

徳島大学 正員 ○岡部 健士

同 上 正 員 杉尾捨三郎

同 上 学生員 土井 建朗

1 ま え が き

水位変動が比較的小さい貯水池の堆砂過程は、全流入土砂量における浮遊砂と掃流砂の配分比に大きく影響される。すなわち、掃流砂の割合が極めて大きければ、水深急変断面を伴う明瞭な段丘 (delta) が発達するが、これに反して浮遊砂の割合が極めて大きければ、頂部堆積層 (Top-set beds) と元河床にほぼ平行な底部堆積層 (Bottom-set beds) がかなりなめらかに接続された堆砂面が形成される。さらに、これらの性質を合せ持つ中間的な堆砂過程もある。そして、堆砂面形状に応じて流水や流砂の運動特性も変化するの
で、貯水池の堆砂過程を統一的に解析することは甚だ困難である。

本研究は、流入土砂において浮遊砂が占める割合が比較的大なる場合の堆砂過程を考察の対象としたものである。この種の堆砂過程については、矢野・芦田(1)、平野・金子(2)、浅田(3)、杉尾・岡部(4)らによる既往の研究があり、いくつかのシミュレーション手法が提案されているが、いずれも多くの変数を含み、また、混在する2種の輸送形式の効果を滑らかに結合させるには至っていない。

本稿では、河床変動に関する流砂の連続式、掃流砂量公式および浮遊砂の拡散式から出発して、堆砂過程を予測するための基礎式を導き、その後、二、三の実験資料を利用した検証を行う。なお、解析および検証は、流入水量および供給砂量が定常に保たれる場合に限る。

2 理論的考察

2-1 流砂の連続式

図-1 に示すような一次元貯水池モデルを考える。

このとき、河床変動に関する流砂の連続式は、次式のようになる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial q_B}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h (cu) dy \right\} = 0 \quad (1)$$

 z = 貯水池の河床高さ, q_B = 貯水池内の単位幅掃流砂量,

c = 貯水池内の任意の点における浮遊砂濃度,

 u = 貯水池内の任意の点における流速の水平成分, h = 貯水池内の水深, λ = 砂の水中間ゲキ率 (≈ 0.4),

t = 時間, x = 流れの方向にとった水平座標, y = 河床から鉛直上向きにとった座標。

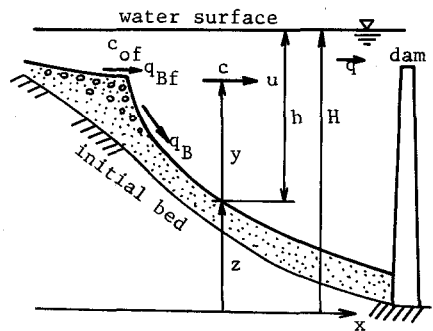


図-1 貯水池堆砂の模式図

貯水池内の河床変動式において、 $\partial q_B / \partial x$ が考慮されることはまれである。とくに、掃流砂を主とする現象を取り扱う場合には、段丘肩の直下流においてすぐさま $q_B = 0$ とするのが一般的である。しかし、浮流砂の効果が卓越するような貯水池では、段丘肩における水深変化が前者に比してかなり小さく、さらに段丘肩より下流の砂面上になお河床波が生じていることがモデル実験において観察されていることなどから、(1)式のような表現をするほうが合理的であろうと推察される。

さて、堆砂過程の解析は(1)式の形を決めてそれを解くことに帰着するのであるが、何らかの粒度分布を有する全流入土砂の内いかなる部分がいずれの輸送形式に属するかを厳密に判定しながら解析してゆくことは

極めて困難である。そこで著者らは“貯水池内に供給される土砂は、段丘肩を通過する時すでにある粒径を境に完全に掃流砂と浮遊砂とに分割されている。”との前提に立って以後の理論を進めることにした。

2-2 浮遊砂による河床変動

浮遊砂に関する拡散式は近似的に次のように書かれる。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial c}{\partial y} \right) + W_0 \frac{\partial c}{\partial y} \quad (2)$$

