傾斜板内挿型気固接触装置の流動特性

永田 啓吾*, 村瀬 和典*, 山口 浩司*
金井 憲志*, 中村 正秋*, 外山 茂樹*

The Flow Properties of a Gas-solid Contactor with Inclined Baffle Plates

by

Keigo NAGATA[†], Kazuo MURASE[†], Hiroshi YAMAGUCHI[†]

Kenji KANAI[†], Masaaki NAKAMURA[†] and Shigeki TOYAMA[†]

The behavior of particles in a gas-solid contactor with inclined baffle plates to form a zig-zag path has been experimentally studied. In this contactor, solid particles trickle down over the baffles and are spouted into the opening between the wall and the plate edge by upflowing gas. The pitch, open spacing fraction and inclination of the baffles are chosen as parameters of the experimental condition. The loading and flooding points are observed at critical gas velocities in using this apparatus. A definite increase in the solid holdup and residence time of solid particles is also observed at the loading point, and particles choked the column at the flooding point. To investigate these properties thoroughly, trajectories of a single particle are calculated in a two-dimensional field of the gas velocity measured with a hot wire anemometer.

Key Words : Distribution of Gas Velocity, Gas-solid Contactor,
Inclined Baffle Plates, Holdup of Solid Particles,
Particle Trajectories, Pressure Drop

1. 緒 言

気体と固体粒子の接触装置は、粒子の移動形態から固定層、移動層、流動層、輸送(気流)層などに分類され、粒子の加熱、冷却、乾燥、化学反応に用いられている。気流の圧力損失を比較的小さく抑え、湿潤粒子の解砕・分散効果も期待されるバッフル内挿型気固向流型接触装置も使用されている。バッフルとしては充填物をランダムに詰めたもの^{1,2)}、角材を一層ごとに交互配列したもの³⁾、前報の山形鋼を状せて平行に配列したもの⁴⁾などがある。

山形鋼を伏せて平行に配列した場合、気流は山形鋼の凹部に衝突し、粉粒体を巻き込んだ循環流を形成し粒子滞留量ならびに気固接触面積を増加させる効果が認められた⁴⁾。本研究では、装置内に供給される粒子の量が比較的少ない場合において、山形鋼による循環流の影響をより明らかにするため、バッフルのサイズを大きくし、流路に傾斜板を交互に配列した傾斜板内挿型気固接触装置を試作した。これにより、ジグザグ流路における気流の速度分布を測定し、単一粒子の運動軌跡を数値解析した。一方、粒子滞留量ならびに圧力損失に及ぼす内挿板の形状の影響を調べた。

2. 実験装置および方法

Fig. 1は実験装置のフローシートである。ブロワーで吸引された空気は流量計を通った後、装置下部から

1994年 7月 20日受付

* 名古屋大学工学部分子化学工学科

(〒464-01 名古屋市千種区不老町) TEL. 052-789-3618

† Dept. of Chem. Eng., Nagoya Univ.

(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01)

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

供給され、上方に向かって流れる。固体粒子は装置上部からスクリーフィーダーにより一定流量で供給され、下方に向かって流れる。定常状態になった後、装置底部に取り付けたボールバルブを急閉し、粒子フィーダーおよびブロワーを同時に停止し、装置内に滞留する粒子量を測定した。

装置本体の寸法は幅 $X=170\text{mm}$ 、厚さ 50mm 、高さ 1500mm 、前面と後面は内部観察用に透明アクリル板で作られている。装置内部には、Fig. 2に示すように傾斜板が垂直距離 Y 毎に交互に配置されている。傾斜板を水平面と角 $\theta=40^\circ$ あるいは 45° と、粒子の安息角以上にとった。傾斜板の水平方向長さを S とし、開口比を $E=1-S/X$ で求めた。

粒子を流さないときのガス速度分布をI型プローブ

Fig. 2 Details of inclined baffle plates

を使用する定温度熱線流速計で測定するために、装置前面のアクリル板にプローブ挿入用の穴を 10mm 間隔で垂直方向に31点、水平方向に17点設けた。

粒子は、シリカサンド(50%径 $d_p=0.25\text{mm}$ 、密度 $\rho_p=2650\text{kg/m}^3$ 、終末速度 $u_t=1.44\text{m/s}$)を用いた。

