

II-86 流動床内の混合特性

についての実験的検討

東北工業大学 正 ○今野 弘

東北学院大学 正 石橋良信

東北大学 正 後藤光亀

1. はじめに

流動床は、高い接触面積が得られ、高濃度の生物の保持や閉塞の心配がないなどの長所を持つ。筆者らは、生物処理を主体にした高度処理の実用化にむけて基礎的な検討を加えているが、流動床の混合特性について実験的に検討したので報告する。

2. 流動化

充填層の下部からの上向き流量を増やしていくと、それまで動かなかった層内の粒子が、少し跳躍したり、充填材が躍動する現象が認められる。これが、流動化の始まりで、これ以後は粒子が水中に浮遊する流動床の状態がみられる。図-1は、上向流速（ u ）に対する充填層の損失水頭を、充填材毎（表-2）にまとめたもので、図から流動化開始速度 u_{mf} は、 $\phi 2$ セラミックで、約 0.3 cm/s 、 $\phi 1$ セラミックで 0.09 cm/s 、活性炭で、 0.05 cm/s 、陰イオン交換樹脂で 0.04 cm/s とそれぞれ得られた。流動化は、固定床の損失水頭と流動床の損失水頭が等しい時という条件を考慮すると、その開始速度 u_{mf} は、 $u_{mf} = f(\phi_s^2, \mu^{-1}, \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon), d^2, \rho_s - \rho)$ などとなり、多くの因子がある。粒子の物理量の代表として、粒径 d と密度 ρ_s を選び、それと u_{mf} の関係を調べたのが、図-2である。当然ながら、粒径が大きく、相対密度が大きいほど、 u_{mf} は早くなる。しかし、図-2における勾配は、1より小さく、層流域から逸脱した領域（ $Re_p > 1$ ）での現象を示している。

3. トレーサ実験

実験装置の概要は、図-3に示した。また、実験条件は、表-1にまとめて示した。カラムは、内径 68 mm 、長さ 300 cm の透明塩ビ製で、下端は、円錐形となっていて、充填材は、孔径 5 mm の多孔板とその上の約 20 cm に充填された 1 mm から 10 mm の砂利層（ふるい分け）によって支持されている。充填材としては、多孔質のセラミック（ $\phi 1, 2 \text{ mm}$ ）、球状活性炭（ $\phi 0.5 \text{ mm}$ ）、陰イオン交換樹脂（ $\phi 0.5 \text{ mm}$ ）を用いた。これらの粒径、密度と沈降速度の実測値は、表-2に示した。トレーサとしては KCl を選び、予備実験の結果、 $50,000 \text{ mg/l}$ 、 20 ml を図-3のコック c の点から瞬時に注入した。トレーサ注入後、カラムトップで越流水の電導度を、5秒毎に電導度計により検出した。

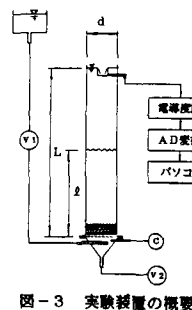


図-3 実験装置の概要

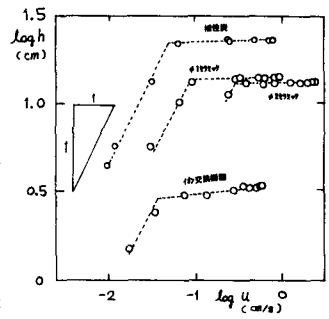


図-1 流動化の開始

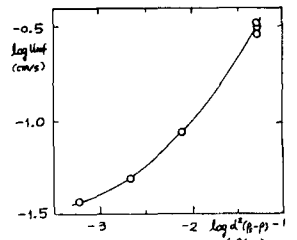


図-2 u_{mf} と $d^2(\rho_s - \rho)^{-1}$ の関係

表-1 実験条件

項目	条件
カラム	内径 $d=68 \text{ mm}$ 高さ $L=300 \text{ cm}$
充填材	多孔質セラミック（ $\phi 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$ ） 活性炭、陰イオン交換樹脂 形状は球状
流動層	高さ $l=94.3 \sim 240.8 \text{ cm}$ 空隙率 $\varepsilon=60 \sim 70.9 \%$ 流速 $u=0.28 \sim 2.27 \text{ cm/s}$
水温	$4.0 \sim 8.3 \text{ }^\circ\text{C}$
トレーサ	KCl 濃度 $50,000 \text{ mg/l}$ 、注入量 20 ml

表-2 充填材の物理的特性

充填材の種類	粒径 (mm)	密度 (g/cm^3)	沈降速度 (cm/s)
多孔質セラミック	2.14(0.21)	2.14	8.28(0.72)
	1.08(0.21)	1.70	4.81(1.00)
球状活性炭	0.55(0.05)	1.70	3.29(0.35)
陰イオン交換樹脂	0.59(0.13)	1.17	1.24(0.41)

注：() 内の数字は、分布の標準偏差値

4. 結果および考察

実験の結果、電導度の値をトレーサの濃度に換算し、出口での濃度を $C(t)$ とするとき 平均滞留時間 $\bar{t}$ 、分散 σ^2 は、

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty t C(t) dt}{\int_0^\infty C(t) dt}, \quad \sigma^2 = \frac{\int_0^\infty (t - \bar{t})^2 C(t) dt}{\int_0^\infty C(t) dt}$$

