{dP}{dx} \dots\dots\dots (13)$$

$$\epsilon_{kj} = \frac{H_{kj}}{\rho_{kj} g_c} \dots\dots\dots (14)$$

$$u_{kj} = \frac{w_{kj}}{H_{kj}} \dots\dots\dots (15)$$

$$u_g = \frac{w_g}{(1 - \epsilon_{kj})\rho_g} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 μ_g , ρ_g , ρ_{kj} , ϕ_{kj} , d_{kj} , w_{kj} , w_g は実験条件として与えられたものである。

以下に、冷間実験を実施して上記の可能性を検討した。

3.3 冷間実験

3.3.1 実験方法

ガスとして常温、常圧の空気を使用し、粉としては直径 0.07, 0.1, 0.2 mm, 見かけ密度 2500 kg/m³ のガラス球粉を使用し、ライザーとダウンカマーにおける圧力損失と粉の滞留量を調査した。

ライザーとダウンカマーのそれぞれを模擬した実験装置を Fig. 2, 3 に示す。ダウンカマーの本体は垂直に保持された内径 41 mm, 長さ 2000 mm のアクリルパイプであり、上部から粉を供給してパイプ内を降下させ、下

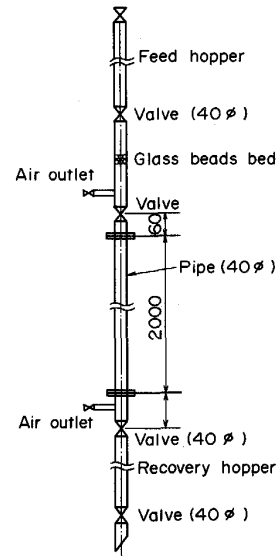


Fig. 2. The experimental apparatus for the down-comer.

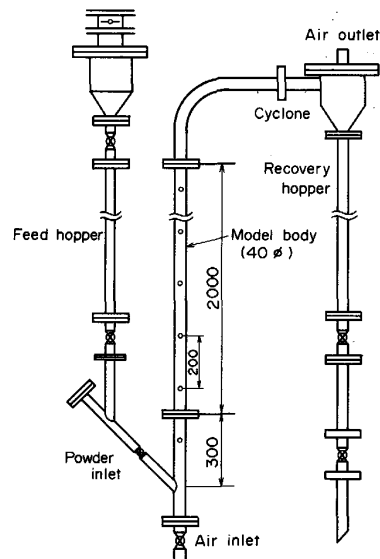


Fig. 3. The experimental apparatus for the riser.

部のホッパーに回収するようにした。本体の下部には空気孔を設け、空気を流さない条件および下方から 1 m/s および 2 m/s の流量で空気を流した条件でも実験を行った。粉の供給速度は 0~25 kg/m²s に設定した。ライザーの本体はダウンカマーと同様、垂直に保持された内径 41 mm, 長さ 2000 mm のアクリルパイプであり、下部から粉を供給し、本体下部の空気吹込み口から空気を吹き込んで本体アクリルパイプ内に粉とガスがともに上昇する固気2相流を形成させた。上部から排出された粉はサイクロンにより分離し、下部のホッパーに回収するようにした。空気流速は 0.5 m/s から 5 m/s の範囲に

設定し、粉の供給速度は $0 \sim 25 \text{ kg/m}^2\text{s}$ に設定した。空気は、粉をサイクロンで分離後、大気放出するようにしている。

計測項目は粉の供給速度、高さ方向圧力分布、粉滞留量の3項目であるが、粉の供給速度は、装入ホッパー内の粉のレベル変化を計量し、高さ方向圧力分布は、本体高さ方向 200 mm 間隔に静圧孔を設置して求めた。また、粉滞留量は、同時に上下のバルブと粉供給バルブを閉じ、本体内に残留する粉の量を計量して求めた。