ここに、 v = 流速の鉛直方向成分、 ϵ = 拡散係数、 W_0 = 粒子の沈降速度。

両辺を y について $0 \sim h$ の間で積分し、流水の連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

を考慮して変形したのち、水面条件：

$$y = 0 \quad \text{にて} \quad W_0 c + \epsilon \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

を導入すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h (cu) dy = -W_0 C_0 - \epsilon_0 \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (5)$$

ここに、 C_0 = 河床に沿う濃度、 ϵ_0 = 河床近傍の拡散係数。

さて、既往の研究においては、貯水池内の全ての河床において砂粒のまき上げがないとの条件

$$\epsilon_0 \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (6)$$

を使用した解析が進められている。この条件は、“堆砂が進行しつつある貯水池には、河床近くに鉛直方向の濃度変化がない領域がある。”との芦田らの実験報告や、底面からの土砂供給がない状態を想定したDobbins⁽⁵⁾の実験結果の一部には符合するが、段丘肩からさほど遠くない河床にまで汎用することには抵抗を感じる。換言すれば、一つの境界断面ともなっている段丘肩直上では、平衡状態における濃度分布特性が満たされ、

$$\epsilon_0 \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0} = -W_0 C_0 \quad (7)$$

であるものが、流入直後に(6)式のように変化するのは不自然である。また、著者らが実施した実験において、段丘肩からかなり下流の領域にもわずかながら流水による砂粒のまき上げがあることが視察されている。以上のような理由から、本解析では(6)式の条件を使用せず、合田(6)によって提案された次のような河床条件を導入することにした。

$$\epsilon_0 \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0} = -k W_0 C_0 \quad (8)$$

ここに、 $k > 1$; 洗掘の傾向 (8-a)

$k = 1$; 平衡状態 (8-b)

$0 < k < 1$; 堆積の傾向 (8-c)

$k = 0$; 純堆積 (8-d)

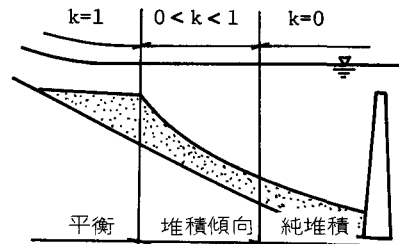


図-2 河床条件の変化

当面する現象においては、(8-b)から(8-d)までの河床状態が順次図-2のように続くと考えられる。

しかし、 k の性質については参考にするべき研究報告が見あたらないので、次に示すような専断的な規定を付することにする。

(1) 段丘肩において, $k = 1$

(2) $0 < k < 1$ の範囲では, $k \propto u_*$

(3) $k = 0$ となる位置は u_* によって決る。

そして, 具体的には図-3 および(9)式に示すような関数形を持つものとする。

$$k = \frac{u_* - 2W_0}{u_{*f} - 2W_0} \quad (u_{*f} \geq u_* \geq 2W_0) \quad (9-a)$$

$$k = 0 \quad (u_* < 2W_0) \quad (9-b)$$

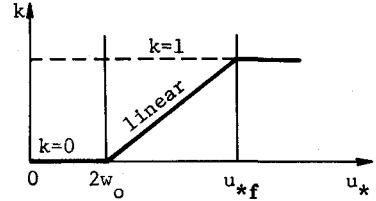


図-3 仮定された k の性質

ここに, u_{*f} は段丘肩の摩擦速度であり, $2W_0$ は“浮流砂が急激に増加し始める限界は $u_* \approx 2W_0$ ”なる Laursen (7) の報告から感覚的に引用されたものである。最後に, 貯水池内の河床近傍濃度に関する芦田らの実験結果に従って,

$$C_0 = C_{0f} \left(\frac{u_*}{u_{*f}} \right)^m \quad \text{ここに, } C_{0f} = \text{段丘肩の河床濃度, } m = \text{指数} \quad (10)$$

