オリフィス付きダウンカマーを装着した 噴流層の安定操作条件

Stable Operation Condition for a Spouted Bed Equipped with a Moving Bed Downcomer with an Orifice

永島 大*, 石蔵 利文

Hiroshi Nagashima, Toshifumi Ishikura

Received 11 October 2013; Accepted 13 February 2014

The smooth transfer of solids from upper stage to lower stage through a downcomer is important for a stable operation of multi-stage spouted beds. Behavior of gas and solids in a moving bed downcomer, which is fitted with an orifice at the bottom, under negative pressure gradient has been investigated experimentally for a spouted bed operation, using Geldart D particles as bed materials. For this study, a downcomer has been installed in a one-stage spouted bed.

As the results, the limits of operating conditions for a stable operation of a spouted bed with a downcomer were determined experimentally. The limits were influenced by the pressure drop across the spouted bed at the minimum spouting, length of the downcomer and the pressure gradient of the moving bed in the downcomer. Also, the range of the operating conditions for stable operation was extended with decreasing the bed depth of the spouted bed. In addition, based on experimental observation, the moving bed flow pattern changed from stable flow to intermittent flow as the gas pressure gradient in a moving bed downcomer increased and the fact could be explained by the solids discharge model which expresses the gas and the particles flow in the vicinity of the orifice.

Keywords: Moving bed, Downcomer, Negative pressure gradient, Solids flow pattern, Spouted bed

1. 緒 言

噴流層は、粒子群を規則正しく循環させて流動化させることができるため、流動層ではスラッシングが生じ易い Geldart の D 粒子¹⁾ に属する粗い粒子に適した固気接触装置である^{2,3)}。本装置は、小麦の乾燥装置として開発されたが、その装置特性を生かして近年、乾燥、造粒・コーティング、バイオマスのガス化・熱

分解などの様々な物理的、化学的操作に応用されている^{2,3)}。その際、噴流層が連続的に操作される場合にはスケールアップの方法として多段化が挙げられる。

多段噴流層^{2,4)}は、単一段の噴流層を縦方向に積み重ね、直列に配列したものである。本装置ではガスが装置内部を上向きに流れる中、原料粒子が塔頂部から供給され、上段から下段へ各段で噴流化しながら逐次下降し、最終的に装置底部から排出し、製品粒子として回収される。粒子保有量が同一であれば、多段化により各段の噴流層の層高が低くなるため、最小噴流化速度や圧力損失の減少および粒子滞留時間の均一化などの利点が得られる。

多段噴流層の段間の粒子輸送にはダウンカマー(連結管)^{2,5,6)}が用いられることが多い。ダウンカマーは、背圧下における粒子輸送の手段の一つで、低圧の

粉体工学会2013年度秋期研究発表会(2013年10月、大阪)にて発表

福岡大学 工学部 化学システム工学科

(〒814-0180 福岡市城南区七隈8丁目19-1)

Department of Chemical Engineering, Fukuoka University

(19-1 Nanakuma 8-chome, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan)

* 責任著者連絡先 h-ngsm@fukuoka-u.ac.jp

上部から高圧の底部へ管内の粒子群のシール作用によって圧力差を保ったまま粒子を下方へ輸送する。したがって多段噴流層の系全体を安定操作するためには各段間のダウンカマー内の粒子群の流れがスムーズな移動層状態であることが最も重要となる。

ダウンカマーの底部には粒子群の流量を調節するために、オリフィス、バルブあるいはLバルブなどが一般的に装着されている。本報告ではオリフィスを用いているため、結局多段噴流層の設計・操作は、背圧下におけるオリフィス付きダウンカマーからの粒子群の排出という問題に帰着する。背圧下におけるオリフィス付きスタンドパイプの流動特性^{7,8)} に関しては、管全体が粒子群で満たされた移動層状態で実験され、観察に基づいてその流動パターンなどの検討がなされている。さらにオリフィス近傍のガスと粒子の挙動が安定操作に影響を与えることが示され、安定操作の条件と限界を説明する粒子排出モデル^{7,8)} が提案されている。筆者らは多段噴流層への応用を念頭において、この報告とは異なり、管内に形成される移動層の層高が操作条件によって変化するダウンカマーを用いて同様の検討⁹⁾ を行った。なお、この実験では多段噴流層の段間の圧力差に相当する背圧を絞り弁を調節することで出現させてダウンカマー内に形成される移動層の流動特性を調べている。

本報告では、前報⁹⁾ で得られた知見を踏まえ、オリフィス付きダウンカマーを実際に噴流層に取り付けた場合の安定操作条件に関する実験を行った。試料粒子として Geldart の D 粒子¹⁾ に属する相馬砂とガラスビーズを用い、流動状態を観察し、背圧下での安定操作が可能なガス速度、圧力損失、粒子供給速度などの操作条件の範囲を噴流層の層高を変化させて調べた。その際、前述のオリフィス近傍のガスと粒子の挙動に基づいた粒子排出モデル^{7~9)} を本実験にも適用して、各試料粒子の安定操作が可能な限界点を求め、実験値と比較した。さらにダウンカマー内のスムーズな移動層流れにおけるガス速度と粒子速度の関係を詳細に検討した。

