

射流領域におけるダム堆砂について

On sedimentation caused by dam in the range of supercritical flow

早稲田大学理工学部 学生員 ○角田 学

早稲田大学理工学部 正 員 吉川 秀夫

東洋大学工学部 正 員 福井 吉孝

早稲田大学理工学部 遠山 正人

早稲田大学理工学部 幸野 潔

1. はじめに

小規模な河床変動をしていた河道に、ダム等を設置すると、大規模な河床変動¹⁾が生じる。このとき、設置点の上・下流部に多くの影響を及ぼす。従って、ダム等の建設により生じる流砂の変動を研究し、大規模な河床変動量の予測、ダム等を越流する河床材料の算定などを水理学的に明らかにする必要がある。特に、ダムによる堆砂については、従来より数多くの研究^{2)~4)}がなされており、緩勾配流路のダム堆砂については、すでにほぼ明らかにされているが、溪流部のダム堆砂については、現象自体に突発性を有し、人の目にふれにくいことなどのために、定性的にも充分に明らかにされておらず、解明すべき問題点が数多く残されている。そこで、本研究では、そのひとつのアプローチとして、流れが射流領域におけるダム堆砂について実験的に検討した。即ち、まず河床材料が一様な粒径で構成されている場合のダムによる堆砂状況を定量的に把握した後、さらに混合粒径の場合のダム堆砂へと発展させた。本実験により、河床構成材料、河床勾配、河床幅およびダムの袖の有無がダムの堆砂に大きく影響を与えることが確認された。

2. 実験装置および実験方法

実験水路は、図-1に示すような直角三角形の断面をもつ、全長9mの木製可変勾配水路である。水路に、実験で使用するのと同じ材料を所定の河床に敷き均して元河床とした。流量の測定は、低水槽の越流堰によった。流砂量は、水路下流端からの流出砂量をレー尔付採砂カゴにより連続的に測定することにより算定した。また、図-1に併記してあるモータードライブ付カメラを用いて、水路上部からの写真撮影により、水深、河床高を水路全区間にわたり測定し、水面勾配、エネルギー勾配等を算定した。さらに、水路全体の流れを把握するために、VTRにより適宜観察した。ダムは水路下流端に設置し、4種類のダムについて、それぞれ実験を行った。各ダムの寸法を表-1に示す。同表において、袖の長さを変化させているのは、袖のダム堆砂に与える影響を把握するためである。即ち、ダムⅠ・ダムⅣは、袖がなく全幅の場合であり、ダムⅡ・ダムⅢは、袖はあるが水通し幅が異なる場合である。なお、袖高は、水がover flowしない程度の高さとした。

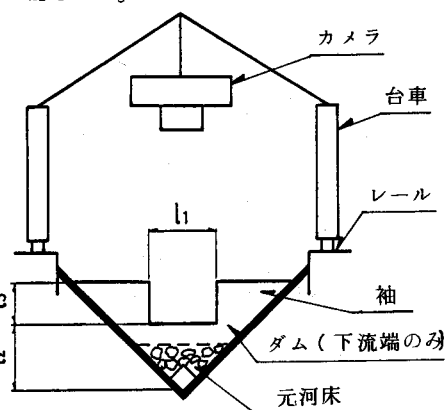


図-1 直角三角形断面水路

表-1 ダムの種類

寸法 Dam	水通し幅 l_1 (cm)	水通し高 l_2 (cm)	袖高 l_3 (cm)
DamⅠ	$10\sqrt{2}$	$5\sqrt{2}$	0
DamⅡ	$10\sqrt{2}$	$11\sqrt{2}$	$10\sqrt{2}$
DamⅢ	$5\sqrt{2}$	$11\sqrt{2}$	$10\sqrt{2}$
DamⅣ	$22\sqrt{2}$	$11\sqrt{2}$	0

