

論 文

Co-flow 型静電流動層の混合・分離特性

緒 方 純 俊*, 藤 野 光 雄**, Jen Shih CHANG***
(1981年7月17日受理)

Mixing and Segregation Properties in Co-flow Type Electrostatic Fluidized Bed

S. OGATA,* M. FUJINO** and J.S. CHANG***
(Received July 17, 1981)

Mixing and segregation phenomena in an electrostatic fluidized bed, on which an electric field parallel to gas flow was imposed, has been investigated. The experiment was performed using glass bead of particle size 120, 200 and 250 μm for applied voltage 0 to 15 kV, relative humidity 0 and 55% at electrode gap distance 8.6 cm. The experimental results show that the imposed electric field enhances moderately the segregation rate and deenhances the mixing rate slightly. A qualitative consideration of segregation mechanism has been made through the simplified governing equations of gas-fluid two phase flow.

1. 緒 言

流動層は燃焼器としての使用を含め、おもに各種の反応装置としてこれまで用いられてきた。ところが近年、集塵装置¹⁻³⁾、あるいは分離装置^{4,5)}としてこれを使用しようとする試みがなされるようになり、にわかにその性能が注目されるようになった。なかでも最も工業的スケールでの応用が期待されるのが、ここで述べる静電流動層 (EBF) であろう。この型式の流動層では、塔内に電極板が取り付けられており、これに直流あるいは交流の高電圧が印加される。このとき粒子および流体の運動は電気流体力学的になる。すなわち、印加電圧を加減することによって粒子あるいはバブルの運動を制御することが可能となる。層内を通して流れる電流は小さいほど望ましい。したがって絶縁性あるいは半絶縁性の粒子が層粒子として使用される。

EBF 型集塵装置では層粒子の表面がダストの捕集

面^{*1}となるので、従来の電気集塵装置(EP)よりも小型で簡便なものが作製されるといわれている¹⁻³⁾。また Zieve ら³⁾の実験によれば、98%以上の集塵効率が得られていて、今後の包括的研究が期待されているところである。

一方、EBF を分離装置として使用するための研究は、集塵装置のそれと同様端緒についたばかりであり、研究報告が散見される程度である。したがって信頼性の高いデータはまだまったく得られていない。Beekmans ら⁴⁾および著者⁵⁾はガスの流れと電界の方向が一致する、いわゆる co-flow 型 EBF¹⁾を用いて実験を行ない、分離が実際に生じていることを確認している。

co-flow 型のほかに、ガスの流れと電界の方向が直交する cross-flow 型 EBF¹⁾がある。しかし著者らのこれまでの予備的実験によれば、cross-flow 型では顕著な分離効果が認められず、分離装置として使用するには不適のようである。とくに本研究で取り扱う、同一密度で粒

* 九州大学工学部化学機械工学科 (812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 10-1, Hakozaki 6-chome, Higashiku, Fukuoka, 812 Japan

** 大日本インキ化学工業株式会社 堺工場 (592 高石市高砂 1-3)

Sakai Factory, Dainippon Ink & Chemicals, Inc., 3, Takasago 1-chome, Takaishi, 592 Japan

*** Department of Engineering Physics, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, L8S 4M1

*1 粒子表面は EP における集塵板と同じ役割を果たす。通常、流動層は連続式、つまり連続的に粒子の供給、排出がなされる状態で使用される。これは流動層のもつ利点の一つで、常にきれいな粒子を供給することができる。一方、EP では脱塵にハンマリングが必要である。一般に工場廃ガスは高温であり、また適度の水蒸気を含んでるので層粒子の表面抵抗は半絶縁体とみなされる大きさである。したがって高電圧を印加するとかなりの電流が流れる。このとき層内には空間電荷は蓄積されず、また層粒子は実質電荷（正味の電荷）をもたないとされている。廃ガス中のダストは通常プラスかマイナスのいずれかに帯電していて、層中を通過する際に粒子の表面に付着する。

