

液固系流動層における液の軸方向混合

荻原 宏二郎・大橋 弘 保*

Axial Mixing of Liquid in Liquid-Solid Fluidized Bed

Kojiro OGIWARA, Hiroyasu OHASHI*

(昭和51年10月31日受理)

1. 緒 言

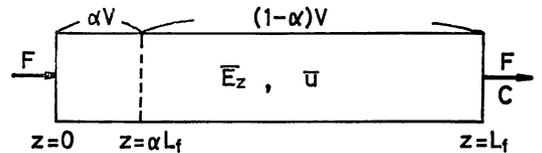
液固系流動層はイオン交換, 吸着, 晶出などの諸操作および液相反応などに広く利用されているが, その設計に際しては物質移動速度, 反応速度などとともに, 粒子および流体の混合状態を知る必要がある。これらのうち, 流体の軸方向混合に関しては気固系流動層の場合, 詳細な研究が数多く報告されているのに対し, 液固系流動層の研究は比較的少なく^{1)~4)}, しかもそれらの結果は実験条件の相違などにより, 研究者によって相当の差異が認められる。

液固系流動層の液の軸方向混合について, 筆者ら⁵⁾は残余濃度の測定結果より, 粒子の終末速度におけるレイノルズ数 (Re_p) がストークス範囲にある場合と, ストークス範囲を大きく超える場合とにわけ, 前者には拡散モデル⁶⁾を適用できるが, 後者には適用できないことを明らかにした。その後, 拡散モデルを適用できない系について精細な観察を行なったところ, 流動層底部の分散板に近いところでは部分的に小さな液体の吹き上げ現象が存在し, そのためこの部分では粒子, 液体の運動が特に激しく完全混合に近い状態とみなすことができる。一方, その上方では粒子の動きが割合小さく, 比較のおだやかな挙動をしており, この部分に対しては拡散モデルを適用できるのではないかと推察される。

そこで, 流動層を完全混合槽と拡散モデルを適用できる層とに別けて, これらを直列に組み合わせたモデルで解析することを試み, 実験結果と比較, 検討した。

2. モデル

流動層底部の分散板の直ぐ上には, 粒子および液体の運動の激しい部分が存在するので, この部分を体積 αV なる1個の完全混合槽と考える。一方, その上部には粒子の分散状態が均一ないわゆる particulate な層であるが, この部分については拡散モデルを適用できるものと



αV : 完全混合槽部分

$(1-\alpha)V$: 拡散モデル適用部分

図1 モデルの概略図

する。図1にモデルの概略図を示す。

拡散モデルを適用できる部分について物質収支をとると基礎式(1)式が得られる。また, 初期および境界条件は(2)~(4)式になる。ここで, (3)式の境界条件は, 拡散モデルを適用できる部分の入口濃度が完全混合槽の濃度に等しいことを表わしている。また, 液固系流動層の場合にはポーデンスライン数 (U) が大きいので(4)式の境界条件を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{E}_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

$$\text{初期条件} \quad t=0 \quad \text{で} \quad C=C_0 \quad (2)$$

$$\text{境界条件} \quad \left\{ \begin{array}{l} z=\alpha L_f \quad \text{で} \quad C=C_0 e^{-Ft/\alpha V} \\ z=\infty \quad \text{で} \quad C=\text{有限} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z=\alpha L_f \quad \text{で} \quad C=C_0 e^{-Ft/\alpha V} \\ z=\infty \quad \text{で} \quad C=\text{有限} \end{array} \right. \quad (4)$$

