貯水池における濁質の沈降・拡散についての数値解析

東北大学工学部　学生員　○柴田光彦
東北大学大学院　正会員　梅田　信
東北大学大学院　フェロー　田中　仁

1. はじめに

ダム貯水池の濁水長期化現象は，洪水時に多量に流入した濁質が，洪水後もダムから放流し続けられるため，貯水池の下流河川で水の濁りが長引く現象である．濁水の長期化により，引き起こされる問題が様々ある．例として，水の濁りにより，下流河川の魚類の成長が阻害されるという問題がある．また，濁度が大きい場合には，景観が悪化するという問題が生じることもある．

そのため，濁水現象については，従来から，工学的視点で，様々な研究や実務上の検討がなされてきた．しかし，現在のところの濁水長期化現象を解決できていないのが実情である．貯水池では，密度成層や乱流などが作用して複雑な水理環境が形成されている．そのため，貯水池における濁質の沈降過程の把握が不十分である．これが濁水現象に対する十分な対策を施せていない理由の一つと考えられる．

図-1 は，（梅田，富岡，2003)より修正し，引用した洪水時の貯水池における水温，濁度の鉛直分布の時間変化である．時間経過により濁度は低減するが，濁水層の下端に着目するとほとんど沈降せず，水温躍層上に浮遊し，滞留している．このことから，濁質は単純な沈降をしていないことが分かる．本研究では，微細な懸濁粒子の挙動と拡散係数や流速といった貯水池の水理条件の関連を，数値解析を用いて調べた．

2. 濁質追跡モデル

本研究では，微細な懸濁粒子の挙動を解析するモデルとして，ランダムウォークモデル(Ross and Sharples，2004)を選択した．このモデルは全ての微細粒子の位置の動きを追いかけるラグランジュ的手法である．

ランダムウォークモデルにおける懸濁粒子の鉛直位置及び水平位置を求める式は Ross and Sharples(2004)より，次の式(1)及び(2)のように表記される．

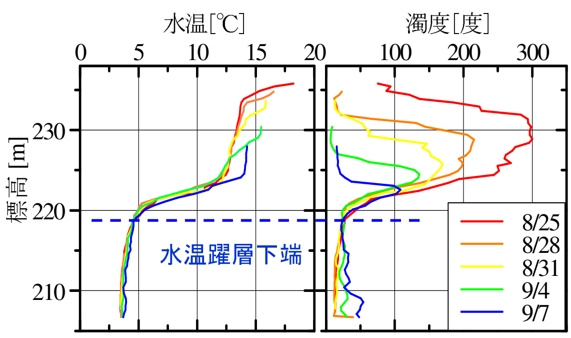

図-1　洪水時の貯水池における水温，濁度の鉛直分布の時間変化

$$z_{n+1} = z_n + K'_z(z_n)\Delta t + (w_p + w)\Delta t + R\left[2K_z\left(z_n + 1/2\,K'_z(z_n)\Delta t\right)\Delta t/r\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

$$x_{n+1} = x_n + K'_x(x_n)\Delta t + u\Delta t + R\left[2k\left(x_n + 1/2K'_x(x_n)\Delta t\right)\Delta t/r\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

z_n：粒子の鉛直位置，x_n：粒子の水平位置，K_z：鉛直拡散係数，K_x：水平拡散係数，K'_z：$\partial K_z/\partial z$，K'_x：$\partial K_x/\partial x$，R：平均 0 の一様乱数（$-1 \leqq R \leqq 1$），r：R の分散，w_p：沈降速度，w：鉛直方向の流速，u：水平方向の流速，Δt：時間ステップである．

式(1)は次のような意味である．Δt 時間後の粒子の位置（x_{n+1}，z_{n+1}）の移動量は乱流拡散を示す決定論項 $K'_z\Delta t$ と乱数項 $R\left[2K_z\Delta t/r\right]^{1/2}$ と沈降項 $w_p\Delta t$ 及び移流項 $w\Delta t$ の和で表現される．拡散係数が空間的に一様でない場合，拡散係数の空間微分を含む決定論項と乱流項とで扱う必要があることが指摘されている．そのため，本研究でも，Ross and Sharples (2004)に倣い，式(1)，(2)のような表現を採用した．

3. モデルの検討事項

ランダムウォークモデルでは，生成した乱数の性質が，計算結果に大きな影響を及ぼす．本研究では，乱数生成法に Mersenne Twister(Matsumoto and Nishimura,1998)を用いた．

また，Mersenne Twister の適用性についての確認を行なった．これは K_z が一定及び $w_p = w = 0$ という条件において，式(1)の計算を行い，そのときの粒子の分散 r_z が，式(3)を満たせばよいというものである．

$$r_z \cong 2k\Delta t \cdot t \tag{3}$$

ここに，r_z：粒子の鉛直位置の分散，t：時刻である．

4. 貯水池水理計算モデルとの結合

4. 1　流動モデルの概要

前章までに述べた粒子挙動のランダムウォークモデルを，貯水池流動モデルと組み合わせて，現実的な流動場における粒子の動きについて検討した．

流動モデルは梅田ほか(2004)の鉛直 2 次元モデルを用いた．このモデルは水温分布による密度流を非静水圧的解析するとともに，k-ε 乱流モデルで，乱流拡散係数を計算するものである．

4. 2　解析条件

解析は，以下に述べるような仮想的な貯水池条件

を設定して行なった．貯水池の全長を 3,000m とし，水深は 40m，横幅は 100m とした．メッシュは水平方向では 200m で区切り，鉛直方向では 1m で区切った．また，貯水池の水温の鉛直分布は図-2 のように仮定した．

