

芦別貯水池の堆砂に関する研究

学生員 ○石井 千万太郎*

正員 岸 力**

§1 緒 言

ダム堆砂は、貯水池容量の減少、用水・取水への悪影響など、ダムの維持・管理の上から重要な問題を提起している。その重大さは広く認識され、多くの研究がなされてきた。その砂堆の移動で代表される堆砂機構はかなり明確にされ、Bedの変動の計算法は一応確立されている。

まず、その流入流砂量を水理計算によって求めようとする場合、通常流量時系列を設定し、これに流砂量公式から求めた流量一流砂量関係を適用する。しかし現状では正確な流量時系列の予測はもちろん、流砂量式の精度にしても問題があり、更に流砂量式が必要とする水理条件にしても互いに影響し合い、実際のダム堆砂の問題に応用する場合に、種々の簡素化の必要が生ずる。

本文は、芦別貯水池における数少ない資料を用い、その堆砂過程のうち特に砂堆の移動に注目し、その実用的な解析法を示したものである。

§2 これまでの諸研究の概要と堆砂の特徴

図-1は一般の浮遊堆砂、掃流堆砂を同時に含む貯水池内の堆砂過程の基本的模式図である。Top-set bed, Fore-set bedは砂堆(ダルタ)とも呼ばれ掃流砂の堆積領域に相当し、Bottom-set bedは浮遊流砂の堆積領域である。即ち、上流から供給される混合土砂のうち、大きい粒径の掃流砂礫は流速が急変する背水の upstream 端付近に堆積し、その前面で河床勾配が急変する砂堆を形成するが、微細な粒子は浮遊をつづけ貯水池の下流端まで達し貯水池全体に堆積するのである。従って砂堆が前進する際は、それ以前に堆積し

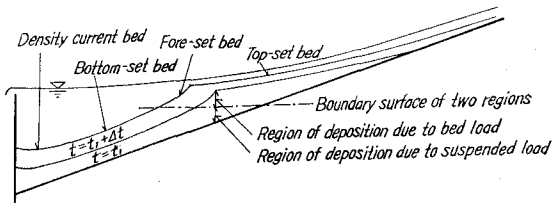


図-1 ダムの堆砂過程の模式図

た浮遊砂の上に、砂堆の肩を通過した大粒径の掃流砂が堆積するため、砂堆の深さ方向の粒径分布はある深さを境として急激に変化し、大粒径の掃流砂堆積層と細粒の浮遊砂堆積層の境界面が存在する。

ダム堆砂の初期の研究は、浮遊砂の貯水池内での挙動の機構が明らかにされていなかったため、浮遊砂の影響を無視できる、即ち、貯水池に流入した土砂が主として掃流形式で輸送される場合について実験的理論的になされた。代表的なものとして、Harrison¹⁾、杉尾²⁾、吉良³⁾、横瀬⁴⁾、山岡⁵⁾、矢野⁶⁾、椿⁷⁾等によるものが上げられるが、そのうち特に砂堆の形状に関するものに注目してみる。

まず砂堆肩より上流の Top-set bed については、一般の河床変動の理論を用いて求める事ができるが、芦田氏等による指数関数⁸⁾、椿氏等による二次放物線⁷⁾にも近似できる。Fore-set bed に対しては、砂堆肩から勾配が急変して水流は河床からはく離するので、前述の河床変動の理論を用いる事ができず、新たな理論が必要となる。砂堆肩の運動に関しては、杉尾氏は数多くの実験結果から、“砂堆肩は水均にクレスト面上を直進する”。と結論しているが、矢野氏⁶⁾は流量・流砂量によって砂堆の高さが変化すると考え、実験事実から得られる——次の仮定を設けて、砂堆の肩の運動を表わす基礎式を導いた。

- (1) 砂堆前面の傾斜角はほぼ水中の安息角となる。
- (2) 砂堆前面で水流ははく離し、砂堆の肩を通過した全流砂量はそのまま砂堆の前面に堆積する。
- (3) 砂堆肩より上流に関しては河床変動に関する一般的な手法が使える。
- (4) 砂堆肩の鉛直上昇成分はその進行方向に比して小さい。