3. 粒子滞留率と圧力損失

前報⁴⁾で山形鋼を内挿した場合と同様、締め切り法による気固二相向流接触時の粒子滞留率 f_p と、固体粒子が存在することによる圧力損失の寄与分 $\Delta P_s(=\Delta P-\Delta P_0)$ をFigs. 3および4に示す。Fig. 3において粒子滞留率 f_p は低ガス流速域でほとんど一定であり、ある流速以上で増加が始まり、高流速域で急激に増大している。一方、Fig. 4の圧力損失 $\Delta P_s/L$ とガス流速 u との関係も同様の関係にある。ただしFig. 4において、低ガス流速域で、 $\Delta P_s/L$ の値が粒子供給量 F にかかわらず、非常に小さな値をとるのは、低ガス流速域では、ガスの影響が少なく、粒子滞留量(ホールドアップ)が粒子供給量 F の値に関係なく一定となるためである。このように、装置内に供給される粒子の量が比較的少ない場合、前報⁴⁾で山形鋼を内挿した場合に観察された場合と同様の結果を示し、 f_p の増加

Fig. 3 The effect of the solid feed rate on the volume fraction of solid particles

Fig. 4 The effect of the solid feed rate on the pressure drop due to solid particles

Fig. 5 Flow behaviour of solid particles in the gas-solid contactor

が始まるガス流速をローディング/loading)開始速度 u_{ld} , 圧力損失が大きく, 操作不能となるガス流速をフラッディング/flooding)速度 u_{fl} と呼ぶ。Fig. 5は, ローディング開始直後およびフラッディング開始直前の流動状態を示す。ローディング状態では, 傾斜板の先端で粒子がガス流によって上方に運ばれ, 循環流を形成している様子が観察される。フラッディング状態に近づくにつれ, 粒子は激しく乱れた循環運動を行い, 粒子滞留量が急激に増加する。

Fig. 3は粒子供給量 F が f_p に与える影響を調べたものであるが, ここで用いた F の範囲では, 他の条件が一定の時, u_{ld} および u_{fl} の値はほぼ同じであった。

Fig. 6は, 傾斜板の設置間隔 Y の影響を見たものであるが, Y が小さいほど f_p は大きく, u_{ld} および u_{fl} は小さくなる傾向にあった。

傾斜板の開口比 E と f_p の関係を Fig. 7 に示す。 E が小さいほど u_{ld} および u_{fl} は小さくなるのは, 開口部を流れる平均ガス速度が $u_0 = u/E$ と大きくなるためであり, 結果の一例を Table 1 にまとめた。これより u_0 の値が粒子の終末速度 ($u_t = 1.44 \text{ m/s}$) 以上になると, ローディングが開始されることが分かる。また, これらの結果は, 前報⁴⁾に用いた山形鋼の間隔を小さくすれば, 少ないガス流速でも, 粒子滞留量の増加効果が期待できることを示すものである。

傾斜板の角度 θ を 40° および 45° と変えたが, f_p およ

Fig. 6 The effect of the pitch of baffles on the volume fraction of solid particles

Fig. 7 The effect of the open spacing fraction on the volume fraction of solid particles

Table 1 Experimental results of the loading and flooding velocities at $F = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $\theta = 45^\circ$

Y (m)	E (-)	u_{ld} (m/s)	u_{ld}/E (m/s)	u_{fl} (m/s)	u_{fl}/E (m/s)
0.100	0.429	0.70	1.63	1.30	3.03
0.150	0.200	0.30	1.50	0.60	3.00
0.150	0.286	0.50	1.75	0.95	3.32
0.150	0.429	0.65	1.52	1.05	2.45
0.250	0.429	0.65	1.52	1.20	2.80
0.375	0.429	0.65	1.52	1.30	3.03

び $\Delta P_s/L$ の結果に差異はなかった。これは, いずれの場合も粒子の安息角以上の値であったためと考えられる。

気固接触効率を高めるには, ガス空塔流速を $u_{dl} < u < u_{fl}$, すなわちローディング状態の範囲で操作すべきであるので, この範囲の圧力損失 $\Delta P_s/L$ を片対数グラフで整理し直してみると, Figs. 8 および 9 となり, ガス空塔速度 u に対しほぼ直線関係にあることが分かる。

$$\log \frac{\Delta P_s}{L} = au + b \quad (1)$$

Fig. 8 The effect of the pitch of baffles on the pressure drop due to solid particles

Fig. 9 The effect of the open spacing fraction on the pressure drop due to solid particles

Table 2 Coefficients a and b in Eq.(1) for the pressure drop due to solid particle flow ($\theta=45^\circ$)

