

京都大学 正 松本 忠生

中村 秀一(現 大成建設)

正 住友 恒

I. はじめに これまでに、ろ過における濁質の捕獲を、ろ過初期と濁質が抑留されつつある場合とについて、実験的に検討を行なった。^(1,2) そのなかで、ろ材周辺の流れが濁質粒子のろ材への衝突効率に与える効果が大きいことを指摘し、また、濁質抑留による効率の変化は、形状変化した単一ろ材に対する衝突効率では表わすことができず、付着率と周辺ろ材の影響を考慮する必要があることを述べた。これらの点をさらに検討するべく、まず第一段階として、複数ろ材モデルによる衝突効率の計算を行ない、若干の考察を行なったので、その結果について報告する。

II. 複数円筒ろ材モデルによる衝突効率の計算

(1) ろ材間隙流れの数値計算³⁾ ろ層を図-1に示すような円筒列でモデル化し、この二次元流れ場のうち、突線⁴⁾で囲んだ正方形部分について渦度方程式を解き、空隙内各点での流速を求めた。

<基礎式> 空隙内平均流速 U 、流入入口幅の $1/2$ ($=h$)を用いて無次元化すると、

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\psi = - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

ここに、 ψ : 渦度、 $Re = U_0 h / \nu$ (ν : 動粘性係数)

<差分法> (1)式左辺は風上差分法で、(1)式右辺と(2)式は中央差分法で差分化するものとし、図-2のNEP, NWP, SWP, SEP各点での値は、まわりの4つの格子点の値の平均をとるとする。任意の点Pにおいて

(1), (2)式は、結果として(3), (4)式となる。ただし格子間隔 $\Delta x = \Delta y = \delta$ とす。

$$\psi_p = (A_N \psi_N + A_S \psi_S + A_W \psi_W + A_E \psi_E) / \Sigma A \quad (3)$$

$$A_N = \frac{1}{8} \{ (\psi_{NE} + \psi_E - \psi_{NW} - \psi_W) + (\psi_{NE} + \psi_E - \psi_{NW} - \psi_W) \} + \frac{1}{Re}$$

$$A_S = \frac{1}{8} \{ (\psi_{SW} + \psi_W - \psi_{SE} - \psi_E) + (\psi_{SW} + \psi_W - \psi_{SE} - \psi_E) \} + \frac{1}{Re}$$

$$A_W = \frac{1}{8} \{ (\psi_{NE} + \psi_N - \psi_{SW} - \psi_S) + (\psi_{NE} + \psi_N - \psi_{SW} - \psi_S) \} + \frac{1}{Re}$$

$$A_E = \frac{1}{8} \{ (\psi_{SE} + \psi_S - \psi_{NE} - \psi_N) + (\psi_{SE} + \psi_S - \psi_{NE} - \psi_N) \} + \frac{1}{Re}$$

$$\Sigma A = A_N + A_S + A_W + A_E$$

$$\psi_p = \frac{1}{4} (\psi_N + \psi_S + \psi_W + \psi_E + \delta^2 \psi_p) \quad (4)$$

<境界条件> 流入入口 無次元速度分布を(5)式で与えた。これより ψ , ψ は(6), (7)式で与えられる。

$$V = \frac{3}{2} (1 - y^2) \quad (-1 \leq y \leq 1) \quad (5) \quad \psi = \frac{3}{2} y - \frac{1}{2} y^3 + 1 \quad (6) \quad \psi = -3y \quad (7)$$

壁面 ψ は(6)式より図-2に示したようになる。また ψ は、隣接する内部の点の値から、(8)式により計算した。

$$\psi_B = -\frac{\psi_I}{2} - \frac{3(\psi_I - \psi_B)}{\delta^2} \quad (ここに、添字 Bは壁面と、Iは内部点を示す)$$

計算は反復法により、緩和係数は0.8~0.95とした。また収束条件は、すべての格子点について相対誤差 $\leq 10^{-3}$ とした。

(2) 衝突効率の計算 (1)で得た流速を用いて粒子の運動を追跡し、粒子がろ材に衝突する最も外側の軌道

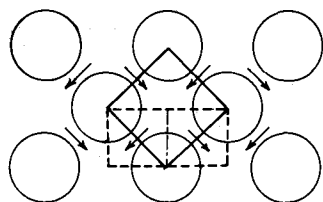


図-1 ろ層モデルと計算領域

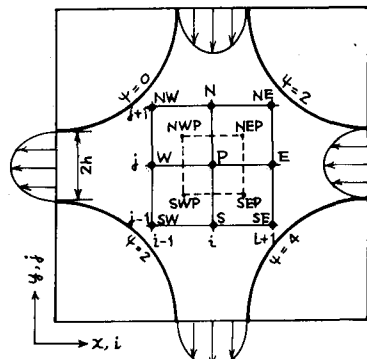


図-2 格子分割

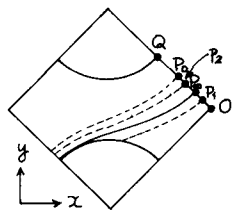


図-3 ろ材に衝突粒子の最外軌道の求め方

を求め、衝突効率は流入流量に対する上記軌道内側流量の比として求めた。
計算は、図-1の破線で示した部分で行ない、下半円で示したろ材に対する衝突効率を求めた。衝突の機構として粒子の重力沈降と Interception のみを考え、定常を仮定すると、粒子運動方程式は (9), (10) 式となる。

$$u_p = \frac{dx_p}{dt} = - \frac{(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18\mu} \frac{g}{\sqrt{2}} + u \quad (9), \quad v_p = \frac{dy_p}{dt} = - \frac{(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18\mu} \frac{g}{\sqrt{2}} + v \quad (10)$$