以上は主としてダム堆砂が掃流形式で行なわれる場合の研究であるが、問題とするダム堆砂において浮遊流砂の占める比重は大きく、その上流の掃流々砂に対してもかなり影響を持つ事は明らかで、浮遊堆砂と掃流堆砂を同時に含む場合の解析において、堆砂形状に及ぼす浮遊流砂の影響を、それが理論的に解明できないにしても経験的に加味し

* 北海道大学大学院博士課程1年 土木工学科河川

** 北海道大学工学部教授 土木工学科河川

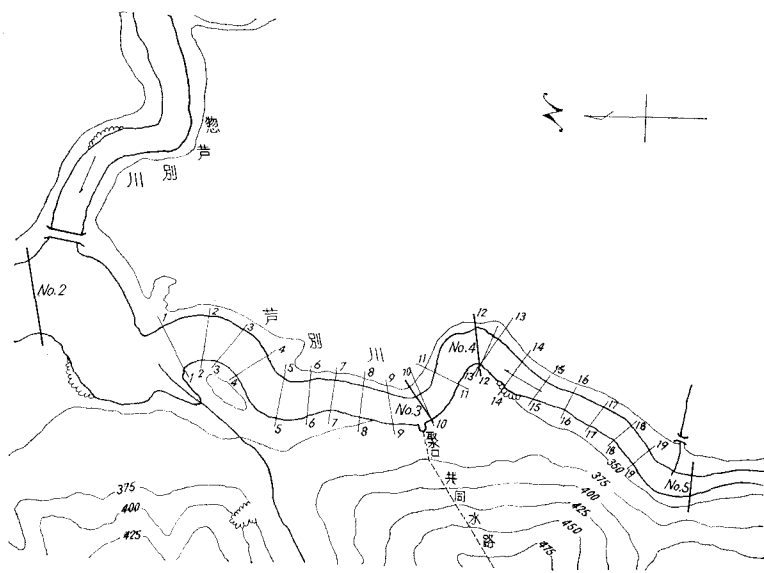


図-2 芦別貯水池堆砂測定平面図

で解析しようとする研究が行なわれた。即ち、前述の浮遊堆砂と掃流堆砂を同時に含む場合の浮遊・掃流堆砂境界面を適当に仮定し、旧河床の代りにこの境界面上に掃流砂が堆積するとし、掃流砂のみを対称とした堆砂計算法を適用するというものもある。その境界面については、中部電力の秦阜ダムの実例⁽⁴⁾、芦田氏らの実験⁽⁸⁾によれば水平面に近似され、平野氏らの実験⁽⁹⁾によれば、下流に傾いた直線平面に近似されている。

§3 芦別貯水池における堆砂の状況

芦別貯水池では昭和32年8月に貯水を開始し、現在に至る間に、昭和40年9月、昭和41年10月、昭和42年10月、および昭和43年10月の4回にわたって横断測量を行ない堆砂の経年変化を測定した。その際の測線は図-2に示す。

(1) 貯水容量の変化と堆砂量

ダム満水位（標高335m）に対する貯水容量を計算し、貯水池堆砂量を求め表-1に示した。

それによると、平均の年間堆砂量は約250 m³/km²・yearである。北海道における貯水池堆砂量としては豊平川流域

約350 m³/km²・year⁽¹⁰⁾、幌別川流域で880 m³/km²・year⁽¹¹⁾等の値が報告されているが、芦別貯水池の値はこれより小さく、堆砂の多い貯水池とは言えない。

(2) 縦断方向堆砂状況

図-3は図-2に示されているNo. 0～No. 5測線の地点における平均河床高の経年変化を示したものである。それによると、堆砂は貯水池全体に及び、特にNo. 2より下流においては、年平均15cm程度で水底にほぼ様な厚さに堆砂している。これに対し、貯水池上流部の堆砂は一様でなく、No. 3, 4の縦断図の変化は砂礫堆の進行過程を示していると考えられる。

