

ダム堆砂に関する研究

芦田 和男・奥村 武信

STUDY ON SEDIMENTATION IN RESERVOIRS

By *Kazuo* ASHIDA and *Takenobu* OKUMURA

Synopsis

Sedimentation in reservoirs is very important subject, because it gives a large influence on the process of sediment transport and the change in water environment.

This paper treats on the annual specific sediment yield, which is very useful index for the prediction of sedimentation, and also on the grain-size distribution of the sedimentation. Rearrangement of data on sedimentation due to dams in Japan shows that the specific sediment yields can be classified to some groups and it is closely related to catchment area for every group.

Taking up the data of sedimentation in the Syo River, a method to estimate the specific sediment yield on the physical background is discussed in detail. The part due to the bed load transport among the specific sediment yield can be estimated by the bed load formula such as by Ashida and Michiue. The part due to the suspended load transport is proportional to the relative area of landslides and square of discharge.

Some interesting characteristics for the longitudinal variation in grain-size distribution of sedimentation due to the dam are also presented from the discussion of the longitudinal variation of shear stress and grain-size distribution feeded from landslides.

1. 緒 言

わが国は国土の2/3が山地によって占められており、われわれの生活の場は、河川扇状地および海岸地域に集中しているので、河川流域における土砂の生産、流出および運搬のプロセスにきわめて影響され易い。一方、流域の開発、ダム等の人工構造物の築造、河川砂利の採取などのために土砂流送の不均衡が生じ、それに伴う各種の災害が顕在化している。すなわち、急激な土砂流出による河道災害、貯水池の堆砂など流出土砂による災害や、河床低下、海岸侵食など流出土砂の不足に基因する災害が生じている。こうした土砂流送の不均衡に伴う変動の実態を明らかにするとともに、将来の変動を予測して適切な防災対策を立てることはきわめて重要な問題であり、その基礎として、流域全体を通じての土砂収支の定量的な解明と収支の不均衡によって生ずる変動量の予知法の確立が現在強く要望されている。

ここでは、土砂の流送過程に大きな影響を与えるダム堆砂の問題を取り上げて検討してみよう。わが国における高さ15m以上のいわゆる高堰堤の総貯水容量は、1955年から急増し、その当時の約25億 m^3 から1970年には約120億 m^3 となっている。これらの貯水池に年々どの程度堆砂しているかをかりに発電用貯水池の堆砂率(1970年現在9%)を120億 m^3 に適用して考えると、堆砂量は10億 m^3 と推定され、その大半は過去15年程度に堆砂しているので年平均して7000万 m^3 程度の堆砂となり、土砂の流送過程に非常に大きな影響を与えていることがわかる¹⁾。こうした傾向は、全国的な観点から貯水池堆砂資料を整理し、堆砂の実態を明らかにしている浅田・石川両氏²⁾の報告にも見ることができる。貯水池の堆砂は今後長期わたって進行するので、将来予測がきわめて重要となる。堆砂量の予測には、流域 1km^2 当りの年間流入土砂量、いわゆる年比流砂量がよく用いられている。本論文においては、まず、マクロの立場から全国各河川の年比流砂量について検討し、

ついで、資料がかなり整っている庄川水系を取り上げて、年比流砂量と崩壊面積や流量などとの関係について詳細に検討し、その算定法について考察する。

土砂流送の特性は、流水と砂れきの特性との関連によって顕著に相異なるので、堆砂量および堆砂形状の予測には粒径別の追跡が必要である。また、ダムの堆砂が、下流の河道部や海岸地域にどのような影響を与えるかは、それぞれの区域の粒径範囲の砂れきがどの程度堆砂するかによるので、堆砂量を粒径別に調べる必要がある。そこで庄川水系を例にとりて、貯水池内での堆積砂れきの篩分け作用や土砂生産地および貯水池上流河道部の河床砂れきの粒度分布と貯水池堆砂の粒度分布の関係などについて考察する。

2. 全国河川の年比流砂量

2.1 年比流砂量と貯水池堆砂量との関係

ある流域から流出する土砂量の程度を示すのに年比流砂量が用いられる。ここに、年比流砂量は1年間1km²当りの流出土砂量のことである。この値は洪水の規模により年により異なるので、その流域の特性を示すためにはかなり長期にわたる年比流砂量の平均、いわゆる平均年比流砂量が用いられる。この値は既往の貯水池堆砂資料から求められるので、年比流砂量と貯水池堆砂量との関係についてまず考察しよう。

