

# 固 - 気系ドラフトチューブ付き噴流層の装置特性\* —チューブ形状と粒子特性の影響—

永 島 大\*\*

## Hydrodynamics of a Gas-Solid Spouted Bed with a Draft Tube — Effects of the Tube Shape and Particle Properties —

Hiroshi NAGASHIMA\*\*

**Abstract** Flow characteristics of a gas-solid spouted bed with a modified draft tube have been investigated experimentally. In this work, four different types of draft tubes were employed and spherically shaped silica gel particles having low particle density were used as the bed materials. The flow characteristics were compared with those obtained using spherically shaped glass beads and irregularly shaped silica sand. The results showed that the conical-cylindrical porous draft tube was the best option for gas-solid contact and solids circulation, and the gas flow rate through the annulus reached the level of a conventional spouted bed without a draft tube. Also, the minimum spouting gas velocity, bed pressure drop and gas flow rate through annulus for the silica gel particles were smaller than those for the glass beads and silica sand. Although the silica gel particles descended in annulus faster than the glass beads because of high sphericity, the particle density of the silica gel was so small that the solids circulation rate was smaller than that for the glass beads.

**Key Words** : Gas-Solid Spouted bed, Draft Tube Shape, Minimum Spouting Velocity, Annulus Gas Flow Rate, Solids Circulation Rate

### 1. 緒 言

噴流層は、通常の流動層操作が困難な Geldart の D 粒子 [1] のような粗い粒子の流動化に適した装置で、底部中央のノズルから高速のガスが供給され粒子層内中心には粒子群が空気輸送状態で上昇するスパウト、その周囲には移動層状態で下降するアニュラス、およびアニュラス上方にはファウンテンが形成され、装置内部で粒子群が規則正しく循環する。本装置は、小麦の乾燥装置として考案され [2]、以後、乾燥、造粒・コーティングなどに応用されており [3]、近年ではバイオマス [4]、プラスチック [5]、タイヤ [6] などの熱分解などにも有用であることが報告されている。

ドラフトチューブ付き噴流層は、噴流層の改良型の一つで、ドラフトチューブの設置によって噴流層操作の安定性や柔軟性を向上させることができる [7, 8]。通常の

噴流層と比較すると、本装置の利点として、粒子の層内滞留時間がより均一になること、層高の限界が無くなりアニュラス部の層を必要に応じて高くできるので粒子の処理容量が増すこと、小粒子も噴流化できるようになることなどが挙げられ、さらに層内圧力損失や最小噴流化速度が通常の噴流層よりかなり小さくなる。したがって、穀物、食品スラリーなど熱変性を受け易い製品の乾燥や製剤のコーティングをはじめとする、特に均一で安定した粒子循環量を目的に応じて適切に調整できることが要求される操作において有用になる。しかし、ドラフトチューブ部分におけるスパウト-アニュラス間の粒子およびガスの交換が遮断されるため粒子の循環量が減少し [9-12]、さらに固 - 気接触性能が低下する [7, 13]。ドラフトチューブ付き噴流層の利点を保ったまま固 - 気接触性能を向上させるため、ドラフトチューブにガスの浸透性を持たせスパウトからアニュラスへガスが流れるようにすれば、特にアニュラス部における移動層状態のガスと粒子群の向流接触が重要な役割を果たす熱や反応操作において有利になると考えられる。以上の観点から、

\* 平成 26 年 5 月 26 日受付

\*\* 化学システム工学科

Claffin and Fane[14] は、金網で作製した通気性のドラフトチューブを用いて実験し、ガスが浸透しないチューブの場合よりも粒子滞留時間の的確なコントロールや良好な固気接触が可能になることを示している。また、装置底部を平面の分散板にした場合 [15, 16] や多孔のドラフトチューブを用いた研究 [17]、大小二成分系で焼結金属製の通気性ドラフトチューブを用いた研究 [18] が報告されている。しかしながら、いずれもアニュラス部ガス流量の全ガス流量に対する割合はドラフトチューブが無い通常の噴流層の場合よりも小さい。さらに円錐型噴流層に側面開放型のドラフトチューブを取り付けると多孔のドラフトチューブを用いた場合よりも高い固 - 気接触が得られることが報告されている [19-22]。

筆者らは、ドラフトチューブに装置的な改良を加えて、ラッパ型 (円筒 - 円錐型) 多孔チューブを用いると通常の噴流層に匹敵する固 - 気接触性能が得られることを報告した [23, 24]。いずれもガラスビーズやけい砂を用いた結果で、触媒粒子、プラスチック、バイオマス [25] など、今後の応用で対象となる粒子を考慮すると粒子密度の影響も検討する必要がある。

本報告では、ドラフトチューブ付き噴流層の利点を保ったままアニュラス部のガス流量割合が通常の噴流層と同程度まで向上するように、ドラフトチューブに装置工学的な面から改良を加え、その流動特性を調べた。また、前報の結果 [23, 24] も含めて粒子の密度や形状などの粒子物性の影響を検討した。ドラフトチューブとして Fig. 1 に示す 4 種類のチューブを用いた。(a) は通常のドラフトチューブで、ガスの浸透がない寸胴型 (円筒型) 非多孔チューブ、(b) は寸胴型 (円筒型) 多孔チューブ、(c) はラッパ型 (円筒 - 円錐型) 非多孔チューブ、そして (d) はラッパ型 (円筒 - 円錐型) 多孔ドラフトチューブである。以上のチューブを用いて、最小噴流化速度、層内圧力損失、アニュラス部ガス流量、粒子循環速度などの流動特性に与えるチューブ形状や粒子特性の影響を実験的に検討した。また、装置内の圧力分布を測定し、その結果から多孔ドラフトチューブを通したスパウトからアニュラスへのガス浸透特性の検討も行った。

## 2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。ドラフトチューブとして (d) 型のラッパ型多孔チューブを取り付けた場合である。また実験条件を Table 1 に示す。実験に用いた粒子は球形で粒子密度が比較的小さなシリカゲル粒子 (SG) であり、この実験結果を粒子密度が  $2500 \text{ kg/m}^3$  程度の球形のガラスビーズ (GB) や不規則な形状のけい砂 (USS) で得られた前報 [23, 24] の結果と比較した。Table 2 に以上の 3 種類の粒子の物性値を示す。なお、いずれの粒子も Geldart の D 粒子に属する。

実験装置本体は上部の円筒部分 (内径  $D_T = 100 \text{ mm}$ )

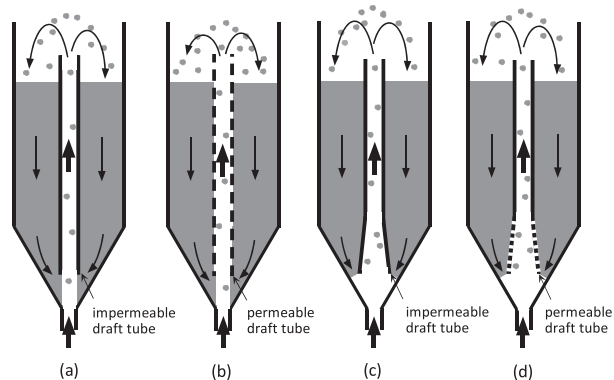


Fig. 1 Schematic diagram of spouted beds with four different types of draft tube.