の式で求められる。

図-4に、比較のため固定床の場合のトレーサ実験の結果を示した。無次元濃度時間曲線は、理想的なピストン流に近く、固定床内の分散は、きわめて小さいということができる。な

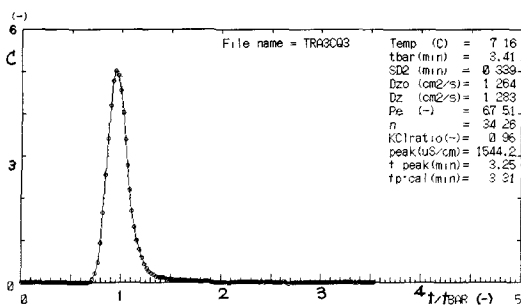


図-4 固定床の場合の濃度時間曲線

お、図中のTBAR、SD2は、それぞれ平均滞留時間、分散の意味で、前述の式で計算した。Dzは、分散係数で、分散モデルの $\sigma^2 = [2Dz/uL - 2(Dz/uL)^2 \cdot \{1 - \exp(-uL/Dz)\}] / \bar{t}^2$ の式を用い、さきに計算した分散値とからDzを計算でき、Peはペクレ数で $Pe = uL/Dz(-)$ で求まる。nは、槽列モデルの槽数で、 $n = \bar{t}^2 / \sigma^2$ で与えられている。

図-5は、各充填材の流動床運転時の無次元濃度時間分布である。固定床の場合と異なることは、無次元濃度のピーク値が、約1であること（固定床;5以上）、無次元滞留時間が、1より小さい（固定床;1）ことなどで、形をみても明かであるが、分散係数約1.3cm²/s、ペクレ数68、槽数34から混合のきわめて少ないピストン流的であると確認できる。これと比較して、各流動床をみると、分散係数が小さく、ペクレ数が大きいのは、線速度の小さいφ1セラミツ、活性炭、陰イオン交換樹脂などは、混合が悪く、φ2セラミツの運転条件は、混合特性から判断すると良好といえることができる。

次に、φ2の多孔質セラミックの場合、線速度を変えて混合特性を比較してみた。図-6にその結果を示した。分散係数は、空隙率によって異なり、40~100cm²/sとなる。しかも、空隙率ε=65%程度のところで最大値を有するようである。また、セラミックに生物が付着してくると、分散係数も大きくなるのがわかる。ペクレ数については、同じく図-7に空隙率との関係で整理した。球形の多孔質セラミックは、空隙率の増加にともなって、Pe数も大きくなることになる。いずれにしても空隙率に対して、Pe数は変化するが、これらの混合特性から判断すると、最適な空隙率は、60~65%程度と考えられる。

5. おわりに

流動床においては、混合特性が処理効率の大切な因子となるので、充填材毎に混合特性を検討した。注入したトレーサが100%流出しなかったり、流動床と空筒の混合系での実験など解析や方法など工夫するべきことも多い。今後検討を重ねていきたい。

なお、本実験に多大のご協力を戴いている仙台市水道局の皆様へ感謝申し上げます。

文献：白井;流動層,科学技術社('77)

土木学会水理公式集('85)

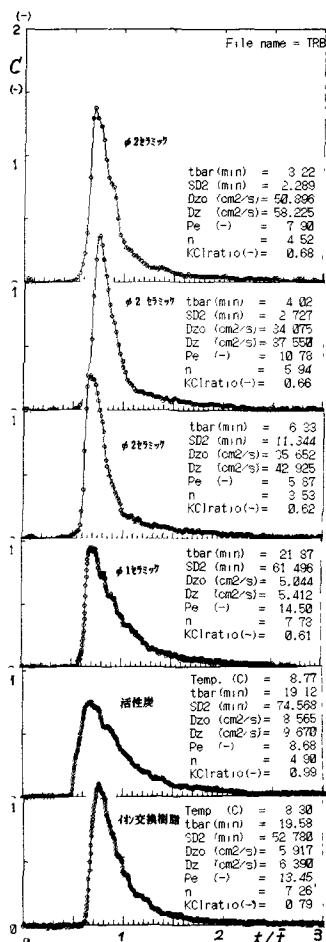


図-5 流動床の場合の濃度時間曲線

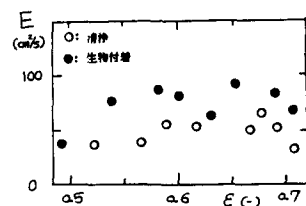


図-6 分散係数と空隙率の関係

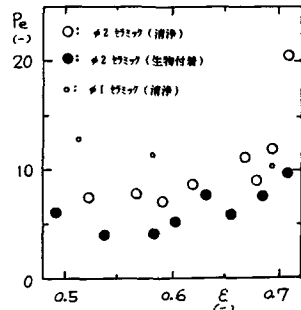


図-7 ペクレ数と空隙率の関係