3.3.2 実験結果

(1) 高さ方向圧力分布

Fig. 4 にダウンカマーにおける高さ方向圧力分布を示す。上部から下部に直線的に増加する圧力分布が形成されている。厳密には上部の圧力損失がやや小さくなっ

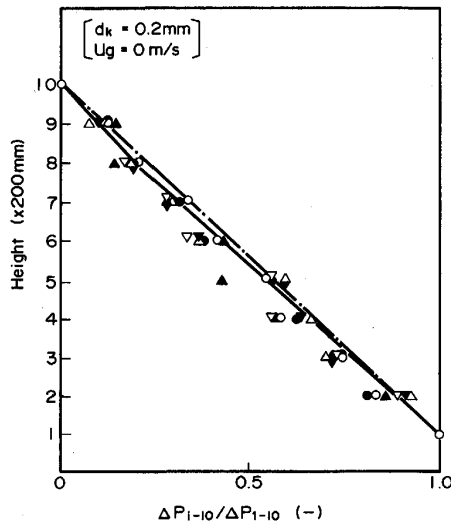


Fig. 4. A profile of pressure observed at the downcomer.

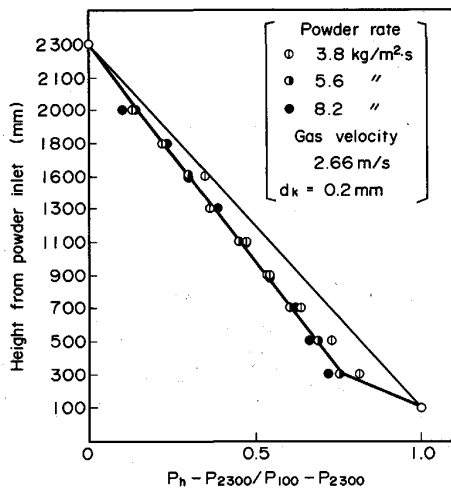


Fig. 5. A profile of pressure at the riser.

ているが、これは、上部から供給された粉が重力により加速され、発達した降下流れを形成するに至るまでの加速区間に対応している。

Fig. 5 にはライザーにおける圧力分布を示している。ここでも下部から上部へと直線的に減少する圧力分布が形成されている。ここでは下部の圧力損失が大きくなっているが、これも、下部から供給された粉がガスと粉の相互作用により加速され、発達した上昇流れを形成するに至るまでの加速区間に対応している。これらの加速区間は運動記述式の(1)式左辺で示されている。

(13)から(16)式は十分に発達した流れを前提としているため、圧力損失としてライザーでは上方半分における値、ダウンカマーでは下方半分における値を採用した。

(2) 粉滞留量と圧力損失の関係

Fig. 6 に粉滞留量と圧力損失の関係を示す。(13)式から予想されるように、両者はおおむね一致している。この関係をふまえて(13)式から粉とガスの相互作用力を決定するが、粉の滞留量の計測値には上下バルブを閉じる手操作に伴う誤差が混入している可能性があるため、ここでは粉とガスの相互作用力としてガスの圧力損失の計測値を採用した。

(3) 粉とガスの相互作用力の定量化

(10)~(16)式を用いて実験データから求めたレイノルズ数と抵抗係数の関係を Fig. 7 に示す。

ダウンカマーのレイノルズ数は 1000~10000 の範囲を占めている。充填層内ガス流れに対する ERGUN の流体抵抗力の場合、レイノルズ数が 1000 以上の範囲における抵抗係数は一定値 (= 1.75) である。しかし、本実験のダウンカマーの場合、レイノルズ数が 4000 以上の領域における抵抗係数はおおむね一定値を示すが、レ

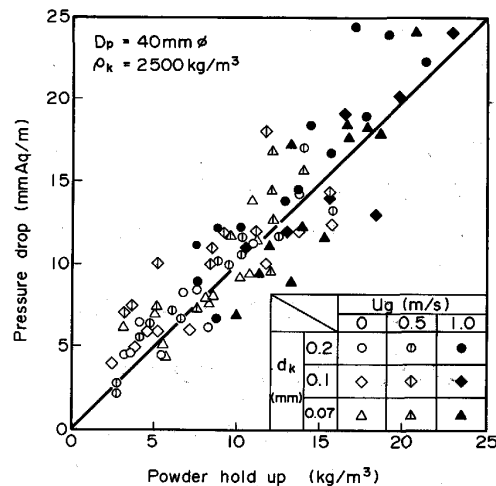


Fig. 6. A relationship between the powder hold-up and pressure drop in the downcomer.

