

## ウォッシュロードの堆積を考慮した貯水池堆砂の実用計算法について Practical Method to Estimate Reservoir Sedimentation of Wash Load

河田 恵昭\*・植本 実\*\*

By Yoshiaki KAWATA and Minoru UEMOTO

In order to construct a moderate scale reservoir, accurate estimation of sedimentation is critically important to manage it. However, it is difficult to estimate reservoir sedimentation of wash load, in comparison with bed material load in which the mechanism of sediment transport can be treated as dynamic process of sediment particles, even if deterministics or probabilistics. A practical method to estimate reservoir sedimentation is proposed in consideration of grain size and fall velocities of wash load.

The longitudinal bed profile calculated by this method is in good agreement with the field data of Amagase-Reservoir in the Yodo River.

*Keywords : wash load, reservoir sedimentation, sediment budget*

### 1. 結 言

貯水池堆砂は、貯水池上流端における背砂による河床上昇が洪水流下の障害となり、このため、従来のダム堆砂は主に掃流砂、浮遊砂など bed material load を対象としたものが多い。

最近では、治水・利水の必要性から風化の進んでいる地域や、地質構造の脆弱な地域など、必ずしも地質的に良好とは言えない地点でもダム建設が進められている。このような地域では地質的な問題の起因して貯水池堆砂量が多いこと、とりわけウォッシュロードと呼ばれる微細土砂の占める比率が高いことが知られており、ダム貯水池において貯水池堆砂量および粒度分布を測定したとき、総堆砂量の30～40%をウォッシュロードが占めることも少なくなく、放流施設への影響やダム堤体への作用荷重の設定においてウォッシュロードの予測が将来重要な問題となるものと予想される。

本研究では、このような状況に鑑み、ウォッシュロード堆積の実用的な計算法を提案するとともに、淀川水系の天ヶ瀬ダム貯水池を例にして計算法の妥当性を検証する。

\*正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

(〒611 京都府宇治市五ヵ庄)

\*\*正会員 工修 京都大学大学院博士課程 (日本工営株式会社勤務)

(〒611 京都府宇治市五ヵ庄)

## 2. 貯水池の堆砂モデル

堆砂シミュレーションモデルの代表的なものとして、一次元の河床変動理論に基づいた芦田・岡部のモデル<sup>1)</sup>があり、現地での再現性も高いがウォッシュロードの堆積領域ではやや問題があることがわかっている。

ウォッシュロードは鉛直方向の乱れ強度により急激に浮遊状態に遷移することや、密度流の影響、さらに、電気的な作用によりフロックを形成することがあることなど流送・堆積機構が極めて複雑である。したがって、厳密に流送・堆積機構を再現することは難しい。

道上・藤田ら<sup>2)</sup>は Reynolds 方程式によって流れの場を求め、3次元の拡散方程式によってウォッシュロードの濃度分布および流送量を計算する方法を示した。これを度重なる大規模な出水により現在堆砂が進んでいる美和ダムに対して適用し、その有効性を実証している。また濁水問題と関連して、密度流を考慮したウォッシュロードの濃度分布を計算する方法も提案されている。しかし、これら手法では膨大な計算量が必要であり、1洪水程度の現象を予測することは可能であるものの、通常100年間の流量時系列を対象とする貯水池堆砂形状予測に適用することは現実的ではない。

このため、ウォッシュロードの堆積予測では、適当に設定した堆積領域の条件下で、ウォッシュロードを計算の対象とせず原河床と平行に堆積させる方法や、密度流の効果を見込まず、代表粒径とその沈降速度を用いて堆積量を計算するなどの簡略化された方法などが用いられることが多かった。しかし、堆積領域や代表粒径を設定するための明確な指標は確立されておらず、経験的にこれらを定めることが必要であり、必ずしも貯水池実績と良い一致を示すとは言えないものであった。

掃流砂、浮遊砂およびウォッシュロードが共存する貯水池では、マクロ的にみて妥当な結果が得られることが必要であり、今回の検討でも出来るだけ実用的なモデルでウォッシュロード堆積過程が再現できることを目的とした。

### 2.1 基礎式

流れの連続式と運動方程式は次のとおりであり、一次元不等流として取扱う。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\alpha Q^2}{2g} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{A^2} \right) + \frac{\partial h_f}{\partial x} - i = 0 \quad (2)$$

ここに、 $h$ ；水深、 $\alpha$ ；エネルギー補正係数、 $Q$ ；流量、 $A$ ；流水断面積、 $h_f$ ；損失水頭、 $i$ ；河床勾配である。

また、一次元河床変動理論をもとにした河床変動の連続式は式(3)のとおりである。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B(1-\lambda)} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \sum_i q_{B_i} \cdot B + \sum_i q_{S_i} \cdot B + Q_W \right] = 0 \quad (3)$$

