研究報告

連続式固-気系噴流層から小粒子が飛び出す場合の 粒子滞留時間分布について*

Residence Time Distribution of Particles in the Continuous Spouted Bed of
Solid-Gas System with Elutriation of Fines

石 蔵 利 文** 田 中 勇 武***

Toshifumi Ishikura Isamu Tanaka

篠 原 久***

Hisashi Shinohara

緒 言

噴流層を応用した粉粒体の乾燥、反応および造粒装置などが、近年工業的に用いられている¹⁾。この場合、粒子群の挙動と関連して、粒子の滞留時間分布がきわめて重要と考えられる。

噴流層における粒子の滞留時間分布については、Becker ら²⁾、Barton ら³⁾、久郷ら⁴⁾などの研究があり、さらに粒子の循環速度に関して Chatterjee⁵⁾、粒子の循環モデルについて Mann ら⁶⁾の研究がある。しかし、粒子が飛び出す場合を含めた滞留時間分布の研究は見当たらないようである。

本報告では、前報⁴⁾において報告した溢流口、供給口の構造(B型)を用いて、連続式固-気系噴流層から小粒子が飛び出す場合の粒子滞留時間分布を実験的に求め、また簡単な混合モデルを用いて理論式を導き、ついで理論値と実験値との比較を行なった。

1. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。空気の流れ、噴流層本体は前報⁴⁾と同様である。オリフィス径としては10mm, 20mm, 円錐角としては60°を使用した。また、塔高 $H=215\text{cm}$ (オリフィスから塔出口までの高さ) は T.D.H. 以上であることが確かめられている⁴⁾。

噴流層が定常状態に達した後、トレーサー粒子を注入口11より瞬間的に送込み、同時に溢流粒子群および飛び

Fig. 1 連続式固-気系噴流層の実験装置概略図

出した小粒子群を、5～15秒毎に試料として採取した。

小粒子としては豊浦標準砂 ($\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$, $D_p=180\mu$, $u_t=131\text{cm/sec}$) を、大粒子としては相馬標準砂 ($\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$, $D_p=718\mu$, $u_t=588\text{cm/sec}$) を用い、トレーサー粒子としては小粒子とほぼ物性値の等しい粒状ソーダ灰 ($\rho_s=2.54\text{g/cm}^3$, $D_p=169\mu$, $u_t=124\text{cm/sec}$) を使用した。溢流粒子群、飛び出した小粒子群中のトレーサー量は0.1N HClを用いる中和滴定により求められた。

2. 解 析

噴流層は噴流部 (Spout) とそのまわりの円環部 (Annulus) およびそれらの上部の Fountain 部とからなると一般に考えられている。そこで、小粒子が飛び出す場合について、Fig. 2*に示すようなモデルを考える。すなわち、全系内の小粒子量を U とし、その内で、Spout

昭和53年1月5日受理

* 化学工学協会主催鹿児島大会にて発表 (1977.11 鹿児島)

** 福岡大学工学部化学工学科 (〒814 福岡市西区七隈11)

TEL 092-871-6631

*** 九州大学工学部化学機械工学科 (〒812 福岡市東区箱崎町6-10-1) TEL 092-641-1101

* Fig. 2 のモデルでは、簡単のために、噴流部から出た粒子中、円環部へ戻る粒子量は小さいと考えて、この量を無視した。

Fig. 2 粒子の混合モデル

部および Fountain 部に存在する小粒子は、完全混合状態にあるとして、その量を U_b とし、Annulus 部に存在する小粒子はピストン流れ状態にあるとして、その量を U_{p1} とし、層上塔内の dead zone に存在する小粒子量を U_d で表わし、さらに塔頂部よりサイクロン（試料採取口）までに存在する小粒子量を U_{p2} とした。

噴流層中の Annulus 部、Spout 部および Fountain 部における物質収支より、溢流粒子群中のトレーサー濃度 X_2 は

$$X_2 = X_0 \left[1 - \exp \left\{ - \frac{C_f F}{U_b} \left(t - \frac{U_{p1}}{FC_f} \right) \right\} \right] \quad \text{.....(1)}$$