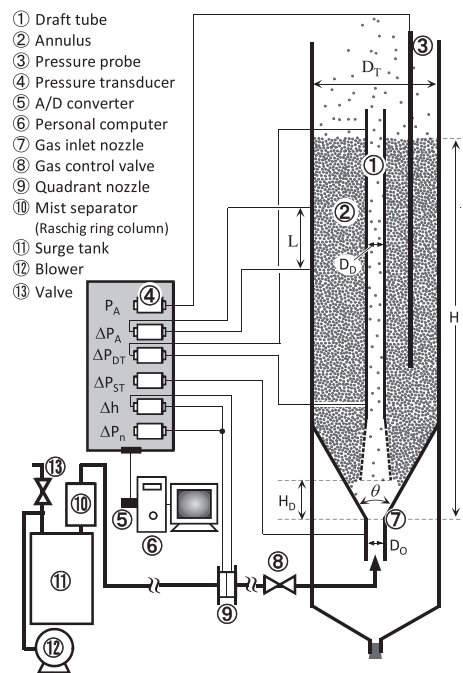


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

Column			
inside diameter	$D_T$ (mm)	:	100
nozzle diameter	$D_o$ (mm)	:	12
cone angle	$\theta$ (deg.)	:	60
bed height	$H$ (mm)	:	$\approx 300$
Draft tube (material : brass)			
tube length	$L_D$ (mm)	:	300
distance of entrainment zone	$H_D$ (mm)	:	20, 30, 40
Cylindrical tube			
inside diameter	$D_D$ (mm)	:	14
arrangement of hole		:	square
opening ratio	$\beta$ (%)	:	0 (non-porous) : Type (a) 20 (porous) : Type (b)
hole diameter		:	1 mm
Conical-cylindrical tube (bugle type)			
inside diameter	$D_D$ (mm)	:	14 $\rightarrow$ 23
arrangement of hole		:	square
opening ratio	$\beta$ (%)	:	0 (non-porous) : Type (c) 20 (porous) : Type (d)
hole diameter		:	1 mm

と下部のコーン部分 (開度  $\theta = 60^\circ$ ) からなり、底部中央のノズル⑦ (ノズル径  $D_o = 12$  mm) から噴流化ガスが供給される。噴流化ガスは、ブロワー⑫から送り込まれる常温常圧の室内空気である。噴流化ガス入口ノズル⑦の上方、装置の中心軸上にドラフトチューブ①を設置した。ドラフトチューブは長さ ( $L_D$ ) が 300 mm で、 $D_D$  はチューブ内径を示す。なお、ドラフトチューブの下端から噴流化ガス入口ノズル⑦までの空間でアニュラス部②を移動層状態で下降してきた粒子がガスに同伴されドラフトチューブ内に流入するため、この部分をエントレメント区間とした。 $H_D$  はその長さで、噴流層の安定性を考慮して使用粒子の粒子径から [7, 26]、20, 30, 40 mm に設定した。また、粒子保有量を固定して、各実験で層高 ( $H$ ) が、前報 [23, 24] と同様、ほぼ 300 mm で一定になるようにした。

Fig. 3 は、(b) 型の寸胴型多孔チューブおよび (d) 型のラップ型多孔チューブを  $H_D = 30$  mm に設置した場合の断面図である。寸胴型チューブは内径  $D_D$  が 14 mm で一定であるのに対し、ラップ型はチューブの下端 50 mm 区間で  $D_D$  が 14 mm から 23 mm まで円錐状に拡大している。チューブの多孔部分は孔径 1 mm で開孔比を 20% にした。なお、この 20% までは開孔比の増加とともに、チューブ部分のガスの浸透性が効果的に増加することを前報 [23] で報告している。また、(b) 型の寸胴型の場合はチューブ全体が多孔であるが、(d) 型のラップ型は下部の円錐部のみを多孔にした。これは次の 3 点に基づいている。(1) 後述するように、多孔チューブを通したスパウトからアニュラスへのガスの浸透はアニュラス部断面積が軸方向に変化する部分で顕著であること。(2) 装置底部コーン部分の断面積変化にチューブ断面積の変化も加わるためラップ型チューブ付きの場合のアニュラス部断面積の変化は寸胴型の場合より大きくなること。よってガスの浸透が顕著なチューブの円錐部のみを多孔にした。さらに、その上部ではアニュラス部のガス流量が変化しなくなるので、(3) 装置上部の円筒部分ではガス流量が一定で、移動層によるより安定した向流固 - 気接触が可能になるためである。

実験では、一旦噴流化に十分な流量のガスを供給して定常な噴流層状態にした後、ガス流量を徐々に減少させて、ガス流量を求めるための四分円ノズル流量計⑨の圧力、噴流化ノズル下部における圧力損失 ( $\Delta P_{ST}$ )、ドラフトチューブの圧力損失 ( $\Delta P_{DT}$ ) およびアニュラス部上部区間  $L (= 100$  mm) の圧力損失 ( $\Delta P_A$ ) を圧力変換器④で計測し、そのデータをパソコン⑥に集積し、各平均値を求めた。 $\Delta P_{ST}$  から別途粒子が無い空の装置で得られた圧力損失分を差し引いて、層内圧力損失  $\Delta P_S$  を求めた。

$\Delta P_A$  を用いて、アニュラス部のガス流量  $Q_A$  を求めた。Ergun の式を適用して、アニュラス部のガス速度  $U_A$  とアニュラス部の圧力勾配  $\Delta P_A/L$  との関係は次式で表すこ

Table 2 Properties of particles used.

		$D_{P50}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_g$ [-]	$\phi_c$ [-]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$U_{mf}$ [m/s]	$Re_{mf}$ [-]	$U_t^*$ [m/s]
Silica gel	(SG)	1590	1.10	0.872	650	0.36	38	5.1
Glass beads	(GB)	1350	1.11	0.781	2480	0.74	67	9.1
Ube silica sand	(USS)	1960	1.25	0.427	2560	0.86	112	11.1

\* : Calculated values

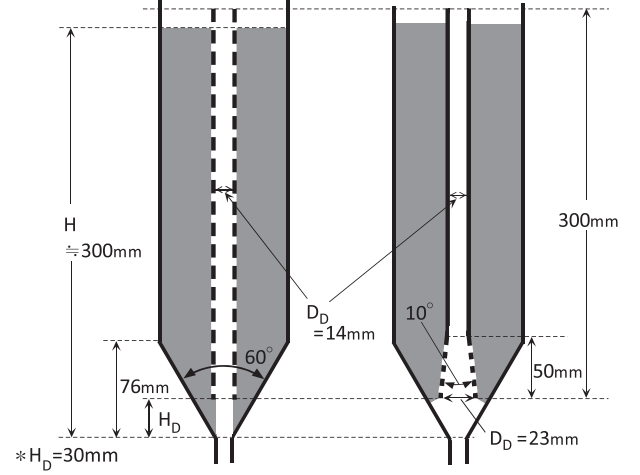


Fig. 3 Schematic diagrams of spouted bed with a cylindrical and a conical-cylindrical porous draft tube.