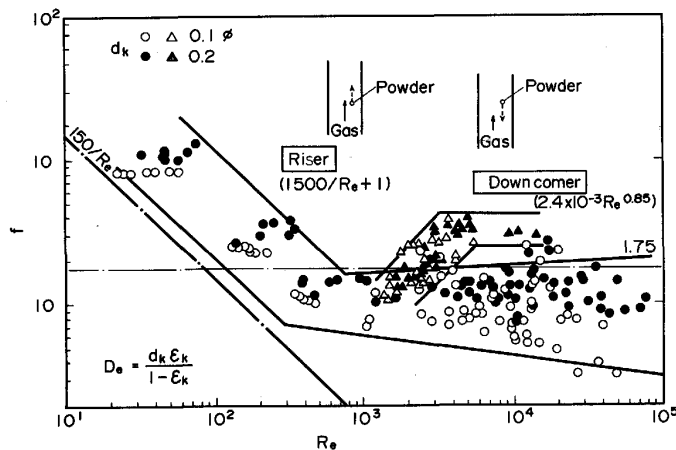


Fig. 7. A relationship between Reynolds number and friction factor.

レイノルズ数が4000以下になると抵抗係数はレイノルズ数の0.85乗に比例する関係になっている。

観察によれば、高レイノルズ数の領域に相当する粉供給量の少ない実験の場合、粉は均一分散に近い形で降下していたが、低レイノルズ数の領域に相当する粉供給量の多い実験または下部から空気を吹き込んだ実験になると、粉は疎密化して紐状になり、螺旋回転して降下するようになった。抵抗係数のレイノルズ数依存性の変化はこのような粉の降下状況の変化と対応している。

ライザーのレイノルズ数は50~100000の範囲を占めている。この範囲における抵抗係数のレイノルズ数依存性は、係数の絶対値に差異はあるものの、ERGUNタイプの流体抵抗力の場合とおおむね一致している。

ただし、レイノルズ数の高い範囲に対応する空気流速の高い実験の場合、粉は均一分散した状態で流れていたが、レイノルズ数の低い範囲に対応する空気流速の低い実験になると周期的な粉の上下運動が観察された。

以上、ダウンカマー、ライザーともに流量、空気流速に依存して粉の流れ模様に変化が認められたが、本実験条件の範囲内でレイノルズ数と抵抗係数はおおむね次式で整理された。

(ダウンカマー)

$$\begin{aligned} Re < 4000 & \quad f = 2.4 \times 10^{-3} \cdot Re^{0.85} \\ Re > 4000 & \quad f = 3.0 \end{aligned} \quad (17)$$

(ライザー)

$$f = 1500 / Re + 1.0 \quad (18)$$

4. 循環流動層におけるガスと粉の挙動

冷間実験で得られた抵抗係数とレイノルズ数の関係式である(17)と(18)式、抵抗係数とレイノルズ数の定義式である(10)から(14)式、および運動方程式である(1)から(4)式を用いてライザーおよびダウンカマーにおける

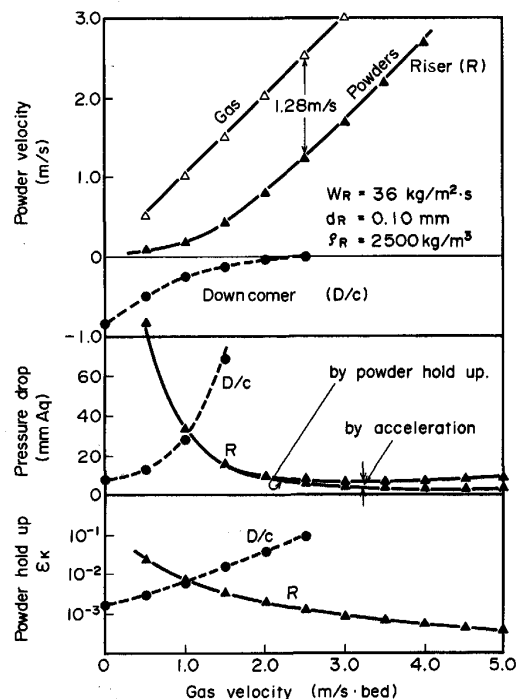


Fig. 8. The behaviors of gas and powders at riser and downcomer calculated by the model.