さらに、飛び出した小粒子中に含まれるトレーサー濃度 X_3 は X_2 よりも U_{p2}/V_i の時間遅れがあるとして

$$X_3 = X_0 \left[1 - \exp \left\{ - \frac{C_f F}{U_b} \left(t - \frac{U_{p1}}{FC_f} - \frac{U_{p2}}{V_i} \right) \right\} \right] \quad \text{.....(2)}$$

トレーサーの物質収支より

$$FC_f X_{out} = OC_0 X_2 + V_i X_3 \quad \text{.....(3)}$$

(1), (2) 式を (3) 式に代入して整理すると、滞留時間分布関数 $E(\theta)$ の式として次式を得る。

$$E(\theta) = \frac{U}{U_b} \left\{ \frac{C_0 O}{C_f F} \exp \left\{ - \frac{U}{U_b} \left(\theta - \frac{U_{p1}}{U} \right) \right\} + \frac{V_i}{C_f F} \exp \left\{ - \frac{U}{U_b} \left(\theta - \frac{U_{p1}}{U} - \frac{U_{p2} C_f F}{UV_i} \right) \right\} \right\} \quad \text{.....(4)}$$

ただし、 $C_f F = V_i + C_0 O$, $\theta = t/t^*$

$$t^* = U/C_f F, \quad U = CW \quad \text{.....(5)}$$

(4) 式中に、 $U = U_b$ ($U_{p1} = U_{p2} = U_d = 0$, Fig. 2 参照), $V_i = 0$, ($C_f F = C_0 O$) を代入すれば、完全混合の場合の理論式として次式が得られる。

$$E(\theta) = \exp(-\theta) \quad \text{.....(6)}$$

Fig. 3 $E(\theta)$ vs. θ (噴流層から小粒子が飛び出さない場合, $V_i/FC_f = 0$, S.B : Spouted bed, F.B : Fluidized bed)

3. 実験結果および考察

3.1 小粒子が飛び出さない場合

Fig. 3 に本実験値と既往の噴流層、流動層の文献値^{11,9)}との比較を示す。図中の点線は、本実験条件とはほぼ同一条件下の流動層の実験値⁹⁾であり、これらは完全混合状態を示している。しかし本実験値には完全混合からのずれが見られ、Barton 等¹¹⁾の結果とよく一致している。また図示を省略したが久郷⁹⁾の実験値ともよく一致した。なお Fig. 3 には、大小 2 粒子群の場合 ($C_f = 0.5$)、小粒子群だけの場合 ($C_f = 1.0$) の結果をも併記した。図より大粒子の存在は $E(\theta)$ には影響を与えないことおよび流速 u 、供給速度 F 、オリフィス径 D_0 の影響もないことがわかる。 u , D_0 の影響については、久郷⁹⁾も同様な結果を得ている。図中の Eqs.(7-1), (7-2) は Table 1 に示すように Eq. (4) から得られた式であるが、両者は同一の式となっており、Barton¹¹⁾らの式とよく合致する。

3.2 小粒子が飛び出す場合

流速を速くし、増加させた場合の実験結果を、Figs. 4, 5, 6 に示す。図中の実線はそれぞれ Eq. (4) より求められた Eq. (7-3), Eq. (8) および Eq. (9) を示しており、これらの式はすべて Table 1 に総括して示されている。表中記載の U/U_b , U_{p2}/U の値は、表中の諸式と実験値を比較し、両者がよく合致するように選ばれた値である。

Eqs. (8), (9) において、時間遅れ U_{p2}/U が大きくなるのは、噴流層頂部よりサイクロンまでの間に存在する飛び出した小粒子量 U_{p2} が大きくなるためと考えられる。