とができる。

$$\frac{\Delta P_A}{L} = A \cdot U_A + B \cdot U_A^2 \quad (1)$$

式中の  $A$  と  $B$  は、使用した粒子によって異なり、予め充填層の状態でのガスの透過流動実験を行い、その検定結果から得られる値である。本実験のシリカゲル粒子の場合  $A=12.6$ ,  $B=2.6$  であった。式 (1) に  $\Delta P_A/L$  の測定値を代入して  $U_A$  が得られ、また、ノズル流量計⑨で全体のガス流量  $Q_T$  が求められると、ガスのマスバランスに基づいて、アニュラス部のガス流量  $Q_A$ 、ドラフトチューブ内のガス流量  $Q_D$ 、ガス速度  $U_D$  を次式で表すことができる。

$$Q_T = U \cdot A_T = Q_A + Q_D \\ = U_A \cdot A_A + U_D \cdot A_D \quad (2)$$

なお、ガス密度は一定とみなした。ここで  $U$  は装置全体の断面積基準のガス速度、 $A_T$ ,  $A_A$ ,  $A_D$  はそれぞれ装置全体、アニュラス部およびドラフトチューブの断面積を示す。なお、本実験ではドラフトチューブ付き噴流層の固 - 気接触性能を全ガス流量のうちアニュラス部を流れるガス流量の割合  $Q_A/Q_T$  を用いて評価した。ドラフトチューブが無い通常の噴流層の場合、 $Q_A/Q_T$  の値は 50-70% 程度である [3]。

また、本装置の粒子循環特性を検討するためアニュラス部の粒子下降速度  $V_{Bd}$  を測定し、粒子循環速度  $W_s$  を次式で求めた。

$$W_s = V_{PA} \cdot A_A (1 - \varepsilon_A) \cdot \rho_P \quad (3)$$

$\varepsilon_A$  はアニュラス部の空隙率、 $\rho_P$  は粒子密度である。 $V_{PA}$  は、アニュラス部上方部分の区間 50 mm の粒子下降速度を目視によって測定した。ドラフトチューブが無い通常の噴流層と異なり、ドラフトチューブ付きの場合、アニュラス部が流動化していなければこの  $V_{PA}$  の軸方向、半径方向の分布はかなり小さくなること、さらに装置下部のコーン部分を除けばアニュラス部の  $V_{PA}$  はほぼ均一であることが知られている [11, 12]。本実験でも  $V_{PA}$  を円筒部分のアニュラス上方で測定し、plug flow と近似して式 (3) を用いて  $W_s$  を求めた。アニュラス部の平均空隙率  $\varepsilon_A$  はアニュラス部分の見かけの体積と層内の粒子保有量から求めた値で、シリカゲル粒子 (SG) の場合、0.31-0.34 の範囲であった。なお、ガラスビーズ (GB) の場合は 0.38-0.39、けい砂 (USS) の場合は 0.40-0.42 で、各粒子の空隙率の値は Table 2 中に示した球形度と対応し、球形に近いほど粒子群は密に充てんされ、空隙率が小さくなることが認められた。

さらに、チューブ内からアニュラス部へのガス浸透状態を調べるため、圧力プローブ③を装置に挿入して、アニュラス部内の圧力  $P_A$  およびチューブ内の圧力  $P_D$  の分布も測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 最小噴流化速度

ドラフトチューブ付き噴流層を安定に操作するためには、ガス速度の操作範囲や所要動力等の観点から層内圧力損失とガス速度の関係を把握しておく必要がある。したがって、本装置の層内圧力損失と最小噴流化速度を検討する。

Fig. 4 は、シリカゲル粒子 (SG) を用いた場合の流動層 (FB)、ドラフトチューブが無い通常の噴流層 (CSB) および (a) 型のチューブを取り付けた通常のドラフトチューブ付き噴流層 (DSB) の層内圧力損失とガス速度  $U$  の関係である。流動層は、流動化状態からガス速度を小さくすると最小流動化速度  $U_{mf}$  を境界にして固定層になる。流動化状態では層内圧力損失  $\Delta P_f$  はガス速度  $U$  によらず一定で、 $\Delta P_f(cal.) = (m \cdot g)/A_f$  の理論圧力損失とよく一致する。なお、 $m$  は装置内の粒子保有量である。一方、固定層の場合には  $U$  の減少とともに  $\Delta P_f$  は減少する。よって流動層、固定層それぞれのデータの交点を  $U_{mf}$  とした。図から噴流層は流動層に比べ圧力損失がかなり小さくなることがわかる。またガス速度を小さくして、固定層になるとスパウトが崩壊するため流動層と異なり圧力損失が増加する。このガス速度を最小噴流化速度  $U_{ms}$  とした。なお、 $U_{ms}$  における圧力損失の増加は、粒子密度が大きなガラスビーズやけい砂の場合により大きく、特に形状が不規則なけい砂の場合に顕著であるこ

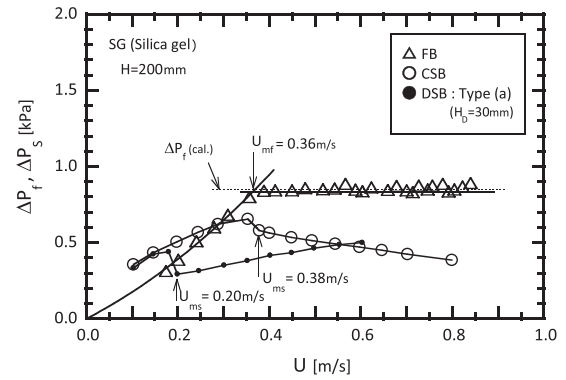


Fig. 4 Relationship between bed pressure drop and superficial gas velocity for fluidized bed, conventional spouted bed and spouted bed with a draft tube.

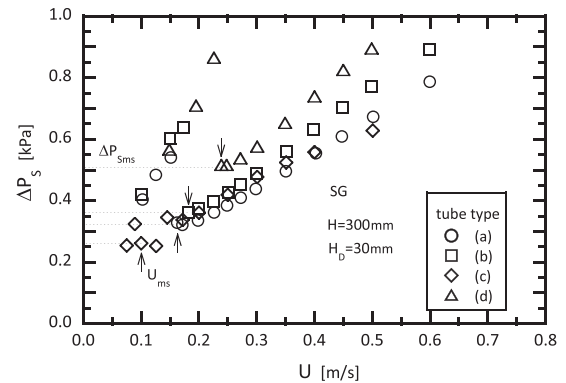


Fig. 5 Relationship between bed pressure drop and superficial gas velocity for four different types of draft tube spouted bed.