ガスと粉の流速、粉の空間占有率および圧力損失を計算する数学モデルを作成し、塔高が2mのライザーおよびダウンカマーにおける粉とガスの運動特性を検討した。ガスとしては上記の実験と同じく、常温、常圧の空気を想定し、粉としてはガラス球粉を想定した。

4.1 ライザーとダウンカマーでのガスと粉の挙動

粉の直径を0.1mm、流量を32 kg/m²sとし、ライザーとダウンカマーにおける粉の流速と滞留量および圧力損失をガス流速に対して整理した結果をFig. 8に示す。

ライザーに着目すると、ガス流速が低い領域では粉の滞留量(ε_{kj}で示している)が多く、圧力損失の高い流

動状態が形成される。実験と対比すると、粉は上下運動していると考えられる。ガス流速を増加させると粉の流速が増加して粉の滞留量が減少し、圧力損失は低位安定化する。しかし、ガス流速が 3 m/s 以上になると、(1) 式の左辺で示される粉の加速の影響が大きくなるため圧力損失は増加するので、ライザーの圧力損失には極小値が存在することになる。

ライザーにおける粉とガスの相対速度はガス流速の増加とともに増大し、ガス流速が約 2.5 m/s 以上の領域では 1.28 m/s 程度に保たれる。一方、単粒子とガスの相対速度は単粒子の自由沈降速度とみなしてよく、STOKES の抵抗力と NEWTON の抵抗力を用いて評価されているが⁴⁾、直径が 0.1 mm、密度が 2 500 kg/m³ の粒子では約 0.5 m/s と算定される。したがって、ライザーにおけるガス流速の高い領域でのガスと粉の相対速度は単粒子の自由沈降速度を大幅に上回ることになる。

ダウンカマーに着目すると、ガス流れがない場合でも降下する粉とガスには速度差が生じるため圧力損失が発生するが、上向きガス流速の増加とともに粉の降下速度が低下して滞留量が増加するため、圧力損失は増大する。しかし、単粒子の自由沈降速度の 5 倍に相当するガス流速が 2.5 m/s まで粉は降下できる計算になる。このような領域では粉は螺旋回転して降下していると考えられる。

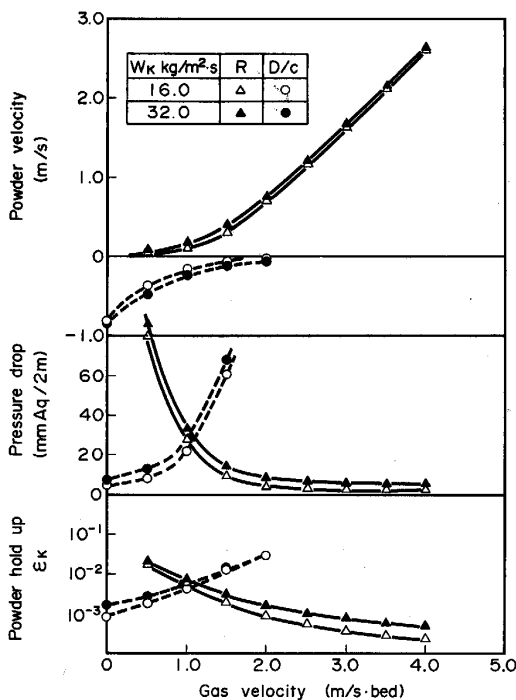


Fig. 9. The effect of the powder flow rate on the behaviors of gas and powders.