径の異なる 2 成分粒子の分離は起こりにくい。

これらの実用化研究のほかに、EFB の基礎特性、とくに流動化特性に関する研究も Katz ら⁹、Johnson ら¹⁰ Dietz ら¹¹ および著者ら^{9,10} によって平行的に進められている。しかし、いずれの研究も粒子の混合、分離との関連においてなされておらず、系統的研究が待たれてい るところである。

2. 実験

2.1 実験装置および実験条件の概略

実験装置の概略を図 1 に示す。また図 2 に塔の詳細および電極配置を示す。塔はさきに著者らが co-flow 型 EFB の流動化研究に用いたもの⁹と同じで、断面が 3.8 × 3.8 cm 正方、高さ 8 cm のアクリル製のものを用い

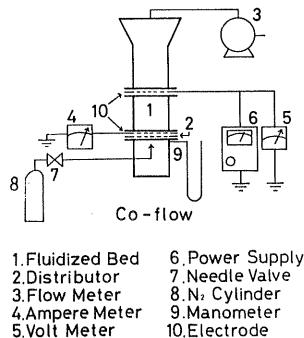


図 1 実験装置の概略
Fig. 1 Outline of experimental apparatus.

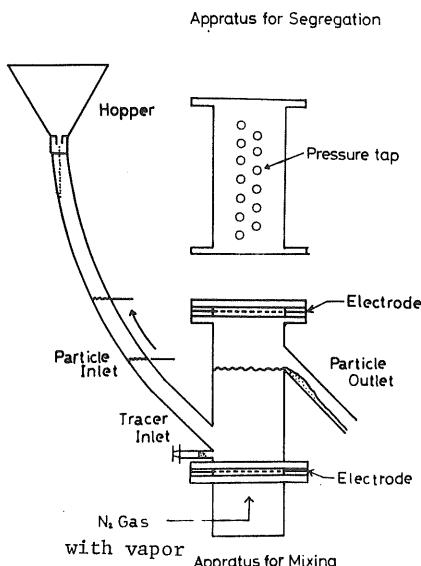


図 2 用いた塔の詳細
Fig. 2 Details of towers used.

た。電極はピッチ 2 mm (9 メッシュ) の銅製金網で、これを塔の上下にゴムパッキンではさんで固定した。ガス分散板としてガラスの焼結板を用いた。使用した粒子はガラスピーブで、密度 2.50 g/cm³、湿度 0 % のときの見掛け電気伝導度 1.1 × 10⁻¹⁰ S/m、粒径の最小および最大はそれぞれ 120 μm および 250 μm にふるい分けられている。流動化ガスとして窒素を用いた。湿度を変化させる場合には塔の入口に洗気瓶を取り付けた。印加電圧は直流で、最高 15 kV を印加した。

2.2 滞留時間分布

滞留時間分布の測定は粒子の混合状態を測る簡便な方法である。実験では図 2 の下図に示す塔を用いた。層にあらかじめ粒子を充填した後に電圧を印加し、ガス流速を所定の大きさまで上昇させて流動化させる。同時に粒子の供給を開始し、層を定常状態に保つ。しかる後に、粒子供給口下部に取り付けられたトレーサ注入器から、ガラスピーブとほぼ密度の等しい粒状ソーダ灰（密度 2.54 g/cm³）を瞬間的（パルス状入力）に注入する。このとき、ソーダ灰の平均粒径はガラスピーブと同じ 250 μm にふるい分けられたものを用いた。粒子排出口から排出される、トレーサを含んだ粒子を平均滞留時間の約 4 倍の長さにわたってサンプリングし、中和滴定によってソーダ灰の濃度を測定した。サンプリング時間内にトレーサの 90% 以上が排出されている場合には、次の計算方法によって平均滞留時間分布 E_θ を計算した。

$$E_\theta = \bar{t} \cdot E(t) \quad (1)$$

ここで

$$E(t) = C / (\sum C \cdot \Delta t) \quad (2)$$

$$\bar{t} = \sum t C / \sum C \quad (3)$$

\bar{t} は平均滞留時間、 $E(t)$ は出口寿命分布値、 C はソーダ灰の濃度、 Δt はサンプリング時間¹¹⁾ である。

2.3 圧力分布

千葉ら¹²⁾の提案した軸方向圧力分布の測定から分離の程度を予測する方法は簡便で、定性的知見を得る方法としては優れている。この方法の原理は固定層と流動層の圧力勾配が異なることを利用している。