更に昭和43年10月に、図-2に示した19測線で貯水池河床の横断測量を行なった。がその平均河床高と最深部河床高を図-4に示したが10測線付近で河床勾配が2分され、砂礫堆の先端が判別できる。

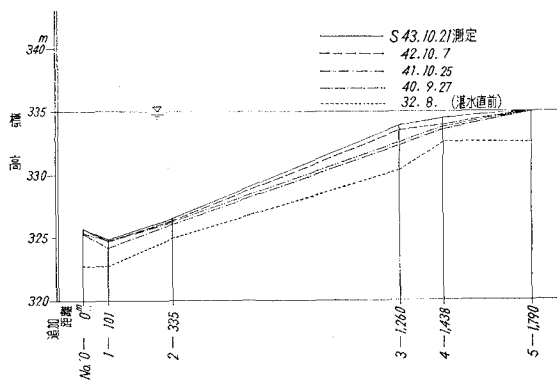


図-3 縦断方向平均河床高

表-1 貯水容量の変化と堆砂量

年 度 (昭和)	貯 水 容 量 (m ³)	年 堆 砂 量 (m ³)	単位面積当り 年 堆 砂 量 (m ³ /km ² ・yer)
40	907,302		
41	875,809	31,493	250
42	842,950	32,859	261
43	810,436	32,514	258

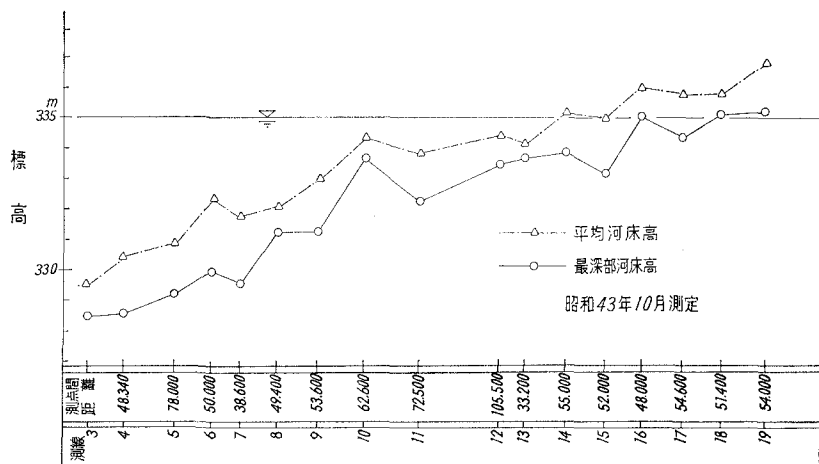


図-4 縦断河床高

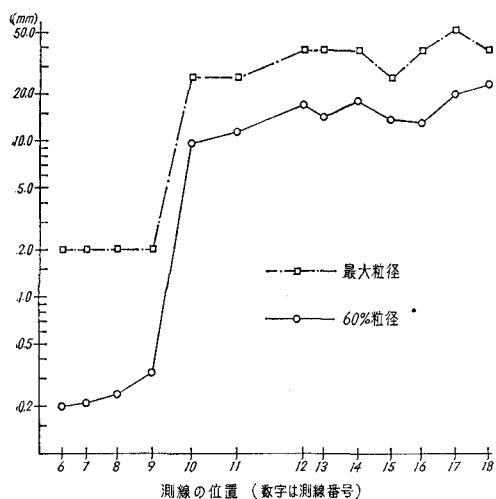


図-5 60% 粒径 (α_{60}) および最大粒径の縦断変化

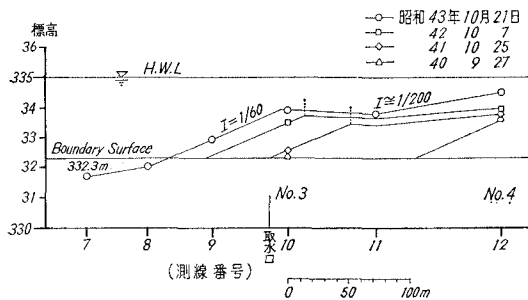


図-6 砂礫堆の移動

(3) 堆砂の粒径分布

更に前述の19測線に於て底質の採取を行ない、粒径分布を調べると(図-5)、測線9と10の間で不連続に変化している、砂礫堆の先端が測線No.3付近に存在するのが明確に認められる。