3. 実験結果とその考察

(1) 実験諸量

実験諸量を表-2に示す。ここでは、実験開始前の河床形状

(これを前河床形状とする)の状態により、3通りのケース(ケースA・ケースB・ケースC)に分類している。即ち、ケースAは、前河床形状が各流量に応じた河床形になっており、これは実際の洪水の変化により前河床がたえず変化している場合に対応している。ケースBは、河床がダムの水通し部より低い位置にあり、水路勾配と平行になっている。これは、通常のマクロにみて動的に安定した河道(これを元河床の河道とする)にダムを設置した場合に対応している。また、ケースCは、河床が水通し部まで完全に到達しており、水路勾配と平行になっている。これは、ダム設置後、時間が無限に経過すると堆砂縦断形が元河床と平行になるであろうと仮定した場合に対応している。なお、ケースCのダムIおよびダムNの場合は、後述の平衡時における流量と流砂量の関係を算定する際にも適用している。

(2)平衡時の流量と流砂量の関係

河床が場所的、時間的に動的平衡になった場合の流量と流砂量の関係を求める。一般に、流砂量式は次式で表わせる。

$$\frac{q_B}{u_* d} = \text{fun}(\psi) \quad (1)$$

$$\psi = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd}, u_* = \sqrt{ghIe} \quad (2)$$

ここに、 q_B :単位幅あたりの流砂量、 u_* :摩擦速度、 d :平均粒径、 h :水深、 Ie :エネルギー勾配である。ここで、渓流域を対象とする場合、(1)式は

$$\frac{q_B}{u_* d} = K \cdot \psi^m \quad (K, m: \text{定数}) \quad (3)$$

と表わせる。また、Manning式を用いて、

$$q = h^{\frac{5}{3}} Ie^{\frac{1}{2}} / n \quad (q: \text{流量}) \quad (4)$$

(2), (3), (4)式より、 について整理すると、

$$q_B = \alpha \cdot q^\beta \cdot I^\gamma \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{K \cdot d \cdot g^{\frac{2m+1}{2}} \cdot n^{\frac{3(2m+1)}{10}}}{\{(\sigma/\rho - 1) \cdot g \cdot d\}^m} \quad (6)$$

$$\beta = 3(2m+1)/10, \gamma = 7(2m+1)/10 \quad (7)$$

となる。

表-2 実験諸量

前河床形状	Case	Dam	Q (l/s)	材料
各流量に応じて不規則	A (Run① Run②)	II	1~9	一様 粒径
ダム設置前の元河床と同一	B-1	II	1~9	
	B-2	III	3,6,9	
	B-3	IV	3,6,9	
水通し部まで完全に満砂	C-1	I	1~13	混合 粒径
	C-2	II	3,6,9	
	C-3	IV	3,6,9	
	C-4	II	1~13	
	C-5	IV	1~13	

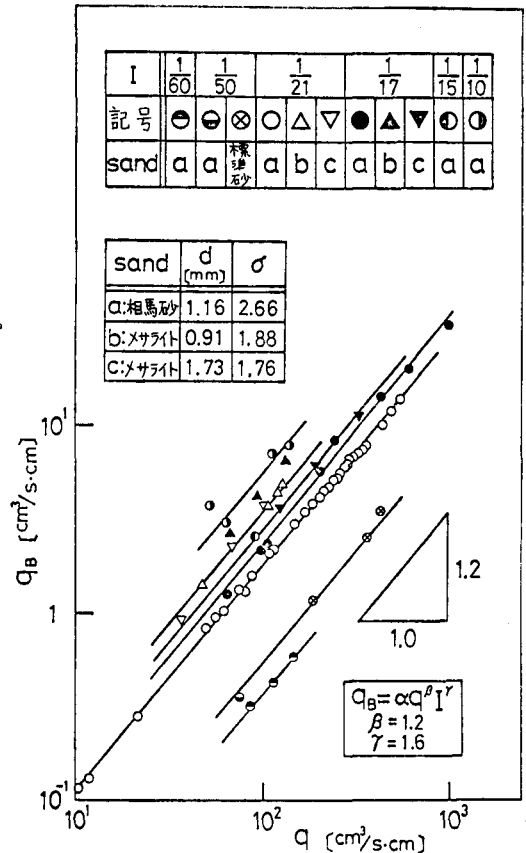


図-2 流量と流砂量の関係(ケースC-1)