Y (m)	E (-)	F ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	a	b
0.100	0.429	1.18	1.37	0.83
		2.10	1.30	1.21
0.150	0.200	1.15	4.58	0.03
		2.02	3.50	0.92
0.150	0.286	1.16	3.47	-0.25
		2.05	2.73	0.58
0.150	0.429	1.16	4.20	-1.22
		2.05	2.52	0.43
		3.01	2.66	0.26
0.250	0.200	1.16	4.91	-0.93
		2.04	2.57	0.94
0.250	0.286	1.17	1.92	0.40
		2.09	1.79	0.84
0.250	0.429	1.16	2.31	-0.16
		2.08	2.11	0.15
0.375	0.429	1.16	1.88	0.05
		2.08	1.43	0.67

直線の勾配は粒子供給量 F , 傾斜板間隔 Y , 開口比 E などによりTable 2によって示される。ただしFig. 8において, 低ガス流速域では, 傾斜板間隔 $Y=0.250$ mおよび 0.375 mの時の直線同士が交わっている。これは, 低ガス流速領域ではガスの影響が少ないため, Y をある程度以上に大きくとった場合, その値にかか

わらず, 層内を移動する粒子の平均速度はほぼ一定となるためだと考えられる。したがって, 低ガス流速領域では Y の値に関係なく, 圧力損失 $\Delta P_s/L$ は同程度の値を示す。

4. ガス流速分布と粒子軌跡の解析

気固向流接触装置内の粒子滞留量に影響を与えるのは, ガス供給量のみならず装置内のガス速度分布が重要であることが分かったが, 粒子の存在下でガス速度分布を測定することは困難である。そこで, 間接的な検討になるが, 粒子流れを伴わないガス単相流の速度分布を熱線流速計で測定した。

Figs. 10および**11**は $Y=0.10$ m, $S=0.10$ m, $E=0.429$ の装置に, ガスを空塔速度 $u=0.74$ m/sおよび 1.25 m/sで流した時の時間平均速度分布の実測値である。速度ベクトルの方向は, 測定部における熱線流速計の値が最大値を示した時のプローブの角度から求めた。それぞれローディング開始直後およびフラッシング開始直前のガス供給速度に対応している。流れの主流は開口部を上方に吹き上がり, 次の開口部に向かって蛇行している。また, 傾斜板の下面および上面に沿って循環流が認められ, これらはFig. 5の粒子運動状態の写真観察とも一致している。

気固向流接触装置ではローディング状態で操作することが望ましく, ローディング開始付近での粒子の挙動を知ることは重要である。この状態では, まだ比較的粒子濃度が低く, 粒子相互間あるいは粒子-流体間の相互作用を無視し得るとし, 実測したガス流速分布を利用し, 単一粒子の運動軌跡を数値解析する。

単一粒子の二次元の運動方程式は次式である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \frac{C_{dx}A_p}{2\rho_p V_p} |u_x - v_x| (u_x - v_x) \\ \frac{dv_y}{dt} &= \frac{C_{dy}A_p}{2\rho_p V_p} |u_y - v_y| (u_y - v_y) + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) g \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

粒子-流体間の抗力係数 C_d は, 粒子レイノルズ数 Re_p の範囲によって次の式を用いて計算した。

$$\left. \begin{aligned} C_d &= 24 / Re_p, & Re_p < 0.3 \\ C_d &= 24 / Re_p (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & 0.3 \leq Re_p \leq 1000 \\ C_d &= 0.44, & 1000 < Re_p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$Re_p = \rho d_p |u_x - v_x| / \mu \text{ or } \rho d_p |u_y - v_y| / \mu \quad (4)$$

粒子は球形と仮定し, 傾斜板および装置壁における粒子の反発は回転を無視した反発の式⁵⁾に従うものとした。単一粒子の挙動をビデオ撮影し, その画像を解析

Fig. 10 Distribution of gas velocity without solid particles ($u=0.74\text{m/s}$)

Fig. 11 Distribution of gas velocity without solid particles ($u=1.25\text{m/s}$)

し、粒子の反発係数 e および動摩擦係数 f_k を求めた ($e=0.3$, $f_k=0.09$)。粒子は、下から数えて4段目の傾斜板先端から初速度 $v_{x0}=-0.05\text{m/s}$, $v_{y0}=0.05\text{m/s}$ で落下するものとした。**Fig. 12**は、ガス供給速度がローディング点 ($u=0.74\text{m/s}$) のとき、粒子径の違いによる運動の軌跡を比較したものである。粒径が $250\mu\text{m}$ の時、粒子はガス流れに沿って傾斜板の背面を循環しながら同伴され、飛散していく。粒径が $500\mu\text{m}$ になると、傾斜板背面に形成されている循環流に沿っ

