水平管内旋回流中の粒子挙動に対する粒径の影響

電力中央研究所　正会員　佐 藤 隆 宏　　電力中央研究所　坂 口 勇

1. はじめに

発電所冷却水路系にはムラサキイガイなどの付着生物が付着し, 取水量減少などの原因になる. 付着生物を防除する方法のひとつとして固形物擦過法[1]がある. これは, スポンジボールなどの固形物を旋回させながら水路内を通過させ, 配管への接触擦過により付着直後の幼体を除去して付着生物の成長を防ぐ方法であり, 模擬海水配管を用いた基礎実験において付着数が約 1/10 になることが確認されている[1]. 本研究では, 効率的な固形物擦過法の開発に資するため, 旋回流中の粒子挙動の数値モデルを開発し, 実験結果との比較を行う. さらに, 粒子挙動に対する粒径の影響を調べる.

2. 旋回流中の粒子挙動の数値モデル

粒径 d, 密度 ρ_s の単一球粒子の並進運動に対する方程式は式 (1) で与えられる.

$$\begin{aligned}\rho_s V\ \frac{d^2\boldsymbol{x_s}}{dt^2} &= C_D\frac{\rho_f}{2}A\left|\boldsymbol{u_r}\right|\boldsymbol{u_r} + C_{LR}\frac{\rho_f}{2}A\left|\boldsymbol{u_r}\right|\frac{\boldsymbol{u_r}\times\boldsymbol{\omega_r}}{\left|\boldsymbol{\omega_r}\right|} + \rho_f V\frac{D\boldsymbol{u_f}}{Dt} \\ &\quad + C_m\rho_f V\left(\frac{D\boldsymbol{u_f}}{Dt}-\frac{d\boldsymbol{u_s}}{dt}\right) + \frac{3}{2}d^2\rho_f\sqrt{\pi\nu}\int_0^t\frac{d\boldsymbol{u_r}/d\tau}{\sqrt{t-\tau}}d\tau + \left(\rho_s-\rho_f\right)V\boldsymbol{g_G}\end{aligned} \tag{1}$$

ここに, $\boldsymbol{x_s}$:粒子の位置ベクトル, $\boldsymbol{u_s}$:粒子の速度ベクトル, $\boldsymbol{u_f}$:流体の速度ベクトル, $\boldsymbol{u_r}$=$\boldsymbol{u_f}$-$\boldsymbol{u_s}$, $\boldsymbol{\omega_s}$:粒子の角速度ベクトル, $\boldsymbol{\omega_f}$:流体の渦度ベクトル (= $1/2(\triangledown\times\boldsymbol{u_f})$), $\boldsymbol{\omega_r}$=$\boldsymbol{\omega_s}$-$\boldsymbol{\omega_f}$, $\boldsymbol{g_G}$:重力加速度ベクトル, A:粒子の投影面積, V:粒子の体積, ρ_f:流体の密度, ν:動粘性係数, C_m:付加質量係数 (=0.5) である. なお, 抵抗係数 C_D は経験式[2], 揚力係数 C_{LR} は Matsumoto and Saito[3] の式を用いる.

回転運動に対する方程式は式 (2) で与えられる.

$$I\ \frac{d\boldsymbol{\omega_s}}{dt} = -C_{tr}\frac{\rho_f}{2}\left(\frac{d}{2}\right)^5\left|\boldsymbol{\omega_r}\right|\boldsymbol{\omega_r} \tag{2}$$

ここに,I:慣性モーメント (= $\rho_s\pi d^5/60$) である. なお, 係数 C_{tr} は Dennis ら[4] の式を用いる.

粒子と管壁面の衝突に関しては, 粒子を剛体球と仮定し, 二体衝突の衝撃方程式[5]を用いて衝突後の速度および角速度を導く. なお, 粒子と管壁面の反発係数 e と動摩擦係数 μ_f はそれぞれ 0.875, 0.40 とし, 衝突時の法線方向単位ベクトル $\boldsymbol{n}$ を乱数を用いて最大 $\pm1°$ の範囲で変化させる不規則反発モデル[6]を用いる.

流れ場に関しては, 旋回流の乱れ強度と粒子の沈降速度を比較した結果 (図-1), 粒子密度 ρ_s が軽い場合に乱れ強度と沈降速度が同程度であり, 流れの乱れが粒子挙動に影響する可能性があることが分かった[5]. そこで本研究では, 流速変動を考慮して解析を行う. 以下に流速変動の解析法を述べる.