(4) 砂礫堆の移動

昭和40年～42年までの各年の測定された縦断方向の河床形状は非常に粗いもので、砂礫堆の形状が詳細に識別できない。それで砂礫堆の形状において、① Top-set bedの堆砂は旧河床の上に様な厚さで行なわれ、② Fore-set bedの勾配は同じである、という仮定に基づき、昭和43年10月の測定から得られた比較的詳しい砂堆形状と、昭和40年～42年までの平均河床高の粗い測点から、砂礫堆の移動状況を推定したものを図-6に示す。上述の堆定に従い、更に浮遊堆砂と掃流堆砂の境界面を水平と仮定し、掃流による堆砂量を算出したものを表-2に示す。

表-2 掃流による堆砂量

年 度 (昭和)	No. 4 から 下流の 堆砂量 (m^2)	砂堆の前進 に寄与する 堆砂量 (m^3)	No. 4 から 砂堆肩まで の堆砂量 (m^3)	砂堆の 移動距離 (m)
41	7,370	7,370		124
42	5,250	3,818	1,432	37
43	4,662	2,588	2,074	20

§4 流砂量式及び水力条件

(1) 流砂量公式

掃流による流砂量の計算には篠原・椿の式を用いる。

$$\phi = \frac{qB}{\sqrt{sgd}} = 25\phi_e^{1/3}(\phi_e - 0.8\phi_c) \quad (1)$$

qB : 単位巾当りの流砂量 (実体積)

s : 水中における砂礫の比重

d : 砂礫の平均粒径

ϕ_e : 有効掃流力 $= \frac{u_*^2}{sgd} \cdot \frac{\phi}{\phi_0}$ (無次元)

ϕ_c : 限界掃流力, $u_{*c} = \sqrt{ghI}$ 河床せん断力

$\phi = V/u_{*c}$, V : 平均流速, h : 水深, I : 河床勾配

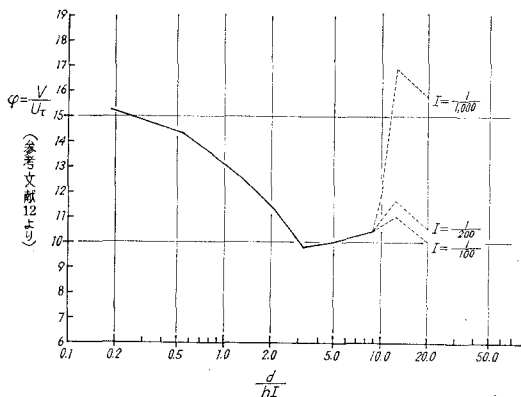


図-7

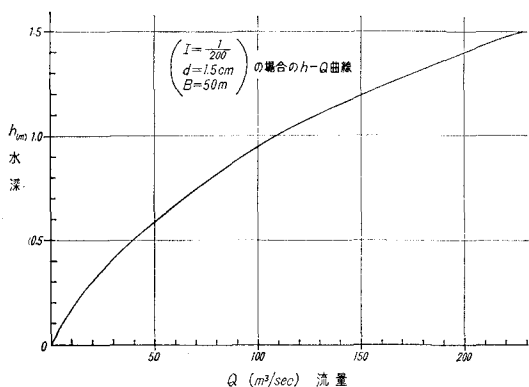


図-8

$$\varphi_0 = 6.0 + 5.75 \log_{10} (h/d)$$

貯水池への流入流量から式(1)によって流砂量を計算するには、河床勾配・河床の砂礫の平均粒径の他に、水深、平均流速を知らねばならない。

(2) 水深—流量曲線

水深—流量曲線を求めるために、芦田氏の資料図¹²⁾ 図-7を用いた。この資料図はマンニングの粗度係数が流量・流砂の存在等の水理量によって変化するので、それらを考慮して粗度係数を合理的に決定しようとしたものである。粒径 d と河床勾配が既知として、水深 h にある値を推定し図-7 ($[\varphi = V/u_*] - [d/hI]$) から φ が求められ、 $\varphi u_* = V$ として平均流速 V が決まり、それから流量が計算できる。その様にして得られた曲線を図-8に示す。またマンニングの粗度係数 n と φ との間には式(2)の関係がある。

$$n = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{g}} \cdot \frac{1}{\varphi} \quad (2)$$