Ergan の式を用いると固定層の圧損は次式のように表わされる。

$$\Delta P = 1.49 \times 10^4 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu u_0}{(\phi_s d)^2} \cdot H \quad (4)$$

ここで ε は空隙率、 μ はガスの粘度、 H は層高、 u_0 はガスの見掛け速度、 d は粒径、 ϕ_s は粒子の形状係数である。式(4)から圧損分布 dp/dh を次のように簡単に記述する。

$$dp/dh \propto -d^{-2} \quad (5)$$

すなわち固定層の圧損分布は粒径の 2 乗に逆比例する。

いま密度が等しく、粒径のみが異なる2成分粒子層(粒径をそれぞれ d_1, d_2 とする)を考える。層が2層に完全に分離しているとき、 ΔP を h に対してプロットすると式(4)が示すように、両者の関係は分離面において勾配の異なる連続した二つの直線となる。

一方、流動層の圧損は次式で表わされる。

$$\Delta P = W/A \quad (6)$$

ここで W は粒子のホールドアップ、 A は塔の断面積である。充填容積が同じであれば、圧損分布は粒子密度 ρ に比例するので、次式のように書き直すことができる。

$$dp/dh \propto -\rho \quad (7)$$

いま粒子の密度が等しい2成分系を考えているので、層が流動状態にあるときの ΔP と h の関係は一つの直線で表わされる。

実験では粒径 $120\text{ }\mu\text{m}$ と $250\text{ }\mu\text{m}$ の2成分粒子を混合比 $50:50$ ($X_p=0.5$) および $35:65$ ($X_p=0.65$) に調整し、種々のガス流速について圧損分布を測定した。このとき、あらかじめガス流速を大きくして2成分を完全に混合させておく。所定のガス流速になるまで流速を徐々に減じ、30分間同じ状態に保った後に圧力分布を測定した。実験に用いた塔および圧力取出し口の概略は図2の上図に示される。

3. 実験結果

3.1 混合効果

図3に相対湿度 RH および印加電圧 V を変化させた場合の E_θ と $\theta(t/\bar{t})$ の関係を示す。ここで t はトレーを注入してからの経過時間、 \bar{t} は式(3)で定義される平均滞留時間である。湿度が0%の場合、粒子は摩擦によって帯電し、これが高電圧の印加された上部の金網に付着して流動状態が不正常になる⁹⁾。この傾向は印加電圧が大きいほど著しく、トレーが所定のサンプリング時間内($4\bar{t}$)に排出されなくなる²⁾。ここでの印加可能電圧は最高6kVであった。

四つの曲線を比較すると印加電圧の効果よりも湿度の効果のほうが大きく、湿度の増加によって曲線は完全混合のそれに近づく。一方視察によれば、印加電圧の効果は層を完全混合から、プラグフローのほうに移行させる効果をもつようであるが、図3に示される結果は視察で予測されたほど顕著でない。なお、電界の方向とガスの流れの方向が一致するcross flowの場合には、バイパスを形成しやすい。参考までにcross flowの測定装置の概略と滞留時間分布曲線を図4、5に示した。

*2 層の一部にデッドスペースを形成し、このなかに入ったトレーは長時間滞留する。この量は高電圧において20~30%にも達する。

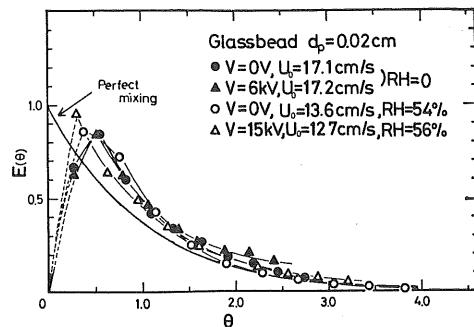


図3 種々の印加電圧と湿度に対する滞留時間分布関数と正規化された時間の関係

Fig. 3 Variations of resident time distribution as a function of normalized time for different applied voltages and humidities.