ここで、ライザーとダウンカマーの圧力損失を比較すると、ライザーにおける圧力損失はガス流速が 2 m/s 以上の範囲でダウンカマーの圧力損失より低くなる。また、ダウンカマーでは上向きガス流速が 2.5 m/s 以下の範囲で粉は降下可能であるとともに、上向きガス流速の増加に対して圧力損失は急激に増加する。したがって、ライザーにおけるガス流速を高位に設定すれば、ダウンカマーへのガスの流れ込みを抑制して安定した粉の循環流れを形成させることができることになる。

4.2 粉の流量の影響

粉の流量を増加させた場合を Fig. 9 に示す。

ライザーにおける粉の流量の増加はガス流速の低い領域では粉の滞留量の増加よりも流速の増加を引き起こすが、ガス流速の高い領域では粉の流速の増加よりも滞留量の増加を引き起こすようになる。また、ダウンカマーでは粉の流量が増加しても粉の降下が可能な上向きガス流速の値に大きな変化はない。すなわち、循環流動層ではガス流速を高位に設定することにより、粉の循環量の増加を実質的な滞留時間 (=塔高/流速×循環回数) の増加、すなわち、反応時間の増加につなげることができることになる。

5. 考 察

(17), (18)式を導出した実験で使用したガラス粉の粒度は 0.07 ないし、0.2 mm であり、大幅に粒度が異なる場合に対する適用の妥当性は問題があるが、仮に(17), (18)式で規定されるガスと粉の相互作用力が粒度の大きく異なる 0.01 mm および 1.0 mm の粉にも適用できると仮定し、粉の粒度を変化させた場合における粉の挙動を考察した。

また、(1)から(4)式の運動方程式は多種類の粉が混在する系を想定したものである。そこで、(17), (18)式により規定されるガスと粉の相互作用力が多種類の粉が混在する場合における個々の粉とガスの相互作用力の記述にも適用可能と仮定し、また、粉同士の相互作用力記述式としては粉同士の衝突のみを考慮して次式を適用し⁵⁾、粒度が異なる粉が共存する場合も考察した。

$$F_{k_j, k_j'} = 1.5 \frac{(1 + e_{k_j, k_j'})}{(1 - e_{k_j, k_j'})} \cdot \frac{\epsilon_{k_j} \rho_{k_j} \epsilon_{k_j'} \rho_{k_j'} (d_{k_j} + d_{k_j'})^2}{(\rho_{k_j} d_{k_j}^3 + \rho_{k_j'} d_{k_j'}^3)} \cdot |u_{k_j} - u_{k_j'}| \cdot (u_{k_j} - u_{k_j'}) \dots (19)$$

$e_{k_j, k_j'}$ は衝突における反発係数 (—) であるが、0.94 とした。

5.1 粉の粒度の影響

粒度が 1.0 mm, 0.1 mm, 0.01 mm の粉に対して計算した結果を Fig. 10 に示す。

ガスと粉の相互作用力は粒度に依存するため、ライザーおよびダウンカマーにおける粉の流動特性は粒度に大きく支配される。例えば、粒度が 0.01 mm の粉で示されるように微細な粉を使用する場合、粉の加速の影響によりライザーの圧力損失が増加し、ダウンカマーの圧力損失より高くなるので、ダウンカマーへのガスの流れ込みが発生しやすくなり、安定な粉の循環流れを形成させるためには空気弁など、ダウンカマーへのガスの流れ込みを抑制する対策が必要になると推定される。一方、粒度が 1.0 mm の粉で示されるように粗い粉を使用する場合、粉の滞留量を減少させて圧力損失を低下させるためにはライザーのガス流速を高く設定する必要があるとともに、ダウンカマーの圧力損失が低下するため、ダウンカマーへのガスの流れ込みも発生しやすくなると推定される。

STOKES の抵抗力と NEWTON の抵抗力を用いて計算される単粒子の自由沈降速度は粒度が小さい場合は粒度の 2 乗に比例し、粒度の粗い場合には粒度の 0.5 乗に比例し、粒度が 0.01 mm, 0.1 mm, 1.0 mm のガラス粉に対してそれぞれ 0.06 m/s, 0.5 m/s, 5.0 m/s と計算される。一方、(17), (18)式の実験式を基とした本数学モ