2. 実験装置および条件

ダウンカマーを噴流層に組み込んだ実験装置の概略を Fig. 1 に、実験条件を Table 1 に示す。オリフィス付きダウンカマー①を塔径 $D_T=100\text{ mm}$ 、ガス入口ノズル径④ $D_i=12\text{ mm}$ の噴流層③に装着して、噴流化実験を行った。ダウンカマーは内径 $D_d=20\text{ mm}$ 、長さ $L_d=500\text{ mm}$ のアクリル管で底部にオリフィス②

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

downcomer		
inside diameter	D_d [mm]	20
length	L_d [mm]	500
orifice diameter	D_o [mm]	7
$(D_d/D_o=2.86)$		
spouted bed		
column diameter	D_T [mm]	100
diameter of gas inlet	D_i [mm]	12
bed depth	H [mm]	50, 100, 150
mass flow rate of solids	F [kg/s]	
	Soma sand (SS)	$3.43\sim5.66\times10^{-3}$
	Glass beads (GB)	$3.90\sim5.68\times10^{-3}$

(オリフィス径 $D_o=7\text{ mm}$) が取り付けられている。装置に供給されるガスは室内の空気、ブロワーからサージタンク、四分円ノズル流量計⑧、ガス流量調節バルブ⑦を経て装置内に送り込まれる。実験では、まず粒子群がホッパー⑤から、粒子供給用オリフィスを通して自然排出状態で噴流層に供給される。つぎにバルブ⑦で層内のガス速度 U を調整して、噴流層およ

Table 2 Properties of particles used

Particles	D_{ps} [μm]	ρ_p [kg/m^3]	ε [-]	ε_{mf} [-]	U_{mf} [m/s]	Re_{mf} [-]
Soma sand (SS)	704	2670	0.401	0.413	0.407	19.1
Glass beads (GB)	780	2480	0.372	0.387	0.421	21.2

びダウンカマー内の圧力損失 ΔP を計測する。 ΔP は、圧力変換器（半導体圧力センサ）⑨で検出し、その出力は A/D 変換器⑩を内蔵する PC ⑪に集積される。噴流層内の粒子群は、ダウンカマー上端（粒子入口部）よりダウンカマー管内に溢流し、図中に示すように管内で層高 L の移動層が形成される。定常状態では、ダウンカマーからの粒子排出速度 F が上部ホッパーからの粒子供給速度と等しくなり、ダウンカマー内の移動層の高さ L が一定となる。 F は、実験装置底部の粒子捕集ビン⑥で所定時間に回収される粒子質量で求められた。また図中の H は噴流層底部からダウンカマー上端（粒子入口部）までの長さで、定常状態では噴流層の層高に等しい。 H は 50, 100 および 150 mm に設定した。実験では、まず粒子供給速度を設定して、ガス速度 U を最小噴流化速度付近から徐々に増加させて、ダウンカマー付き噴流層の系全体が安定操作可能な操作条件の範囲を調べた。

実験に用いた粒子は、通常の噴流層で処理される D 粒子に相当するやや角張った相馬砂と球形に近いガラスビーズで、各試料粒子の主な特性を Table 2 に示す。粒子径 D_{ps} は空気透過法で求めた比表面積球相当径、粒子密度 ρ_p はピクノメータ法による実験値である。また表中の空隙率 ε は、前報⁹⁾ のダウンカマーのみの実験で得られた値で、ダウンカマー内で形成された安定な移動層の空隙率を示す。なお、この値はガス速度、粒子速度によらずほとんど一定であった⁹⁾ ため、本実験におけるダウンカマー内の移動層に対しても用いた。なお、ダウンカマー内の粒子移動層が管全体を満たしていないため、操作条件が変化しても移動層の層高が変化することによって空隙率が一定を保つと考えられる。さらに流動層の流動化実験で得られた最小流動化速度 U_{mf} 、その時の空隙率 ε_{mf} および粒子基準のレイノルズ数 Re_{mf} の値も表中に示している。

3. 背圧下における粒子排出モデル

3. 1 ダウンカマー内粒子群の流動パターン

本実験において、噴流層に組み込まれたダウンカマー内の粒子群の流動状態が 2 種の流動パターンに大別できることが観察から認められた。その定性図を Fig. 2

Fig. 2 Schematic diagram of flow patterns in a moving bed downcomer with an orifice

に示す。 F_0 は、ダウンカマー底部のオリフィスからの粒子群の自然排出速度¹⁰⁾ である。前報⁹⁾ の噴流層に組み込まずに行った背圧下におけるダウンカマーからの粒子排出実験の場合と同様に、安定な移動層状態 (I) では、ダウンカマー底部のオリフィス直上に動的アーチが形成され、マクロ的にはこのアーチを通して粒子群が連続排出される。圧力勾配 ($\Delta P/L$) の増加に伴い、粒子群の排出と閉塞が周期的に繰り返され、それに応じて移動層の高さ L が最大値 L_{max} と最小値 L_{min} の間を上下する不安定な状態 (II) になり、安定な操作のためには圧力勾配に限界値があることが観察から認められた。この安定な移動層操作のための圧力勾配の限界値を $(\Delta P/L)_{crit.}$ と定義した。なお、不安定な状態 (II) は、Zhang and Rudolph^{7,8)} が検討したようなスタンドパイプの操作では管全体が粒子で満たされているため、現れない流動パターンである。