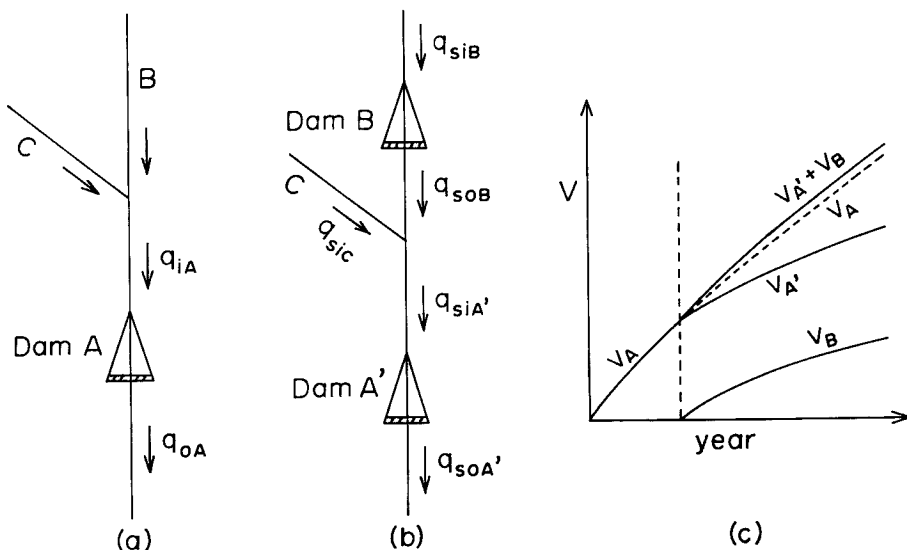


Fig. 1 Schematic sketch for calculation of specific sediment yield.

Fig. 1(a) は、流域に貯水池Aが1ヶある場合である。年間の貯水池への流入土砂量、貯水池からの流出土砂量および貯水池堆砂量をそれぞれ q_{siA} 、 q_{soA} および ΔV_A とすると、

$$q_{siA} = \Delta V_A + q_{soA} \quad \dots\dots\dots (1)$$

貯水池の土砂捕捉率を E とすると、(1)式は次のようになる。

$$q_{siA} = \Delta V_A / E \quad \dots\dots\dots (2)$$

A点の年比流砂量 q_{siA} は年堆砂量 ΔV_A から(2)式を用いて算定すべきである。ここに、 E は流入土砂の量および粒度分布、洪水流量および貯水池の条件などによって支配される。これに対して従来2,3の簡単な経験式が提案されているが、上記の種々の要素により支配されるので今後の検討が必要であろう。しかし、比較的

大きな貯水池で堆砂率（堆砂量/貯水容量）がかなり低い場合には、 E は 1.0 に近く年堆砂量 ΔV_A で年比流砂量を代表させてもよいと考えられる。

次に Fig. 1(b) のように貯水池 A の上流に貯水池 B が造られた場合を考えよう。堆砂量の経年変化は Fig. 1(c) のようになり、貯水池 B の完成後 ΔV_A は $\Delta V_{A'}$ のように減少する。Fig. 1(c) を参照して次式が得られる。

$$\Delta V_B = q_{siB} - q_{soB} \dots \dots \dots (3)$$

$$\Delta V_{A'} = q_{siA'} - q_{soA'} = E q_{siA'} \dots \dots \dots (4)$$

$$q_{siA'} = q_{soB} + q_{siC} \dots \dots \dots (5)$$

したがって、

$$\frac{\Delta V_{A'}}{E} + \Delta V_B = q_{siC} + q_{siB} = q_{siA} \dots \dots \dots (6)$$

上式の関係は B 地点と C 地点および残流域の流砂量の合計が近似的に A 地点の流砂量に等しいとするものであるが、この区間の河道に貯留される砂れきの量が無視できる場合にはその関係は成立する。長期にわたる平均的な値を問題にする平均年比流砂量においては (6) 式の関係を認めてよいであろう。上の考察は、貯水池 2 ケの場合であるが、貯水池群の場合でも同様な取扱いができる。

すなわち、捕捉率 E がほぼ 1.0 である貯水池では、その貯水池を含めて上流にある貯水池群の年間の堆積土砂量の総計をもってその貯水池地点における年比流砂量とみなすことができる。

従来、上流貯水池の影響や堆積による捕捉率 E の減少の影響などを考慮せず、貯水池の堆砂量から機械的に年比流砂量を算定している場合も見受けられるが、上述のようにすべきである。逆に、年比流砂量を用いて堆砂量を算定するためには、まず、その年比流砂量を用いてその地点に本来流下してくるべき流出土砂量を算出しその値から上流貯水池に堆砂すると考えられる量を差し引くべきである。上流貯水池の堆砂量は上と同様な手続きによればよい。このためには、流域の各地点における年比流砂量を明らかにしていかなければならない。

2.2 平均年比流砂量

上述の考察にもとづいて、全国の貯水池堆砂資料から各流域の平均年比流砂量を調べてみよう。いま、捕捉率 E がほぼ 1.0 であると考えられる貯水池として、貯水容量 200 万 m^3 以上、堆砂率 25% 以下のものを取り上げた。また、平均的な年比流砂量を求めるために貯水池完成後の経過年数 10 年以上のものを取り上げた。このような貯水池に対して、それを含めて上流にある貯水池群の年間堆砂量の合計によってその貯水池地点の平均年比流砂を求め、流域面積との関係を示したものが Fig. 2 である。