流動層出口での濃度変化は(5)式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{C}{C_0} = & e^u \left[\frac{e^{-b\theta}}{2} \left\{ e^{-k\sqrt{\left(\frac{U}{1-\alpha}\right)^2 - b}} \operatorname{erfc} \left(\frac{k}{2\sqrt{\theta}} - \sqrt{\left\{ \left(\frac{U}{1-\alpha}\right)^2 - b} \right\} \theta} \right) \right. \right. \\ & + e^{k\sqrt{\left(\frac{U}{1-\alpha}\right)^2 - b}} \operatorname{erfc} \left(\frac{k}{2\sqrt{\theta}} + \sqrt{\left\{ \left(\frac{U}{1-\alpha}\right)^2 - b} \right\} \theta} \right) \left. \right\} \\ & - \frac{1}{2} \left\{ e^{-\frac{kU}{1-\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\frac{k}{2\sqrt{\theta}} - \frac{U\sqrt{\theta}}{1-\alpha} \right) \right. \\ & \left. \left. + e^{\frac{kU}{1-\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\frac{k}{2\sqrt{\theta}} + \frac{U\sqrt{\theta}}{1-\alpha} \right) \right\} \right] + 1 \quad (5) \end{aligned}$$

ここで, $k=1-\alpha$, $b=2U/\alpha(1-\alpha)$, $\theta=\bar{E}_z t/L_f^2 = \phi(1-\alpha)/2U$, $U=(1-\alpha)\bar{u}L_f/2\bar{E}_z$, $\phi=Ft/V$