前報⁹⁾ で示したように、ある粒子供給速度 F の下でダウンカマー内に層高 L の安定な移動層が形成されている場合、圧力勾配 $\Delta P/L$ は一定値を保つ。本実験のようにダウンカマーを噴流層に取り付けた場合には、噴流層の圧力損失 ΔP が増加するとダウンカマー下部のオリフィス部における背圧が増加するため、オリフィスからの粒子排出速度が F よりも一旦小さくなり、ダウンカマー内の粒子量が増加する。この粒子

の蓄積によって、移動層の層高が大きくなるため、オリフィスからの粒子排出速度が次第に増加する。そして $\Delta P/L$ が元の値と等しくなった時点で粒子排出速度は F まで回復し、再び層高が一定の安定な移動層が形成される定常状態に戻ると考えられる。

3.2 粒子排出モデル

Fig. 3 はダウンカマー部分に着目したガスと粒子の流れの模式図である。ガスおよび粒子などの速度を考慮する際は上向きを正とした。ダウンカマーの上端は噴流層の層上部で大気開放、一方下端のオリフィス部分は噴流層の圧力損失分加圧された背圧下であり、ダウンカマーの内部には移動層が形成される。この背圧下の操作が定常状態であれば、ダウンカマー底部のオリフィスからの粒子排出速度 F は、上部ホッパーからの粒子供給速度、すなわち噴流層上表面部でオーバーフローによってダウンカマー上端から流入する粒子速度と等しい。ここでダウンカマー内の移動層に着目すると、 F は次式で表される。

$$F = |U_s| \cdot (1 - \varepsilon) \rho_p \cdot A_d \quad (1)$$

ここで U_s は移動層内の粒子速度 ($U_s < 0$)、 ε は空隙率、 ρ_p は粒子密度である。

Fig. 3 Schematic diagram of gas flow and particles flow in a moving bed downcomer

また、ダウンカマー内のガス空塔速度を U_g 、移動層内の粒子とガスの相対速度（ダウンカマー断面積基準）を U_r とし、次式で定義した。

$$U_r = U_g - \varepsilon \cdot U_s \quad (2)$$

さらにダウンカマー底部のオリフィス直上の半球面積基準のガス速度を U_{gs} とすると、 U_{gs} は U_g を用いて次式で表すことができる。

$$U_{gs} = \frac{U_g}{2} \left(\frac{D_d}{D_o} \right)^2 \quad (3)$$

上式中 D_d 、 D_o はそれぞれダウンカマーの内径、オリフィス径である。

粒子排出速度の安定性などを保持するためには、ダウンカマー内の粒子群を前述の (I) の安定な移動層状態に保つ必要がある。そこで安定な移動層状態の (I) と不安定な状態 (II) の境界を推算できることが重要となる。この境界点の推算に関して、Zhang and Rudolph^{7,8)} は、実験結果に基づいてモデルを提案している。そのモデルでは、Fig. 2 に示すように境界点においてはダウンカマー底部のオリフィス直上に形成される粒子の動的アーチが半球状にまで成長し、そこを通過するガス速度 U_{gs} が粒子の最小流動化速度 U_{mf} に等しい ($U_{gs} = U_{mf}$) と考えた。Zhang and Rudolph^{7,8)} の実験は、スタンドパイプ全体が粒子で満たされた移動層流れにおけるもので、また粒子径 $677 \mu\text{m}$ のガラスビーズのみを用いた結果である。筆者らは前報⁹⁾ でダウンカマーのみの実験に対してこのモデルが概ね適用できることを示し、さらに、その実験における観察から $U_{gs} > U_{mf}$ ではオリフィス直上に気泡が断続的に発生し、管内粒子群の層高が周期的に上下する不安定な状態 (II) になることを示した。前報⁹⁾ の実験は、多段噴流層における噴流層一段分の圧力損失に相当する背圧を絞り弁を用いて出現させて行ったもので、得られたダウンカマー内移動層の流動特性は、ダウンカマーを実際に噴流層に取り付けた場合と変わりはないと考えられる。したがって、本実験結果にもこのモデルを適用した。このモデルに基づいたオリフィス直上半球面積基準ガス速度 U_{gs} および圧力勾配 $\Delta P/L$ と管内粒子群の流動状態の関係を **Table 3** に示す。

