

九大工学部 正員 椿 東一郎
大 林 組 正員 増田 知行
九大工学部 学生員 O 宮武 順造

1 近年洪水調節や水資源開発の目的として各種の容量をもつ貯水池が峻造されているが、我が国は一般に地形急峻で流出土砂量が多く貯水池への堆積によって有効貯水量の減少、back sandによる河床の上昇などの障害が注目されている。掃流砂による貯水池の埋没過程は一般に段丘の形で行なわれ、上流より供給された土砂は砂堆の背面を掃流される間に、一部は背面に堆積してback sandとして堆砂を上流側に波及させ、他は段丘の肩より転落して前面に堆積しその移動によって貯水池を埋めてゆく。従つて段丘の運動に注目して、特に我が国に於て、多くの実験的研究が行なわれ、杉尾教授、山岡教授、矢野、芦田教授などにより優れた結果が得られている。しかしながら段丘の生成、発達及び運動は特異点として解析的な取扱いは甚だしく制約するため、いまのところ杉尾教授が試みられているように堆砂現象に関する多くの実験を帰納して合理的な実験式を導くことが現象の定量的な把握のために急務であろうと思われる。さて貯水池の埋没過程に於て既に移動床である河川にdamを築造し背水区域外の河床を構成する砂礫による流砂が貯水池に流入する場合と、山岡部の多くの河川にみられるように原河床を構成する礫にくらべて甚だしく小さい砂礫をwash loadとして流送したものを貯水池に於て堆積させる型とがある。本文では一般的な後者の場合を取扱うことにすると、問題点としては、与えられた単位幅供給砂量 q_0 、流量 Q 、及び与えられた堰に基ずく貯水池水面形のもとに、①段丘発生位置 ②段丘肩の軌跡 ③段丘厚さと前進速度 ④段丘部流砂量 ⑤平均堆砂面勾配及び段丘が堰に到達した時の堆砂面勾配、などがあげられる。これらについては杉尾教授は既に次元解析に基ずく実験式を提案されているが、われわれは杉尾教授、山岡教授の実験結果を検討すると同時に、新しく実験を補足して、より普遍的な表式を求めようと試みている。実験は目下継続中で今のところ射流状態の等流流れが堰による S_a 曲線に接触する場合を終了した段階であるが、この範囲に限って若干の考察を加えてみたい。

2 実験装置と方法

有効長15m幅0.6m高さ0.6m片面

表-1

ガラス張りの固定水路に100勾配の底面をつけ、水槽上端のSand boxからslitを通じて一定量の砂を水槽中に落下させ、分散器によつてほぼ種方向に一様になるよう分散させた。使用した砂の性質及び実験の要目は表-Iにしたが、供給砂量 q_0 が埋没過程に及ぼす特徴を調べることを主目的

実験番号	砂	平均粒径(mm)	比重	Sand boxに於ける空層率%	堆砂中2空層率%	流量(範) cm^3/sec	勾配	堰高(cm)	給砂量(実験) 範囲 cm^3/sec
I	A	0.85	2.632	49.0	43.0	373.6	1	10.0	0.254
	B	0.33	2.684	48.0	42.0	373.6		7.5	0.254
II	A	0.85	2.632	49.0	43.0	373.6	100	5.0	0.254
	B	0.33	2.682	48.0	42.0	373.6		2.5	0.254

表-2

実験番号	砂	平均粒径(mm)	比重	Sand boxに於ける空層率%	堆砂中2空層率%	流量(範) cm^3/sec	勾配	堰高(cm)	給砂量(実験) 範囲 cm^3/sec
杉尾博士	A	0.85	2.59	47.0	49.0	172.5	1	2.5	0.254
	B	0.844	2.63			172.5			0.254
山岡博士	A	3.3	2.66	47.0	49.0	172.5	100	4.0	0.254
	B	1.4				172.5			0.254
	C	0.46				172.5			0.254

として流量を一一定に保って q_{00} を出来るだけ広範囲に変化させた。

実験 I II は底勾配はいずれも $\frac{1}{100}$ であるが、I の河床は平滑であって射流等流水深が小さく跳水によって急激な垂程変化を伴って貯水池の Sa 曲線に接続する場合であり、II は射流等流流れの Froude 数がほぼ 1 に近く、貯水池水面が一様な場合を対照とした。尚、杉尾、山岡教授の実験要目を表-2 に示した。