(3) 流砂量計算のための水理量

a. Top-set bed の勾配

§3の(4)での仮定①に従い、砂堆の進行中も一定と仮定し、図-6から $I=1/200$ とする。

b. B (川幅) ≈ 50 m, $s=1.56$, $d=1.5$ cm

c. $\phi_c = u_{*c}^2 / sg d = 0.053$

ϕ_c の値は Shields, 岩垣, 栗原らの諸式を平均したものである。

d. 砂礫の移動限界流量 Q_{er} は次の様にして求まる。

$$u_{*c}^2 = gh_c I = 0.053 sg d$$

$$\therefore h_{er} (\text{移動限界水深}) = 24.8 \text{ cm}$$

$$\therefore \text{図-8 から } Q_c = 15.8 \text{ m}^3/\text{sec} \text{ となる。}$$

§5 流量資料

流砂量を計算するに当り必要となる流量資料としては、芦別貯水池への日最大流入量が与えられているにすぎない。芦別貯水池に流入する河川は、芦別本流と惣芦別川の2本であり、全流域面積 126 km² のうち芦別本流は 70.6 km² を占める。従って芦別貯水池への流入量に流域面積比 70.6/126=0.56 を乗じて芦別本流の流量とした。

§6 流砂量の計算

次の順序に従い計算して流砂量を求める。

(1) §5 に従い芦別本流流量 Q を求める。

(2) 図-8 の $h-Q$ 曲線から h を求める。

(3) $\varphi = V/u_* = (Q/hB)/\sqrt{ghI}$ によって φ を求める。

(4) $\varphi_0 = 6.0 + 5.75 \log_{10} (h/d)$ によって φ_0 を求める。

(5) $\phi = u_*^2 / sg d = ghI / sg d = hI / sd$ を計算

(6) $\phi_e = \phi \times (\varphi / \varphi_0)$ の計算

(7) $\Phi_n = \phi_e^{1.3} (\phi_e - 0.8 \phi_c)$ を計算

(8) $q_B = \sqrt{sg d^3} \Phi = \sqrt{sg d} \times (25 \Phi_n) = 25 \sqrt{sg d^3} \cdot \Phi_n$

$$q_{B \text{ day}} = 24 \times 60 \times 60 \times q_B = (24 \times 60 \times 60)$$

$$\times 25 \sqrt{sg d^3} \cdot \Phi_n$$

$$Q_{B \text{ day}} = B q_{B \text{ day}} = B \times (24 \times 60 \times 60) \times 25 \sqrt{sg d^3} \cdot \Phi_n$$

$$s=1.65, q=9.8 \text{ m/sec}^2, d=1.5 \times 10^{-2} \text{ cm}, B=50 \text{ m} \text{ から } Q_{B \text{ day}} = 7.765 \times 10^5 \times \Phi_n \text{ となる。}$$

但し $q_{B \text{ day}}$: 1日の単位幅当りの流砂量 (m³/m·day)

$Q_{B \text{ day}}$: 1日の流砂量 (m³/day)

§7 計算流砂量の補正

(1) 日平均流量と日最大流量との比による補正

流砂量の計算において流量資料として日最大流量を用いたが、その計算値は過大の値を与える事は明らかである。

ところで流砂量と流量の間には、佐藤・吉川・芦田の流砂量式によれば、式(3)の関係がある。

$$Q_B = w \sqrt{g} n^{9/10} B^{1/10} I^{21/20} Q^{9/10} \quad (3)$$

従って近似的に $Q_B \propto Q^{0.9} \div Q$ が成立し、流砂量は流量に比例することになる。従って日平均流量と日最大流量との比が、補正の上で、計算流砂量に線形的な意味を持つと