(5)式の計算結果を図2に示す。本図は α および U をパラメータとして示した残余濃度曲線であるが, いずれの

* 秋田大学鉱山学部燃料化学部教授

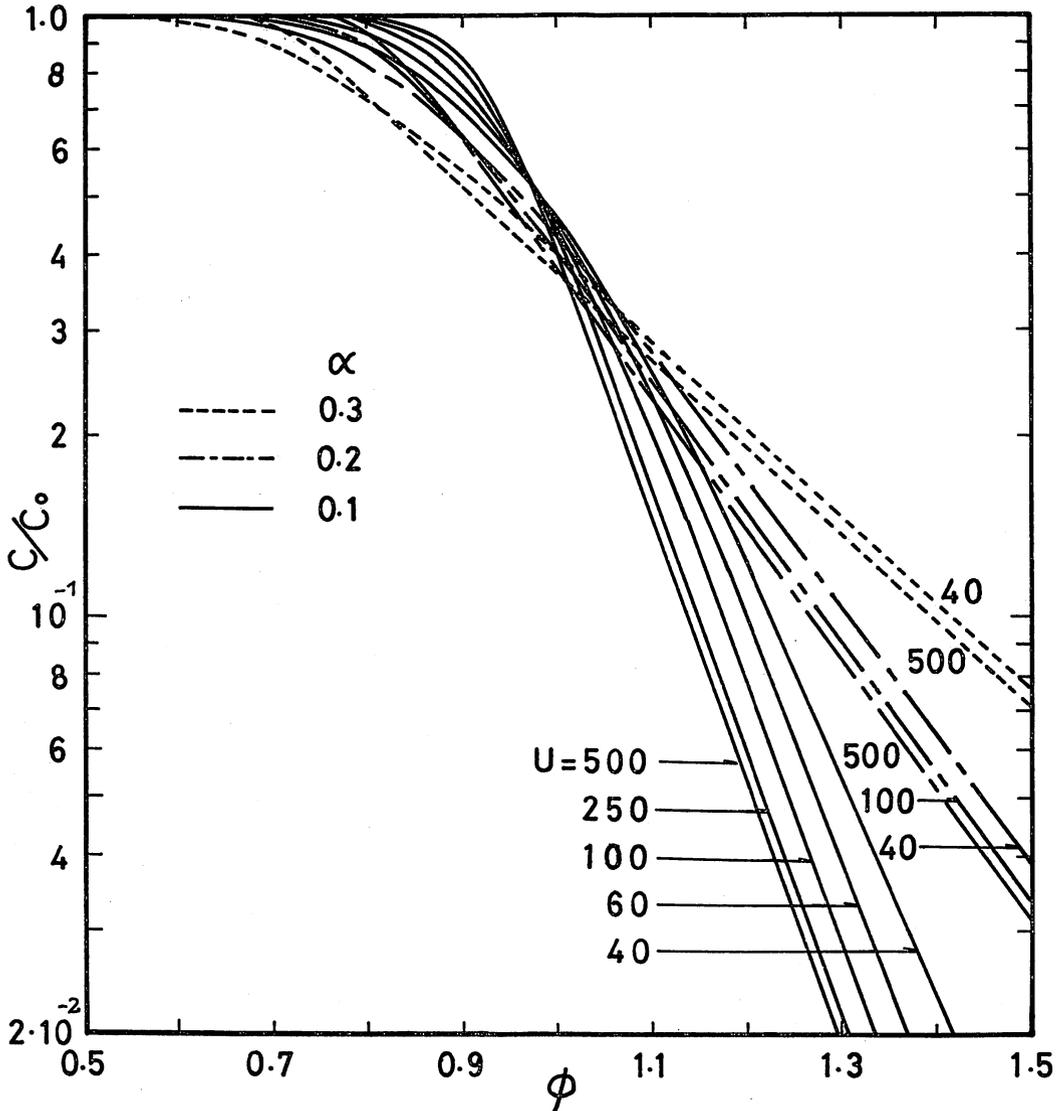


図2 残余濃度曲線(5)式の計算値

曲線も C/C_0 がある値以下では直線になる。そして、 α が大きくなるにつれて直線部分は C/C_0 の大きい値から始まり、かつ直線部分の勾配は小さくなり、また U による影響も小さくなる。

3. 実験装置および方法

使用した装置の概略を図3に示す。使用した塔は内径60mm, 40mmおよび24mmの3種類の透明メタクリル樹脂管で、主流体には水道水、またトレーサには飽和塩化ナトリウム水溶液を用い、いずれも7m上方のヘッドタンクより供給した。分散板より上の部分の長さは内径60mmおよび40mmの塔では1700mm、また内径24mmの塔では1000mmである。トレーサを流動層底部に面源とし

て流入させるため、分散板および主流体をトレーサの混合部について種々検討した。その結果、分散板として、ポリスチレン粒子の場合はナイロン布を、ガラス粒子の場合は多孔板(孔径4mm, 5mmピッチの錯列配列)に上面にサラン網、下面にナイロン布を張ったものを使用した。混合部は主流体とトレーサが完全に混合し、かつこの部分における滞在時間が、流動層内のそれに比して十分短くなるように工夫した。すなわち、ロート状の混合部に多量の水を流して液の滞在時間を短くするとともに、液の乱れによってトレーサをよく混合し、その一部を流動層に供給するようにした。

液の残余濃度は1KHz, 3Vの電圧をかけた白金電極により導電率の時間的変化を測定し、これをペン書きオ

表1 粒子の性質

粒子	d_p [cm]	ρ_p [g/cm ³]	u_t [cm/sec]	u_{mf} [cm/sec]	Re_t [-]
ガラス粒子	0.1578	2.50	26.4	0.803	319
〃	0.0442	〃	2.9	0.120	21.4
ポリスチレン粒子	0.1887	1.05	6.3	0.20	41.5
〃	0.1709	〃	5.2	0.11	34.0

表2 実験条件

	d_p [cm]	W [g]	D_T [cm]	記号
ガラス粒子	0.1578	1500	6.0	▼
〃	0.0442	500	〃	●
〃	〃	1000	〃	■
〃	〃	1500	〃	▲
ポリスチレン粒子	0.1887	300	〃	◇
〃	〃	100	4.0	○
〃	〃	200	〃	□
〃	〃	300	〃	△
〃	0.1709	63.2	2.4	◐
〃	〃	34.8	〃	◑