Fig. 7 は、噴流層でえられた U_b/U および U_{p2}/U を、ほぼ同一の実験条件下における流動層でのそれら⁹⁾と比較したものである。

Table 1 Eq.(4) から導かれた滞留時間分布関数

No.	u [cm/sec]	$E(\theta)$	U/U_b	U_p/U^*
1	79	$V_t/C_f F=0$ $(U/U_b)\exp[-(U/U_b)(\theta-U_{p1}/U)]$ Eq. (7-1)	1.11	0.10
2	103	$V_t/C_f F=0$ $(U/U_b)\exp[-(U/U_b)(\theta-U_{p1}/U)]$ Eq. (7-2)	1.11	0.10
3	143	$V_t/C_f F=0.1-0.15$ $(C_0 O \div C_f F)$ $(U/U_b)\exp[-(U/U_b)(\theta-U_{p1}/U)]$ Eq. (7-3)	1.11	0.10
4	169	$V_t/C_f F=0.5-0.6$ $(V_t \div C_0 O)$ $(U/U_b)\exp[-(U/U_b)(\theta-(U_{p1}/U)-(U_{p2}C_f F/UV_t))]$ Eq.(8)	1.25	0.15
5	195	$V_t/C_f F=0.8-0.9$ $(V_t \div C_f F)$ $(U/U_b)\exp[-(U/U_b)(\theta-(U_{p1}/U)-(U_{p2}/U))]$ Eq. (9)	1.50	0.20

*) $U_p/U=(U_{p1}+U_{p2}C_f F/V_t)/U$

Fig. 4 $E(\theta)$ vs. θ (噴流層から小粒子が飛び出す場合, $V_t/FC_f=0.1\sim0.15$, $C_0 O \div C_f F$)

Fig. 6 $E(\theta)$ vs. θ (噴流層から小粒子が飛び出す場合, $V_t/FC_f=0.8\sim0.9$, $V_t \div C_f F$)

Fig. 5 $E(\theta)$ vs. θ (噴流層から小粒子が飛び出す場合, $V_t/FC_f=0.5\sim0.6$, $V_t \div C_0 O$)

図中の噴流層において、小粒子がほとんど飛び出さない領域 ($u/u_t < 1.1$) においては、 U_b/U , U_p/U がそれぞれ一定値であるが、 $u/u_t > 1.1$ の場合には U_{p2} が増加するため、 U_b/U の値は減少し、 U_p/U の値は増加して、完全混合からのずれが大きくなっている。また流動層では、噴流層のようにピストン流れを示す U_{p1} がないため、 $u/u_t < 1.35$ の領域においては、 $U_p/U=0$ であるが、噴流層の場合には U_{p1} が存在するため、 U_p/U の一定値が存在する。しかし、さらに小粒子が飛び出す領域において、流速が増加すると、流動層、噴流層における

Fig. 7 U_b/U , U_p/U vs. u/u_t (S·B : Spouted bed, F·B : Fluidized bed)

U_b/U , U_p/U の値は、同一の傾向を示すようになる。

結 言

噴流層から小粒子が飛び出さない場合の滞留時間分布について

(1) 本実験でえられた小粒子の滞留時間分布は、文献

値^{1,5)}とよく合致し、流動層⁹⁾の場合のそれとの相違が認められた。

- (2) 大小2粒子群の場合と、単一試料だけの場合の実験値は、互いによく合致した。
  - (3) 流速、オリフィス径は、久郷らの結果⁵⁾と同様、滞留時間分布に影響を与えない結果がえられた。
- 噴流層から小粒子が飛び出す場合の滞留時間分布につ

いて

- (1) 流速の増加にともない、完全混合からのずれが大きくなり、流動層⁹⁾と同様の傾向を示した。
- (2) 簡単な粒子混合モデルから得られた推算値と実験値とがかなりよく一致した。