本実験において、 q_B と q との関係を求めると、図-2のようになる。即ち、定数 β 、 r の値は、
 $\beta=1.23$ 、 $r=1.60 \cdots \cdots (8)$ となった。なお、従来の流砂量式における β 、 r の値については、掃流力の大きい領域の場合、例えば、 $\beta=0.90$ 、 $r=1.05$ (佐藤・吉川・芦田式)、 $\beta=1.43$ 、 $r=1.60$ (篠原・椿式)となっている。また、同図には、長さ2m、幅5cmの矩形断面水路による実験データ($I=1/60$, $1/50$, $1/15$, $1/10$ の場合)を併記してある。

(3)射流領域におけるダム堆砂について
 本実験のダム堆砂は射流領域で行われている。図-3にケースB-1の場合のダム堆砂縦断面形の一例を示す。同図には実験開始後、砂堆がダムに到達してから0分後と4分後の堆砂面高、水面高、エネルギー線、河床幅およびFr数をそれぞれ示してある。河床形状は、 $x=0 \sim 2$ mの間、および3mより上流ではほぼ直線状を呈しており、河床縦断面形が必ずしも二次曲線となるとは限らないことを示している。また、 $x=2 \sim 3$ mの間で、水流が河床変動によりジャンプを生じ、こ

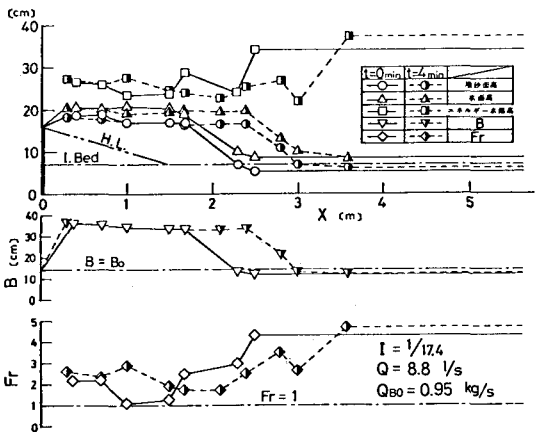


図 3 射流領域におけるダム堆砂縦断面形の例示 (ケース B-1)

の地点で上流から流下してきた砂の一部が堆積し、またエネルギーを減少させていることがわかる。この現象がくり返し生ずるために、ジャンプ地点が次第に上流へと進行していくことになる。これは、ダムによる堆砂のような移動床の場合、射流領域にあるときも境界条件が変化するために、水面形は上流に影響を与えることを示すひとつの例である。従って、常流領域と射流領域とのダム堆砂に与える影響を比較すると、表-3のようになると思われる。ここに、H：水深、 Q_s ：流砂量、 I_e ：エネルギー勾配、 I_o ：元河床勾配、 I_m ：各流量により異なる安定勾配を示す。

Fr数	$Fr < 1$	$Fr > 1$
全体の流れ	常流	射流*
河床勾配	$I \rightarrow I_o$	$I \rightarrow I_m \rightarrow I_o$
Hと I_e と Q_s の関係	$H \rightarrow I_e \rightarrow Q_s$ ↑	$H \leftarrow I_e \leftarrow Q_s$ ↑

*:河床変動により一部ジャンプを含む。

(4)流量が変化する場合のダム堆砂について
 砂防ダムの土砂調節作用の効果を調べるために、流量を変化させた場合の河床勾配の変化を実験的に検討した。ダム堆砂縦断面形の概要およびそのときの洪水の変化過程を図-4に示す。洪水の変化として、図-4に示す4通りを行った。 Q_B は各Runにおける流量のとき、平衡時に流れるであろう流砂量を示しており、こ

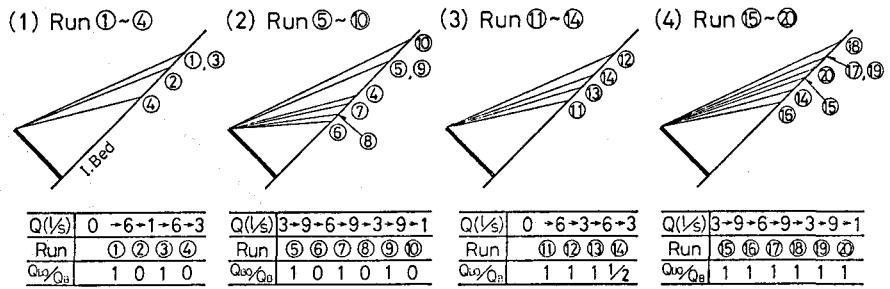


図 4 洪水の変化によるダム堆砂縦断面形の概要図 (ケース A)