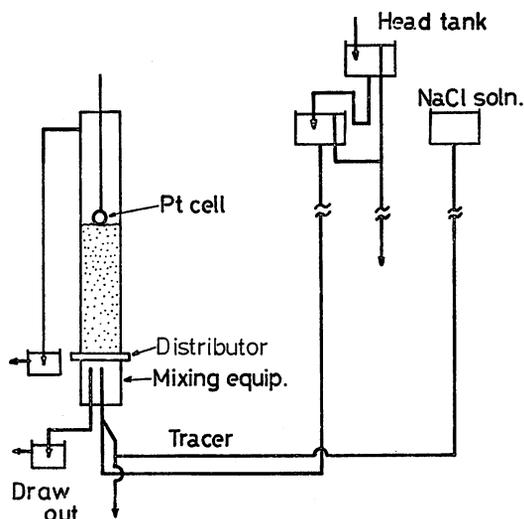


図3 実験装置

ッシログラフに記録させた。なお、白金電極は流動層頂部の数 mm 上方に設置した。

実験に供した粒子のおもな性質を表1に示す。実験温度は5~13°Cで、 Re_t は10°Cにおける値である。粒径測定は顕微鏡によった。表2に実験条件を示す。ここで記号は図6以降の各図について共通である。

4. 実験結果および考察

図4および5は、解析方法の1例としてポリスチレン昭和52年2月

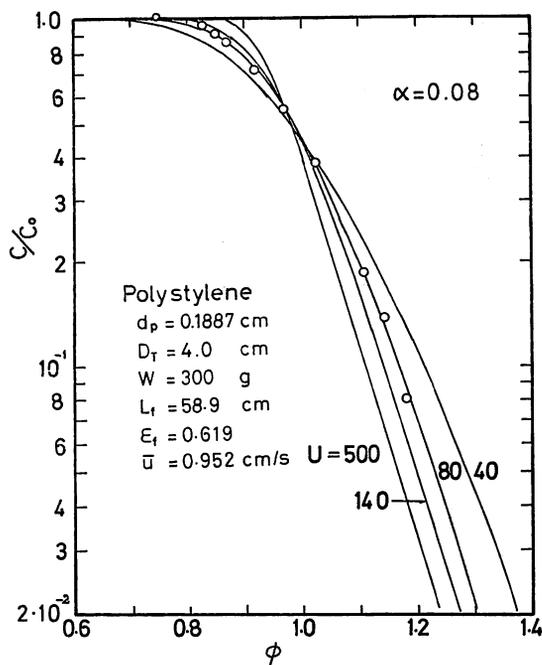


図4 残余濃度の測定値と計算値の比較

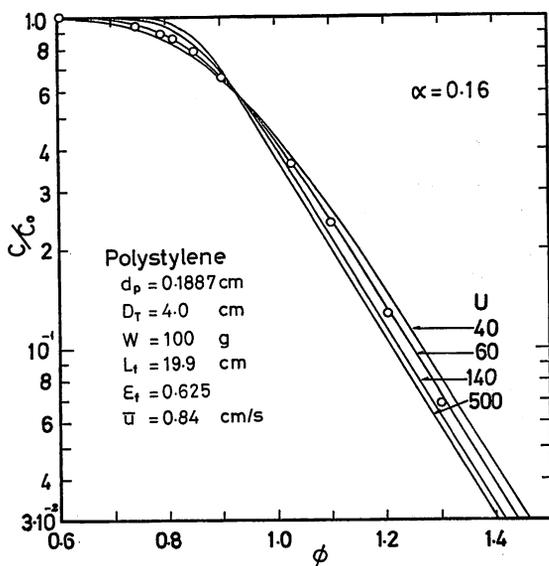


図5 残余濃度の測定値と計算値の比較

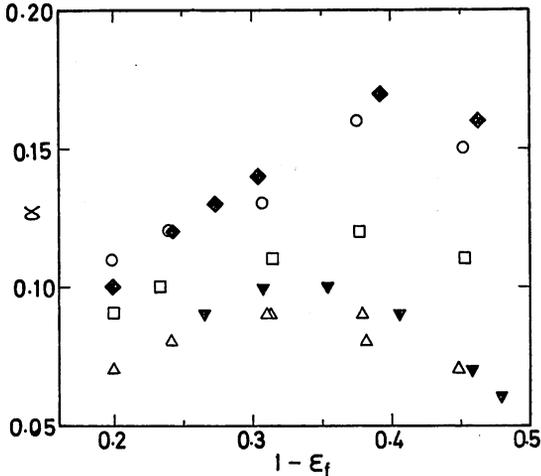


図6 α 対 $1 - \epsilon_f$

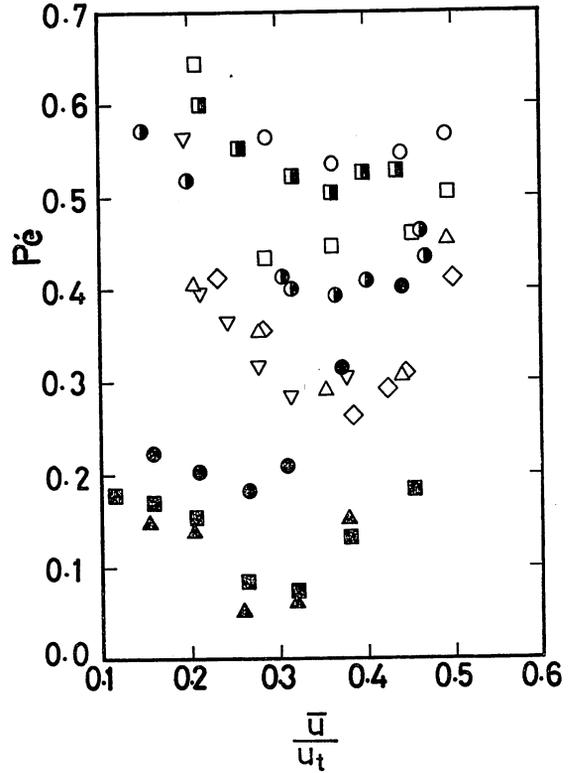


図8 Pe_tilde 対 \bar{u}/u_t