上記の粒子排出モデルに基づいて噴流層に組み込まれたダウンカマー内の安定な移動層状態およびその限界における各推算値を求めるために以下の式を用いた。

噴流層に組み込まないダウンカマーのみの粒子排出実験から、背圧下での粒子排出速度 F に関しては、

Table 3 Flow pattern in a moving bed downcomer with an orifice

Dimensionless gas velocity [-]	Pressure gradient [Pa/m]	Flow pattern
$U_{gs}/U_{mf} < 1$	$(\Delta P/L) < (\Delta P/L)_{crit.}$	stable flow Region (I)
$U_{gs}/U_{mf} = 1$	$(\Delta P/L) = (\Delta P/L)_{crit.}$	instability point
$U_{gs}/U_{mf} > 1$	$(\Delta P/L) > (\Delta P/L)_{crit.}$	unstable flow Region (II): intermittent flow
$U_{gs}/U_{mf} \gg 1$	$(\Delta P/L) \gg (\Delta P/L)_{crit.}$	stoppage

各粒子に対して、Eq. (4) の相関式⁹⁾ が得られている。

$$\frac{F_0 - F}{F_0} = \alpha \cdot \left[\left(\frac{\Delta P}{L \cdot \gamma_b} \right) \cdot \left(\frac{D_d}{D_o} \right)^2 \right]^\beta \quad (4)$$

なお、 F_0 はオリフィスからの粒子の自然排出速度¹⁰⁾ である。また、 γ_b は $\gamma_b = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g$ で定義される粒子移動層の単位体積重力、 α 、 β は粒子によって異なる定数で、実験結果より相馬砂では $\alpha = 0.11$ 、 $\beta = 2$ およびガラスビーズでは $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 2$ であった⁹⁾。さらに、ダウンカマー内の安定な移動層におけるガスの流れには Kozeny-Carman の Eq. (5) が適用できた⁹⁾。

$$\frac{\Delta P}{L} = 180 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu}{D_{ps}^2} \cdot U_r \quad (5)$$

なお、式中の μ は、ガス粘度である。

以上の Eqs. (1)~(5) と Table 2 の各物性値を用いて、後述するダウンカマー内が安定な移動層状態であるときの粒子排出速度 F やガス速度 U_g 、粒子速度 U_s 、

また安定な移動層流れの限界点における圧力勾配 $(\Delta P/L)_{crit.}$ などを推算し実験値と比較した。

4. 実験結果および考察

4. 1 ダウンカマー付き噴流層の安定操作範囲

Fig. 4 は、ダウンカマー付き噴流層の層高 $H = 50, 100, 150 \text{ mm}$ の場合の圧力損失 ΔP とガス速度 U の関係を示す。なお、 ΔP は、噴流層底部の入口ノズルによる圧力損失も含んでいる。また図には、同じ H でダウンカマーがない通常の噴流層の場合の実験結果も示している。ダウンカマー付き噴流層のデータは、系全体が定常で安定な流動状態の下で得られたもので、安定な噴流層を保ちながら、同時にダウンカマー内には安定な移動層が形成されている。したがって各 H で最小のガス速度が最小噴流化速度 U_{ms} である。また U の増加とともに ΔP は増加するので、この U_{ms} において圧力損失が最小で、その値を ΔP_{min} とした。安定な噴流化を保つためには、ガス速度を U_{ms} 以上に、圧力損失を ΔP_{min} 以上に保つ必要がある。一方、図中の

Fig. 4 Relationship between pressure drop and gas velocity as a parameter of spouted bed height, in a spouted bed with and without a downcomer

Fig. 5 Region of stable operation for a spouted bed with a downcomer obtained from relationship between pressure drop and moving bed height in a downcomer, using Soma sand (SS) at spouted bed height of 100 mm

ダウンカマーがない通常の噴流層の結果は、噴流層状態からガス速度を減少させて得られた値で、固定層のデータまで含んでいる。この場合、最小噴流化速度は、 U の減少によって噴流層の中心部のスパウトが崩壊し、 ΔP が急激に増加する時のガス速度と定義される。図からダウンカマー付き噴流層の $\Delta P_{\min}$ 、最小噴流化速度 U_{ms} が、通常の噴流層の場合とほぼ一致し、層高 H の増加でいずれも顕著に大きくなることがわかる。さらに噴流化状態における ΔP と U の関係はダウンカマー付きの場合とない場合とでほとんど一致する。以上のことは、ダウンカマーを装着した場合も、通常の噴流層の基本的な流動特性がほとんど変わらないことを示唆する。したがって系全体の連続安定操作のためには、ダウンカマー内の粒子挙動の把握が最も重要となる。また、図より、同じ層高 $H=100$ mmでは、相馬砂より空隙率の小さなガラスビーズの方が $\Delta P_{\min}$ が大きくなることが認められる。

Fig. 5は、相馬砂(SS)を用いて得られた層高 $H=100$ mmの場合のダウンカマー付き噴流層の実験結果で、安定な状態における圧力損失 ΔP とダウンカマー内移動層高さ L の関係である。粒子供給速度 F をパラメータとして示している。 F が一定であれば ΔP は L の増加でほぼ直線的に増加し、直線の傾きである圧力勾配は、 F の減少によって大きくなる。さらにEq. (5)を用いて、 F の設定値に対する移動層内の粒子とガスの相対速度 U_r が求められ、図中に F とその U_r を一緒に示している。 F が減少すると U_r は増加することになる。