Fig. 12 Trajectories of a single particle in two-dimensional flow field ($u=0.74\text{m/s}$)

Fig. 13 Trajectories of a single particle in two-dimensional flow field ($u=1.25\text{m/s}$)

て粒子が循環し、粒子の飛散および降下は見られない。それ以上の粒径になると、粒子に働く重力が支配的になり粒子は傾斜板に沿って降下する。**Fig. 13**は、ガス供給速度がフラッディング点 ($u=1.25\text{m/s}$) のときの粒子運動の軌跡を示したものである。重力が支配的となる粒径が $1000\mu\text{m}$ 以上の場合を除き、使用した粒子の大部分が上方に運ばれ、フラッディング状態にあることが示されている。この他、種々の条件下での単一粒子運動の解析と、ビデオによる流動状態の観察結果との比較から、両者の結果がよく一致することがわかり、定性的には、本装置内の粒子の挙動を単一粒子運動の解析で説明することができた。

5. 結 言

前報⁴⁾の、山形鋼を伏せて平行に配列した気固接触

装置内における循環流の影響をより明らかにするため、パツフルとして傾斜板を交互に配置した傾斜板内挿型気固接触装置を試作し、実験およびジグザグ流路における単一粒子の運動軌跡の数値解析を行い、以下に示す知見を得た。

本装置を使用し、粒子滞留量および圧力損失を測定した結果、山形鋼の場合と同様に、粒子のローディング開始速度や操作不能となるフラッディング速度が存

在することが明らかとなり、その速度分布を実測した。ローディング開始速度やフラッディング速度は、装置内の傾斜板の開口比を小さくするほど小さな値を示すことがわかった。また、測定したガス速度分布を用いて、粒子径の違いによる単一粒子の運動軌跡を解析し、ビデオによる流動状態の観察結果との比較から、定性的には両者の結果がよく一致することがわかった。

Nomenclature

A_p : cross sectional area of a single particle	(m^2)	u_n : superficial gas velocity at the flooding point	($m \cdot s^{-1}$)
C_d : drag coefficient for a single particle	($-$)	u_{ld} : superficial gas velocity at the loading point	($m \cdot s^{-1}$)
d_p : particle diameter	(m)	u_{mf} : minimum fluidization velocity	($m \cdot s^{-1}$)
E : open spacing fraction($=1-S/X$)	($-$)	u_0 : gas velocity at the minimum opening($=u/E$)	($m \cdot s^{-1}$)
e : repulsive factor for a single particle	($-$)	u_x : gas velocity in the x -direction	($m \cdot s^{-1}$)
F : feed rate of solid particles	($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	u_y : gas velocity in the y -direction	($m \cdot s^{-1}$)
f_k : kinematic friction factor	($-$)	V_p : volume of a single particle	(m^3)
f_p : volume fraction due to holdup of solid particles	($-$)	v_t : terminal velocity of a single particle	($m \cdot s^{-1}$)
g : gravitational acceleration	($m \cdot s^{-2}$)	v_x : particle velocity in the x -direction	($m \cdot s^{-1}$)
L : total length of the column	(m)	v_y : particle velocity in the y -direction	($m \cdot s^{-1}$)
ΔP : pressure drop of gas-solid countercurrent flow	(Pa)	X : width of the column	(m)
ΔP_0 : pressure drop of gas flow	(Pa)	Y : pitch of inclined baffle plates	(m)
ΔP_s : pressure drop due to solid particles ($=\Delta P - \Delta P_0$)	(Pa)	ϵ : void fraction	($-$)
Re_p : particle Reynolds number	($-$)	ρ : density of air	($kg \cdot m^{-3}$)
S : horizontal length of inclined baffle plates	(m)	ρ_p : density of solid particles	($kg \cdot m^{-3}$)
u : superficial gas velocity	($m \cdot s^{-1}$)	μ : viscosity of air	($Pa \cdot s$)

References

- 1) Claus, F. G., F. Verrnes and P. le Goff : *Can. J. Chem. Eng.*, **54**, 143(1976)
- 2) Large, J. F., M. Nand, P. Guinon and M. A. Bergougnou : *Chem. Eng. J.*, **22**, 95(1981)
- 3) Verver, A. B. and W. P. M. van Swaaij : *Chem. Eng. J.*, **45**, 119(1986)
- 4) Nagata, K., M. Nakamura, N. Yamagishi, H. Yamaguchi, H. Mori, S. Toyama, Y. Hamada and S. Tamura : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **31**, 556(1994)
- 5) Tsuji, Y. : "Kuuki-yusou no Kiso", p.52, Yo-ken Do(1984)