表-3 日平均流量と日最大流量との比

年度 (昭和)	(1) 桂沢ダムの 年流入量 (100 km ² 当 (×10 ⁶ m ³))	(2)=(1)× $\frac{126}{100}$ 桂沢から推定 した芦別ダム 年流入量 (×10 ⁶ m ³))	(3) 芦別ダム日最 大流量から求 めた年流入量 (×10 ⁶ m ³))	(4)= $\frac{(3)}{(2)}$ 流入量 比
38	111.48	140.46	241.34	1.72
39	122.27	154.06	248.61	1.61
40	156.61	197.33	289.78	1.47
41	159.90	201.47	335.89	1.67
				1.62

考えられる。従って、芦別貯水池への年総流入量（但し、その資料がないので、芦別貯水池に近い桂沢貯水池に流入する幾春別川の年総流入量の資料¹³⁾があるので、これを用い、面積比によって推定したもの）と日最大流量の総和として年流入量を計算し、両者の比を調べた。その結果、その比は1.5～1.7で比較的一定して、平均として1/1.62を得た。この計算過程を表-3に示す。

(2) 堆砂容積の補正

計算される流砂量は砂礫の実体積である。実体積と見掛けの体積の関係は周知の様に次式で示される。

$$V = \left(\frac{r_w}{r_u} G_s \right) V_s = 1.28 V_s \quad (4)$$

V : 見掛けの体積, V_s : 実体積, G_s : 砂礫の比重
 r_w : 水の単位体積重量, r_u : 砂礫の単位体積重量
 $(r_w = 1.0 \text{ ton/m}^3, r_u = 2.0 \text{ ton/m}^3, G_s = 2.56)$

従って(1), (2)の補正をまとめると、堆砂量を求める式は次のようになる。

$$\begin{aligned} (\text{堆砂量}) &= K \times (1/1.62) \times (1.28) \times \left(\frac{\text{日最大流量による}}{\text{流砂量}} \right) \\ &= K Q_m \end{aligned} \quad (5)$$

K : その他の補正係数

(3) その他の補正

実測の堆砂量、即ち砂堆肩の前進に寄与する堆砂量と、上述の Q_m を比較して表-4に示した。

流砂量の計算は、毎時の流量によらず、日最大流量だけで近似した事、混合粒径の流砂と平均粒径の一樣砂とした事など、いくつかの仮定に基づいた粗い計算であるから、計算値には更に補正が必要な事は当然である。表-4から明らかな様に、各年のその他の補正係数はほぼ等しく $K=0.5$ の値が得られた。したがって、全ての補正係数をまとめると次の式が得られた。

$$\begin{aligned} (\text{堆砂量}) &= 0.5 \times (1/1.62) \times (1.28) \times \left(\frac{\text{日最大流量による}}{\text{流砂量}} \right) \\ &= 0.395 \times (\text{日最大流量による流砂量}) \quad (6) \end{aligned}$$

表-4 補正係数 K の計算

年度 (昭和)	(1) (5)式における Q_m (m ³)	(2) 砂堆の前進に寄与 する年堆砂量	(2)/(1) K
41	14,806	7,370	0.498
42	7,816	3,818	0.489
43	4,961	2,588	0.522

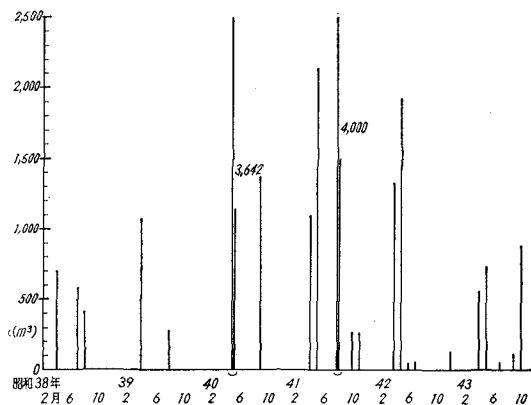


図-9 月別堆砂量

§8 平均年堆砂量の推定

昭和38年～43年の間の日別堆砂量を図-9に示した。6年間の計算結果をみると、堆砂量は4月・5月の融雪期と台風期に集中的に発生していることがわかる。昭和41年8月の異常出水は別としても、堆砂量はかなり大幅に変化する事が認められる。したがって、平均的な堆砂量を推定するには6カ年では短かいと思われる。しかしながら、芦別貯水池の流入量の資料は昭和38年以前のものがなかったので、その分については幾春別川の資料¹³⁾から推定した。