また、得られた結果から安定操作が可能な範囲は、

図中に示す直線A, B, C, Dに囲まれた範囲になることがわかった。各直線の基準を以下に述べる。① 直線A: 直線Aは、圧力損失 ΔP の最小値 $\Delta P_{\min}$ を示す。すなわち、噴流層が形成されるためにはガス速度 U を最小噴流化速度 U_{ms} 以上に設定しなければならないので、Fig. 4で示したようにガス速度に対応して ΔP は $\Delta P_{\min}$ 以上でなければならない。② 直線B: 直線Bは移動層の高さ L の上限で、ダウンカマーの長さ $L_d (=500$ mm)を示す。 L が L_d に達すると、フラッキング現象が生じ、粒子が噴流層表面に溢出する。したがって、噴流層の層高が増加するため、安定操作できなくなる。③ 直線C: 直線Cは圧力勾配($\Delta P/L$)の最大値を示す。前述したように安定な移動層を保つためには、圧力勾配($\Delta P/L$)を限界値($\Delta P/L$)_{crit}以下に保つ必要がある。④ 直線D: 直線Dは噴流層高さ H を保持するための圧力損失の最大値を示す。圧力損失 ΔP は、ガス速度 U の増加により増加する。また、 U の増加(ΔP の増加)は噴流層内の粒子循環速度を増加させ、これによってファウンテン部からダウンカマー内に直接流入する粒子量が増加する。その結果として、直線D上の圧力損失以上になると、噴流層とダウンカマーへの粒子供給速度のバランスが崩れ、噴流層が層高 H を保持できなくなることを示す。以上の直線A~Dのうち、前報⁹⁾で示されたようにダウンカマーのみの移動層操作においては直線B, Cのみで制限されたが、ダウンカマーを噴流層に取り付けることによってさらに直線A, Dの制限が付加されることになる。

また、図中の破線Eは、直線Cの実験結果に対し、

Fig. 6 Region of stable operation for a spouted bed with a downcomer obtained from relationship between pressure drop and moving bed height in a downcomer, using Soma sand (SS) at spouted bed height of 50 mm

前述した粒子排出モデルに基づいた $(\Delta P/L)_{crit}$ の推算結果である。推算は、モデルより $U_{gs}/U_{mf}=1$ として Eqs. (1)～(5) を用いて行った。すなわち Eq. (3) より $U_g=2 \cdot U_{mf}(D_o/D_d)^2$ となり、これを Eq. (2) に代入する。一方 Eq. (4) を用いて F を $(\Delta P/L)$ の関数として Eq. (1) に代入し、 U_s について整理し、さらに Eq. (2) に代入する。上記によって得られた Eq. (2) の U_r を Eq. (5) に代入し、 $(\Delta P/L)$ の解を求めた。この推算において各物性値は Table 2 の値を、オリフィスからの粒子自然排出速度 F_0 は予備実験で検定された結果を用いた。図より実験値の $(\Delta P/L)_{crit}$ (直線 C の傾き) が推算値 (破線 E の傾き) よりも大きく、約 1.25 倍であることがわかる。これはモデルにおいて限界状態では $U_{gs}/U_{mf}=1$ 、すなわちオリフィス直上の動的アーチが半球状まで成長すると考えたが、Fig. 5 の実験では用いた粒子が相馬砂で形状が角ばっているためオリフィス直上の動的アーチがより強固で崩壊し難いことを示唆する。

Fig. 6 は、噴流層底部からダウンカマー上端の高さを変更し、噴流層の層高 $H=50$ mm にした場合の実験結果である。Fig. 5 の $H=100$ mm の場合と比較して、安定操作範囲が広がる。この主な要因は、噴流層の層高 H が低くなると最小噴流化速度に対応する最小圧力損失 ΔP_{min} が小さくなり、図中の直線 A が下がることである。また、Fig. 5 で現れた直線 D は本条件では認められなかった。これは噴流層の層高が低くなった影響で、粒子循環量が減少したためと考えられる。すなわち噴流層のファウンテン部から直接ダウンカマーに流入する粒子流量が F に比べて十分小さく

なり、ガス速度が増加しても噴流層の層高を一定に保持できたと考えられる。さらに Fig. 6 より、安定な移動層を保つための最大圧力勾配 $(\Delta P/L)_{crit}$ の実験値 (直線 C の傾き) が、Fig. 5 の噴流層の層高 $H=100$ mm の場合と同様に粒子排出モデルによる計算値 (直線 E の傾き) より大きいことがわかる。なお、噴流層の層高 $H=150$ mm の場合は、Fig. 6 の結果とは逆に最小圧力損失が高くなるため安定操作範囲が狭くなることが認められた。