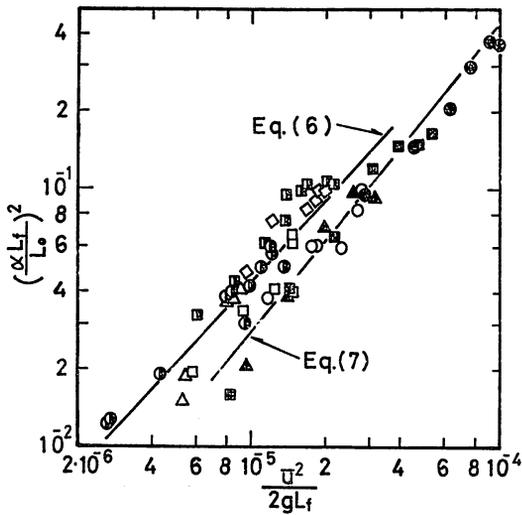


図7 $(\frac{\alpha L_f}{L_0})^2$ 対 $\frac{\bar{u}^2}{2g L_f}$

粒子 ($d_p=0.1887\text{cm}$) を用いた場合における残余濃度の測定値と(5)式による計算値を比較したものである。ここで、実線は(5)式の計算値で、○印は実験値を示す。種々の α および U の値について(5)式を計算し、計算値と実測値を比較して、図4および5に示すように実験値と一致した理論曲線から α および U を求めた。このようにして得られた α の代表的な値を図6に示す。本図によると、 α は塔径、粒子充填量によらず空間率が0.6~0.7の範囲で最大となる。この傾向は他の粒子でも同様である。ポリスチレン粒子およびガラス粒子の α を流動層底部での吹き上げ部分の長さ αL_f の形に書き換え、これを無次元化した $(\alpha L_f/L_0)^2$ とフルード数 ($\bar{u}^2/2g L_f$) との関係で整理すると図7を得る。図よりポリスチレン粒子とガラス粒子の結果は明確に異なるので、そのおのおのについて