デルによれば、ライザーにおけるガスと粉の相対速度はレイノルズ数の小さい範囲で粒度の 1 乗、レイノルズ数の大きな範囲では粒度の 0.5 乗に比例し、例えばガス流速が 5 m/s の条件におけるガスと粉の相対速度は粒度が 1.0 mm, 0.1 mm, 0.01 mm のそれぞれに対し、4.46 m/s, 1.28 m/s, 0.45 m/s と計算される。これらの数値を比較すれば、ガスと粉の相対速度は粒度が小さくなるにしたがい単粒子の自由沈降速度より大きくなることになる。一方、ダウンカマーにおけるガスと粉の相対速度はレイノルズ数の小さい範囲でおおむね粒度の 0.05 乗、レイノルズ数の大きな範囲で粒度の 0.5 乗に比例する。すなわち、レイノルズ数が小さい条件に対応する上向きガス流れのある場合、本数学モデルではガスと粉の相対速度の粒度依存性は極めて小さくなり、粒度が 1.0 mm から 0.01 mm までおしなべて約 2.5 m/s の上向きガス流れに抗して降下できることになる。

5.2 粒度分布の影響

粒度が 1.0 mm, 0.1 mm および 0.01 mm の 3 種類の粉を等量混合させた場合の計算結果を Fig. 11 に示す。

粒度の異なる粉の間に速度差が生じると、粉同士の相互作用力がはたらくため粉同士の速度差はさほど大きくならない。特にガス流速を増加させると流速が全体的に増加するため、粒度の異なる粉同士の速度差は相対的に減少する。これは、滞留時間の均一化すなわち反応時間

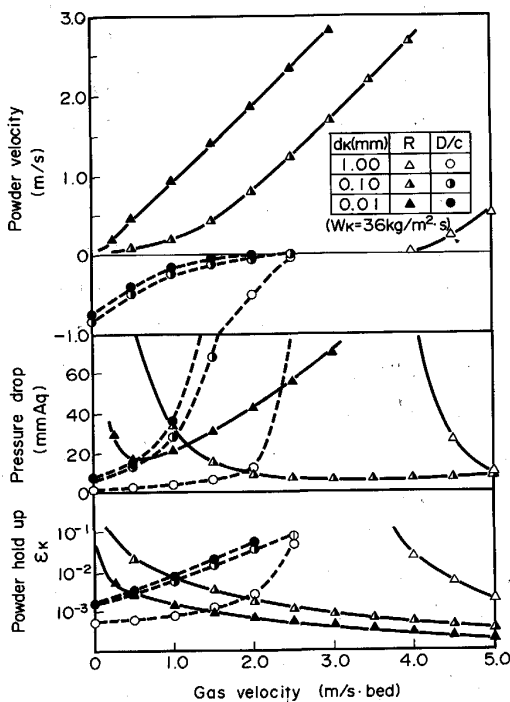


Fig. 10. The effect of particle size on the behaviors of gas and powders.

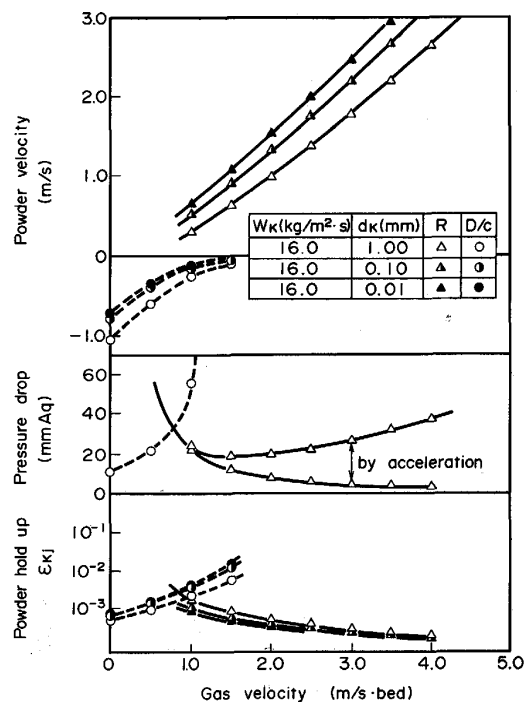


Fig. 11. The behaviors of powders of different size at riser and downcomer, calculated.