とが認められた [24]。噴流層にドラフトチューブを装着すると、通常の噴流層の場合と異なり、噴流化状態における層内圧力損失  $\Delta P_s$  は  $U$  の増加とともに増加する。これは、粒子の加速によるエネルギー損失が支配的なドラフトチューブ内の圧力損失が付加されるためと考えられる。さらに  $U_{ms}$  および圧力損失の両者が通常の噴流層と比べて著しく減少することがわかる。このことは、ガス速度の操作範囲が広くなること、また噴流化のための所要動力が小さくなることを意味する。以下にこのドラフトチューブ付き噴流層に着目して、改良型チューブを用いた結果について述べる。

Fig. 5 は、ドラフトチューブ付き噴流層の層内圧力損失  $\Delta P_s$  とガス速度  $U$  の関係で、(a), (b), (c), (d) の 4 種類のチューブを用いた結果である。使用粒子はシリカゲル粒子 (SG)、エントレメント長さ  $H_D$  は 30 mm である。いずれも安定な噴流層の状態から  $U$  の減少とともに  $\Delta P_s$  は減少し、最小噴流化速度  $U_{ms}$  に達する。ここでチューブが閉塞するため、圧力損失が急激に上昇する。 $U_{ms}$ ,  $\Delta P_s$  は、いずれも多孔の (b) 型, (d) 型の場合に大きくなること、この傾向はラッパ型の場合 [(c) 型 → (d) 型] に



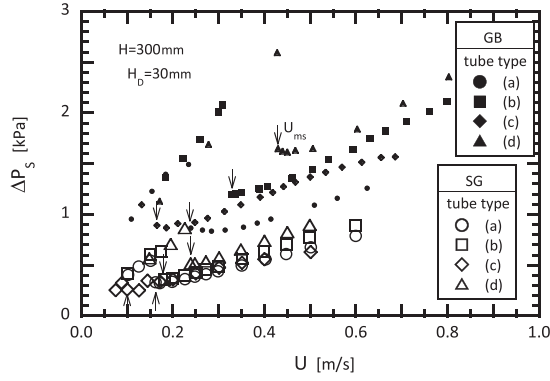


Fig. 6 Relationship between bed pressure drop and superficial gas velocity for four different types of draft tube spouted bed when using SG and GB as bed materials.

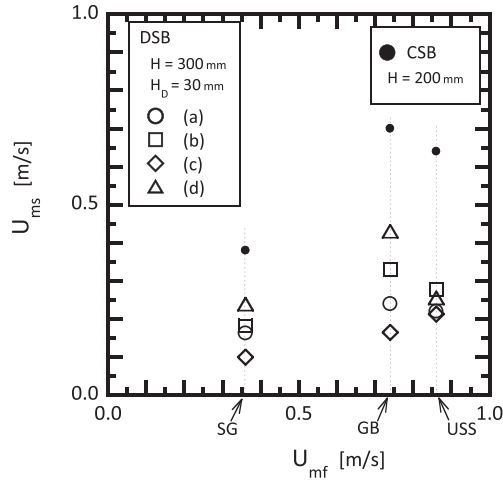


Fig. 7 Relationship between minimum spouting velocity and minimum fluidizing velocity.

顕著であることがわかる。これは、ラッパ型多孔チューブ (d) にするとアニュラス部へのガスの浸透割合や粒子循環速度が最も大きくなるためと考えられる。またラッパ型非多孔チューブ (c) は、 $U$  を減少させて現れる、チューブから粒子が間欠的に噴き上がる噴流化状態を示すガス速度の範囲が、他に比べて長いので  $U_{ms}$  が小さくなる。ガラスビーズ (GB) を用いた場合と比較した結果を Fig. 6 に示す。SG も GB と同様の傾向であるが、 $U_{ms}$ 、 $\Delta P_s$  の範囲が異なり、SG の場合かなり小さくなる。

Fig. 7 にシリカゲル粒子 (SG)、ガラスビーズ (GB) およびけい砂 (USS) の 3 種の粒子を用いた場合の最小噴流化速度  $U_{ms}$  と最小流動化速度  $U_{mf}$  の関係を示す。パラメータはドラフトチューブの形状である。前述したようにいずれの粒子の場合も噴流層にドラフトチューブを取り付けることにより  $U_{ms}$  が著しく減少すること、 $U_{ms}$  は、多孔の (b), (d) 型の場合に大きくなり、この傾向は特にラッパ型の場合に顕著である。SG と GB はともに球形粒子であるが粒子密度が異なる。図より  $U_{mf}$  は、粒子密度が小さな SG の方が小さく、 $U_{ms}$  も同様の傾向を示す

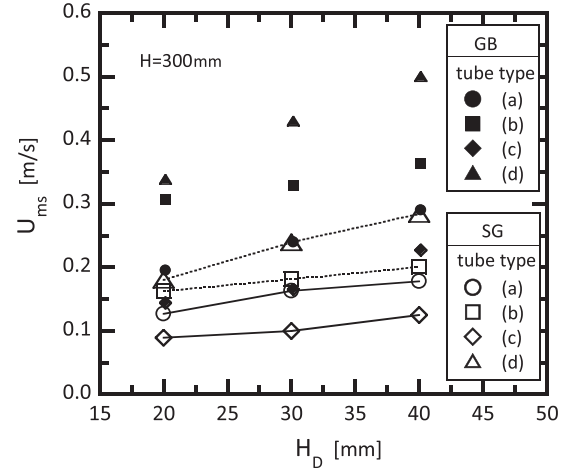


Fig. 8 Effects of length of entrainment zone and tube type on minimum spouting velocity.

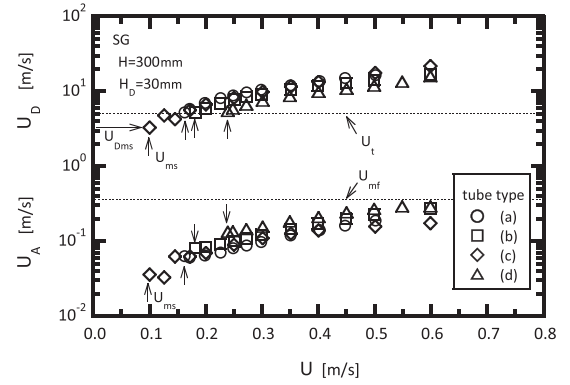


Fig. 9 Relationship between gas velocities in annulus and draft tube and superficial gas velocity.