水面形の測定には 1M ごとに設置した静圧管をマンノメータに導き、段丘肩の軌跡及び堆砂形状はポイントゲージによった。

3. 実験結果 図-1, 2 は実験 I, II より堆砂形状及び水面形の時間的变化及び段丘肩及び段丘肩水位の軌跡を例示したもので、図-3 は流量を一一定に保ち粗砂量を変えた場合の段丘肩の軌跡、初期水面形及び段丘が堰に到達した時の堆砂形状及び水面形を例示したものである。これらの図から次のことが認められる。

(1) 射流部を wash load として流送されてきた工砂は流砂能力即ち流速変化の最も激しい位置を中心として堆積し、若干下流に流されて小さい段丘の発生をみる。従って段丘開始点は跳水終了後の $x >$ 下流であるが射流フルード数の大きい実験 I では段丘肩の軌跡は最初急傾斜の上向きを辿り、その後ほぼ水平に流下する。Froude の実験 II では、その軌跡は最初からほぼ水平である。

(2) 段丘通過時に於ける段丘肩水位は同一位置に於ける原水面形水位に比してのなり小さい。又段丘肩及び段丘肩水位の軌跡がいずれも水平であり、杉尾、山岡教授などが既に指摘されてい

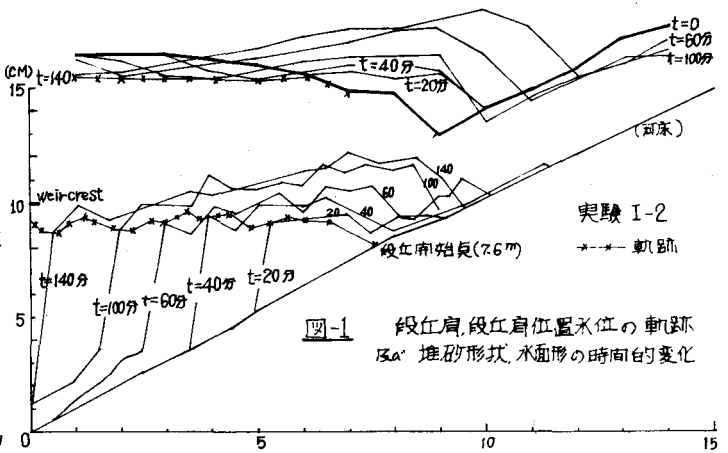


図-1 段丘肩、段丘位置水位の軌跡及び堆砂形状、水面形の時間的变化

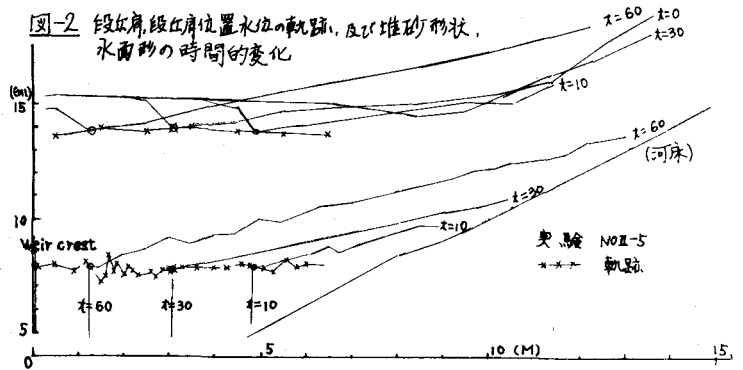


図-2 段丘肩、段丘位置水位の軌跡、及び堆砂形状、水面形の時間的变化

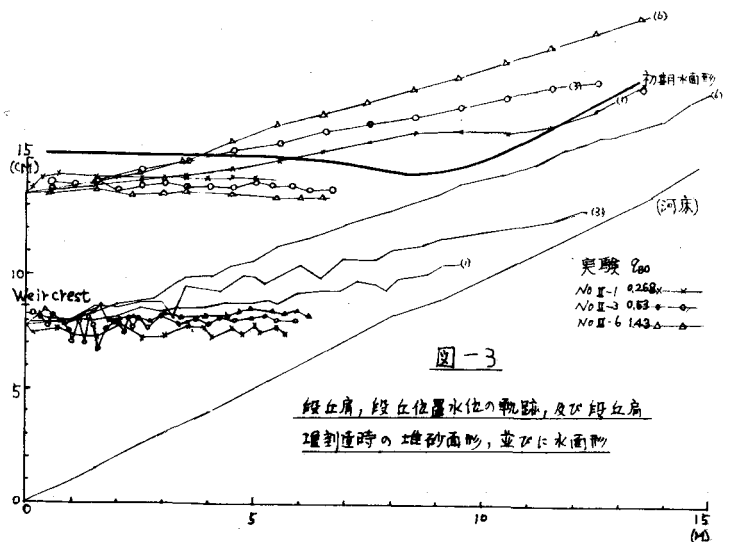


図-3 段丘肩、段丘位置水位の軌跡、及び段丘肩、堰到達時の堆砂形状、並びに水面形

るように埋没過程中ほぼ一様である。

(3) 同一流量で給砂量を変化させた場合、図-3で明らかなように、給砂量が増すにつれて、段丘の軌跡が僅か乍ら高い位置の水平線を通り、又段丘肩水深も若干小さくなる。また給砂量の増え程 back sand のさく上が著しく、段丘流砂量と給砂量の比が減少してゆく。