ここに、 $q_B$ および $q_s$ ：単位幅当たりの掃流砂量および浮遊砂量 (bed material load)、 $i$ ：粒径階、 $Q_W$ ：ウォッシュロード量、 $\lambda$ ：空隙率である。

### 2.2 貯水池のモデル化

貯水池断面は測量結果をもとにして与え、また、連続している貯水池を分割して離散化し、断面 $n$ と $n+1$ の間の流砂量は図-1のように取り扱うこととした。

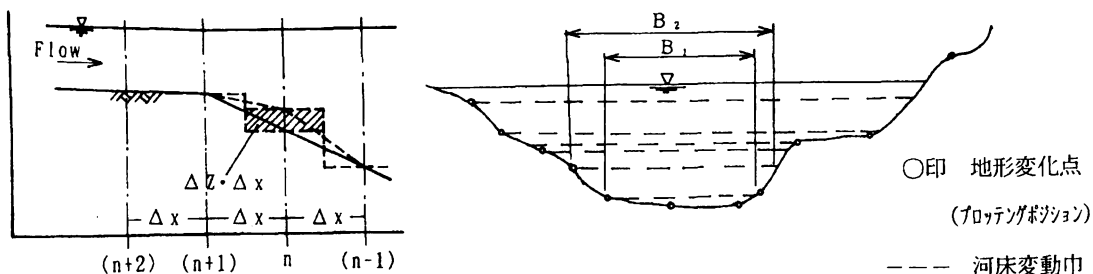


図-1 貯水池のモデル化

この図に従えば、単位時間 $\Delta t$ による河床変動量 $\Delta z$ は、

$$\Delta z = \frac{1}{(1-\lambda)} \cdot \frac{\sum_i (q_{Bi,n+1} - q_{Bi,n}) + \sum_i (q_{Si,n+1} - q_{Si,n}) + Q_{w0,n}}{(A_n^t + A_n^{t+\Delta t})/2} \quad (4)$$

となる。

ここに、 $q_{B,n}$ ：断面 $n$ への流入掃流砂量、 $q_{s,n}$ ：断面 $n$ への流入浮遊砂量、 $A_n^t$ ：時刻 $t$ における断面 $n$ の河床堆砂面積、 $n$ の代表 $Q_{w0,n}$ ：断面 $n$ と $n+1$ の間で堆積するウォッシュロード量である。

### 2.3 流砂量の算出方法

式(3)において、掃流砂量および浮遊砂量は既存の流砂量公式を用いて算定する。今回は、掃流砂は土研式、浮遊砂は芦田・道上式を用いることにした。ウォッシュロードの流送量( $Q_w$ )は経験的に次式で表される<sup>3)</sup>。

$$Q_w = \alpha Q^{n+1} \quad (5)$$

ここに、 $Q$ は流量、 $\alpha$ は河川ごとに定められる定数で、 $n=1$ が用いられることが多い。

一方、ウォッシュロードの堆積については、常時満水位から計画堆砂面までは十分な水深があり、底部付近の流速が極めて小さいため、底部の堆積層からの再浮上がないと仮定しさらに、洪水時には密度流の効果を無視でき、貯水池の濁水濃度が均一であるとすれば、貯水池面積に比例した量が沈降するものと考えられる。すなわち、ある断面位置での沈降量は、貯水面の面積と沈降速度 $w_0$ とウォッシュロード濃度 $\frac{Q_w}{Q}$ に比例し、残りのウォッシュロードが下流へ流送されものと考ええる。

$$Q_{w0,n} = B \cdot \frac{\sum_i Q_{wi,n-1} \cdot w_{0i}}{Q} \Delta x \quad (6)$$

ここに、 $Q_{w0}$ ：ウォッシュロードの沈降量、 $Q_w$ ：上流から流送されるウォッシュロード量、 $B$ ：貯水池水面幅、 $w_0$ ：沈降速度である。

ウォッシュロードの粒径は $100\mu$ 以下が対象となるが、実際の貯水池では $5\mu$ 程度を最小として分布しており、粒径による計算値への影響が大きいため、掃流砂、浮遊砂と同様、粒度分布を考慮することが必要と考えられる。

また、ウォッシュロードの堆積領域として、ここでは乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ と摩擦速度 $u_*$ がほぼ等しい地点を境界位置と仮定した。その結果は砂粒子の沈降速度との関係で、 $u_* = w_0$ で与えられ、計算を行う上での一応の目安とすることができる。

### 3. 天ヶ瀬ダム貯水池実績を用いた検証

#### 3.1 ダム貯水池の概要

天ヶ瀬ダムは淀川水系宇治川に1964年に築造されたダム高73mのアーチ式コンクリートダムで、総貯水容量は26,280,000 m<sup>3</sup>、有効貯水容量は20,000,000 m<sup>3</sup>である。