①群はわが国で最大の流出土砂量を示す黒部川、天竜川、大井川の平均年比流砂量で、他の地域に比して著るしく大きい。②群～③群は、只見川、庄川、吉野川、木曾川、耳川、十津川など流出土砂量の多いとされている河川のものである。④群～⑤群はわが国でも最も流出土砂量の少ない中国地方の河川のもので、④はほぼその上限、⑤はその下限を示している。その他の地域の河川では③～④の間に入るものが多い。それぞれの直線は、

$$q_s \propto A^{-0.7} \dots \dots \dots (7)$$

の関係を示している。この関係は、従来から指摘されているところであるが、この図においても同一の水系の資料（例えば吉野川、三面川、只見川、木曾川など）についてはほぼ成立していることが認められる。すなわち、同一水系に対して流域面積が増加するにつれ、(7) 式の関係で年比流砂量が減少することは、平均的にみると地形こう配や崩壊面積率がこの関係で減少していることを示すものであろう。しかし、詳細にみると、庄川水系などのように流域面積がもっとも小さい地点において年比流砂量がもっとも小さくなっている場合もある。このことは、後記するように、崩壊面積率の分布から説明することができる。

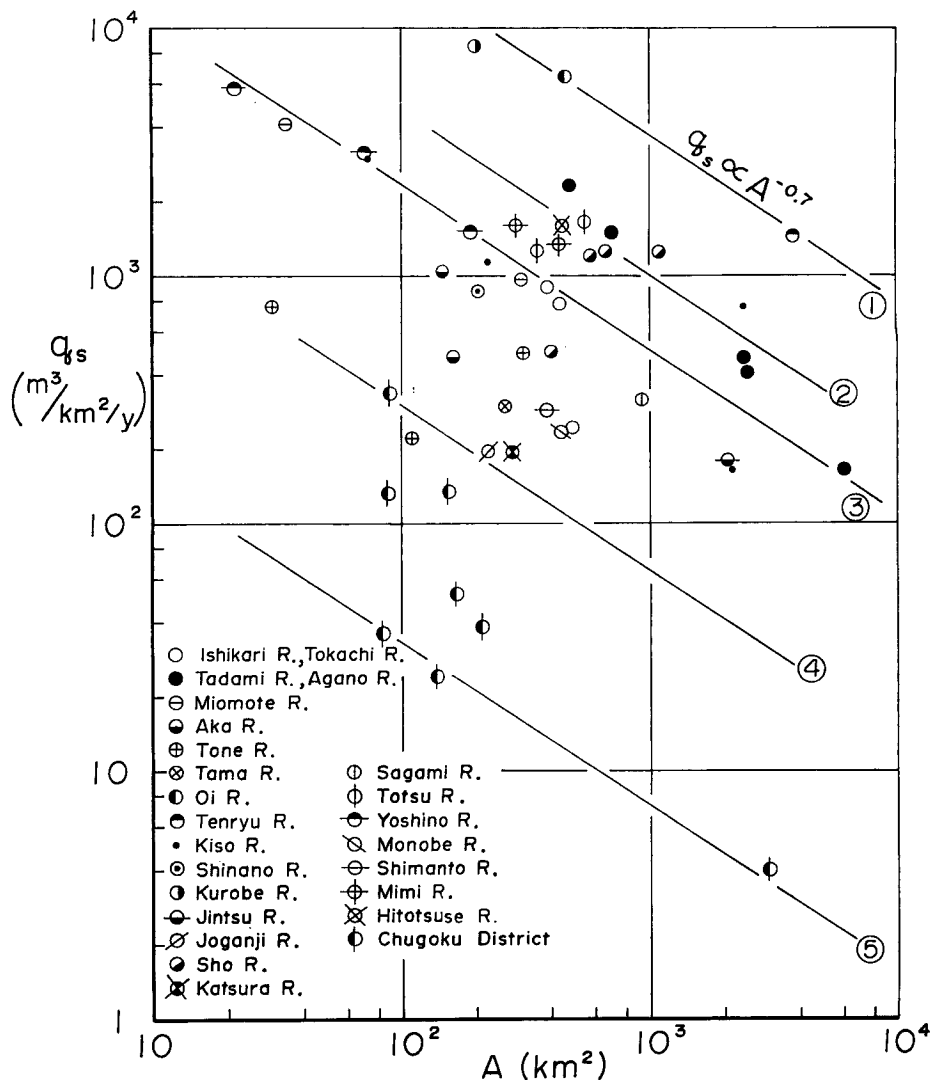


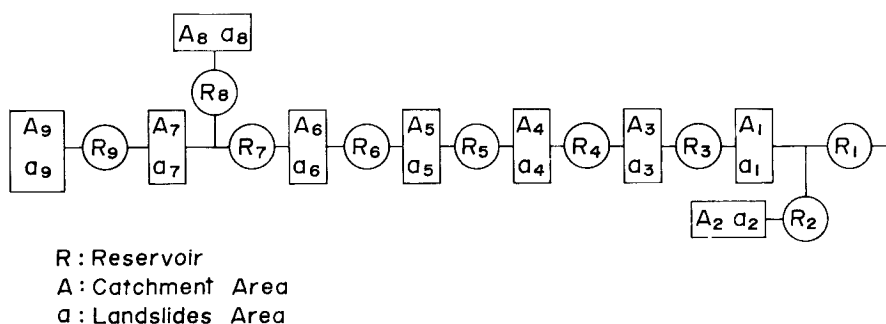
Fig. 2 Relation between specific sediment yield and catchment area in Japan.