4 実験結果の考察 貯水池の埋没過程に於ては河床の近傍を浮流状態で輸送される砂もその浮流距離の小さいために堆砂に關與するものと考えなくてはならない。従つてこれら河床近傍の浮流砂を含む掃流型流砂量の式として、有効掃流力、 ψ_c が導入されてゐる次式

$$\Phi = \frac{q_b}{\sqrt{s g d^3}} = 25 \psi_c^{1.3} (\psi_c - \psi_c) = 25 \psi_c^{1.3}$$

$$\psi_c = \psi \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{U_*^2}{s g d} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad \text{但し} \quad \left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{V}{U_*} \\ \varphi_0 &= 6.0 + 5.75 \log \frac{h}{d} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

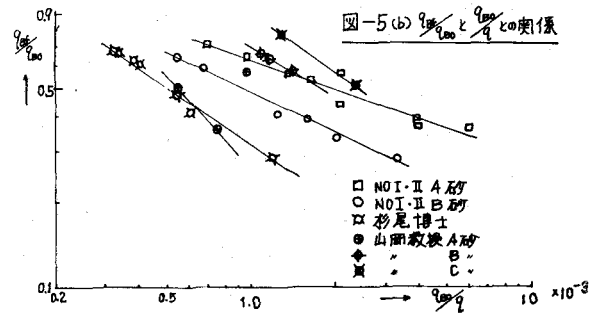
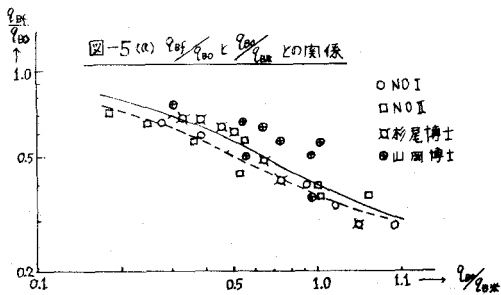
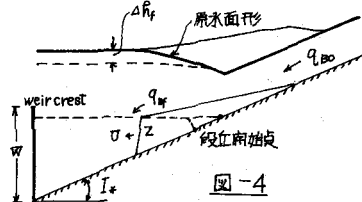
を用ゐることとする。なほ多くの場合、 $\psi_c = 0.04$ は ψ_c にくらべて無視される。さて ψ_c を単位幅流量 q と水深 h で書き更すと $\psi_c = \frac{q^2}{s g d \varphi_0 h^2}$ となる。従つて①式が段丘肩にも適用できるものと仮定し、さらに φ の微小な変化を無視すると、段丘肩水深が前述のように一定のときには段丘流砂量 q_{bf} も一定の値に保たれることになる。なほ q_{bf} は段丘高さを Z 、段丘の前進速度を U 、空隔率を λ とすると Exner の関係式

$$q_{bf} = (1 - \lambda) Z U \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

が近似的に成立するが、 Z 及び U の測定値よりも q_{bf} は埋没過程中一定であることが知られる。

さて段丘流砂量 q_{bf} と給砂量 q_{00} との割合、段丘進行速度 U などの無次元形を求めるに、ついで杉尾博士は現象を規定する重要な要素として、 $\frac{q_{00}}{q}$ をあげて実験式を作られてゐるが、しかしながらこのパラメータでは原河床勾配 I_* と粒径 d などの要素を含み込むことが出来ない。以下では $\frac{q_{00}}{q}$ の代りに原河床勾配 I_* 及び与えられた流量のもとに流し得る流砂量 q_{00} を①式に於て $\psi_c = \frac{q^2 (g I_* q)^{1.3}}{s g d \varphi_0}$ として求め、給砂量 q_{00} と q_{bf} との比 $\frac{q_{00}}{q_{bf}}$ を最も重要なパラメータであると考えた。