ことがわかる。一方、GB と USS の結果を比較すると、USS の方が粒子径が大きいため  $U_{mf}$  は GB よりも大きい、 $U_{ms}$  は逆に小さくなる傾向が認められる。

Fig. 8 に  $U_{ms}$  に与えるエントレメント長さ  $H_D$  の影響をチューブ形状をパラメータとして示す。粒子としてシリカゲル粒子 (SG) とガラスビーズ (GB) を用いた結果である。図から  $U_{ms}$  は  $H_D$  の増加とともに大きくなり、またラッパ型多孔チューブ (d) の場合に最も大きくなること、さらに粒子密度が小さい SG の値がより小さいことがわかる。

### 3.2 アニュラス部ガス流量割合

本装置の固気接触性能をアニュラス部のガス流量  $Q_A$  を用いて検討した。Fig. 9 は、式 (1), (2) を用いて求められたアニュラス部ガス速度  $U_A$  およびドラフトチューブ内ガス速度  $U_D$  と噴流化ガスのガス速度  $U$  の関係である。シリカゲル粒子 (SG) の結果で、パラメータはチューブ形状である。図より寸胴型、ラッパ型ともに多孔にすることで  $U_A$  が増加することがわかる。また、 $U_A$  は全ての条件で最小流動化速度  $U_{mf}$  より小さく、このことから

アニュラス部は流動化しておらず移動層状態であることが認められる。一方  $U_d$  は式 (2) のマスバランスに対応するため、 $U_A$  とは逆にチューブを多孔にすることで減少する。 $U_{ms}$  における  $U_d$  すなわち  $U_{Dms}$  は、ドラフトチューブ内のチョーキング速度に対応する値で、図から粒子の終末速度  $U_t$  と同程度であることがわかる。なお  $U_{Dms}$  は鉛直な空気輸送を検討した Grbavcic らの報告 [27] と同様にチューブ内に流入する粒子の質量流量すなわち粒子循環速度の増加とともに大きくなる傾向が認められた。

本装置の固 - 気接触性能を全ガス流量のうちアニュラス部を流れるガス流量の割合  $Q_A/Q_T$  を用いて評価した。 $Q_A/Q_T$  の値は式 (1), (2) に実験結果を代入して算出した。Fig. 10 はドラフトチューブの4タイプ (a), (b), (c), (d) を用いた場合の  $Q_A/Q_T$  と  $Q_T$  の関係である。 $H_D = 30$  mm に設定した場合のシリカゲル粒子 (SG) とガラスビーズ (GB) の結果である。図から、 $Q_T$  の減少により  $Q_A/Q_T$  は徐々に増加し、 $U_{ms}$  付近で急激に増加することがわかる。これは、供給ガス流量の減少に伴ってチューブ内が希薄な空気輸送の状態から、徐々に粒子ホールドアップが増加し、 $U_{ms}$  付近で不安定な間欠的噴流化状態となり、結果としてエントレメント区間でアニュラス部へバイパスするガス流量が増加するためと考えられる。 $Q_A/Q_T$  は、寸胴型、ラッパ型いずれも多孔チューブの方が非多孔チューブより大きく、特に (d) 型のラッパ型多孔チューブが最も大きく、通常の噴流層の場合の  $Q_A/Q_T$  に近づくことが認められる。SG と GB の結果を比較すると、 $Q_A/Q_T$  は、SG を用いた場合の方が小さい。Table 2 に示すように、SG は球形度がより大きいいためアニュラス部の空隙率  $\varepsilon_A$  は小さくなる。よってアニュラス部のガスの通気抵抗が大きくなり、 $Q_A/Q_T$  が小さくなると考えられる。

以上得られた実験データに基づいて、 $Q_A/Q_T$  に与えるエントレメント区間の長さ  $H_D$  とチューブ形状の影響を Fig. 11 (a), (b) に示す。(a) は粒子として SG と GB、(b) は USS と GB を用いた結果である。図中の  $Q_A/Q_T$  は安定な噴流化状態における値として  $U \approx 2 \times U_{ms}$  における値を用いた。図より、(d) 型ラッパ型多孔チューブを用い  $H_D$  を 40 mm に設定することによって  $Q_A/Q_T$  は、SG, GB 粒子においては 50 - 60 % まで、USS 粒子においては不規則な形状で空隙率が大きくガスの浸透性が増すので 70 % に達することがわかる。また、いずれのチューブを用いても  $Q_A/Q_T$  は  $H_D$  の増加とともに大きくなり、その傾向は非多孔チューブを用いた時に著しく、特にラッパ型の非多孔チューブ (c) 型の場合により顕著になる。さらにドラフトチューブを多孔チューブにすることによる  $Q_A/Q_T$  の増加は  $H_D$  が 20 mm の時に著しいことがわかる。

以上のことから、ドラフトチューブ付き噴流層の固 - 気接触性能がチューブを多孔にすることで向上するが、

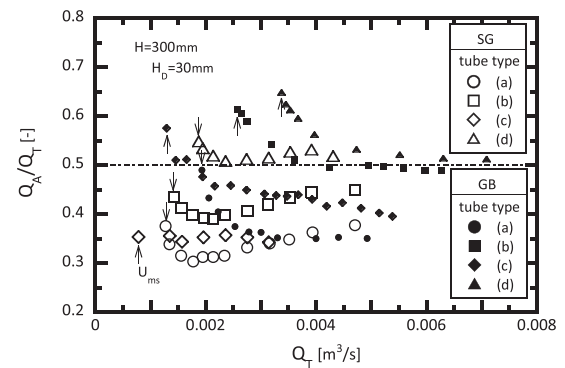
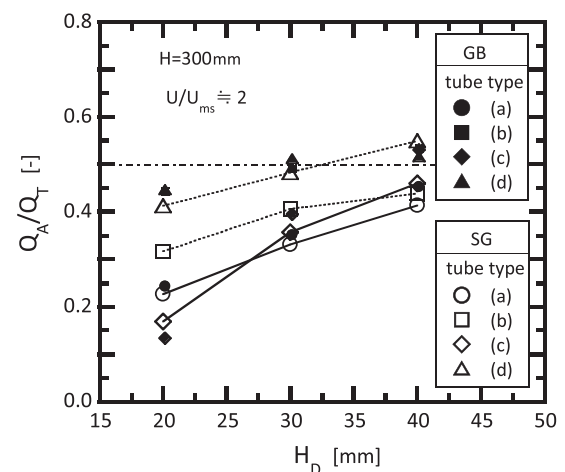
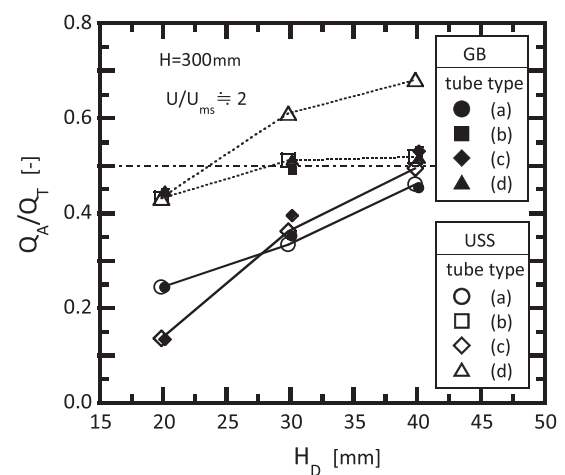


Fig. 10 Relationship between gas flow rate through annulus and total gas flow rate for four different types of draft tube spouted bed when using SG and GB as bed materials.



(a) data obtained using SG and GB.



(b) data obtained using USS and GB.

Fig. 11 Effects of length of entrainment zone and tube type on gas flow rate through annulus.

