

貯水池における濁質の挙動に関する研究

東北大学大学院 学生会員 ○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ことがある。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。

本研究では、梅田ほか(2003)における現地観測データを用いて、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、数値解析により検討を行なった。

2. 現地観測データ

本研究において用いた現地観測データは梅田ほか(2003)より、東北地方に位置するXダムで実施された。流域面積が172km²、総貯水容量3.1×10⁷m³の中規模な貯水池である。

貯水池の平面図を図-1のように示す。現地観測は、2001年8月22日に生じた洪水時に実施された。観測項目は流入水と放流水の採水・分析及び貯水池内の多地点における水質の鉛直分布計測である。流入水及び放流水はそれぞれ地点A及びBにおいて行った。測定・分析項目は、水温、濁度及びSSの3項目で、採水したすべてのサンプルに行なわれた。また、洪水時流入・放流の時系列の観測結果を図-2に示した。これは上から流入水・放流量、流入SS・放流SSの時系列を示している。発電放流は表層放流(水面下2m)であり、洪水はオリフィスゲート(EL.230.0m)より放流されている。

3. 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。これ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。

このモデルにおける懸濁粒子の鉛直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。

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

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

ここで、 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1様乱数 ($-1 \leq R \leq 1$)、 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 $R[2K_z \Delta t/r]^{1/2}$ 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。

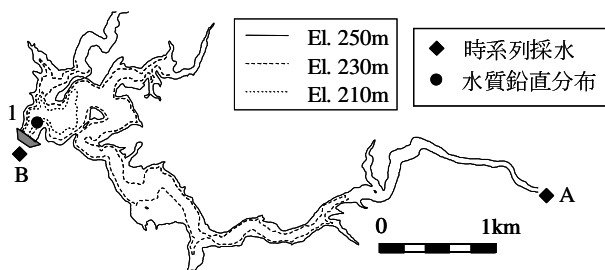


図-1 Xダム平面図観測地点

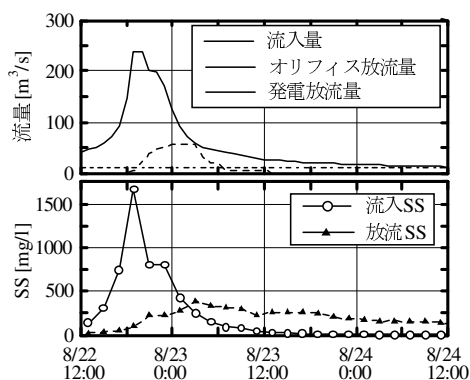


図-2 洪水時流入・放流時系列の観測結果

keywords: 貯水池, 濁質, ランダムウォークモデル, 数値シミュレーション

連絡先: 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 環境水理学研究室 Tel 022-795-7453 :Fax 022-795-7453

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、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルで、乱流拡散係数を計算するものである。

4. 2 X ダムにおける流動モデルの解析条件

計算期間は洪水発生前日に当たる 8 月 21 日から 9 月 5 日までの約 2 週間である。計算メッシュは水平方向では 200m、鉛直方向では 1m の大きさとし、時間ステップは $\Delta t=30[s]$ とした。

計算の初期条件として、貯水位はダム管理所における実測値を用いた。水温分布は、8 月 22 日 16 時の地点 1 における実測値を貯水池内に水平一様分布で与えた。流入量・放流量についてはダムの管理記録を元に与えた。また、流入水温は測定値を用いた。

4. 3 濁質追跡モデルの解析条件

時間ステップは $\Delta t=2[s]$ とした。懸濁粒子の投入時刻は流入水の SS 濃度変化に対応して、ピーク時とピーク前後の 3 段階とした。それぞれの時刻は、8 月 22 日 16 時、18 時及び 21 時とした。また、投入時刻における流入水の SS 濃度を考慮し、粒子数はそれぞれ、200 個、400 個及び 200 個とした。投入時刻ごとの初期位置を投入時刻での水面直下の上流端に設定した。また、粒径（沈降速度 w_p ）は梅田ほか(2000)を参考に、粒径 $3.528[\mu m]$ （ $w_p=1.00 \times 10^{-5}[m/s]$ ）とした。流動モデルの計算を基に濁質追跡モデルの計算を行ない、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. 計算結果