最小2乗法により整理し、実験式として(6)および(7)式を得た。

ポリスチレン粒子

$$\left(\frac{\alpha L_f}{L_0}\right)^2 = 8.51 \times 10^3 \left(\frac{\bar{u}^2}{2g L_f}\right)^{1.06} \quad (6)$$

ガラス粒子

$$\left(\frac{\alpha L_f}{L_0}\right)^2 = 5.62 \times 10^4 \left(\frac{\bar{u}^2}{\alpha g L_f}\right)^{1.28} \quad (7)$$

使用した粒子の種類が少ないので粒径、粒子密度等の影響を明らかにすることはできないが、吹き上げ部分の長さ αL_f はフルード数の影響を大きく受けることが判る。

拡散モデルを適用できる部分について求めた U をペクレ数の形に書き換え、 \bar{u}/u_t の関数として整理した結果を図8に示す。本図によると、ガラス粒子およびポリスチレン粒子では、 \bar{u}/u_t の値が0.3~0.4でペクレ数が最小になるが、ペクレ数の値は粒子の種類によって大きな差がみられる。

本実験で得られた U の値は50~250でピストン流れと見なせる範囲にあった。したがって、流体の混合に対しては、流動層底部での吹き上げの影響が大きいと考えられる。

5. 結 言

液固系流動層において、 Re_t がストークス範囲を超える粒子について、完全混合槽と拡散モデルを直列に結合したモデルを提案し、それにより液体の軸方向混合を検討した。実験値と計算値を比較して α および U を求め、 α については、吹き上げ部分の長さをフルード数の関数として整理した。また、 U については Pé の形に書き改め、 \bar{u}/u_t の関数として示した。

以上の結果から、流動層上部での particulate な層では、液体はピストン流れに近いので流動層全体の液体の軸方向混合に対しては、流動層底部に存在する液体の吹き上げの影響が大きいと思われる。

使用記号

C	: 流動層出口での濃度 [mol/l]
C_0	: 初濃度 [mol/l]
D_T	: 流動層塔径 [cm]
d_p	: 粒子直径 [cm]
\bar{E}_z	: 液の平均軸方向混合拡散係数 [cm ² /sec]
F	: 液流量 [cm ³ /sec]
g	: 重力加速度 = 980 [cm/sec ²]
L_f	: 流動層層高 [cm]
L_n	: 固定層層高 [cm]
Pé	: Pécllet 数 (= $d_p \bar{u} / 2 \bar{E}_z$) [-]
Re_p	: 粒径を代表径とする Reynolds 数 [-]

Re_t	: 粒子の終末速度における Re_p [-]
t	: 時間 [sec]
U	: Bodenstein 数 (= $(1-\alpha)\bar{u}L_f/2\bar{E}_z$) [-]
\bar{u}	: 流動層内の液体の線速度 [cm/sec]
u_{mf}	: 流動化開始速度 [cm/sec]
u_t	: 粒子の終末速度 [cm/sec]
V	: 流動層容積 [cm ³]
W	: 粒子充填量 [g]
z	: 軸方向の距離 [cm]
α	: 吹き上げ部分の割合 [-]
ϵ_f	: 流動層空間率 [-]
ρ_p	: 粒子の密度 [g/cm ³]
ϕ	: = Ft/V [-]
θ	: = \bar{E}_z/L_f^2 [-]

参 考 文 献

- 1) Cairns, E.J. and J.M. Prausnitz ; A.I. Ch. E. Journal, 6, 400, 554 (1960).
- 2) 宮内:「流系操作と混合特性」, 日刊工業新聞社, (1960).
- 3) 鞭, 間室, 佐々木: 化学工学, 25, 747 (1961).
- 4) 中西, 千田, 只木, 前田: 化学工学協会第31年会講演要旨集, p.287 (1966).
- 5) 大橋, 斎藤: 化学工学協会東北地方大会講演要旨集, p.25 (1968).
- 6) 矢木, 宮内: 化学工学, 17, 382 (1953).