Fig. 7 は、噴流層の層高 $H=100$ mm におけるガラスビーズ (GB) の場合の実験結果である。Fig. 5 の相馬砂と比較して安定操作範囲が狭い。これは安定な噴流層を保持するための最小圧力損失 ΔP_{min} が前述したように相馬砂の場合より大きくなり、図中の直線 A が上がるためである。また安定な移動層状態のための最大圧力勾配の実験値 (直線 C の傾き) が、粒子排出モデルに基づく計算値 (破線 E の傾き) の約 0.93 倍で計算値とほぼ一致する。これは用いたガラスビーズの形状が球形に近いため、モデル通りにオリフィス直上の動的アーチが半球状まで成長し、限界に達したためと考えられる。以上の Figs. 5, 6 の結果から同一の粒子であれば、図中の直線 C と破線 E は、噴流層の層高 H によってほとんど変わらないことが認められた。これは、前述したように $(\Delta P/L)_{crit}$ はダウンカマー内の粒子群が安定な移動層流れを保つための限界の圧力勾配であり、噴流層の条件には依存せず、ダウンカマーの条件 (D_d , D_o)、粒子物性値が一定であれば変わらないためである。

Fig. 7 Region of stable operation for a spouted bed with a downcomer obtained from relationship between pressure drop and moving bed height in a downcomer, using glass beads (GB) at spouted bed height of 100 mm

Fig. 8 Effect of pressure gradient on gas velocity and particle velocity in a moving bed downcomer for Soma sand (SS)

4. 2 移動層内のガス速度および粒子速度と圧力勾配の関係

移動層内のガス速度および粒子速度に与える圧力勾配の影響¹¹⁾を検討する。Figs. 8, 9 は、各々粒子径が $704\ \mu\text{m}$ の相馬砂 (SS) および $780\ \mu\text{m}$ のガラスビーズ (GB) を用いた結果で、図の縦軸はガス速度 U_g 、粒子とガスの相対速度 U_r および粒子速度 $\varepsilon \cdot U_s$ 、横軸は圧力勾配 $\Delta P/L$ を示す。図中の実験値は $D_o=7\text{ mm}$ のオリフィスを装着した内径 $D_d=20\text{ mm}$ のダウンカマー ($D_d/D_o=2.86$) で得られた、安定な移動層操作 (I) における実験結果である。そのため、 $\Delta P/L$ の上限が圧力勾配の限界値 $(\Delta P/L)_{\text{crit.}}$ の実験値を示す。なお、縦軸の各速度はダウンカマー断面積基準の値であり、横軸の 0 は自然排出の状態を指す。また図中に

はダウンカマーを噴流層に組み込まない場合で、 $D_o=12\text{ mm}$ のオリフィスを装着した内径 $D_d=30\text{ mm}$ のダウンカマー ($D_d/D_o=2.50$) で得られた実験結果も示している。Figs. 8, 9 より相馬砂、ガラスビーズいずれの粒子を用いても、圧力勾配がダウンカマー内のガス速度や粒子速度に与える影響はダウンカマーを噴流層に組み込んだ場合もそうでない場合と同様の傾向であること、 U_r は圧力勾配 $(\Delta P/L)$ の増加とともに直線的に増加することがわかる。また、ガス速度 U_g は相対速度 U_r の値に近く、したがって粒子下降速度 U_s の値は小さいが、 $(\Delta P/L)$ の増加とともに自然排出時の速度から 0 に近づくことがわかる。さらに $U_g < 0$ の範囲がかなり狭く、実験データは全て $U_g > 0$ の側に含まれる。これは、実際の安定操作では向流流れの

Fig. 9 Effect of pressure gradient on gas velocity and particle velocity in a moving bed downcomer for glass beads (GB)

みで操作されることを示唆する。なお、この結果は $677\mu\text{m}$ のガラスビーズを用いた Zhang and Rudolph^{7,8)} の実験結果とも一致する。

一方、図中の3本の線は U_r 、 $\varepsilon \cdot U_s$ 、 U_g の計算値を示す。 U_r と U_s はそれぞれ Eq. (5)、Eqs. (4)、(1) を用いて任意の $(\Delta P/L)$ に対して求められ、さらにその結果を Eq. (2) に代入して U_g を得た。実験値は安定な移動層状態における値であるが、相馬砂、ガラスビーズいずれの場合でも計算値と実験値が良く一致することがわかる。

また図中には粒子排出モデルに基づく安定操作のための圧力勾配の限界値 $(\Delta P/L)_{\text{crit.}}$ の推算値を、ダウンカマーを噴流層に組み込んだ場合の実験条件に対して求め、示している。Fig. 8 の相馬砂の場合、 $(\Delta P/L)_{\text{crit.}}$ の実験値は推算値より大きい、Fig. 9 のガラスビーズの場合にはかなり一致することが認められ、Figs. 5~7 における直線 C と E の関係と対応する。さらに Figs. 8, 9 から相馬砂とガラスビーズのいずれの場合でも $(\Delta P/L)_{\text{crit.}}$ の実験値はダウンカマーを噴流層に組み込んだ場合の方が組み込まない場合よりも小さいことがわかる。これは、ダウンカマーとオリフィスの面積比 $(D_d/D_o)^2$ が噴流層に組み込んだ場合の方が大きいことと対応している。すなわち、安定操作上の限界点は、前述した通りオリフィス直上の半球面積基準のガス速度が問題になるが、ダウンカマー内移動層の圧力勾配は管断面面積基準のガス速度に依存するためである。