寸胴型であればドラフトチューブが無い通常の噴流層の場合には及ばないことがわかった。しかしラッパ型多孔チューブを用いると、チューブを浸透してスパウト部からアニュラス部へ流れるガス流量がさらに増加し、固 - 気接触性能が通常の噴流層に匹敵するレベルにまで近づけることができた。したがって装置内の圧力の軸方向分布から、チューブ形状によるガスの浸透性の相違をシリカゲル粒子の場合で考察する。Fig. 12はドラフトチューブとして非多孔の寸胴型 (a) 型およびラッパ型 (c) 型を用いた場合のチューブ内の圧力  $P_D$  とアニュラス部の圧力  $P_A$  の軸方向分布である。縦軸の圧力は層内圧力損失  $\Delta P_s$  で、横軸はガス入口ノズルからの高さ  $Z$  を層高  $H$  で無次元化している。図はエントレメント区間の長さ  $H_D$  が 30 mm の場合であるので、ガス入口ノズル、ドラフトチューブ下端の位置はそれぞれ  $Z/H = 0, 0.1$ 、装置本体下部のコーン部分は  $Z/H = 0 - 0.24$  ( $Z = 0 - 76$  mm) の区間、ラッパ型チューブの円錐部分は  $Z/H = 0.1 - 0.25$  ( $Z = 30 - 80$  mm) の区間にあたる。図より、寸胴型チューブの  $P_D$  は、チューブの全区間を通して断面積は変化せずガス速度が一定であるため、ほぼ直線的に減少し、圧力勾配が一定であることがわかる。一方ラッパ型の場合の  $P_D$  と  $Z$  の関係はチューブの円筒区間では寸胴型と同様に直線関係であるが、円錐区間では  $Z$  の増加とともに断面積が減少することによってガス速度が増加し、さらに、チューブの形状によるガス流れの乱れも加わることから、データがこの直線からずれると考えられる。また図から、アニュラス部の圧力  $P_A$  も同様に  $Z$  の増加とともに減少することがわかる。しかし、装置底部のコーン部分 ( $Z/H = 0.1 - 0.24$ ) と円筒部分 ( $Z/H > 0.24$ ) ではその傾向が異なり、コーン部分では  $Z$  とともに  $P_A$  は急激に減少し、円筒部分では直線的に減少する。これは、アニュラス部のガス流量が一定であるが、Fig. 3 で示したように、コーン部分では  $Z$  の増加とともにアニュラス断面積が著しく増加することから、ガス速度  $U_A$  は  $Z/H = 0.1$  における値から急激に減少すること、一方円筒部分では、断面積が変わらないためガス速度は一定であることに対応している。このガス速度の変化に圧力勾配が従うため図のような圧力分布を示すと考えられる。このことから、ラッパ型チューブを用いるとコーン形状とチューブの円錐形状との 2 つの効果で、 $Z$  の増加によるアニュラス断面積の拡大がより大きくなるため、 $U_A$  が減少し  $P_A$  の減少がより顕著になると考えられる。

チューブ内圧力  $P_D$  とアニュラス部圧力  $P_A$  を比較すると、図より寸胴型、ラッパ型のいずれも  $P_A$  より  $P_D$  が大きく、この差がドラフトチューブの下端 ( $Z/H = 0.1$ ) からコーン部分と円筒部の接続部 ( $Z/H = 0.24$ ) にかけて  $Z$  の増加とともに急激に大きくなること、またその圧力差は、ラッパ型チューブを用いた場合、寸胴型の場合よりも大きくなることからわかる。ドラフトチューブを多孔にした

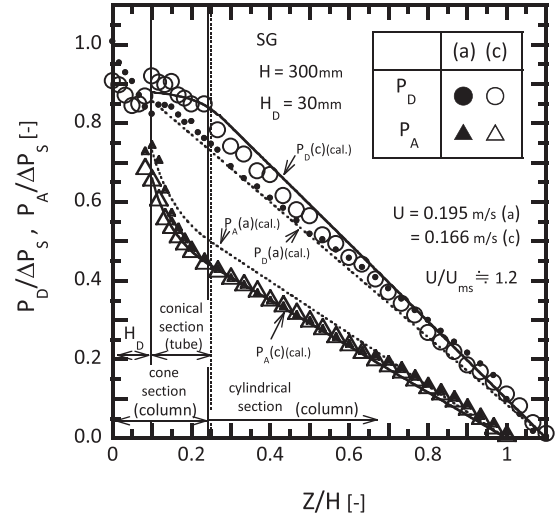


Fig. 12 Longitudinal pressure distributions within annulus and draft tube when using type (a) and type (c) draft tube. [the solid lines represent the calculated values for tube type (c) and the dotted lines represent the calculated values for tube type (a)]

場合、この圧力差が大きくなるほどスパウトからアニュラス部へガスの浸透がより著しくなるため、ラッパ型多孔チューブを用いた場合、寸胴型多孔チューブの場合よりもアニュラス部に流れるガス流量の割合が増加すると考えられる。以上の実験結果を検証するため、用いた寸胴型およびラッパ型チューブの幾何形状、操作条件を考慮して、アニュラス部の圧力  $P_A$  とチューブ内圧力  $P_D$  の推算も行った。 $P_A$  には式 (1) の圧力勾配とガス速度の関係式を用い、 $P_D$  には管内をガスが乱流状態で流れる場合の圧力降下の式を適用して圧力分布を計算した。寸胴型、ラッパ型の計算結果をそれぞれ破線、実線で示した。計算結果も前述の実験結果と同様の傾向になることがわかる。

### 3.3 粒子群の循環特性

噴流層を反応装置などの化学装置として利用する場合、固体と気体の接触や粒子の滞留時間を適切にかつ正確に制御しなければ、高効率、高収率の製品製造は望めないため、粒子循環特性の検討は重要となる。粒子循環特性は、前述したようにアニュラス部の粒子下降速度  $V_{pi}$  を測定し、式 (4) で求められる粒子循環速度  $W_s$  を用いて検討した。Fig. 13 は、 $V_{pi}$  とガス速度  $U$  の関係でチューブ形状の影響を示し、球形粒子のシリカゲル粒子 (SG) とガラスビーズ (GB) 粒子の結果である。SG, GB 両粒子ともに (d) 型のラッパ型多孔チューブの場合に  $V_{pi}$  は最大になる。これは、粒子の流入面積が大きいため、またエアレーション効果が支配的になるためと考えられる。粒子で最小噴流化速度が異なるためガス速度  $U$  の範囲は異なるが  $V_{pi}$  は両粒子で同等の範囲であること、しかし同じガス速度で SG と GB の  $V_{pi}$  を比較すると、形状が球形により近く粒子密度がかなり小さい SG の場

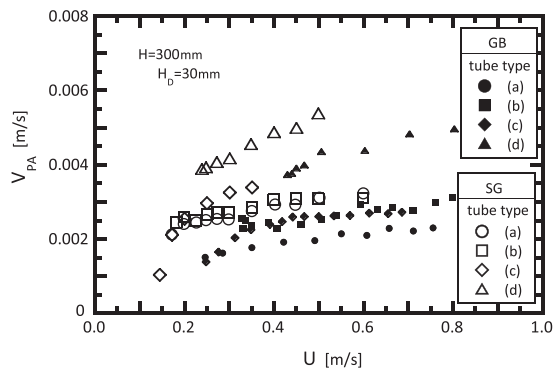


Fig. 13 Relationship between descending particle velocity in annulus and superficial gas velocity for four different types of draft tube spouted bed when using SG and GB as bed materials.

