

呉工業高等専門学校 正 ○大橋 晶良

長岡技術科学大学 正 原田 秀樹

同上 正 桃井 清至

1. はじめに

流動層型反応器の処理性能を評価するには、生物膜内の動力学的現象および粒子流動機構を把握すると共に、反応器内の流体混合特性を定量化する必要があり、これらの現象を考慮して、流動層型反応器の非定常状態でのシステムパフォーマンスを予測するモデルの構築とその検証を既報で報告した¹⁾。本研究は、流動層型反応器の軸方向混合特性におよぼす粒子物理性状(粒径・密度)と空間率の影響を廃水処理に適する実際の充填粒子の物性に近い種々の粒子を用いたトレーサー実験より定量化し、実験的相関式を提示したものである。

2. 実験方法および条件

トレーサー実験は、図-1に示す塔長4m、内径3cmの亚克力製円塔カラムを使用し、インパルス応答法によって行った。トレーサー液は、NaCl溶液(10W/V%)にメタノールを加え、比重を0.998に調整したものを使用し、測定は、流動層高上部に取付た電導度計で応答を求めた。充填粒子は、表-1に示す9種類の粒子を使用した。粒径は、実体顕微鏡写真より調和平均径を以って粒径とし、粒子密度は、ガラス球に対してはピクノメーターで測定し、他の活性炭・クレイボール・バイオパーティクルに対しては粒子沉降試験により間接的に求めた。流速と充填粒子量を種々変化させることにより、流動層高は約170cm～390cmの範囲で行った。水道水は25℃に調整した。

3. 実験結果および考察

トレーサー応答実験結果の一例と分散モデルを適用して軸方向分散係数 D_z を使用して計算した滞留時間分布関数(RTD関数)の比較例を図-2に示す。両曲線は、比較的によく一致していることから、流動層内の流体混合特性を分散モデルで記述できることを示している。そこで、流体混合特性の定量化に当り、次式のTaylorの解析による円管内の軸方向分散係数 D を導入した。

$$D = 10.1 \alpha u_* \quad (1)$$

(1)式の円管の半径 α に、Kozenyの模型による仮想管径の半径を代入し、また摩擦速度 u_* を粒子沉降と粒子表面に働くせん断力の釣り合いから求めると、(1)式は(2)式に変形される。

$$D = 10.1 \left\{ \frac{d_p \cdot \varepsilon}{3(1-\varepsilon)} \right\} u_* = 10.1 \frac{d_p \cdot \varepsilon}{3(1-\varepsilon)} \sqrt{d_p (\rho_p - \rho_f) g / 6 \rho_f} \quad (2)$$

Taylorの解析とKozenyの模型より求めた(2)式の軸方向分散係数 D と実験値 D_z の比較を図-3に示す。固定層と空層付近で、 D_z/D は1に近づく傾向が観察される。空層状態では、流動層内に粒子は存在せずTaylorの解析が適用でき、 D_z/D は当然1に近づくことが予想される。また粒子の動きがない固定層では、実験値 D_z が(2)式分散係数 D に近づくことを示している。しかし、各粒子とも空間率 $\varepsilon=0.65$ 付近で D_z/D が最大値をもつ傾向が見られ、

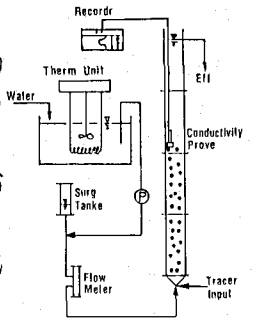


図-1 装置図

表-1 充填粒子の物理性状

充填粒子	$\rho_p (\text{g/cm}^3)$	$d_p (\text{mm})$	Key
ガラス球	2.528	0.902	○
〃	〃	0.596	●
〃	〃	0.389	⊙
〃	〃	0.203	⊖
活性炭	1.316	0.329	△
バイオパーティクル	1.027	0.985	□
〃	1.012	1.487	◇
クレイボール	1.243	1.488	▽
ク	1.274	1.911	▽

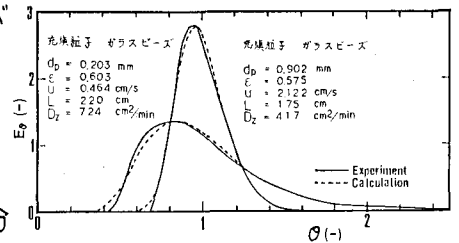
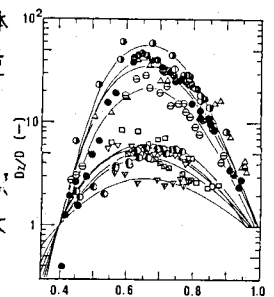
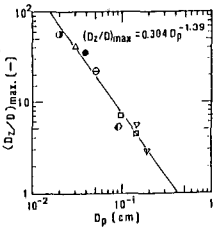


図-2 RTD曲線

図-3 D_z/D と ε の関係

流動化状態の実際の分散現象を(2)式のDでは表現できないことを示している。この D_E とDの偏倚の主な原因として、粒子の挙動が考えられる。空間率 ε の増加と共に粒子の動きが活発になるため、 D_E とDの偏倚の程度は小さくなり、さらに空間率 ε が増加すると粒子は希薄な状態となり、粒子間の距離が増加するのに対して個々の粒子の動きの影響度は減り、 D_E とDの偏倚を減少させるものと思われる。