Fig. 2 の関係は平均年比流砂量を全国的立場からマクロに捉えられる上では有用であるが、さらに詳細には流量、河川こう配、崩壊面積率などとの関係を検討することが必要である。これについて、次章において庄川を例に取って検討しよう。

3. 庄川水系ダム群の堆砂資料による年比流砂量の検討

3.1 ダム堆砂量と年比流砂量

庄川流域の上流部は河川の水量豊富で水力発電の条件に恵まれ、Fig. 3 に示すように古くから多数のダムが築造され、一大電源供給地帯となっている。それぞれのダムの毎年の堆砂量が測られているので、この資料を用いて年比流砂量と流量および崩壊面積率との関係を検討してみよう。Fig. 3 には各ダムごとの流域面積



No.	Name of Reser.	A (km ²)	a (km ²)	Year of Dam Construction
1	Komaki	79.0	0.126	1932
2	Toga	91.2		1945
3	Soyama	100.7	0.160	1932
4	Obara	91.9	0.508	1943
5	Narude	60.2	0.387	1952
6	Tsubakihara	83.6	0.160	1954
7	Hafogaya	155.8	5.008	1957
8	Oshirakawa	20.7		1963
9	Miboro	398.5	1.843	1961

Fig. 3 System of reservoirs in the Syo River Watershed.

および崩壊面積を示しているが、鳩ヶ谷および大白川の流域の崩壊面積が非常に大きいのが注目される。**Table 1** に各貯水池の建設当時の総貯水量、1970年現在の堆砂量および堆砂率を示す。ここに、堆砂量は満水位以下のもので、満水位以上に堆砂したものは含まれていない。

Fig. 4 は各ダムの堆砂量の年々の累積である。上流にダムが築造されると堆砂量が激減することをよく示している。**Fig. 5** は、それぞれのダムより上流域のダム群の堆砂量を総計したものの年々の累積である。この曲線のこう配から、それぞれのダム地点の年比流砂量を求めることができる。ただし堆砂率がかなり大きい小原ダムでは、砂れきがダム下流へかなり流出しており、過少な値を与えると考えられる。

Table 1 Original capacity and volume of sedimentation in reservoirs (Syo River)

Reservoir	Original Capacity	Volume of Sedimentation (in 1970)	Ratio of Sedimentation %
1	$37,957 \times 10^3 \text{ m}^3$	$6,703 \times 10^3 \text{ m}^3$	17.66
2	1,113	938	84.28
3	32,991	20,248	61.37
4	11,419	9,396	82.28
5	9,709	4,080	42.02
6	22,274	4,238	19.03
7	33,539	7,509	22.39
8	11,000	467	4.25
9	329,655	2,014	0.61

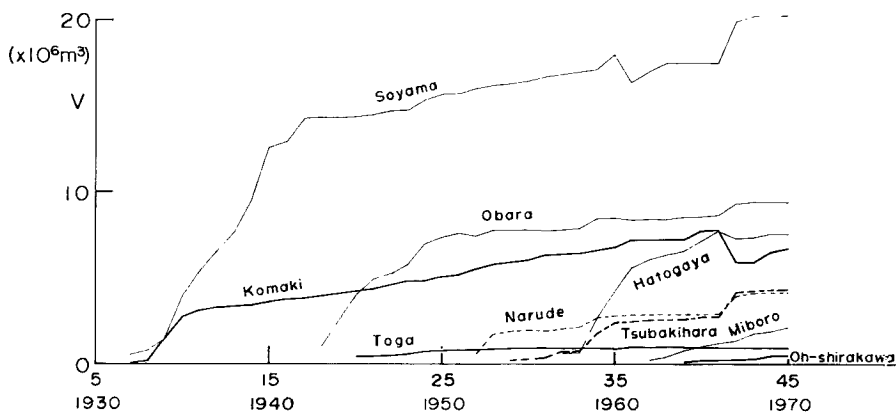


Fig. 4 Accumulated volume of sedimentation in each reservoir.

Fig. 5 のこう配は、1932~'45, '46~'58 '59~'61, '62~'70 の期間ごとにかなり変化しており、これはその期間の洪水流量の規模を表わしている。例えば、'59~'61 間のこう配は非常に大きい、この間にはかなり大きな洪水流量が何回も発生している。また、同一の期間のこう配の比較により、流域の崩壊面積率などの土砂生産に関係する特性と年比流砂量との関係を検討することができる。例えば、鳩ヶ谷は御母衣に比べてかなりこう配が大きい、これは鳩ヶ谷流域に崩壊地を多く持っているためである。以下、こうした年比流砂量と流量および崩壊面積率との関係をさらに検討しよう。

3.2 年比流砂量と崩壊面積率との関係

Fig. 5 から、上述した各期間ごとのそれぞれのダム地点での年比流砂量を求め、それに対応する流域の崩壊面積率との関係を示したものが、Fig. 6 である。年比流砂量と崩壊面積率とは比例的な関係にあることが認められる。ここに、崩壊地の面積は昭和46年の2万分の1の航空写真から読み取ったもので、その結果を図-1に示している。崩壊地の面積を読み取る作業は個人誤差を伴ない易いので、値の絶対値についてはそれほど信をおくことができない。また、1回の写真の読み取りであって、崩壊面積率の経年的な変化を考慮していないなど問題が多いが、年比流砂量と崩壊面積率とがほぼ比例的な関係にあることは認めてよいであろう。