4.3 背圧下における粒子排出速度

Fig. 10 は、オリフィスからの粒子排出速度 F を自然排出速度 F_0 ¹⁰⁾ で無次元化した値に及ぼす圧力勾配

$\Delta P/L$ の影響を示す図で、相馬砂とガラスビーズの安定操作における実験結果である。図から安定操作が $F/F_0=1\sim 0.5$ の範囲で可能であること、また背圧下での F が圧力勾配 $\Delta P/L$ の増加で減少し、ダウンカマーを取り付けた噴流層の層高に依存せず $\Delta P/L$ で整理できることがわかる。図中には、安定な移動層操作のための最大圧力勾配 $(\Delta P/L)_{\text{crit.}}$ の推算値も示している。さらに二本の放物線は、それぞれ相馬砂とガラスビーズを用いたダウンカマーのみの実験⁹⁾、すなわち噴流層一段分の圧力損失に相当する背圧をバルブ操作で出現させた実験で得られた Eq. (4) による計算値である。本実験結果もダウンカマー内の粒子群の挙動に着目すれば、ダウンカマーのみの場合と類似の流動特性を示すと考えられる。実際、実験値と Eq. (4) による計算値がおおむね一致し、特に $F/F_0=1\sim 0.7$ の範囲では、自然排出状態により近いためよく一致することが認められる。

Fig. 11 は、 F/F_0 とオリフィス直上の半球面積基準のガス速度 U_{gs} を粒子の最小流動化速度 U_{mf} で無次元化した U_{gs}/U_{mf} の関係である。比較のために、ダウンカマーを噴流層に組み込まずに行った背圧下における粒子排出実験⁹⁾ のデータも示している。この実験結果は、図中に示すように内径 $D_d=30\text{mm}$ のダウンカマーに $D_o=11\sim 13\text{mm}$ のオリフィスを装着した条件で得られたもので、前述した安定な移動層状態 (I) だけでなく不安定な状態 (II) におけるデータも含んでいる。

また、図中に曲線で示された計算値は前述の3.2項における各定義式によって求められた F/F_0 と U_{gs}/U_{mf} の関係である。計算は、まず任意の U_g を与え、

Fig. 10 Effect of pressure gradient on mass flow rate of particles in a moving bed downcomer

Fig. 11 Effect of gas velocity through hemisphere with orifice diameter on mass flow rate of particles for Geldart D particles

Eq. (3) によって U_{gs} から U_{gs}/U_{mf} を求める。一方、Eqs. (1), (2), (4), (5) を用いて各 U_g における F を算出する。このようにして逐次数値計算を行った。図よりいずれの粒子の場合も安定な移動層状態の $F/F_0 = 1 \sim 0.7$ の範囲では、Fig. 10 と同様に実験値と計算値がよく一致し、またダウンカマーのみによる実験値ともほぼ一致することがわかる。よって Eq. (4) をはじめとして背圧下のダウンカマーのみの実験結果より導出された粒子排出速度などの実験整理式がダウンカマー付き噴流層の場合にも適用できることが認められた。

さらに、ダウンカマー内で安定な移動層が形成されるガス速度の範囲を図から読み取ると、本実験結果もダウンカマーのみの実験結果と同様に、形状が球形に近いガラスビーズ (GB) では $U_{gs}/U_{mf} < 0.9$ 、やや角張った形状の相馬砂 (SS) では $U_{gs}/U_{mf} < 1.3$ であり、

限界値がモデルによる $U_{gs}/U_{mf} = 1$ に近いことがわかる。よって Table 3 に示した粒子排出モデル⁷⁻⁹⁾ が本実験結果にも概ね適用できることが認められる。なお、球形粒子の場合には限界点における U_{gs}/U_{mf} の値が 1 に近いが、砂状粒子の場合 1 をやや上回る。これは角張った粒子では粒子排出口の動的アーチの強度が強く、半球以上に膨らみ成長し得るためと考えられる。

5. 結 言

ダウンカマー付き噴流層の噴流化実験を、Geldart の D 粒子を用いて行い、ダウンカマー内にスムーズな移動層を形成させる系全体の安定な操作範囲を検討し、以下の結果を得た。

- (1) 噴流層を形成させるための最低の圧力損失や最小噴流化速度などの基本的流動特性は、噴流層内のダウンカマーの有無によってほとんど影響を受けない

ことが認められた。

- (2) ダウンカマー内の粒子群の流動状態が圧力勾配の変化によって、安定な移動層流れ (I)、粒子の排出と閉塞を周期的に繰り返し、それに伴って移動層の層高が上下する不安定な流れ (II) の2つのパターンが観察された。
- (3) ダウンカマー付き噴流層の系全体の安定な操作範囲が、最小噴流化速度における圧力損失、ダウンカマー内のスムーズな移動層の最大圧力勾配およびフラッキングを生じるダウンカマーの長さなどによって決定され、噴流層の層高が低いほど系全体の安定操作範囲が広がることがわかった。
- (4) 安定な移動層状態の時、圧力勾配の変化によるガ