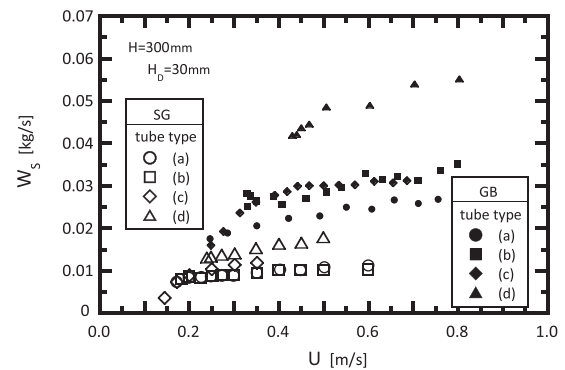
合の方がより大きいことがわかる。

Fig. 14 は  $W_s$  と  $U$  の関係で、(a) は SG, GB 粒子の結果、(b) は USS, GB 粒子の結果を示す。Fig. 14 (a) から  $W_s$  は、粒子密度の小さい SG 粒子を用いた場合の方が GB 粒子の場合よりも小さいことがわかる。また Fig. 14 (b) から不規則な形状の USS 粒子の方が GB 粒子より  $W_s$  が小さいことが認められる。なお、 $U$  の増加に伴って  $W_s$  が増加するのは Ji ら [11] が指摘しているように、この  $U$  の範囲ではエントレメント区間の粒子群がクラスターを形成してガスに同伴され、チューブ内を上昇するためと考えられる。また多孔チューブを用いることで  $W_s$  は増加するが、これはアニュラス部のガス速度が大きくなり、エアレーション効果が働くことと装置底部の圧力の上昇に伴いドラフトチューブ底部の圧力も増加するためチューブ内の粒子ホールドアップが増加することによると考えられる。

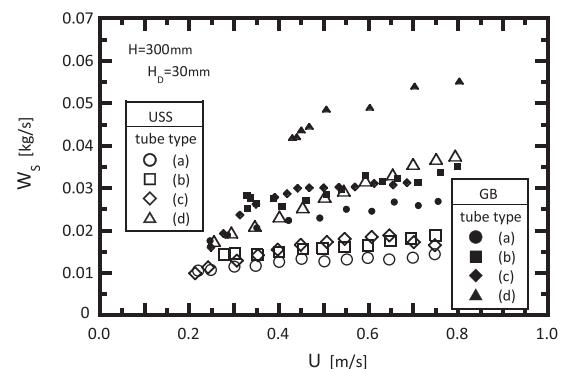
#### 4. 結 言

ドラフトチューブ付き噴流層のドラフトチューブとして、(a) 寸胴型非多孔チューブ、(b) 寸胴型多孔チューブ、(c) ラップ型非多孔チューブ、(d) ラップ型多孔チューブの4種のチューブを用いて、流動特性を調べた。また粒子として球形で密度が小さなシリカゲル粒子を用いて実験を行い、球形のガラスビーズ、形状が不規則なけい砂を用いた実験結果と比較した。得られた主な結論を以下に述べる。

- ① 層内圧力損失、最小噴流化速度は、(d) 型ラップ型多孔チューブを用いた場合に最大になり、またいずれのチューブを用いてもエントレメント区間が長くなると増加した。  
またそれらの値は、粒子密度が小さなシリカゲル粒子を用いた場合の方が他の粒子の場合よりも小さいことが認められた。



(a) data obtained using SG and GB.



(b) data obtained using USS and GB.

Fig. 14 Relationship between solids circulation rate and superficial gas velocity for four different types of draft tube spouted bed.

- ② アニュラス部ガス流量割合、粒子循環速度は多孔チューブを用いることで顕著に増加した。特に (d) 型ラップ型多孔チューブを用いた場合、ドラフトチューブ付き噴流層の利点を保ったまま通常の噴流層と同程度の 50 % 以上のアニュラス部ガス流量割合が得られた。シリカゲル粒子を用いると、粒子形状が球形に最も近いアニュラス部の空隙率が小さくなりアニュラス部ガス流量割合が他の粒子に比べて小さくなることがわかった。さらに球形であるため流動性が良好で、アニュラス部の粒子下降速度は他の粒子に比べて大きくなること、しかしながら粒子密度がかなり小さいため粒子循環速度は逆に小さくなることが認められた。
- ③ 層内の圧力分布から、(d) 型ラップ型多孔チューブを用いた場合にアニュラス部ガス流量割合が最大になることが確かめられた。

#### 謝 辞

本報の研究に有益な助言を賜りました当学科の石蔵利文教授および実験にご協力いただいた本研究室の卒業生諸氏に感謝いたします。



## Nomenclature

$A$	: coefficient in Eq. (1)	[kPa•s/m <sup>2</sup> ]
$A_A$	: cross-sectional area of annulus	[m <sup>2</sup> ]
$A_D$	: cross-sectional area of draft tube	[m <sup>2</sup> ]
$A_T$	: cross-sectional area of column	[m <sup>2</sup> ]
$B$	: coefficient in Eq. (1)	[kPa•s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
$D_D$	: diameter of draft tube	[m]
$D_O$	: diameter of spouting gas nozzle	[m]
$D_P$	: particle diameter (medium diameter)	[μm]
$D_T$	: column diameter	[m]
$g$	: gravitational acceleration	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	: bed height	[m]
$H_D$	: length of entrainment zone (distance from gas inlet nozzle to bottom of draft tube)	[m]
$L$	: distance between pressure taps in annulus	[m]
$L_D$	: length of draft tube	[m]
$m$	: mass of particles	[kg]
$P_A$	: pressure at $Z$ in annulus (gauge pressure)	[kPa]
$\Delta P_A$	: pressure drop of annulus for distance of $L$	[kPa]
$P_D$	: pressure at $Z$ in draft tube (gauge pressure)	[kPa]
$\Delta P_D$	: pressure drop across draft tube	[kPa]
$\Delta P_f$	: pressure drop across fluidized bed	[kPa]
$\Delta P_s$	: pressure drop across spouted bed	[kPa]
$\Delta P_{ST}$	: total pressure drop measured at gas inlet nozzle for spouting gas	[kPa]
$Q_A$	: gas flow rate through annulus [ $=U_A \cdot A_A$ ]	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_D$	: gas flow rate through draft tube [ $=U_D \cdot A_D$ ]	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_T$	: total gas flow rate [ $=Q_A + Q_D$ ]	[m <sup>3</sup> /s]
$Re_{mf}$	: Reynolds number [ $=D_P \cdot U_{mf} \cdot \rho_g / \mu_g$ ]	[-]
$U$	: superficial gas velocity in column [ $=Q_T / A_T$ ]	[m/s]
$U_A$	: gas velocity in cylindrical part of annulus [ $=Q_A / A_A$ ]	[m/s]
$U_D$	: gas velocity in cylindrical part of draft tube [ $=Q_D / A_D$ ]	[m/s]
$U_{Dms}$	: superficial gas velocity in draft tube for minimum spouting	[m/s]
$U_{mf}$	: minimum gas velocity for fluidization	[m/s]
$U_{ms}$	: minimum gas velocity for spouting	[m/s]
$U_t$	: terminal velocity of single particle	[m/s]
$V_{Pt}$	: descending particle velocity in	

	cylindrical part of annulus	[m/s]
$W_s$	: solids circulation rate	[kg/s]
$Z$	: longitudinal ordinate	[m]