ここでは(5)式および(8)式を用いた。また、 Q_{B0} は上流からの給砂量を示している。図-5の(a)、(b)に、それぞれRun④、Run⑬の場合を例示する。両者の場合、流量は同一であるが、給砂の有無、前河床形状が異なっている。いずれも、河床縦断面の変動が小さくなっていくことがわかる。

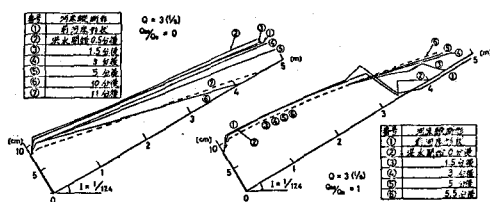


図-5 ダム堆砂縦断面の時間的变化 (ケース A)

(5) ダム堆砂の収束現象

動的に安定な河道にダムを設置すると、最初は大規模な河床変動が生じるが、次第に堆砂縦断面およびダム越流砂量が一定値に収束していく傾向にある。即ち、前河床形状が異なっているが、ダム上流部の流路は、その流量に見合った流砂量および河床勾配になっていく傾向にある。その一例を図-6に示す。同図は、本実験のように河床縦断面が直線で近似できると仮定した場合であり、一定洪水によりダム越流砂量およびダム上流部の河床勾配が、ある領域に収束していくことがわかる。

また、一定洪水が長期間継続した場合には、収束域を離れて、図-6において三角形印で示すような位置へと移行し、河床勾配が元河床に平行になっていく傾向にある。このとき、ダム越流砂量は給砂量と必ずしも一致しないことがわかる。これは、ダムの袖の有無、河床幅の変化などに起因していると思われる。

ここで、同一流量のもとで、河床勾配が S_0 から S_1 へ、河床幅が B_0 から B_1 へ変化したとすると、(5)式より

$$\frac{Q_{b0}}{B_0} = \alpha_0 \cdot \left(\frac{Q}{B_0}\right)^\beta \cdot S_0^\tau \quad (9)$$

$$\frac{Q_{b1}}{B_1} = \alpha_1 \cdot \left(\frac{Q}{B_1}\right)^\beta \cdot S_1^\tau \quad (10)$$

となる。(9)、(10)式において、 $\alpha_0 = \alpha_1$ とすると、次式を得る。

$$\frac{S_1}{S_0} = \left(\frac{Q_{b1}}{Q_{b0}}\right)^{\frac{1}{\tau}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_0}\right)^{\frac{\beta-1}{\tau}} \quad (12)$$

本実験において、 Q_{b1} としてダム越流砂量 Q_{b*} を、 B_1 としてダム地点の河床幅を、また、 β 、 τ の値として(8)式を用いると、(12)式は、図-7の実線のようになることがわかる。