流速変動 $u'_i(i=r,\theta,z)$ が 1 次マルコフ過程に従うと仮定すると, 時刻 $t+\Delta t$ における流速変動成分は次式で与えられる.

$$u'_i\left(t+\Delta t\right) = \rho_L\left(\Delta t\right)u'_i\left(t\right) + e_i\left(t+\Delta t\right) \qquad \rho_L\left(\Delta t\right) = exp\left(-\Delta t/T_L\right) \tag{3}$$

ここに,$\rho_L(\Delta t)$:Lagrange 的自己相関係数, T_L:Lagrange 的積分時間スケールである. また,$e_i(t)$ はランダム成分であり, 正規分布に従うと仮定すると次式で与えられる. なお, ランダム成分 e_i は空間的に無相関とみなす.

$$P\left(e_i\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{e_i}}exp\left(-\frac{e_i^2}{2\sigma_{e_i}^2}\right) \qquad \sigma_{e_i} = \sigma_i\sqrt{1-\left\{\rho_{L\ i}\left(\Delta t\right)\right\}^2} \qquad \sigma_i = \sqrt{\bar{u_i'^2}} \tag{4}$$

以上より, 時刻 $t+\Delta t$ の流速変動 u'_i は, 式 (4) に従って発生されられたランダム成分 e_i, ならびに前時刻 t の流速変動 u'_i から式 (3) を用いて導かれ, 流れ場である流速分布 $u_f(r,\theta,z)$ に反映される.

計算は, 乱数を用いて発生させた流速変動 u'_i と旋回流平均速度 U_i の径方向分布から時々刻々の流速 $u_f(r,\theta,z)$ を導き, 粒子の運動方程式 (1), (2) を Runge-Kutta 法を用いて解析し,3 次元場の粒子挙動を求める.

キーワード：固液二相流, 旋回流, 数値モデル, 流速変動, 付着生物, 固形物擦過法
連絡先：千葉県我孫子市我孫子 1646, Tel：0471-82-1181, Fax：0471-84-7142

3. 実験結果と解析結果の比較

数値モデルの検証を行うため, 管内径 D100mm, 長さ L19.5m の固液二相旋回流実験装置を用いて, 実験を行った. 計測は, 軸方向変化を調べるため,z/D=15,55(z; 旋回流発生装置からの距離) の 2 箇所において, 流速分布に関しては LDV にて, 粒子の三次元挙動に関しては画像処理にて行った. 詳細は既報 [5] を参考にされたい.

実験と解析の比較は, 2 分割弁型旋回流発生装置で弁角度 ϕ=60°, 断面平均軸速度 U_m=1.00m/s を対象に行った. この実験条件で得られた旋回流の周方向平均速度 U_θ と軸方向平均速度 U_z の径方向分布を図-2 に示す. ここに, 点線および破線は計算で用いた旋回流流速分布モデルであり, U_θ に関しては Rankin-Vortex Model を,U_z に関しては実験式 [5] を用いた. また, 流速変動の RMS$\sqrt{\overline{u_i'^2}}$ に関しては, 図-1 に示す乱れ強度 u'_θ,u'_z の径方向分布の近似値を与え, Lagrange 的積分時間スケール T_L は直線流の一般的な値を参考に 0.100 秒とした.

旋回流中の粒子挙動に対する粒径 d の影響を調べるため, 密度 ρ_s=1.15×10^{3}kg/m^3 の等しい 3 種類の粒子 [粒径 d=3.2,6.4,12.8mm] を用いた. これらの粒子数密度分布 $P(r,\theta)$ の実験結果と解析結果を図-3 に示す. ここに, 粒子数密度 $P(r,\theta)$ は, 全計測時間中に対象領域 (r,θ) を通過した粒子数 $n(r,\theta)$ と全粒子数 N から定義され, 対象領域を通過する粒子数が多いほど粒子数密度は大きい. また, 解析結果の実線は粒子の軌跡である.

実験結果によれば, 旋回強度 S が強い z/D=15 では粒径 d に依らず管壁付近を全体にわたり旋回する. しかし, 旋回強度が弱い z/D=55 では, 粒径が大きいほど旋回半径が小さく, 中心付近を旋回する. また, 解析結果は,d=12.8mm では実験よりも若干中心付近を通過するが, 粒子挙動に対する粒径の影響を再現している.