3.3 年比流砂量と流量との関係

年比流砂量 q_s を合理的に推定するためには、水理的な手法を導入することが必要である。こうした研究はすでに江崎氏³⁾によっても行なわれている。いま、掃流砂量を Q_B 、浮流砂量を Q_s 、流域面積を A とすると q_s は

$$q_s = (\int_{year} Q_B dt + \int_{year} Q_s dt) / A \quad \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。ここに、 Q_B は掃流砂量式を用いて算定することができる。一方、浮流砂量については Wash load が大部分を占めるので、流量条件だけでは算定することができず、流域内における裸地斜面の面積、そのこう配、生産砂れきの中で浮流砂の粒径範囲の占める場合、降雨量の中での表面流出成分の割合などに支配され、現状では水理的な計算法のみでは的確に算定することはむずかしく、この方面の研究が進められつつある^{4), 5)}。一方、従来経験的に、

$$Q_s = \alpha Q^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

の関係が広く認められているので、既往の堆砂資料を用いて α の値を算出し、これと上に述べた諸量との関係を実証的に検討していくこともきわめて大切である。いま、簡単な考察から、(9)式の α を (10)式のように表わすと、 α' は α よりは普遍的な係数になると考えられる。鳩ヶ谷貯水池の堆砂資料を用いて、(8), (9), (10)

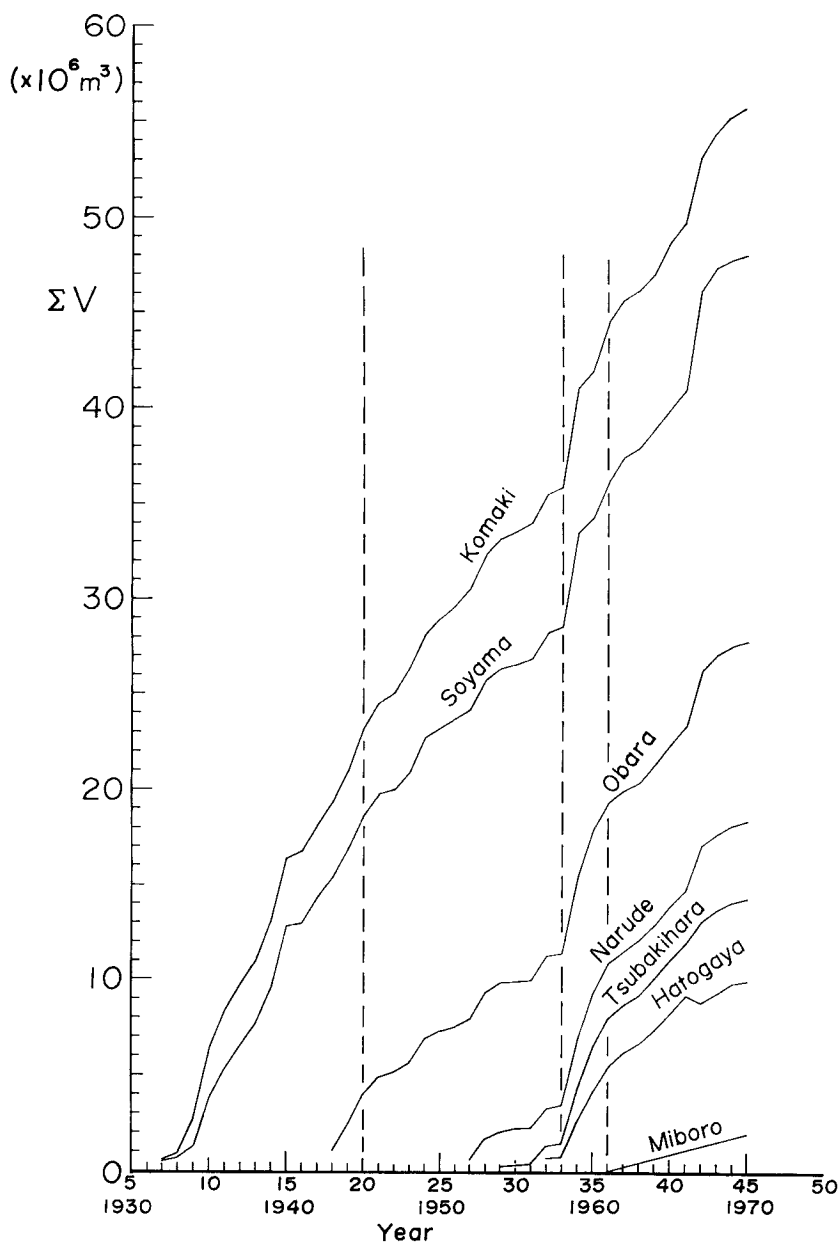


Fig. 5 Total accumulated volume of sedimentation in all reservoirs upstreams from the one.