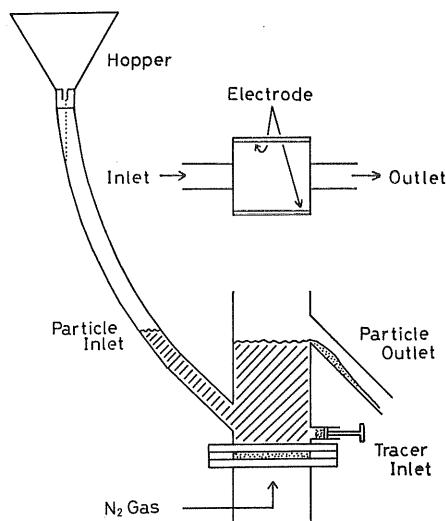


図4 cross-flow型 EFB の塔と電極の概略
Fig. 4 Details of tower and electrodes of cross flow EFB.

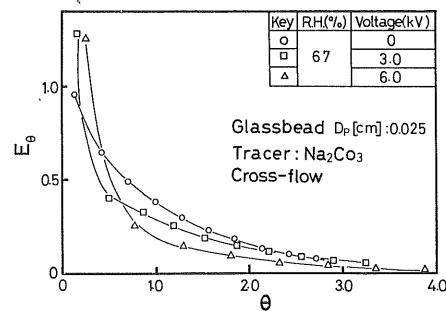


図5 cross-flow型 EFBにおける滞留時間分布関数と正規化された時間との関係

Fig. 5 Relation between resident time distribution function and normalized time for the case of cross flow EFB.

3.2 分離効果

図 6(a)に印加電圧がゼロのときの圧力分布を示す。また印加電圧が 12 kV のときの圧力分布を図 6(b)に示す。いずれも大粒子 (250 μm) と小粒子 (120 μm) の混合比は 50 : 50 ($X_p=0.5$) である。ここで u_p および u_f はそれぞれ大粒子および小粒子の最小流動化速度で、これらは分離実験に先だって実測されている。

一成分系の最小流動化速度 u_{mf} は次式で表わされる^{11,12)}。

$$u_{mf} \propto \{\varepsilon_{mf}/(1-\varepsilon_{mf})^2\} \rho d^2 \quad (8)$$

ここで ε_{mf} は u_{mf} における層の空隙率である。 u_{mf} は d^2 に比例して増加する。厳密には、2 成分系の最小流動化速度は式(8)と若干異なるが、本実験における層の流動状態を推測するには式(8)で十分である。 $u=1.2 u_p$ および $2u_p$ では両成分の粒子はともに流動しているので、圧力分布は式(7)から予測されるように直線的に増加する。一方、 $u=0.8 u_f$ では 2 成分ともに固定層の状態にある。このとき、図 6(b)でみられたように、圧力分布は $h=0.048$ m で折れる二つの直線で表わされる。これは式(5)で予測されたとおりで、大粒子が層の下部 ($h < 0.048$ m) に、小粒子が層の上部 ($h > 0.048$ m) に分離・配置されていることを示している。 $u=1.2 u_f$ では小粒子は流動状態、大粒子は固定状態にあるが、ここでも 2 成分の分離がはっきりと認められる。一方、図 6(a)では $u=0.8 u_f$ および $1.2 u_f$ のいずれにおいても圧力分布は直線的に変化していて、分離が起こっていないことを示している。これら両図より印加電圧の効果がはっきりと認められる。