4. おわりに

本研究では, 流速変動を考慮した旋回流中の粒子挙動に関する数値モデルを開発した. そして, 実験結果と数値モデルによる解析結果はほぼ一致することが分かった. さらに, 旋回流中の粒子挙動に対する粒径の影響を調べ, 旋回強さが弱い場合には粒径が大きいほど旋回半径が小さく, 管中心付近を通過することを明らかにした.

参考文献： 1) 坂口ら, 電中研研究報告,U89031,1989, 2) Schiller, L. et al ,V. D. I. Zeits, Vol.77,p.318,1933, 3) Matsumoto, S. et al ,J.Chem.Eng. of Japan, Vol.3, No.1 ,pp.83-92,1970, 4) Dennis, S., et al ,J.F.M.,Vol.101,Part 2,pp.257-279,1980, 5) 佐藤ら, 年会講演会 2000 講演論文集, 日本混相流学会,pp.171-174,2000, 6) 牛島, 電中研研究報告,U98019,1999

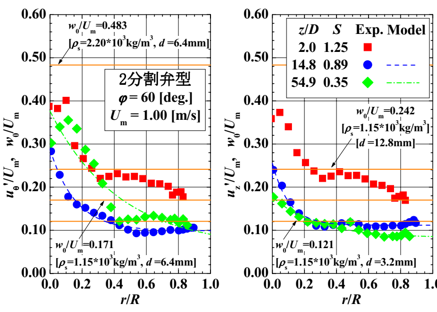

図 - 1 乱れ強度と沈降速度の関係

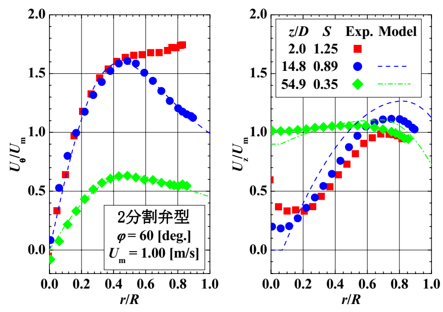

図 - 2 旋回流流速分布

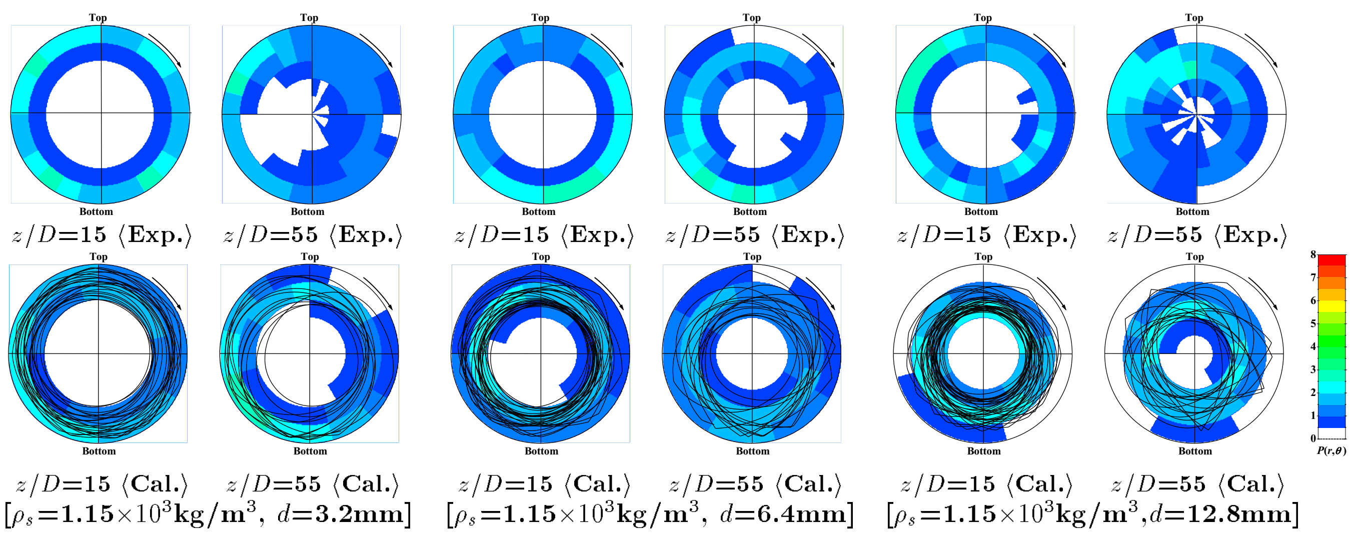

図 - 3 実験結果と流速変動を考慮した数値モデルによる解析結果の比較 [2 分割弁型 ϕ=60°, U_m=1.00m/s]