$$a = a' \cdot I \cdot (a/A) \dots \dots \dots (10)$$

式の妥当性を検討していこう。

流砂量の計算地点をダムによる背水の影響のない 5.464 km の地点に選り、断面形はダム築造直後（昭和32

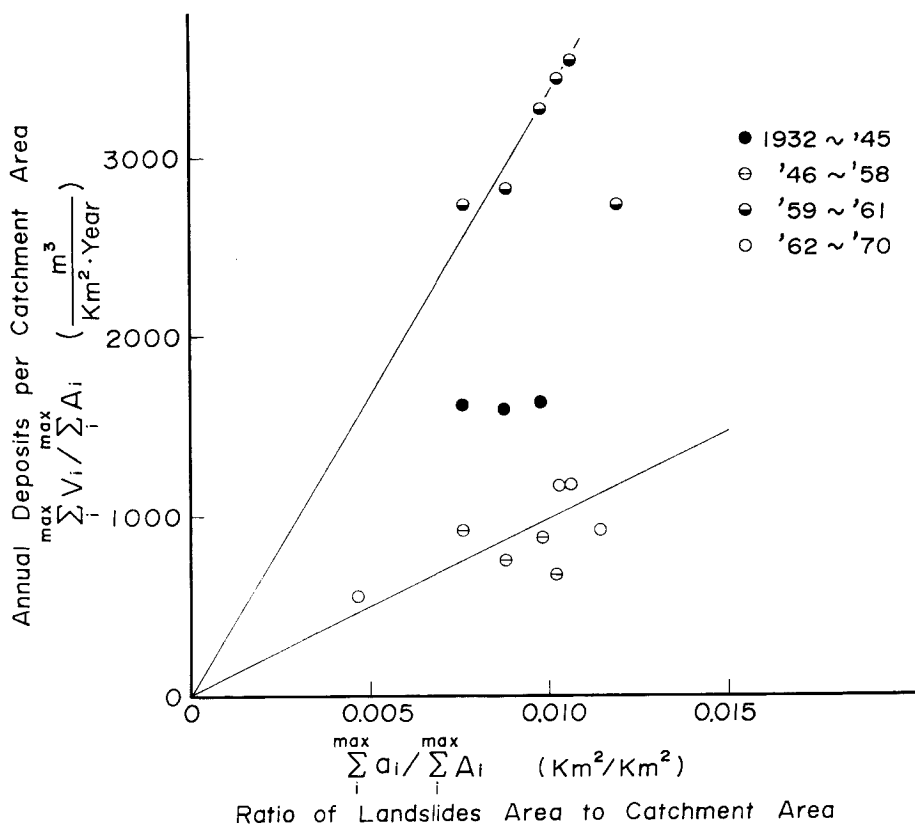


Fig. 6 Relation of specific sediment yield and relative area of landslides.

年11月)と昭和42年11月との平均断面とし、こう配は、昭和43年の縦断面図から1/135とした。流砂量式は、芦田・道上⁶⁾による

$$\frac{q_{Bi}}{f_0(d_i)u_{*e}d_i} = 17\tau_{*ei}(1-\tau_{*ci}/\tau_{*i})(1-u_{*ci}/u_{*i}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

を用い、河床形態は Upper regime にあるとみなされるので、 $u_{*e}=u_{*}$ とし、抵抗則として、

$$\frac{u_m}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{d_{65}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

を用いる。 d_{65} は、昭和48年12月の調査による6.2 cmを使用する。粒度分布はFig. 13の曲線のうち00(ダムによる背砂の生じている地点)で示されるものを使用する。流量記録を用いて、年間の掃流砂量を算定するのであるが、流量—時間曲線が十分に得られておらず、日平均流量、日最大流量とその生起時刻、毎6時の流量に関する資料のみが整備されているので、これらの値から流量—時間曲線を推定して用いた。したがって推定の誤差がかなりあるものと思われる。計算地点の河床は90%粒径の10 cm程度のれきによりアーモークートが形成されているので、この限界掃流力に対する流量300 m³/sec以上の流量階(100 m³/sec)について計算した。計算値と実測値との比較をTable 2に示す。ここに掃流砂量の実測値とは、年間の全堆積量のうちで粒径1 mm(河床砂れきの5~10%粒径)以上のものとして、全堆砂量に一定比率0.43を乗じて求め、さらに、計算地点から満水位までの河床に堆積しているものを加算した。計算値は、実測値に比して若干大きい、流量

一時間曲線の推定の精度，実測値の算定法などかなり問題が多いのでこれ以上検討することは困難であり，計算値はほぼ妥当な値を与えると見ることができる。

次に，(9)式を浮流砂による年間の堆砂量 V_s と全堆砂量 V との割合を P として次のように書きかえて検討しよう。

$$\frac{(P \cdot V)_j}{\sum_{j=1}^n (P \cdot V)_j} = \frac{(\int Q^2 dt)_j}{\sum_{j=1}^n (\int Q^2 dt)_j} \dots\dots\dots (13)$$