2 相に分離した層の一例を図 7 に示す。このとき、大粒子は無機性のポスターカラーで着色されている。分離境界面は分散板から高さ 2 cm のところにあるのがはっきりと認められる。またこのときの圧力分布を図 8 に示す。ここでも電圧を印加した場合には $u=0.8 u_f$ で分離を生じている。

4. 電界の効果についての考察

電圧を印加したときに流動層高が増加する、すなわち層膨張の促進が認められている^{6,9)}。このときの粒子および流体の速度の変化を以下に考察する。

Soo¹³⁾ は流動層が定常かつ層流であると仮定し、粒子および流体の運動量収支から次式を導いた。

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu' \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu'_p \frac{\partial v_p}{\partial r} - (\rho + \rho_p) g = 0 \quad (9)$$

$$-\rho_p F(v - v_p) - \frac{\partial P}{\partial z} \left(1 - \frac{\rho_p}{\bar{\rho}_p}\right) - \bar{\rho} g + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu' \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

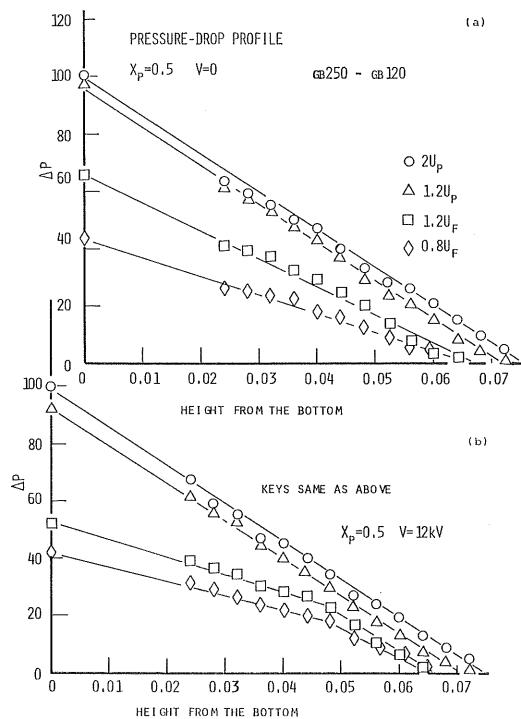
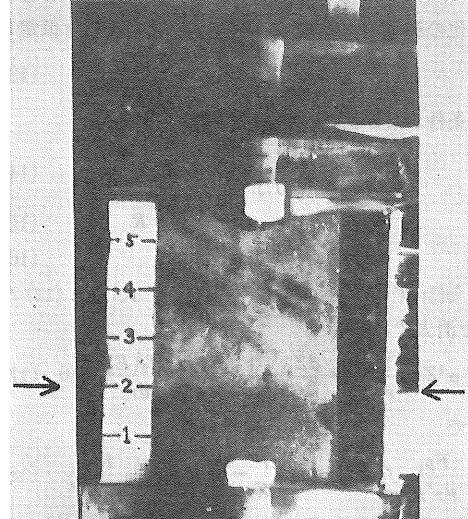


図 6 (a) ゼロ電圧のときの圧損と層高の関係
(b) 12 kV のときの圧損と層高の関係

Fig. 6 (a) Relation between pressure drops and bed height for different gas velocities at zero voltage.
(b) Relation between pressure drops and bed height for different gas velocities at 12 kV of applied voltage.



Segregation of co-flow : $V=12$ kV, $U=8.30$ cm/s

図 7 2 相に分離した層の典型例

Fig. 7 Typical example of bed picture segregated into two phases.