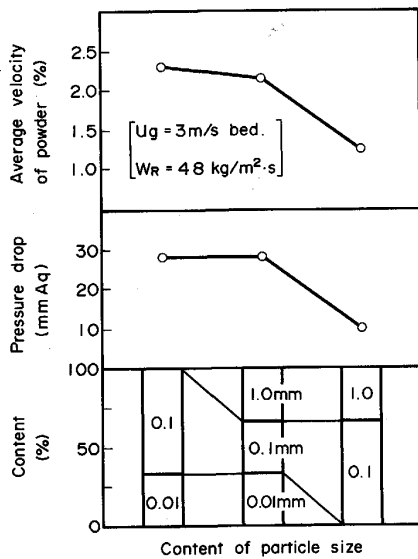


Fig. 12. The effect of the range of powder size on powder velocity and pressure drop at riser.

の均一化を意味する。したがって、ガス流速を高位に設定することにより原料の粒度分布制約条件を緩和できると推定される。

ただし、Fig. 8 に示した粒度が 0.1 mm の粉のみの場合と比較すると、粒度が 1.0 mm と 0.01 mm の粉を混合した場合の Fig. 11 ではガス流速の高い領域での圧力損失が著しく大きくなっている。そこで、3 種類の粉を混合させた場合に対して 0.01 mm の粉を除去した場合と 1.0 mm の粉を除去した場合について粉の平均流速と圧力損失を計算し、比較した結果を Fig. 12 に示す。

明らかに、0.01 mm の粉を除去した方が圧力損失が小さくなり、粉の流速も低下する。粉の流速の低下は反応時間の増加を意味することを勘案すれば、反応効率の面からは微細な粉を除去する方が望ましいと考えられる。

6. 結 言

1) 流動層内において粉は気流中に均一に分散していると仮定し、流動層における粉とガスの運動支配因子であるガスと粉の相互作用力を内部に存在する粉の全表面

積で容積を割って与えられる水力学的直径を代表寸法としたレイノルズ数と抵抗係数により整理することを試み、直径 41 mm、高さ 2000 mm の垂直管、粒度 0.07 ないし 0.2 mm、密度 2500 kg/m³ のガラス粉、常温、常圧の空気を使用して冷間実験を実施し、以下の結果を得た。

(ダウンカマー)

$$f = 2.4 \times 10^{-3} \cdot Re^{0.85} \quad (Re < 4000)$$

$$= 3.0 \quad (Re > 4000)$$

(ライザー)

$$f = 1500/Re + 1.0$$

2) 上式を使用して循環流動層におけるガスと粉の挙動について検討し、ライザーにおけるガス流速を高位に設定する方がライザーの圧力損失が低下してダウンカマーへのガスの流れ込みが抑制されるため、安定な粉の循環流れを形成させる点で有利であること、この場合、循環量を増加させてもライザーにおける粉の滞留時間はあまり変化しなくなるため、循環量の増加を実質的な反応時間の増加につなげることができる点でも有利であることなどの特性を確認した。

3) さらに、上式を粒度が実験条件と著しく異なる場合、また、多種類の粉が共存する場合におけるガスと粉の相互作用力記述式にも適用し、かつ、粉同士の相互作用力としては衝突による運動量の変化のみを考慮して粉の粒度の影響について考察し、ガス流速を高く設定すれば粉同士の相互作用力が増大する結果、粗粒粉と微細粉のライザー内の滞留時間差が減少するため、粒度分布の大きな原料も使用できるが、循環流れの安定化、圧力損失の低下、反応時間の増加などの観点から、微細な粉は除去することが望ましいと考えられる点を指摘した。

文 献

- 1) 循環流動層に関するシンポジウム論文集 (化学工学協会編) (1987 年 6 月)
- 2) 国友和也, 林 洋一, 中村正和: 循環流動層に関するシンポジウム論文集 (化学工学協会編) (1987 年 6 月), p. 36
- 3) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 403
- 4) 森川 信: 流体-固体 2 相流 (1979), p. 66
- 5) 森川 信: 流体-固体 2 相流 (1979), p. 3