

東北大学 正 ○ 大垣真一郎
 東京大学 正 松尾 友矩

1. はじめに 活性汚泥などのフロック粒子群の界面沈降の機構を探る目的で、界面沈降速度の温度および濃度依存性を求める実験を行ない、前報等^{1),2)}において、界面沈降速度の温度依存性が初期濃度の影響を受けることを示した。本報告では、剛体球形粒子群に関する Richardson の実験式^{3),4)}を用いて、活性汚泥の低濃度域の界面沈降機構について解析する。

2. Richardson 式への温度依存性の導入

Richardson の実験式は、種々の球形粒子と液体の組合せについて、その界面沈降速度または流動層の上向流速度と空隙率との関係を次元解析の手法によって整理したものである。その基本的な立場は、粘性力の卓越する粒子群と慣性力の卓越する粒子群を両極端に考え、その途中の中間領域に入る粒子群についてはレイノルズ数の指数公式の形に整理するというものである。その結果を次式に示す。

$$\frac{v_{\phi}}{w} = \varepsilon^n = (1-\phi)^n$$

$$\begin{cases} Re < 0.2, & n = 4.65 + 19.5 \frac{d}{D} \\ 0.2 < Re < 1, & n = (4.36 + 126 \frac{d}{D}) Re^{-0.23} \\ 1 < Re < 500, & n = 4.45 \cdot Re^{-0.1} \\ 500 < Re < 7000, & n = 2.39 \end{cases} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 v_{ϕ} は初期体積濃度中の時の界面沈降速度、 w は粒子群を構成している単粒子の自由沈降速度、 ε は空隙率、 n は指数、 Re は単粒子の自由沈降時のレイノルズ数、 d は粒子径、 D は沈降筒の直径である。実験時の水温は 20°C である。

今、後の実験解析に適用する者の領域 ($1 < Re < 500$) について (1) 式を変形し温度依存性を導入する。 $T^{\circ}\text{C}$ (添字 T) の時、

$$\frac{v_{\phi,T}}{w_T} = (1-\phi)^{n_T} \quad \dots\dots (2)$$

が成立するとし、温度によって液側の粘度のみが変化するとすれば、単粒子沈降速度 w は、液側粘

度を μ 、定数 m_0 (Stokes 式に従う時は $m_0 = -1$) として、 $w \propto \mu^{m_0}$ であるから、 20°C の値 (添字 20) を基準として表現すれば、

$$w_T = w_{20} \cdot \left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right)^{m_0} \quad \dots\dots (3)$$

を得る。一方、指数 n_T は、

$$\frac{n_T}{n_{20}} = \frac{(Re_T)^{-0.1}}{(Re_{20})^{-0.1}} = \left(\frac{w_T \cdot d_T \cdot \rho_T / \mu_T}{w_{20} \cdot d_{20} \cdot \rho_{20} / \mu_{20}} \right)^{-0.1}$$

と表わされ、 $d_T = d_{20}$ 、 $\rho_T = \rho_{20}$ とすれば

$$= \left(\frac{w_T}{w_{20}} \cdot \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \right)^{-0.1}$$

(3) 式より

$$= \left(\mu_T / \mu_{20} \right)^{0.1 \cdot (1-m_0)}$$

ゆえに

$$n_T = n_{20} \cdot \left(\mu_T / \mu_{20} \right)^{0.1 \cdot (1-m_0)} \quad \dots\dots (4)$$

となる。結局、 $v_{\phi,T}$ は、(2)、(3)、(4) 式より

$$v_{\phi,T} = w_{20} \cdot \left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right)^{m_0} \cdot (1-\phi)^{n_{20} \cdot \left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right)^{0.1 \cdot (1-m_0)}} \quad \dots\dots (5)$$

となる。ここに、 $n_{20} = 4.45 \cdot (Re_{20})^{-0.1}$ である。

この (5) 式は、濃度項 $(1-\phi)$ の指数部に液側粘度 μ_T が入っていることにより、 $v_{\phi,T}$ が、単粒子沈降速度の温度依存性 ($w \propto \mu^{m_0}$) には従わず、初期濃度によってその温度依存性を変えることを示している。

3. AS 樹脂粒子群による (5) 式の実験的確認

(5) 式の確認を平均粒径 314μ 、比重 1.071 、平均単粒子沈降速度 $w_{20} = 0.414 \text{ cm/sec}$ 、 $Re_{20} = 1.30$ 、 $m_0 = -0.737$ の AS 樹脂粒子群に就いて行なった。沈降筒は内径 7.7 cm 、長さ 120 cm のものを用いた。濃度 ϕ は実測値を用いて計算したが、最終沈降体積率 T_f との関係は、 $\phi = 0.624 \cdot T_f$ であった。

計算値と実測値は、 $T_f = 0.43 \sim 0.80$ 、 $T = 9.5 \sim 40^{\circ}\text{C}$ のデータに就いて、図-1 のように良い一致を示した。

見掛け上の温度依存性を、 $v_{\phi} \propto \mu^m$ という液側粘度の指数部 m で表現し、その初期濃度 (右表現) による変化を求めると図-2 のようになる。初期濃度が大きくなると従い、 m の絶対値は大きくなる。

4. 活性汚泥に関する実験結果

スキムミルクで育てた活性汚泥の界面沈降速度(上記沈降筒を使用)の実験結果($V_f = 0.1 \sim 0.5$, $T = 5 \sim 40^\circ\text{C}$)を V_f と m の関係についてプロットしたものが図-3である。 $V_f > 0.25$ においては、高濃度のため汚泥フロック間で骨組み構造の形成が生じ、界面沈降とは異なる構造になっているものである。低濃度域 $V_f < 0.25$ (約 T.S. $< 5000 \text{ mg/l}$) では右上りの傾向となり、AS樹脂粒子群と同様の結果を示している。