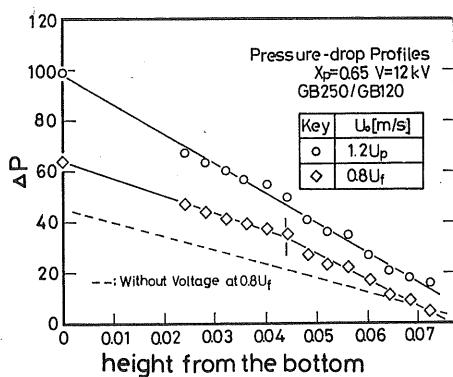


図 8 図5に対応した圧損と層高の関係

Fig. 8 Relation between pressure drops and bed height associated with Fig. 5.

ここで μ' , $\mu_{p'}$ はそれぞれ固気サスペンションの粘度および粒子クラウドの粘度である。式(9), (10)を本実験系に応用するために両式の左辺に、粒子層に作用する電界の力 $f_1(E)$ および流体に作用する力 $f_2(E)$ を加える^{*3}。

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu' \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu_{p'} \frac{\partial v_p}{\partial r} - (\rho + \rho_p) g + f_1(E) = 0 \quad (11)$$

$$-\rho_p F(v - v_p) - \frac{\partial P}{\partial z} \left(1 - \frac{\rho_p}{\bar{\rho}}\right) - \bar{\rho} g + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu' \frac{\partial v}{\partial r} + f_2(E) = 0 \quad (12)$$

v は軸方向の速度成分で、十分に発達した流れを仮定すると $v = v(r)$, $v_p = v_p(r)$ である。また半径方向の速度成分 $u = u_p = 0$, かつ $\rho_p = \rho = \text{const.}$ である。さらに本流動化の範囲内では粒子の輸送は起こらないと仮定して

$$\int_0^R v_p r dr = 0 \quad (13)$$

境界条件および他の付随した条件は

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial v_p}{\partial r} = 0 \end{array} \right\} \quad \text{at } r=0 \quad (14)$$

$$v = 0 \quad \text{at } r=R \quad (15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = dP/dz = \text{const.} \quad (16)$$

さらに $\mu' = \mu_{p'} = \text{const.}$ と仮定し、式(11), (12)から v_p を消去すると

$$\beta + \alpha^2 Z - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{dZ}{dr} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \left(\frac{df_2(E)}{dr} \right) = 0 \quad (17)$$

ここで

$$\beta = \frac{F \rho_p}{\mu_{p'} \mu'} f_1(E) + \left\{ - \frac{dP}{dz} - (\rho + \rho_p) g \right\} \frac{F \rho_p}{\mu_{p'} \mu'} \quad (18)$$

$$\alpha^2 = F \rho_p (\mu' + \mu_{p'}) / \mu_{p'} \mu' \quad (19)$$

$$Z = (1/r) (d/dr) r (dv/dr) \quad (20)$$

*3 実際に用いた塔は三次元流動層であるが、ここでは簡単のために円筒座標を用いている。

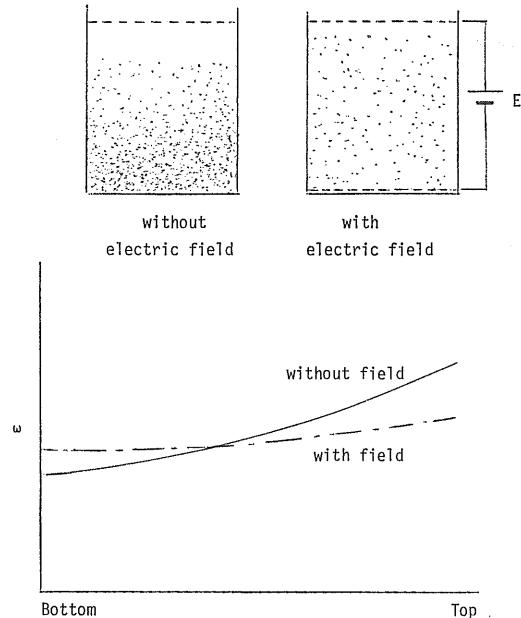


図 9 電界が印加されたときと無印加のときの仮想的空隙率分布

Fig. 9 Supposed void fraction pattern with and without electric fields.