ここに， j は各年， n は記録期間の年数を示す。

浮流砂量の大半は降雨による直接流出成分がある場合の流量によってもたらされると考えられる。したがって浮流砂量の算定はこの時間の流量について行なうのが適切であろう。しかしその流量を決定することは容易ではない。そこで，ここでは一つの規準として日雨量 30 mm 以上の降雨に伴う出水を取り上げその流量の立上りから通減曲線の遷移部までの期間の流量を取った。また，積雪のある冬期の11月から4月までの流量は除外した。こうした点については，今後流量と流砂量の実測値を用いて検討しなければならないと考えている。

(13)式における P の値は貯水池により，また，年によって変化すると考えられるが，これを一定とみなして(13)式の関係を示したものが Fig. 7 である。年堆砂量の実測値にかなりの誤差が含まれていると考えられること， P を一定とみなしたことなど問題が多いが，(13)式の関係はほぼ成立していると見ることができる。また，Fig. 6 に示したように，年比流砂量と a/A とはほぼ比例的な関係にあるので，(10)式の関係の α が a/A に比例することは認めることができよう。

この流域に対して， α および α' を求めると，

$$\alpha = 4.7 \times 10^{-6} \quad \alpha' = 1.07 \times 10^{-3} \quad (\text{m}^{-3} \cdot \text{sec})$$

となる。ただし，(13)式の P として堆砂土砂のうち粒径 1 mm 以下の土砂の占める割合 0.57 を用いた。

(Fig. 12 参照) さらに，こう配 I としては一次谷の平均こう配 $I = 0.366$ ， a/A は前記したとおりで 0.012 を用いた。今後，同様な方法により他の流域について α ， α' の値を求めて，流域特性との関係を検討していきたいと考えている。

4. ダムによる堆砂の粒度分布の検討

4.1 貯水池堆積土砂の粒度分布

土砂れきの流送過程は，その粒径によりいちじるしく相違する。砂れきの浮遊限界および掃流限界の摩擦速度をそれぞれ u_{*s} および u_{*c} とすると， $d > 0.1 \sim 0.2$ mm の範囲では $u_{*c} < u_{*s}$ であり， $d < 0.1 \sim 0.2$ mm で

Table 2 Comparison between calculated bed load and observe ddeposit

year	$V_B = \frac{1}{(1-\lambda)} \int_{year} Q_B dt$	
	Calculated Values	Observed Values
1957	$683 \times 10^3 \text{m}^3$	$273 \times 10^3 \text{m}^3$
58	512	77
59	747	869
60	752	712
61	316	607
62	0	185
63	0	108
65	801	259
68	166	85
69	492	167*
70	0	16*
71	36	217*
Total	4, 505	3, 575

* only below the normal water level

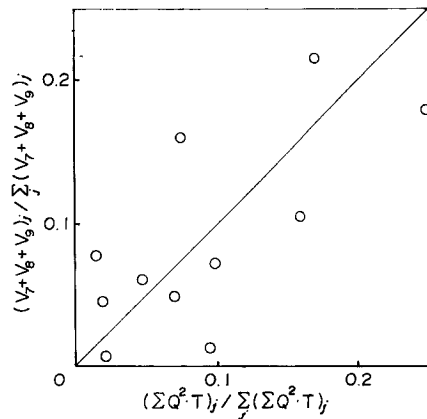


Fig. 7 Relation of sedimentation due to suspension and discharge for Hatogaya Reservoir.

は $u_{*c} > u_{*s}$ である。したがって、掃流力が増加すると前者ではまず $u_* = u_{*c}$ の条件があらわれ、砂れきは掃流形式で移動を開始し、さらに掃流力を増加して $u_* = u_{*s}$ に至ると砂れきは浮遊しはじめ $u_* > u_{*s}$ の範囲では u_* の増加につれて掃流形式で輸送されるものに比して浮遊形式で輸送されるものが支配的となる。しかし、いずれにしても貯水池内では掃流形式を取り、デルタの形式で貯水池を埋没させる。これに対して、 $d < 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ の範囲では $u_{*c} > u_{*s}$ であって、掃流力を増加させると、まず、 $u_* = u_{*s}$ の条件があらわれ、粒子は浮遊形式で輸送され、その逆に u_* が減少すると同じ条件のところで堆積しはじめ、堆積した粒子は掃流形式で輸送されることはない。すなわち、 $d = 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ を境にして大きい砂れきと小さい砂れきとは堆砂の機構が異なるので、貯水池内で明確に篩分けられることになる。このことを検討するために庄川水系の8ヶ所の貯水池で堆砂の粒度分布を調べた。その結果は **Table 3** に示すとおりであり、上述の事実を明確に示している。さらに詳細に見ると次のことが認められる。

i) 鳩ヶ谷、椿原、成出、祖山および小牧貯水池では浮遊砂の堆積領域と掃流砂の堆積領域とに明確に区分されている。これは、採取場所がデルタよりかなり下流部および上流部に取られたためである。これに対して、利賀および中野貯水池では、両者の中間的な粒度分布特性を示している。このことは、浮遊砂の堆積領域