活性汚泥においては、界面沈降中、フロックが離合集散を繰り返すので粒子群を構成する代表単粒子というものを定義しえない。実験的に得られるデータは粒子群としての挙動に関するもの、即ち界面沈降についてのデータだけである。(5)式を運用するに当たっても諸係数は界面沈降のデータから推定しなければならぬ。(5)式の係数の内、 m_0 については、図-3において $V_f \rightarrow 0$ に外挿した値を用い、 $m_0 = -0.75$ とする。これは見掛け上の単粒子沈降速度の粘度依存性が -0.75 乗であることを意味するから、一般に得られている球形粒子の場合を想定すると単粒子沈降に関するレイノルズ数は約 $1 \sim 2$ となる。そこで、 $Re \approx 1$ と仮定すれば $m_0 = 4.45$ となる。体積濃度 ϕ は、最終沈降体積率(20時間500ml シリンダー沈降) $V_{f,20}$ の定数倍 $\phi = a \cdot V_f$ として表わされると思えば、 20°C の界面沈降データ ($V_{f,20}$ および V_f を実測) より、次式

$$V_{f,20} = w_{20} \cdot (1 - a \cdot V_f)^{4.45} \quad \dots\dots (6)$$

を用いて、 20°C における見掛け上の単粒子沈降速度 w_{20} および a を決定することが出来る。このようにして(5)式より活性汚泥に関して次式を得た。

$$V_{f,T} = 0.278 \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_{20}}\right)^{-0.75} \cdot (1 - 141 \cdot V_f)^{4.45} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{20}}\right)^{0.75} \quad \dots\dots (7)$$

単位: cm/sec

この(7)式で計算した見掛け上の温度依存関係 $V_{f,T} \sim \mu^m$ の指数 m を V_f に対して示したものが図-3中の実線である。

(7)式のような形式が実験結果の変化をよく表現することがわかる。参考データとして、硫酸バンドとアルギン酸によって凝集させたカオリンフロックに関する実験結果および計算値を図-4に示しておく。

5. 考察 界面沈降速度の温度依存性が初期濃度によって変化すること、その変化の程度はRichardson式の形式によって表現できること、および、その領域は $Re > 1$ に相当することが明らかとなった。活性汚泥の界面沈降においては、慣性力も考慮に入れた機構を考える必要があり、特に温度依存性において明らかである。

参考文献: 1) 大垣・松尾, 第28回年次講演会 II-19, 1973.
2) 大垣・松尾, 第10回衛生工学討論会, 1974, 3) Richardson, Trans. Instn. Chem. Engrs., 32, 1954.
4) Richardson, ibid., 39, 1961., 5) 大垣・松尾, 土木学会論文報告集, 2103, 1973.

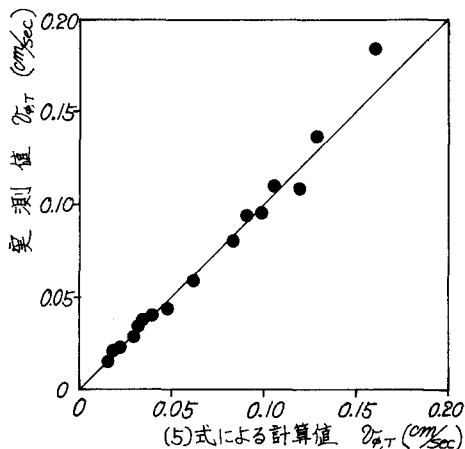


図-1. AS樹脂粒子群の界面沈降速度

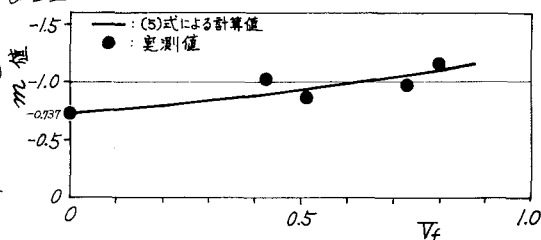


図-2. AS樹脂粒子群の m 値の変化

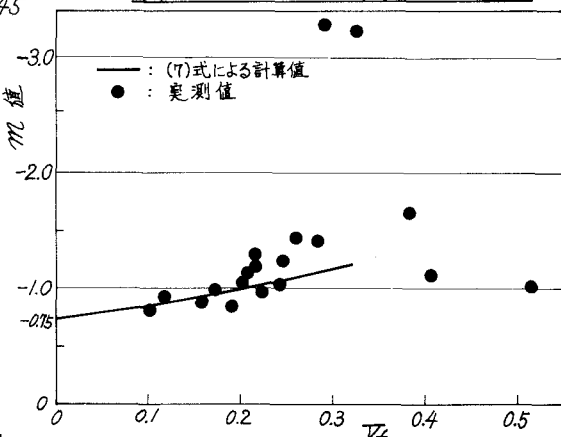


図-3. 活性汚泥の m 値の変化

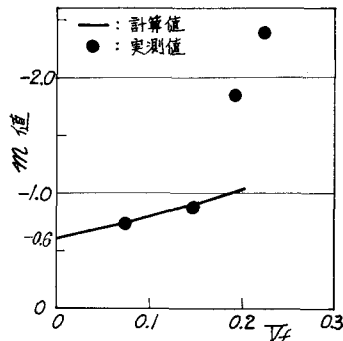


図-4. カオリンフロックの m 値の変化