各粒子について、 $\log(D_E/D)$ と空間率 ε の関係に3次式を仮定し、最小二乗法を行った。ここで、固定層付近での空間率 $\varepsilon=0.4$ と仮定管径 $D_c (=2d_p\varepsilon/3(1-\varepsilon))$ と塔径 D_T が一致す 図-4 $(D_E/D)_{max}$ と d_p の関係
る空間率 $\varepsilon=3D_T/(2d_p+3D_T)$ の時、 $D_E/D=1$ という拘束条件を付加えた。その結果、 D_E/D が最大値 $((D_E/D)_{max})$ となる空間率 ε の平均は0.66であり、標準偏差は0.03であった。図-4に $(D_E/D)_{max}$ と粒径 d_p の関係を示した。両対数係数上において、 $(D_E/D)_{max}$ は粒径 d_p と負の線形関係の傾向が見られ、回帰直線を図中に示した。

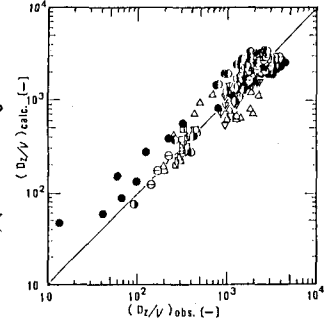


図-5 本実験式と実験値の比較

これより、 D_E とDの偏倚は、 $\log(D_E/D)$ と空間率 ε に3次式を、また両対数係数上で $(D_E/D)_{max}$ と粒径 d_p に負の線形関係という二つの因子で整理することができ、最終的に、流動層型反応器内の流体混合特性を記述するためのパラメーターである軸方向分散係数 D_E の実験的相関式として次式を得た。

$$D_E = D \left\{ 0.304 d_p^{-1.39} \right\} f(\varepsilon) \quad (3)$$

ここで、Dは(2)式、 d_p : (cm)

$$f(\varepsilon) = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon - \varepsilon_2)(\varepsilon - \varepsilon_4)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)(\varepsilon_3 - \varepsilon_4)}$$

$$\varepsilon_1 = 0.4 \quad \varepsilon_3 = 0.66$$

$$\varepsilon_2 = \frac{3D_T}{2d_p + 3D_T}$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\varepsilon_3(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 3\varepsilon_3) - \varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_3}$$

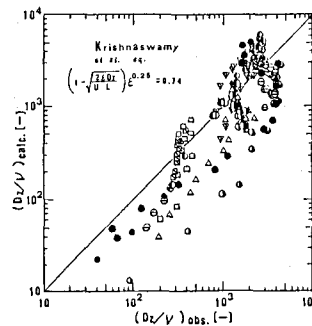


図-6 Krishnaswamy et al. の実験式と本実験値の比較

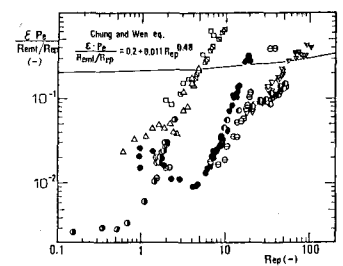


図-7 Chung and Wen の実験式と本実験値の比較

(3)式を用いた計算値と実験値との比較を図-5に示す。実験値は直線上付近に分布しており、(3)式の相関式は良好な予測を与えるものと思われる。図-6に本実験値とKrishnaswamyらの式の比較、図-7にChungらの式の比較を示した。図-6,7ともに、全体的に本実験値の D_E の方が高く、特に粒径の小さな粒子に対しては差が大きいようである。この原因としては、Krishnaswamyらの式、Chungらの式ともに本実験で使った表-1の粒子に比べ大きな粒径粒子を使用して求めた実験式のためと考えられる。このため、(3)式の軸方向分散係数の算出式は、粒径0.2mm~2mm、粒子レイノルズ数 Re_p 0.1~100の範囲では有効であると思われる。

4. おわりに

トレーサー実験より、流動層における軸方向分散係数の値を算出する相関式を得た。相関式はTaylorの解析とKozenyの模型も適用し、粒子の挙動の影響は空間率 ε と粒径 d_p の関数で表示できた。

使用記号 a : 円管の半径、 d_p : 平均粒径、 D_T : 塔径、 D_E : 軸方向分散係数、 L : 流動層高、 Pe : ペクレ数 $(=d_p u/D_E)$ 、 Re_p : 粒子レイノルズ数 $(=d_p u/\nu)$ 、 Re_{mf} : 最小流動化時の Re_p 、 u : 空塔速度、 u_t : 停留速度、 g : 重力加速度、 ρ_p, ρ_f : 粒子、流体密度、 ν : 動粘性係数、 ε : 空間率

参考文献 1) 桃井清至; 土木学会論文報告集, p99 (1983) 2) P.R.Krishnaswamy et al.; Can. J. Chem. Eng. Vol.56, p550 (1978) 3) S.F.Chung et al.; AIChE Journal Vol.14, No.6 p857 (1968)