§7の(1)で述べた様に幾春別川の日平均流量から芦別川の日最大流量を求める換算係数は $(70.6/151) \times 1.62$ とする。図-5は昭和38年4月～5月の資料について、芦別川本流の日最大流量および堆砂量を求め、更に幾春別川流量から換算した値を示したものである。それによると両河川で、融雪出水に10日間のズレがあり、幾春別川は早く融雪が始まる。しかし堆砂量は4月～5月の合計量でほとんど一致した値となり、この例から判る様に、幾春別川の流量から計算した堆砂量も信頼できるものである。

図-10は上述の計算によって得られた10年間の年堆砂量である。10年間の堆砂量は5,300 m³であったが、昭和36・37年の2年連続の異常出水の分を除くと10年間の平均年堆砂量は3,900 m³となり、昭和42年の堆砂量に相等するものである。

従ってこの平均年堆砂量を用い、昭和44年の河床形状を前述の仮定、即ち“Top-set bed”は旧河床上に一樣に

表-5

年月日	芦 別		幾 春 別	
	流 量 (m ³ /sec)	堆 砂 量 (m ³)	流 量 (m ³ /sec)	堆 砂 量 (m ³)
38. 4. 25	—	—	18.3	47
26	—	—	24.8	122
27	—	—	16.8	28
28	—	—	15.6	0
29	—	—	—	—
30	—	—	—	—
5. 1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	16.0	10
4	—	—	28.7	167
5	—	—	19.0	56
6	—	—	26.0	135
7	21.8	86	23.2	100
8	31.6	200	—	—
9	24.4	117	18.9	55
10	35.0	250	20.0	67
11	30.5	190	17.9	43
12	24.8	122	22.4	92
13	22.2	90	26.6	140
14	28.6	166	31.2	197
15	34.2	237	24.2	113
16	40.6	360	32.1	210
17	31.0	195	46.2	440
18	26.3	138	31.9	208
19	22.9	99	38.8	305
20	17.1	30	33.3	225
21	23.3	103	31.7	205
22	34.9	250	22.3	90
23	30.9	195	29.0	170
24	33.9	237	31.3	197
25	32.4	213	27.8	158
26	31.6	200	19.4	60
27	19.1	61	—	—
28	16.3	10	—	—
29	20.1	67	—	—
30	—	—	—	—
31	16.6	20	—	—
6. 1	17.1	30	—	—
6. 8	19.1	56	—	—
合 計		3,722		3,640

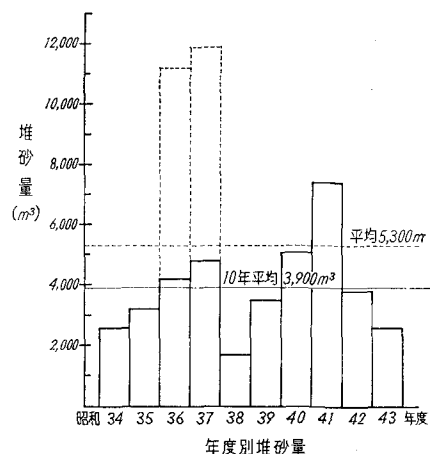


図-10

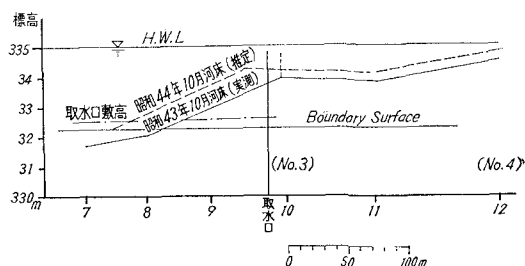


図-11

堆積する”，“Fore-set bed の勾配は変化しない”，“Top-set bed の平均上昇速度は約 30 cm/year である”，の仮定を用い堆定したものを図-11 に示す。