ここに、 u, v : x, y 方向速度, ρ : 密度, d : 粒子径, μ : 媒質粘性係数

g : 重力加速度, また、添字 p は粒子を表わす

上式から、時刻 t に $P_t(x_p, y_p)$ に在る粒子が Δt 後に $P_{t+\Delta t}(x_p + \Delta x_p, y_p + \Delta y_p)$ へ移動するとして粒子を追跡したが、精度を高めるべく、 Δt は十分小さくした。また実際の計算では、移動距離は格子間隔 δ で相対化した。

粒子がろ材に衝突する最外軌道は、図-3 に示す任意点 P_0 より始め、順次 $P_1 \rightarrow P_2 \dots$ というように探索した。収束点 P_m を始点とする軌道が求める軌道となる。

III. 計算結果と考察

図-4 は、ろ材径 917μ で、密度 1.92 のシリカゲル粒子を濁質とした場合について衝突効率を計算し、空隙内流速に対してプロットした例である。図中破線は、Interception のみによる効率を表わしている。各濁質粒径のいずれについても、流速の増大とともに卓越機構が重力沈降から Interception へ移行するが、濁質粒径が小さい程、低流速で移行が始まることばかり、これは筆者らの実験結果とよく一致している。また、図-5 は大久保⁴⁾がろ材を単一円筒でモデル化して計算した結果であるが、図-4 と比較すると、かなり傾向が異なる。これは両図から明らかな、Interception による衝突効率の差が原因である。実際のろ層では間隙流が周辺ろ材の影響を受け、このため Interception の効果が大きく、また、低流速時にもほとんど低下しないと推測されるが、複数ろ材モデルによる

と、この点が正しく評価されるのではないかと考えられる。ろ過の進行に伴い、抑留濁質はろ材形状あるいは空隙形状、従ってろ材周辺流況とも変化させる。そこで、観察から得た代表的な抑留状態を設定したうえで、抑留量を空隙変化量として効率の変化を計算した。結果を図-6 に、また同一条件の実験値を図-7 に示した。両図によると、図-7 で衝突効率の一時増大の見られる $d_p = 5\mu$ の場合には、計算結果でも効率の顕著な増大がみられ、一時増大のない 30μ については計算値もあり増大しないこと、 5μ の濁質の場合に、実験値、計算値とも空隙内流速(初期) 0.6 cm/s の方が、衝突効率の増大が著しいこと

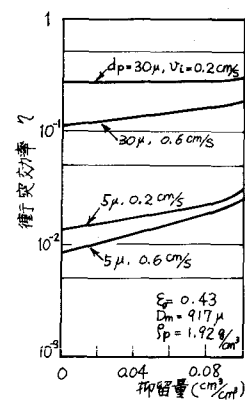


図-6 抑留による衝突効率の変化(計算結果)

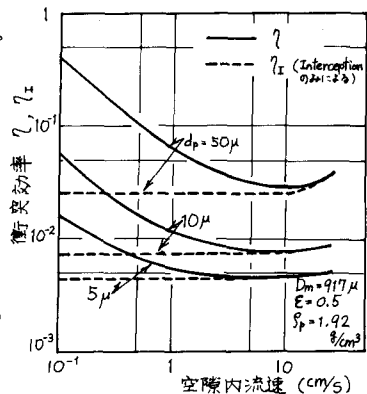


図-4 衝突効率計算結果(複数ろ材モデル)

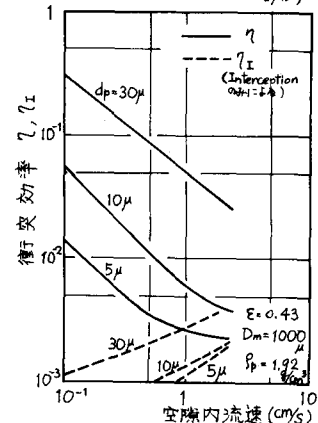


図-5 単一円筒モデルによる計算結果

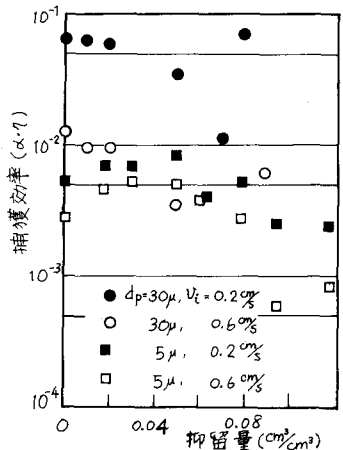


図-7 抑留による捕獲効率の変化(実験値)
($E=0.43, D_m=917\mu, \rho_p=1.92\text{ g/cm}^3$)
[注] Δ : 付着率

がわかり、両者に良い対応が認められた。ろ過継続中の衝突効率は、空隙内流速増大による効率減少効果と、上記のような増大効果の相対関係によって変化しているものと考えられるが、濁質が除去(捕獲)される効率を明確にするには、付着過程の検討が不可欠であり、今後の課題である。なお、数値計算に際しては、京都大学大型計算機センターの計算機システムを利用した。

(参考文献) 1) 松本、三松、須藤: 第36回年講(昭56), 2) 中村、

大久保、松本: 第37回年講(昭57), 3) 宇仁蒼: 京都大学卒業論文(昭57), 4) 大久保: 京都大学修士論文(昭57)