とすれば, (5)式は(11), (12)式のようにになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h (cu) dy = -W_0 C_{0f} \left(\frac{u_*}{u_{*f}} \right)^m \left(\frac{u_{*f} - u_*}{u_{*f} - 2W_0} \right) \quad (u_* \geq 2W_0) \quad (11)$$

$$= -W_0 C_{0f} \left(\frac{u_*}{u_{*f}} \right)^m \quad (u_* < 2W_0) \quad (12)$$

2-3 掃流砂による河床変動

本節で考察されるのは, 段丘肩通過後の掃流砂の挙動であって, 背砂には無関係であることを付記する。掃流砂公式としては, 取り扱いが容易な Brown 型を用いる。

$$q_B = K (d_s u_*) \frac{(u_*^2 - u_{*c}^2)^2}{(sg d_s)^2} \quad (13)$$

ここに, d_s = 掃流砂の代表粒径, u_{*c} = 掃流砂の限界摩擦速度, s = 掃流砂の水中比重,

g = 重力の加速度, K = 係数

上式を x で偏微分し,

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = \frac{d_s K}{(sg d_s)^2} (u_*^2 - u_{*c}^2) (5u_*^2 - u_{*c}^2) \frac{\partial u_*}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (14)$$

を得, つぎに Manning 式を変形して得られる(15)式を代入すれば, (16)式のようにになる。

$$\frac{\partial u_*}{\partial h} = -\frac{7}{6} \cdot \frac{u_*}{h} \quad (15)$$

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = -\frac{7}{6} \frac{d_s K}{(sg d_s)^2} \frac{u_*}{h} (u_*^2 - u_{*c}^2) (5u_*^2 - u_{*c}^2) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (16)$$

(16)式を利用して河床変動を計算する場合には, 式中の h および $\partial h / \partial x$ は流れの運動方程式を解いて求められるべきであるが, 計算式の煩雑化および急変流に対する抵抗則のもつ信頼度を考慮すれば, 次のような近似を行うことも許されるであろう。すなわち, 貯水池内の水面は水平であるとみなして

$$h = H - z \quad \text{および} \quad \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad \text{ここに, } H = \text{貯水位} \quad (17)$$

とし, u_* は, あらかじめ指定した Manning の n と単位幅流量 q を用いて次式で計算する。

$$u_* = n\sqrt{g} q h^{-\frac{7}{6}} = n\sqrt{g} q (H-z)^{-\frac{7}{6}} \quad (18)$$

以上のような近似法と流水の運動方程式とを対比したとき、抵抗理論上の根本的な矛盾に気付くが、本稿では敢てこの近似を用いることにする。

結局、(18)式は次式のように書き直される。

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = \frac{7}{6} \cdot \frac{K}{s^2 g^2 d_s} \cdot \frac{u_*}{H-z} \cdot (u_*^2 - u_{*c}^2) (5u_*^2 - u_{*c}^2) \frac{\partial z}{\partial x} \quad (19)$$

ただし、上式は $u_* \geq u_{*c}$ なる範囲においてのみ有意である、 $u_* < u_{*c}$ なる範囲では

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

となる。

2-4 貯水池における堆砂過程の基礎式

上述の考察により(1)式の第2項の形が決定されたわけであるが、(1)および(19)式さらには(19)および(20)式にはそれぞれ適用範囲が付されているので、貯水池全体の河床変動を一つの式で表現することはできない。また、流入砂の粒度分布によっては、 u_{*c} と $2W_0$ の大小関係が入れ換えることもあろう。

よって、本稿では、一例として $u_{*c} > 2W_0$ なる場合の基礎式を示すに止める。

$u_{*c} > 2W_0$ なる場合；

① $u_* \geq u_{*c}$ において

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \cdot \frac{7Ku_*}{6s^2g^2d_sh} (u_*^2 - u_{*c}^2) (5u_*^2 - u_{*c}^2) \frac{\partial z}{\partial x} \\ - \frac{W_0}{(1-\lambda)} C_{0f} \left(\frac{u_*}{u_{*f}} \right)^m \left(\frac{u_{*f} - u_*}{u_{*f} - 2W_0} \right) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