(謝辞) 本研究の実験にあたり、協力いただいた雨川智行氏に感謝いたします。

使用記号

C	: 塔内粒子群中の小粒子濃度 [g(小粒子)/g(全粒子)]	U	: 全装置内に保有される全小粒子量(=CW) [g]
C_f	: 供給粒子群中の小粒子濃度 [g(小粒子)/g(全粒子)]	U_b	: 完全混合領域内に保有される小粒子量 [g]
C_0	: 溢流粒子群中の小粒子濃度 [g(小粒子)/g(全粒子)]	U_d	: 死空間領域内に保有される小粒子量 [g]
D_0	: オリフィス径 [mm]	U_{p1}, U_{p2}	: 各々時間遅れ領域に保有される小粒子量 (Fig. 2 参照) [g]
D_p	: メディアン粒子径 [μ]	u	: 空塔ガス速度 [cm/sec]
D_T	: 塔径 [mm]	u_t	: 粒子終末速度 (風篩法によって測定) [cm/sec]
$E(\theta)$	: 滞留時間分布関数 [—]	V_t	: T.D.H. 以上の塔高における粒子の飛び出し 速度 [g/sec]
F	: 粒子供給速度 [g/sec]	W	: 全装置内の粒子保有量 [g]
H	: 塔高 (オリフィスから塔出口までの高さ) [cm]	$X_0, X_1, X_2, X_3, X_{out}$	: トレーサー濃度 (Fig. 2 参照) [—]
O	: 粒子群の溢流速度 [g/sec]	ρ_s	: 粒子密度 [g/cm ³]
t	: 時間 [sec]	θ	: 無次元時間 [—]
t^*	: (5)式による平均滞留時間 [sec]		

引用文献

- 1) Barton, R.K., G.R. Rigby and J.S. Ratcliffe: *Mech. Chem. Eng. Trans.*, **4**, 105 (1968)
- 2) Becker, H.A. and H.R. Sallans: *Chem. Eng. Sci.*, **13**, 97 (1961)
- 3) Chatterjee, A.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **9**, 531 (1970)
- 4) Ishikura, T., I. Tanaka and H. Shinohara: *J. Res. Assoc. Powder Tech. (Japan)*, **13**, 535 (1976)
- 5) Kugo, M., N. Watanabe, O. Uemaki and T. Shibata: *Bull. Hokkaido Univ. Sapporo, Japan*, **39**, 95 (1965)
- 6) Mann, U. and E.J. Crosby: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **11**, 314 (1972)
- 7) Mathur, K.B. and N. Epstein: "Spouted Bed", Academic Press, New York (1974)
- 8) Tanaka, I. and H. Shinohara: *J. Res. Assoc. Powder Tech. (Japan)*, **10**, 18 (1973)

Authors' Abstract

Residence Time Distribution of Particles in the Continuous Spouted Bed of Solid-Gas System with Elutriation of Fines

by

Toshifumi ISHIKURA* and Isamu TANAKA** and Hisashi SHINOHARA**

(*Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

(**Department of Chemical Engineering, Kyushu University)

There are a few study on the residence time distribution in the continuous spouted bed of solid-gas system without elutriation of particles. However, there is apparently no study on the case with elutriation of fines.

In this paper, the residence time distribution of particles in the continuous spouted bed with or without elutriation of fines was measured and the experimental values were compared with the theoretical values which were developed from the simple mixing model.

As the results, the experimental values without elutriation of fines coincided fairly well with the reported and the theoretical values and furthermore the experimental values with elutriation of fines showed good agreement with the theoretical values.

List of Figures and Table

Fig. 1 Schematic diagram of the continuous spouted bed of solid-gas system

Fig. 2 Mixing model

Fig. 3 Residence time distribution in the continuous spouted bed without elutriation of fines
($V_t/FC_f=0$, S·B : Spouted bed, F·B : Fluidized bed)

Fig. 4 Residence time distribution in the continuous spouted bed with elutriation of fines
($V_t/FC_f=0.1-0.15$, $C_0O \div C_fF$)

Fig. 5 Residence time distribution in the continuous spouted bed with elutriation of fines
($V_t/FC_f=0.5-0.6$, $V_t \div C_0O$)

Fig. 6 Residence time distribution in the continuous spouted bed with elutriation of fines
($V_t/FC_f=0.8-0.9$, $V_t \div C_fF$)

Fig. 7 The relation between ratio of U_b , U_p to U and u/u_t
(S·B : Spouted bed, F·B : Fluidized bed)

Table 1 Summary of residence time distribution $E(\theta)$ obtained from Eq.(4)