ス速度および粒子速度の実験値が、噴流層に組み込まない場合とほぼ一致し、粒子排出モデルに基づく計算値ともよく一致した。また粒子径が 700~800 μm 程度の粒子では、圧力勾配の増加によってガスの流れはほとんど向流であることが確かめられた。

- (5) 背圧下での粒子排出速度に関して、ダウンカマーのみの実験から得られた相関式が、噴流層に組み込んだダウンカマーの場合にもほぼ適用できた。またダウンカマー内の移動層が安定な粒子流れ (I) から不安定な粒子流れ (II) に移行する限界点の実験値が、噴流層に組み込まない場合と同様に粒子排出モデルによる計算値とおおむね一致することがわかった。

Nomenclature

A_d : cross-sectional area of downcomer	$[\text{m}^2]$	U : superficial gas velocity through spouted bed column	
D_d : diameter of downcomer	$[\text{m}]$		$[\text{m/s}]$
D_h : diameter of supply orifice	$[\text{m}]$	U_g : superficial gas velocity through downcomer	$[\text{m/s}]$
D_i : diameter of gas inlet nozzle	$[\text{m}]$	U_{gs} : superficial gas velocity through hemisphere with orifice diameter	$[\text{m/s}]$
D_o : diameter of orifice fitted to bottom of downcomer	$[\text{m}]$	U_{mf} : superficial gas velocity at minimum fluidization	$[\text{m/s}]$
D_{ps} : particle diameter (equivalent specific surface diameter)	$[\mu\text{m}]$	U_{ms} : superficial gas velocity at minimum spouting	$[\text{m/s}]$
D_T : column diameter	$[\text{m}]$	U_r : superficial gas relative velocity	$[\text{m/s}]$
F : mass flow rate of solids under negative pressure gradient	$[\text{kg/s}]$	U_s : downward velocity of particle in downcomer	$[\text{m/s}]$
F_0 : mass flow rate of solids under gravity	$[\text{kg/s}]$	α : coefficient in Eq. (4)	$[-]$
g : gravitational acceleration	$[\text{m/s}^2]$	β : coefficient in Eq. (4)	$[-]$
H : spouted bed height (length between base of spouted bed and top of downcomer)	$[\text{m}]$	γ_b : specific mass of moving bed $[=\rho_p \cdot (1-\varepsilon) \cdot g]$	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)]$
L : moving bed height in downcomer	$[\text{m}]$	ε : void fraction in moving bed	$[-]$
L_d : length of downcomer	$[\text{m}]$	ε_{mf} : void fraction at minimum fluidization	$[-]$
ΔP : pressure drop	$[\text{kPa}]$	μ : gas viscosity	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
Re_{mf} : Reynolds number $[=D_{ps} \cdot U_{mf} \cdot \rho_g / \mu]$	$[-]$	ρ_p : particle density	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

References

- 1) Geldart, D.: "Types of Gas Fluidization", *Powder Technol.*, **7**, 285-292 (1973)
- 2) Mathur K. B. and N. Epstein: "Spouted Beds", Academic Press, New York, USA (1974)
- 3) Epstein N. and J. R. Grace: "Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamental and Applications", Cambridge University Press, UK (2011)
- 4) Madonna, L. A., R. F. Lama and W. L. Brisson: "Solids-Air Jet", *Brit. Chem. Eng.*, **6**, 524-528 (1961)
- 5) Kunii, D. and O. Levenspiel: "Fluidization Engineering (2nd ed.)", Butterworth-Heinemann, USA (1991)
- 6) Malek, M. A. and T. H. Walsh: "The Treatment of Coal for Coking by the Spouted Bed Process", Rep. No. FMP 66/54-SP. Dept. Mines and Tech. Surveys, Ottawa, Canada (1966)
- 7) Zhang, J. -Y. and V. Rudolph: "Transitional Packed Bed Flow in Standpipes", *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, 1242-1246 (1991)
- 8) Zhang, J. -Y. and V. Rudolph: "Flow Instability in Non-Fluidized Standpipe Flow", *Powder Technol.*, **97**, 109-117 (1998)
- 9) Nagashima, H., T. Ishikura and M. Ide: "Flow Characteristics of a Small Moving Bed Downcomer with an Orifice under Negative Pressure Gradient", *Powder Technol.*, **192**, 110-115 (2009)
- 10) Beverloo W. A., H. A. Leniger and J. van de Velde: "The Flow of Granular Solids through Orifices", *Chem. Eng. Sci.*, **15**, 260-269 (1961)
- 11) Knowlton, T. M.: "Unique Problems and Solutions in Gas-Solids Flow," *AIChE Symp. Series*, **93** (317), 1-6 (1997)