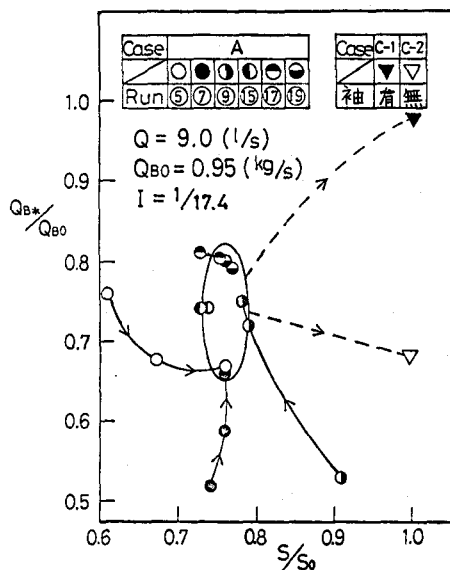


図-6 河床勾配と越流砂量の収束現象

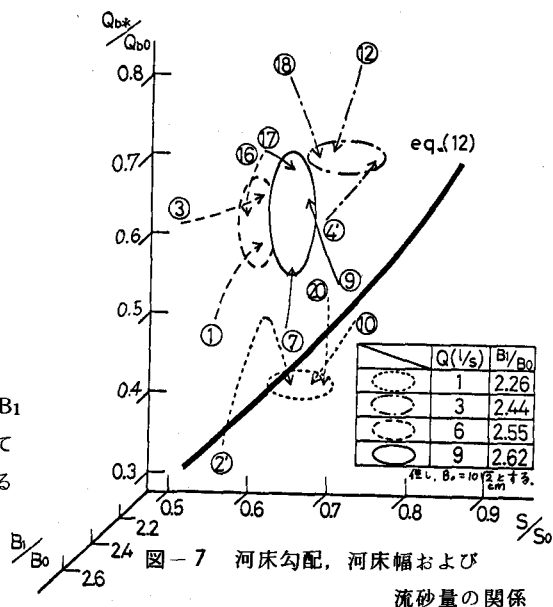


図-7 河床勾配、河床幅および

流砂量の関係

(6)混合砂礫によるダム堆砂について

実際のダム堆砂は、混合粒径の効果が大きく、砂礫の分級作用が行われており、河床の縦断形および流砂量が一樣粒径のそれと著しく異なることが知られている⁶⁾。そこで、図-8に示すような粒度分布をもつ混合砂礫により、ダムの堆砂実験を行った。実験ケースは、表-2におけるケースC-4、C-5に相当し、ダムの袖がある場合とない場合についてダムを越流する砂量の比較を行った。このときの越流砂量の時間的変化を図-9に示す。同図より混合粒径の場合の流砂量は、時間的に変化していることがわかる。これは、一樣

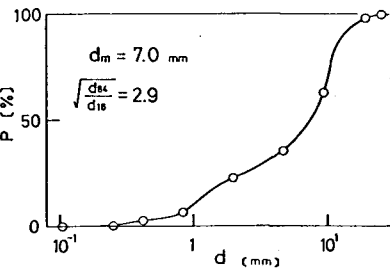


図-8 粒度分布

粒径の場合においては流砂量が時間的にそれほど変わらなかったことと異なっており、注目すべきことである。原因のひとつとして、混合砂礫において形成される洲の大きさと関係があることが実験により確認された。詳細については、講演時に報告する予定である。また、ダムに袖がある場合には、同一流量のとき、例えば15分間で袖がない場合の約3%に越流砂量が減少することがわかる。ここに、袖の有無がダム堆砂に与える影響を知ることができる。

また、ダムの越流砂量と洲の形成との関連性をさらに詳細に検討するためには、洲の発達状況を把握することが必要である。その一例を図-10に示す。同図からもわかるように、

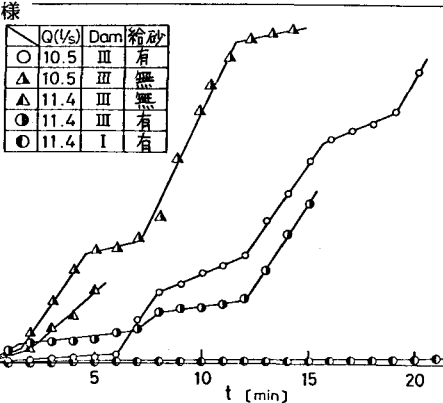


図-9 越流砂量の時間的変化(累加曲線)

ダム上流部に形成された洲は、時間的に上流へと発達していき、主流の蛇行が洲の発達に応じて顕著になっていくことがわかる。また、洲の形成の発端となる位置は、ダム近傍では、ダムクレスト水平面上(ここでは $x=1m$ の地点)の近傍の地点であり、その点から上流側へ洲の発達がみられる。さらに上流部では、大きな限界掃流力の必要な物体(例えば、大粒径の石)の近傍が洲の発端となる地点となっており、洲は発達