流入条件は水面付近で流入し，流入量は$10m^3/s$で，流入水の水温は 20℃である．また，貯水位 30m 付近で選択取水し，放流量は $10m^3/s$ である．

5. 計算結果

5. 1 計算条件

まず，流動モデルでは，時間ステップ Δt =30[s]とし，各々のメッシュの w，u，k_z 及び k_x の計算を行ない，1 時間毎の各メッシュの w 及び u の時系列データを出力させた．濁質追跡モデルでは，以下のような初期条件を設定した．計算期間は 10 日間で，粒子の数を 10 個とし，時間ステップ$⊿t$=2[s]，w_p=1.0 ×10^{-6}m/s，初期位置を z_n は水面上，x_n は上流端とした．流動モデルでの計算値を基に，z_n 及び x_n の計算を行い，1 時間毎の各粒子の z_n 及び x_n の時系列データを出力した．

5. 2 計算結果及び考察

図-3 は 100 時間経過時の各メッシュの流速分布をベクトル表示したものである．図-3 を見ると，上流端では，流入水が密度流として，水深 20m 付近に流れ込んでいることが分かる．また，貯水位 30～20m 付近では，下流方向に流れ，逆に貯水位 30m～水面付近では上流方向に流れていることがわかる．さらに，放流口に水平方向の流れが弱まり，上昇する流れが生じることがわかる．

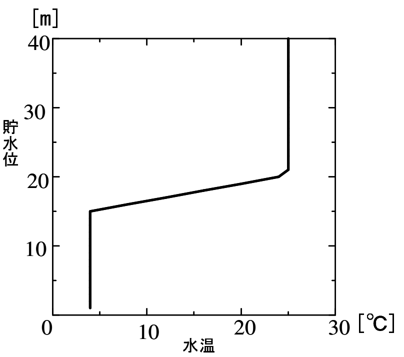

図-2 貯水池の水温の鉛直分布

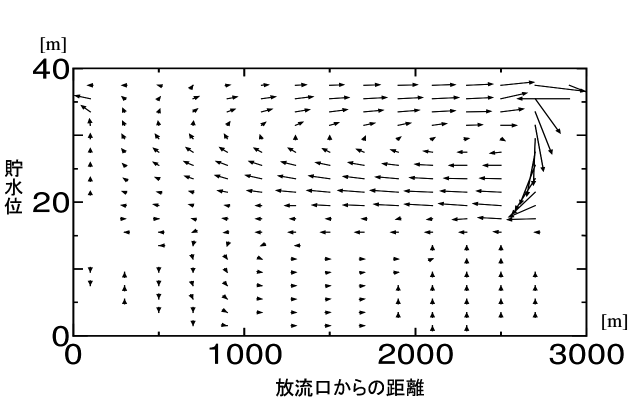

図-3 貯水池内の流速分布

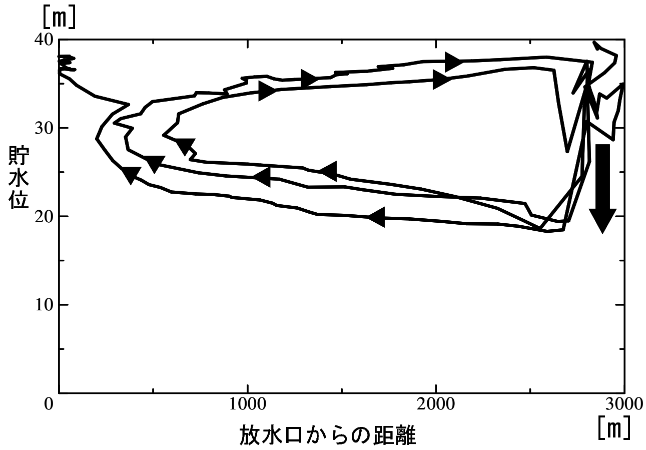

図-4 貯水池内での濁質の挙動

次に，出力させた z_n 及び x_n の時系列データをプロットし，粒子の貯水池内での挙動を図-4 に示した．図-4 から，粒子の挙動は以下のようであった．粒子は初期位置から流れに乗って，水温躍層へ沈降し，下流方向へと流れる．徐々に浮遊し，鉛直位置が水面付近になると，上流方向に流れ，上流の水面付近に戻ってくるという過程を 2，3 回繰り返した後，放流された．

このことから，粒子の挙動は水の流れの影響を強く受けていることが分かる．これは，設定した沈降速度が小さいこと，及び乱流拡散も大きくないためであると考えられる．

また，この粒子の滞留時間は 168[hr]であった．貯水池の水の滞留時間=貯水池の体積/流入量であるから，流入水の平均滞留時間は 333[hr]である．図-3 より，実質的に流動しているのは水温躍層より上の層だけで貯水池全体の半分程度であるから，実質的な流入水の滞留時間は 166.7[hr]程度だと考えられる．

したがって，本検討条件では，流入水の滞留時間と粒子のそれはおおむね一致する結果となった．

参考文献

1)Oliver．N．Ross and Jonathan．Sharples (2004)：Recipe for 1-D Lagrangian particle tracking models in space-varying diffusivity，Limnology and Oceanography ：methods2，pp289-302，2004

2)梅田信，富岡誠司(2003)：ダム貯水池における洪水時微細土砂の流下過程について，河川技術論文集，第 9 巻，pp.359-364

3) 梅田信，池上迅，石川忠晴，富岡誠司(2004)：ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析，水工学論文集，第 48 巻，pp. 1363-1368

4)Matsumoto and Nishimura(1998) : MersenneTwister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudoora ndom number generator", ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation Vol. 8, No. 1, January pp.3-30