ダムが建造された地域は河床幅の狭いV字谷地形を呈するため、貯水池低標高部の容量が小さく、ダムの総貯水容量の24%を占める計画堆砂容量で、貯水池水深の約65%である約50mが死水域にあたる。このため、貯水池運用による水位変化は、洪水時に最大20mの貯水位操作を行う以外は年間を通しては比較的小さいものとなっている。

流域の大部分を占める琵琶湖流域で生産された土砂は、瀬田洗堰からの放流水が比較的清浄であることから下流へは流送されておらず、天ヶ瀬ダムへの流入土砂量のほとんどは支川（洗堰より下流の352km<sup>2</sup>）より流送されるものである。特に、裸地面積率が5%の大戸川流域は主要な土砂供給源となっていることが報告されている。

天ヶ瀬ダムはダム完成から約30年を経過し、約4 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>の堆砂が確認されており、総貯水容量に対する堆砂率は15%である。

貯水池の横断測量によって得られた最深河床の縦断変化を図-2に示すが<sup>4)</sup>、堆砂はほぼ原河床勾配に沿って堆砂しており、この範囲ではデルタ肩は見られない。河床勾配がダムから3.1km位置（No.16）で大きく変わっているが、この位置には天ヶ瀬ダム建設により水没した旧大峯ダムがあり、このダムの堆砂によるものと推定される。

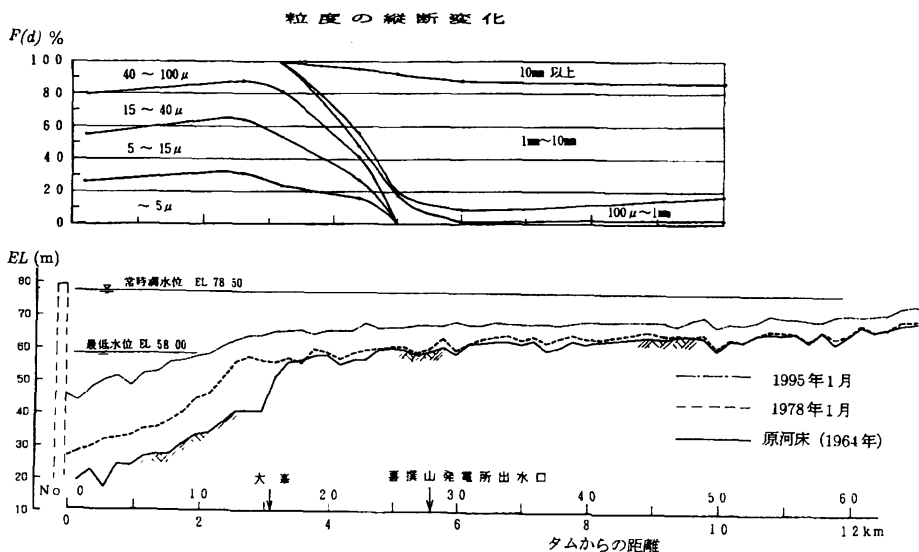


図-2 堆砂実績と粒度の縦断変化

### 3.2 粒度分布の縦断的な変化

昭和48年に行われた堆砂の粒度分布調査<sup>5)</sup>では図-3のような結果が得られており、旧大峯ダム付近から大きな変化が見られる。大峯ダム下流からは、粒径0.1mm以下のウオッシュロードによって占められ、一方、それより上流では次第に粒径0.1mm以上の浮遊砂の割合が高くなり、No.25より上流ではウオッシュロードはほとんど確認されなくなる。No.16からNo.22の間は原河床勾配が急な場所であり、ウオッシュロードから掃流砂までが混在する。

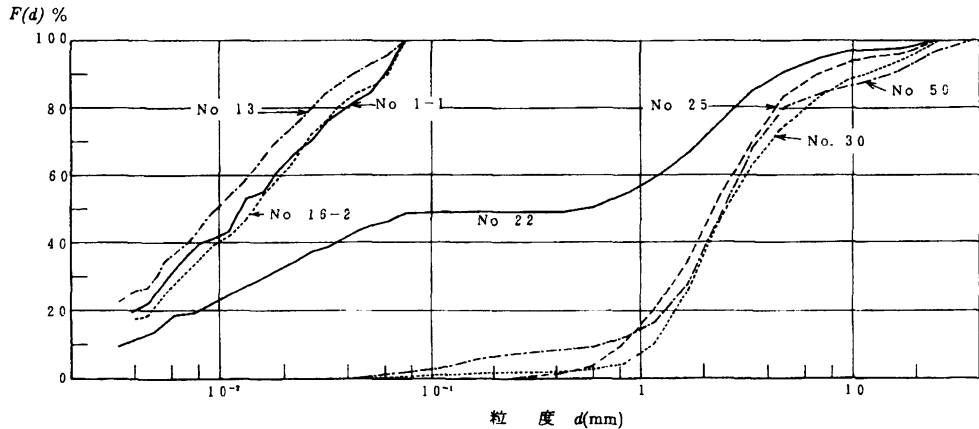


図-3 粒度分布解析結果

粒径の最大は10~20mm程度であるが、それより大きな礫は調査範囲では確認されない。

なお、このデータはダム完成後9年を経過した時点のものであり、堆砂が進んだ現在では大峯ダムの位置も不明瞭となっているため、ウオッシュロードの堆積状況が大きく変化していることも予想される。