いま均一電界を仮定すると $df_2(E)/dr = 0$, $f_1(E) = \text{const.}$ である。いま層は非常に稀薄な状態にあると仮定すると $\mu = \bar{\rho}$, $\mu_{p'} = 0$ とおくことができる。式(15)および $A = 0$ を利用すれば、 v および v_p は Soo¹³⁾ の得た結果と同じ形に帰着する。

$$v(\beta R^2/4\alpha^2)(1-r^2/R^2) = 2\bar{v}(1-r^2/R^2) \quad (21)$$

$$v_p = v - \frac{g}{F} \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\rho_p}\right) - \frac{1}{\rho_p F} \frac{dP}{dZ} = 2\bar{v} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) - \bar{v} \quad (22)$$

ここで \bar{v} は流体の平均流速で次式のように表わされる。

$$\bar{v} = \beta R^2/8\alpha^2 \quad (23)$$

式(21), (22)は流動層の上部、すなわち稀薄層において適応される。

式(18)に示されるように β は電界の項を含んでいるので、式(21), (22)より、稀薄層における v および v_p はいずれも電界によって促進されることがわかる。このことは稀薄層における空隙率が減少し、層の充填が一様になる傾向を示している。図 9 にこのときの空隙率 ε を模式的に示した。

電界の力は層の充填が均一になるように作用すると同時に、図 3 にみられるように、わずかにながら粒子の混合を妨げる効果を有している。このことは大粒子、あるいは密度の大きい粒子が層の下部に徐々に沈降するのに有利な条件を与える。すなわち分離を起こしやすい。

5. 結 語

静電流動層の研究はまだ端緒についたばかりで、流動の基礎特性に関するものと、静電流動層型集塵装置の開発を目指したものとが散見される程度である。本研究では新たに本装置の混合、分離特性に着目し、実験と理論の両面から解析を試みた。実験からは静電流動層が分離装置として利用される可能性が見いだされた。また理論解析からは、粒子および流体の挙動に関する定性的知見が得られ、電界が分離に有効に作用することが認められた。密度および化学的性質の異なる 2 成分以上の混合物を用いる系統的研究は今後の課題である。

本研究に協力された田川克志氏（現旭化成延岡工場）、山田健二氏（現日石化学横浜工場）に感謝します。また本研究の進行に関して有益なご助言をいただいた篠原久教授（現福岡大学）に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Zahedi and J.R. Melcher : *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **26** (1976) 345
- 2) J.C. Alexander and J.R. Melcher : *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, **16** (1977) 311
- 3) P.B. Zieve, K. Zahedi and J.R. Melcher : *Environ. Sci. Tech.*, **12** (1978) 96
- 4) J.M. Beekmans, I.I. Incullet and G. Dumas : *Powder Tech.*, **24** (1979) 267
- 5) 緒方純俊：静電気学会第2回('80)電気プロセス研究会、大阪 (1980)
- 6) H. Katz and J.T. Sears : *Can. J. Chem. Eng.*, **47** (1969) 50
- 7) T.W. Johnson and J.R. Melcher : *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, **14** (1975) 146
- 8) P.W. Dietz and J.R. Melcher : *ibid.*, **17** (1978) 28
- 9) 緒方純俊、田川克志、藤野光雄、篠原 久：粉体工学研究会誌, **17** (1980) 620
- 10) S. Ogata, T. Ohshio and J.S. Chang : IEEE IAS Annual Meeting, Philadelphia, October (1981)
- 11) T. Kunii and O. Levenspiel : *Fluidization Engineering*, John Wiley & Sons, New York (1969)
- 12) S. Chiba, T. Chiba, A.W. Nienow and H. Kobayashi : *Powder Tech.*, **22** (1979) 255
- 13) S.L. Soo : *Fluid Dynamics of Multiphase Systems*, Blaisdell Publishing Co., Waltham, Massachusetts (1967)