② $2W_0 \leq u_* < u_{*c}$ において

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{W_0}{(1-\lambda)} C_{0f} \left(\frac{u_*}{u_{*f}} \right)^m \left(\frac{u_{*f} - u_*}{u_{*f} - 2W_0} \right) = 0 \quad (22)$$

③ $u_* < 2W_0$ において

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{W_0}{(1-\lambda)} C_{0f} \left(\frac{u_*}{u_{*f}} \right)^m = 0 \quad (23)$$

以上の3式を適当な方法で数値解析すれば、貯水池の堆砂過程を描くことができる。ただし、計算に先立って次の各量が与えられていなければならない。

- ① 初期値として、元河床形状および段丘肩の出発点
- ② 流水に関する資料として、貯水位、流量および粗度係数
- ③ 流砂に関する資料として、段丘肩における掃流砂の代表粒径、水中比重および流砂量、さらに段丘肩における浮遊砂の代表粒径、水中比重および河床近傍濃度

なお、掃流砂に関する係数 K は、掃流砂の連続条件を満たす必要があるので、与えられた掃流砂量 q_{Bf} から決定するのがよからう。また、 m は0.5前後の値をとるものと思われる。

3 数値計算例

本手法の検証計算を、芦田ら、平野ら、および著者らの実験結果に基づいて実施した。表-1は計算に必要な諸量を取りまとめたものである。ただし、表中の※を付された数値は、著者らの手にある研究報告から

推量もしくは著者らの判断で適切と思われる値を与えたものである。

計算は、各基礎式を単純な前進差分形に書き直したのち、時間ステップ = 50 sec., 距離ステップ = 10 cm で実行した。図 - 4, 5, 6 は計算結果と実測値とを比較したものである。

	q (cm^3/s)	q_T (cm^3/s)	q_{Bf} (cm^3/s)	C_{of} (p.p.m)	d_s (cm)	W_0 (cm/s)	i	h_f (cm)	n	m
芦田ら	250	0.569	0.057*	2,000*	0.01*	0.5	$1/30.8$	10	0.03*	0.5
平野ら	225	0.114	0.04	562	0.015*	0.5	$1/50$	8.5	0.03*	0.5*
著者ら	224	0.166	0.016	1,256	0.012	0.2	$1/32.2$	8.8	0.03*	0.5

表 - 1 実験諸量 (表中, q_T = 単位幅総給砂量, i = 元河床勾配,
 q_{Bf} = 段丘肩の掃流砂量, h_f = 段丘肩の水深)