図-3 に懸濁粒子の鉛直分布及び X ダムの濁度（実測値）の鉛直分布の時系列変化を示した。図-3 を見ると、時間が経つにつれて、EL.225m より上では、粒子の個数が減少するものの、EL.220~225m 付近では、粒子の数があまり減少せず、躍層上に滞留していることが分かる。また、貯水池内の濁度の実測値においても同じ傾向であることが分かる。これは水温躍層が EL.220~225m 付近に発生していて、そのために貯水池内の鉛直方向への流動が遮断されているためと考えられる。

懸濁粒子の挙動の軌跡を図-4 に示す。これは投入後に貯水池内に滞留し続けた粒子、計算期間内に放流された粒子及び湖底に堆積した粒子のそれぞれ、3 パターンの粒子の軌跡の例を示している。堆積した粒子を除いて、沈降せず、オリフィスゲート（EL.230.0m）に水平方向に流れていることが分かる。これは流入及び放流により流下方向に強い流れが発生しているためと考えられる。

また、粒子の平均滞留時間がピーク前及びピーク時に投入したケースが 70 時間程度に対し、ピーク後に投入したケースでは、130 時間となった。出水後半は、流入量が減って、貯水池内の流動が弱くなったためと考えられる。

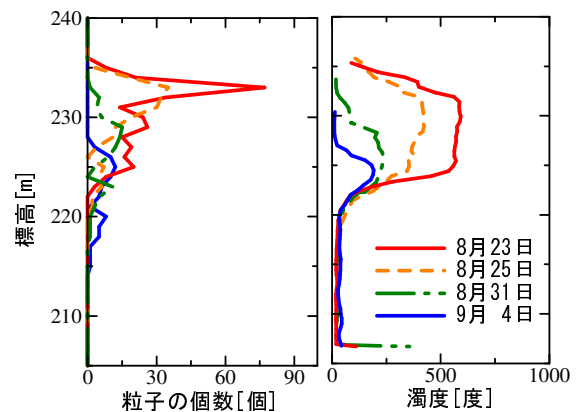


図-3 懸濁粒子の鉛直分布及び X ダムの濁度（実測値）の鉛直分布の時系列変化

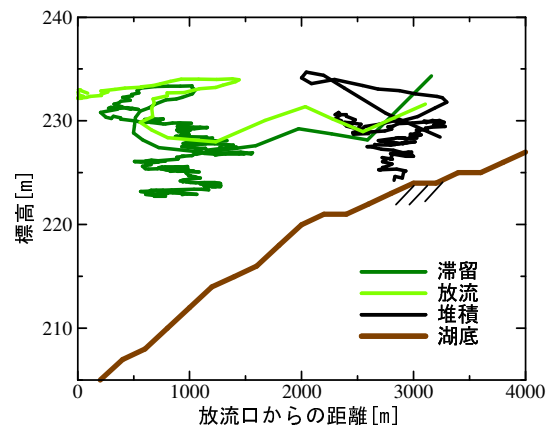


図-4 懸濁粒子の軌跡の図

6. まとめ

計算結果は、濁水長期現象が起こる貯水池内で観測される時間経過により、全体の濁度は減るものの、濁質が水温躍層上に浮遊し、滞留している状態を表現できたのではないかと考えられる。

ただし、水理条件と濁質挙動の関連については、さらに検討する必要があると考えられる。

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 pseudorandom number generator", *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation* Vol. 8, No. 1, January pp.3-30.
- 5) 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭新, 高橋迪夫 (2000): セキ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.255-268.