(1) 段丘流砂量 給砂量 q_{00} のうち段丘流砂量 q_{bf} が貯水池を埋め、 $(q_{00} - q_{bf})$ が back sand を形成するから、貯水池の堆過程に於ては流砂量分配 $\frac{q_{bf}}{q_{00}}$ が最も重要である。図-5(a-b)は $\frac{q_{00}}{q}$ の実験値をそれぞれ杉尾、山岡教授の資料とともに $\frac{q_{00}}{q_{bf}}$ 及び $\frac{q_{00}}{q}$ の関数としてプロットしたものである。図-5(b)のように流量、原河床勾配及び粒径



によってまちまちであったものが図-5(a)ではほぼ一つの曲線のまわりに散らばる。明らかに $\frac{q_{0f}}{q_{00}}$ が増すとともに $\frac{q_{0f}}{q_{00}}$ は減少し、給砂のうち back sand の変化に消費される石砂量の割合が増加してゆくことを示している。

(2) 段丘肩の軌跡 貯水池内の原水面曲線($t=0$)は容易に計算され、実用上ほぼ水平とみなしてよい。貯水池内の一處に注目して高さ h の段丘が近づくとともに水深 h より低下し始め段丘の肩がその点を通過する時原水位より dh_f 低下するものとする、運動量の定理を適用しさらに dh_f が h にくらべて小さいとして近以計算を行なうと、

$$dh_f = Z \frac{h_c^3}{h^2} \left(\frac{Z}{h-Z} \right) \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。従つて段丘肩水深 h_f は

$$h_f = h - Z \left(1 + Z \frac{h_c^3}{h^2} \cdot \frac{h}{h-Z} \right) \dots \dots \dots (4)$$

となり、さらに h_f は①式の近以式を用いて次式

$$h_f = \left(\frac{25 \sqrt{s g d^3}}{l_{0f}} \right)^{\frac{1}{1.53}} \cdot \frac{l}{\sqrt{s g d q q_0}} \dots \dots \dots (5)$$

を満たさねばならない。貯水池のように水面が水平である場合、その水位より $(dh_f + h_f)$ を引いた段丘肩の軌跡もほぼ水平である。なお h_f の $l_{0f}^{-0.22}$ であるから、流量を同一にして給砂量を大きく増加しても、crestの軌跡の低下量は図-3に示されるように僅かである。

(3) 段丘前進速度 段丘絶生長のごく近傍を除くと段丘肩の軌跡は水平とみなされるから、原河床勾配 I_0 を用いて $Z = X \cdot I_0$ とおける。従つて段丘位置 X と時間 t との関係及び前進速度は

$$X = \sqrt{\frac{2 l_{0f} \cdot t}{I_0 (1-\lambda)}} \quad U = \sqrt{\frac{q_{0f}}{l_{00}}} \cdot \sqrt{\frac{q_{00}}{2 I_0 (1-\lambda) \cdot t}} \dots \dots \dots (6)$$

となり、段丘の進行速度は $t^{\frac{1}{2}}$ に比例する。図-6にこの関係の一例を示す。また図-7に $\sqrt{\frac{q_{00}}{2 I_0 (1-\lambda) \cdot t}} = \sqrt{\frac{l_{0f}}{l_{00}}}$ の値を $\frac{q_{0f}}{q_{00}}$ の函数として表わしている。図中の実線は図-5(a)の平均曲線(実線)から計算したもので極めて簡単な取扱いが妥当であることを示している。

(4) 堆砂面勾配 段丘肩に於ける流砂量は q_{0f} 、堆砂面お跡に於ける流砂量は q_{00} 、であるから、平均的には堆砂面上に $\frac{1}{2}(q_{0f} + q_{00})$ の流砂量があるとみなされる。従つて①式及び I_0 のもとに流し降る流砂量 q_{0m} を導入して、

$$\frac{1}{2}(q_{00} + q_{0f}) = 25 \sqrt{s g d^3} \left[\frac{4^{1.53} (2 I_0 q_{0f})}{s g d q_0} \right] = q_{0m} \left(\frac{I_0}{I_m} \right)^{1.53}$$

$$\text{より} \quad \frac{I_0}{I_m} = \left(\frac{1}{2} \frac{q_{00}}{q_{0m}} \left(1 + \frac{q_{0f}}{q_{00}} \right) \right)^{\frac{1}{1.53}}$$

となり $\frac{1}{I_m}$ は $\frac{q_{0f}}{q_{0m}}$ の函数となる。段丘が堰に到達した時の堆砂面勾配 I を用いて、この関係を図-8に示し、砂防工学では満砂後の河床勾配として、原河床の $\frac{1}{2}$ にとるという便宜的な方法が用いられるが、 $\frac{1}{2}$ はほぼ平均値に相当し、実際には $\frac{q_{0f}}{q_{0m}}$ が増す程 $\frac{1}{I_m}$ は増加する。