## Greek letters

$\beta$	: opening ratio of perforated draft tube	[%]
$\varepsilon_A$	: average void fraction in annulus	[-]
$\theta$	: angle of cone base	[°]
$\mu_g$	: gas viscosity	[Pa•s]
$\rho_g$	: gas density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_P$	: particle density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_g$	: geometric standard deviation	[-]
$\phi$	: surface factor	[-]

## References

- [1] Geldart, D., Types of Gas Fluidization, Powder Technology, Vol. 7, 285-292 (1973).
- [2] Mathur, K. B. and Gishler, P. E., A Technique for Contacting Gases with Coarse Particles, AIChE Journal, Vol. 1, 157-164 (1955).
- [3] Mathur, K. B. and Epstein, N., Spouted Beds, Academic Press, New York (1974).
- [4] Aguado, R., Olazar, M., San Jose, M. J. and Bilbao, J., Pyrolysis of Saw-Dust in a Conical Spouted Bed Reactor. Yields and Product Composition, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 39, 1925-1933 (2000).
- [5] Aguado, R., Olazar, M., San Jose, M. J. and Bilbao, J., Wax Formation in the Pyrolysis of Polyolefins in a Conical Spouted Bed Reactor, Energy & Fuels, Vol. 16, 1429-1437 (2002).
- [6] Arabiourrutia, M., Lopez, G., Elordi, G., Olazar, M., Aguado, R. and Bilbao, J., Product Distribution Obtained in the Pyrolysis of Tyres in a Conical Spouted Bed Reactor, Chemical Engineering Science, Vol. 62, 5271-5275 (2007).
- [7] Hatate, Y., Ijichi, K. and Uemura, Y., Flow Characteristics of Draft Tube Spouted Bed and Its Application, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, Vol. 34, 343-360 (1997).
- [8] Epstein, N. and Grace, J. R., Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, Cambridge (2011).
- [9] Hattori, H., Ito, S., Onezawa, T., Yamada, K. and Yanai, S., Fluid and Solids Flow Affecting the Solids Circulation Rate in Spouted Beds with a Draft-Tube, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 37, 1085-1092 (2004).
- [10] Zhao, X. L., Yao, Q. and Li, S. Q., Effects of Draft Tube

- on Particle Velocity Profiles in Spouted Beds, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 29, 875-881 (2006).
- [11] Ji, H., Tsutsumi, A. and Yoshida, K., Solids Circulation in a Spouted Bed with a Draft Tube, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 31, 842-845 (1998).
- [12] Muir, J. R., Berruti, F. and Behie, L. A., Solid Circulation in Spouted and Spout-Fluid Beds with Draft-Tubes, *Chemical Engineering Communication*, Vol. 88, 153-171 (1990).
- [13] Nagashima, H., Ishikura, T. and Ide, M., Hydrodynamics of a Spouted Bed with an Impermeable Draft Tube for Binary Particle Systems, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 16, 688-693 (1999).
- [14] Clafflin, J. K. and Fane, A. G., Spouting with a Porous Draft-Tube, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 61, 356-363 (1983).
- [15] Hattori, H. and Nagai, T., Spouted Bed with a Draft-Tube without Gas Inlet Nozzle or Orifice, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 29, 484-487 (1996).
- [16] Hattori, H., Nagai, T., Ohshima, Y., Yoshida, M. and Nagata, A., Solid Circulation Rate in Screen-Bottomed Spouted Bed with Draft Tube, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 31, 633-635 (1998).
- [17] Ishikura, T., Nagashima, H. and Ide, M., Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, Vol. 22, 615-621 (1996).
- [18] Ishikura, T., Nagashima, H. and Ide, M., Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube Containing a Small Amount of Finer Particles, *Powder Technology*, Vol. 131, 56-65 (2003).
- [19] Alitzibar, H., Lopez, G., Alvarez, S., San Jose, M. J., Barona, A. and Olazar, M., A Draft-Tube Conical Spouted Bed for Drying Fine Particles, *Drying Technology*, Vol. 26, 308-314 (2008).
- [20] Alitzibar, H., Lopez, G., Aguado, R., Alvarez, S., San Jose, M. J. and Olazar, M., Hydrodynamics of Conical Spouted Beds Using Different Types of Internal Devices, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 32, 463-469 (2009).
- [21] Alitzibar, H., Lopez, G., Olazar, M. and Bilbao, J., Effect of Temperature on Fine Particle Drying in a Draft-Tube Conical Spouted Bed, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 34, 1130-1135 (2011).
- [22] Alitzibar, H., Lopez, G., Bilbao, J. and Olazar, M., Minimum Spouting Velocity of Conical Spouted Beds Equipped with Draft Tubes of Different Configuration, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, 2995-3006 (2013).
- [23] Nagashima, H., Ishikura, T. and Ide, M., Effect of the Tube Shape on Gas and Particle Flow in Spouted Beds with a Porous Draft Tube, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 87, 228-236 (2009).
- [24] Nagashima, H., Suzukawa, K. and Ishikura, T., Hydrodynamic Performance of Spouted Beds with Different Types of Draft Tubes, *Particuology*, Vol. 11, 475-482 (2013).
- [25] Makibar, J., Fernandez-Akarregi, A. R., Diaz, L., Lopez, G. and Olazar, M., Pilot Scale Conical Spouted Bed Pyrolysis Reactor: Draft Tube Selection and Hydrodynamic Performance, *Powder Technology*, Vol. 219, 49-58 (2012).
- [26] San Jose, M. J., Alvarez, S., de Salazar, A. O., Olazar, M. and Bilbao, J., Operating Conditions of Conical Spouted Beds with a Draft Tube: Effect of the Diameter of the Draft Tube and of the height of Entrainment Zone, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, 2877-2884 (2007).
- [27] Grbavcic, Z. B., Garic-Grulovic, R. V. and Arsenijevic, Z. L., Prediction of the Choking Velocity and Voidage in Vertical Pneumatic Conveying of Coarse Particles, *Powder Technology*, Vol. 161, 1-9 (2006).