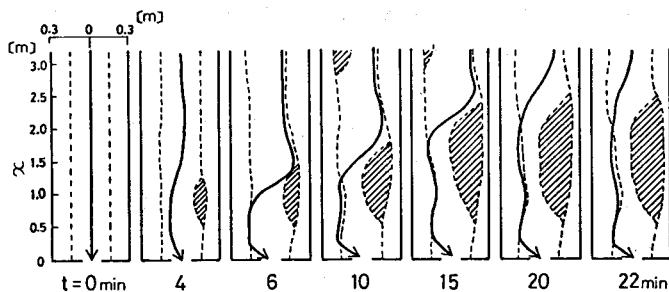


図-10 洲の発達と主流線の変化 (ケースC-4) <平面図>

$Q=12\%$
comment:
・矢印は流心線,
・斜線部は洲,
・点線は河床面,
と示す。
なおよ一樣粒径のときは
図-10の $t=0$ 分後と同様であつた。

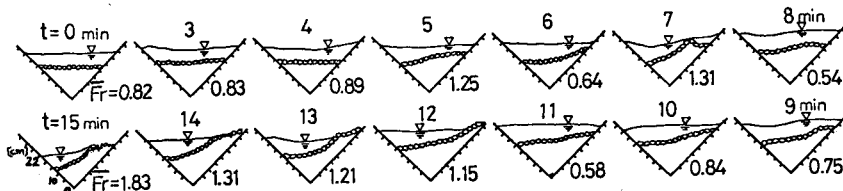


図-11 河床横断面形の時間的変化 (ケースC-4)

$Q=12\%$
comment:
・ $x=1m$ 地点
・ $\bar{Fr}$ は平均のフルード数を示す。

する場合もあれば、衰退していく場合もあることが確認された。洲が形成され、次第に発達していく状況を河床の横断面でみた場合を図-11に示す。同図には、各断面の平均フルード数 $\overline{Fr}$ を併記している。

4. 結語

以上の検討から、次の事が結論される。

- ①ダム堆砂の場合、元河床が射流領域にあるとき、水面形は上流に影響を与える。これは、河床変化のためである。
- ②ダムの堆砂状況は、ダムの袖の影響が大きく、混合粒径の場合にはさらに著しい。従って、ダムの水通し部の変化をとり入れたダムの堆砂状況の変化を水理学的に明らかにする必要がある。
- ③一定洪水が短期間継続する場合、ダム上流部の河床勾配およびダム越流砂量が時間的に一定になる傾向がある。
- ④混合粒径の流砂量は、時間的に変化し、それは、洲の形成と関係がある。
- ⑤洲の形成の発端となる原因が必ず存在する。

なお、今後の研究課題として、①ダム堆砂が進行し、ダム越流砂量が時間的に変化していくときの流量と流砂量の関係を明らかにし、非平衡時のダム堆砂を明らかにすること、②ダムの堆砂においては、水通し幅のような下流の境界条件の影響を水理学的に明らかにすること、および③河床材料が混合粒径の場合の流砂量を明らかにすること、があげられ、現在検討中であり、次の機会に報告する予定である。

本研究は、文部省科学研究費：総合研究A「河川の高水計画と河道形状に関する研究」の補助のもとに行われた。ここに謝意を表わします。 本実験には、井筒・片山・藤堂・田中・小西君の協力を得た。

参考文献

- 1)石川忠晴：ダム建設等による大規模な河床変動の新計算法，土木技術資料 1980
- 2)例えば、杉尾捨三郎：堰の堆砂に関する実験，信州大学工学部研究所報告 μ 5 1955
- 3)江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究，土木研究所報告 1966
- 4)矢野勝正・芦田和男・定道成美：ダムの背砂に関する研究(1)，京大防災研年報第6号 1963
- 5)村野義郎：砂防ダム堆砂面の縦断形について，新砂防 μ 47 1962
- 6)平野宗夫：混合砂礫河床の変動と平衡河床に関する研究，土木学会論文報告集第207号 1972
- 7)H.W.Chen：River Mechanics, Volume I 1971
- 8)建設省土木研究所：河川における土砂の移動機構に関する研究ノート，土木研究所資料第1416号
- 9)吉川秀夫・角田学・東能利夫：急流河川におけるダム堆砂の実験的検討，土木学会年講 1980