§9 結 論

本論文の結論を要約すれば次の通りである。

1) 芦別貯水池の堆砂は全体では年間約 32,000 m³ であり，流域の単位面積当り堆砂量は約 250 m³ である。

2) 堆砂量のうち約 88% は浮遊土砂とみなされる細粒成分で，貯水池内にはほぼ一様な厚さに堆積している。貯水池の上流に，砂堆を形成しながら堆積する粗粒成分の量は平均して年 3,900 m³ であり，全堆積量の約 12% である。

3) Top-set bed の勾配，Fore-set bed の勾配とも，砂堆の進行中変化せず，各々 1/200，1/60 であり，堆積境界面は標高 332.3 m の水平面と推定される。

4) Top-set bed の上昇速度は約 30 cm/year である。

5) 篠原・椿の流量量式に基づいて，芦別本流の日最大流量から日流砂量を求める関係式を得た。

6) 流量記録を用いて，昭和 34 年～43 年の 10 年間の堆砂量を追算し，10 年平均の年堆砂量として 3,900 m³ を得て，これにより昭和 44 年の砂堆の進行を推定した。

あとがき

本研究で解析に用いた芦別貯水池に関する資料は、電源開発株式会社の提供によるもので、多大の御協力を深く感謝致します。

参考文献

- 1) A. S. Harrison: Deposition of the head of reservoirs, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, I. A. H. R, 1953, 199-225.
- 2) 杉尾捨三郎: 堰による堆砂現象に関する研究, 1960. 堰上流の堆砂現象に関する解析的研究. 土木学会論文集第 32 号, 1956.
堰上流の堆砂現象に関する実験. 土木学会誌第 38 巻, 第 11 号, 1953.
矩形水路における堰による堆砂現象の実用的解法. 信州大学工学部紀要, 第 9 号, 1960.
- 3) 吉良八郎: 貯水池の滞砂面勾配について. 香川大学農学部学術報告, 第 13 巻, 第 1 号, 1961.
- 4) 吉良八郎・横瀬広司: 貯水池のタイ砂機構に関する実験. 農業土木研究, 別冊, 第 1 号, 昭 35.
- 5) 山岡 勲: 堰における堆砂の進行過程とその形状について. 北海道開発局土木試験所月報, 第 104 号, 1962.
- 6) 矢野勝正・芦田和男・定道成美: ダムの背砂に関する研究 (I). 京大防災研究所年報第 6 号 (昭 38. 7).
- 矢野勝正・芦田和男・田中祐一郎: ダムの背砂に関する研究 (II). 京大防災研究所年報第 6 号 (昭 38. 7).
- 矢野勝正・芦田和男・田中祐一郎: ダムの背砂に関する研究 (III). 京大防災研究所年報第 7 号 (昭 39. 3).
- 7) 椿東一郎・増田知行・宮武順造: 貯水池の堆砂過程について. 土木学会年次学術講演集 (昭和 41 年度).
椿東一郎・宮武順造: 貯水池の堆砂過程について (II). 土木学会年次学術講演集 (昭和 42 年度).
- 8) 芦田和男: ダム堆砂に関する研究. 京大防災研究所年報第 10 号 B (昭 42. 3).
- 9) 平野宗夫・右田 真・渡辺訓甫: 掃流浮流砂の流入による貯水池の堆砂過程. 土木学会年次学術講演集 (昭和 42 年度).
- 10) 豊平川流域保全調査報告書: 札幌営林局 (昭 44. 1).
- 11) 幌別川流域治山調査報告書: 水利科学研究所 (昭 42. 12).
- 12) 芦田和男: 河道の設計法 (4)―河川の粗度について―. 土木技術資料, 1-7.
- 13) 多目的ダム管理年報: 昭和 34 年～昭和 41 年. 建設省河川局.
- 14) 中部電力株式会社: 泰阜えん堤上流堆積物調査資料, 昭 40.
- 15) 応用水理学 中 I: 石原藤次郎・本間仁編.