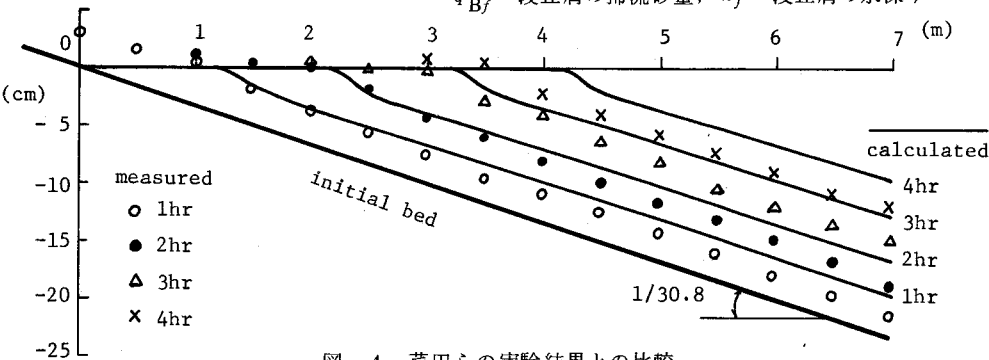


図 - 4 芦田らの実験結果との比較

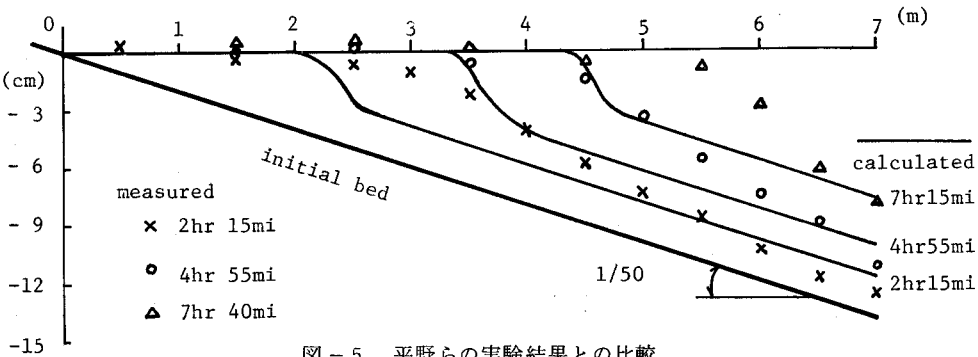


図 - 5 平野らの実験結果との比較

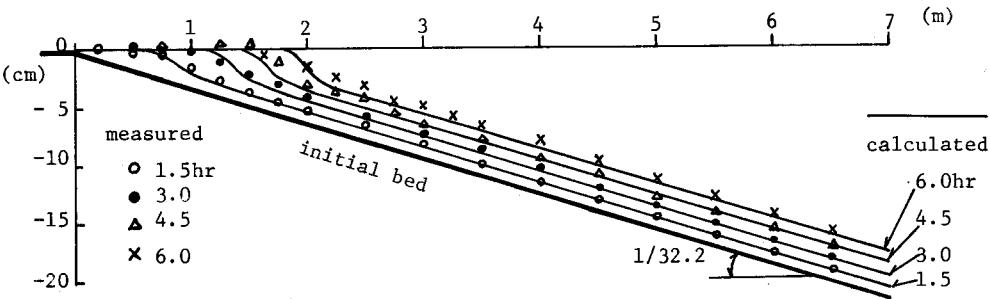


図 - 6 著者らの実験結果との比較

計算に使用された諸量には著者らの主観的な判断による値が含まれているので、ここに示された図のみから本法の細部にわたる精度を議論することはできないが、段丘肩の進行速度および Bottom-set beds の堆砂厚さなどはかなり良好に再現されている。ただし、総給砂量における掃流砂の割合が比較的多い場合（図-5）には、段丘肩が発達しすぎる傾向がある。

4 む す び

浮遊砂が多量に流入する貯水池の堆砂過程のシミュレーション手法を紹介した。そして、若干の実験結果を利用した検証計算により、その有用性が確かめられた。

本法は、①掃流砂と浮遊砂との効果を同時に考慮したこと、②段丘肩の軌跡をはじめから仮定しておく必要がないこと、③基礎式の性質上、粒径範囲別の計算も可能であること、など背砂への接続も含んだ応用上の利点を有している。しかし、基礎式誘導過程で導入された諸仮定には、シミュレーション逐行のみを目的としたものが二、三含まれているので、今後に残された問題点も多い。

最後に、実験および計算は徳島大学大学院生板東高君の協力によるところが大きく、また、本研究は文部省科学研究助成金による援助のもとに行われたことを記して各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 矢野・芦田・大同・前田：浮遊砂による貯水池の堆砂に関する研究；京大防災研年報，第7号，昭37，PP. 348～364.
- 2) 平野・金子・式：浮遊砂による貯水池の堆砂過程，土木学会年講，第30回，Ⅱ-151，昭50.
- 3) 浅田：山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究 — 貯水池における堆砂過程のシミュレーション，電力中央研究所総合報告，Ⅻ2，昭51.
- 4) 杉尾・岡部：浮遊砂による貯水池の堆砂について，土木学会年講，第29回，Ⅱ-112，昭49.
- 5) Dobbins W.E.：Effect of Turbulence on Sedimentation, Proc. of ASCE, 1943.
- 6) 合田：上水浄化における水理学上の基礎的諸問題，京大学位論文，昭31.
- 7) Laursen E.M.：The Total Sediment Load of Stream, Proc. of ASCE, Vol. 84, 1958.