### 3.3 シミュレーション結果

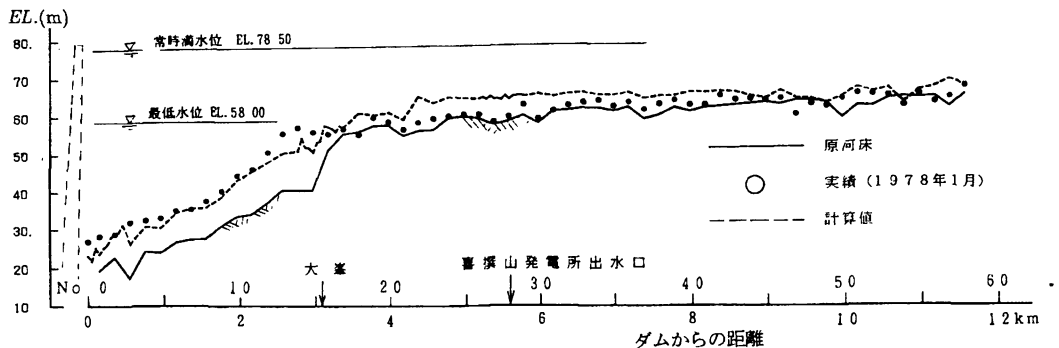
貯水池へ流入するウオッシュロード量は主要な支川ごとに与えるべきであるが、簡略のため先の式(5)によってダム流入量の関数として与え、定数は実績値とほぼ等しくなるよう $\alpha = 1.0 \times 10^{-6}$ ,  $n = 1$ に設定した。また、粒径は、調査結果で得られた粒度曲線より5, 15, 40 $\mu$ の3粒径に区分し、ウオッシュロードの堆積領域は旧大峯ダムが位置するNo.16より下流に設定した。流量時系列は1967年から1979年の12年間とし、管理年表よりダムが洪水調節を行った際の流量および貯水位を与えた。なお、平常時における土砂堆積は、貯水位変動、流量ともに非常に小さいため無視している。

実績堆砂量と計算結果を図-4に示す。ウオッシュロードの堆積領域であるNo.0~No.16区間では、概ね計算値と実績値は一致しており、本モデルの妥当性がうかがえる。

しかし、図-3の粒度分布 (No.22) で見られるような、ウオッシュロードと浮遊砂の混在領域を完全に再現するには至っていない。この領域では、洪水時の貯水池操作によりウオッシュロードの堆積境界が時系列的に変化しているものと推定され、今後この現象を再現できるモデルの構築が必要である。

No.22付近より上流の区間では、両者の堆砂形状は似ているものの、堆積深においてやや大きな差が認められる。この区間では上流から流送される土砂の粒度分布や堆積時の空隙率が精度よく与えられなかつ

たことが原因であろう。



図－4 計算値と実績との比較

#### 4. 結 語

ウォッシュロードの流入に対し、粒度分布を適切に与えることにより、沈降量のみを考慮した実用的なモデルでも、ある程度の実績再現が可能であることがわかった。現在建設が進められているダムの多くは今回用いた仮定が成立するものと思われ、本モデルの適用が可能であろう。

しかし、満砂状態に近いものや排砂施設によるフラッシングなど浮遊砂の非平衡性が卓越した場には適用出来ないことも起りうることに注意する必要がある。また、ウォッシュロードの堆積領域の決定がやや不明確であり、これと掃流砂・浮遊砂との遷移領域の再現にも問題が残ることが今後の課題である。

最後に、資料を提供いただいた建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所に感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 芦田・岡部：貯水池堆砂の数値計算法に関する研究，京大防災研年報25号B-2，1982，pp.389-400
- 2) (財)ダム水源地環境整備センター：ダム堆砂解析技術資料，1993
- 3) 吉川 秀夫編著：流砂の水理学，丸善，1985，pp.142-144
- 4) 近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所：天ヶ瀬ダム貯水池堆砂測量報告書，1995
- 5) 村本・道上・藤田：天ヶ瀬貯水池の濁水に関する調査研究，京大防災研年報17号B，1974，pp.585-596