Table 3 Particle size characteristics of reservoir sedimentation

Sampling plot		Size range and some extra remarks	Clay %	d_{50} (mm)	Type of sedimentation
Reservoir	Depth below N.W.L.				
Hatogaya	23m	< 0.2mm	5.0	0.038	S
	6	0.2~38	—	1.4	B
Tsubakihara	27	< 0.2	6.4	0.041	S
	2	0.2~30	—	6.0	B
Narude	27	< 0.2; 96%	14.1	0.042	S
	23	< 0.2; 90%	4.9	0.062	S
	3	0.2~31	—	8.0	B
Obara	5	< 0.2; 36% > 5; 59%	—	11.0	S + B
	—	> 5; 93%, $d_{max}=36$	—	18.0	B
Soyama	15	< 0.1	12.7	0.02	S
	6	0.1~45	—	2.2	B
Komaki	31	< 0.2	12.0	0.019	S
		1~40	—	18.0	B
Toga	2	< 0.2; 90%, $d_{max}=0.7$	2.6	0.065	S
	1	< 0.2; 60%, $d_{max}=1.0$		0.16	S + B
Nakano	6	< 0.1; 13%, $d_{max}=1.0$		0.22	B
	2	< 0.1; 6%, $d_{max}=80$		44.0	B

clay; $d \leq 0.005 \text{ mm}$

B: sedimentation of bed load

S: sedimentation of suspended load

と掃流砂の堆積領域との境界は貯水池の水位や流量によって若干移動するので、両者の間に遷移的な区間があると考えられるが、利賀および中野ではこの遷移区間から資料を採取したためではないかと考えられる。

ii) 小原貯水池の堆砂の粒度分布は特徴的なパターンを示す。すなわち、他の貯水池においては掃流砂堆積領域に 5 mm 以下の砂れきが相当量存在するのに対して、この貯水池の堆積土砂にはこの部分の砂れきはほとんど存在しない。これは、堆砂がダムクレストまで達しているため洪水時ゲートを開放した時の流速が大きく、この粒径範囲のものが流出してしまうためであろう。また、0.2 mm 以下の粒子が相当量存在するのはゲートを閉めてから沈降したものではないかと推察される。

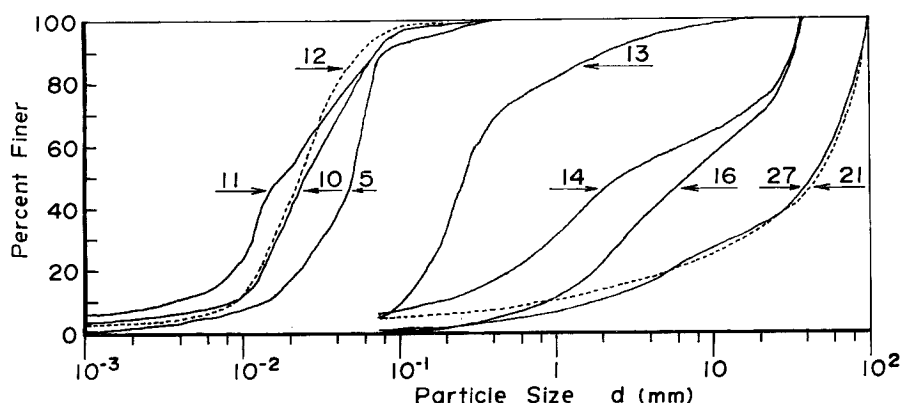


Fig. 8 Grain-size distribution curves sampled in Hatogaya Reservoir.

貯水池堆積土砂の粒度分布の流下方向の変化をさらに詳細に検討するために、鳩ヶ谷貯水池で Fig. 9 に示す測点について堆積土砂の粒度分布を調べた。その結果を Fig. 8 に示している。また、各粒径範囲ごとの割合、 d_{max} 、 d_{65} などの縦断変化を Fig. 9 に示している。堆積砂れきの粒径は堆砂形状におけるデルタ付近から下流にかけて急激に細くなっており、明確な篩分け作用が働いていることが知られる。

各粒径範囲ごとの堆積の生ずる場所は、流量および貯水池水位により変動するので、計算によってその変動の程度を調べるとともに、計算値が実測値とどの程度適合するかを検討してみよう。粒径範囲ごとに堆積の生じる位置を計算により推定することが可能になれば、そのような計算法を各年度の堆砂形状に適用して、貯水池堆砂の各粒径範囲ごとの割合を推定することもできる。

計算は、鳩ヶ谷貯水池および小牧貯水池について元河床および1968年河床を対象として次のような手順で行なった。i) 貯水池水位は既往の実績から常に常時満水位に保持されているものとする。ii) 流量を数段階変化させる。iii) 河道の粗度係数を河床砂れきの平均粒径から算定する。iv) 上の諸量を用いて不等流計算により各断面の u_* を算定し、 $u_* = w$ (沈降速度) の条件で各粒径範囲ごとの堆積の生じる位置を求める。

計算の結果は Fig. 10 に示すとおりであり、各粒径ごとに堆積を開始する位置が流量によって変動する状況を知ることができる。浮流砂に対する平均的な流量と考えられる $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ に対する各粒子の堆積開始位置を Fig. 9 に示した。実測値の傾向と比較的よく一致する。

貯水池堆積土砂の粒径別の割合を知るために、まず、貯水容量および堆積土砂量の鉛直分布を調べたものが Fig. 11 である。両者はほぼ同様な傾向があり、各深さの所にその面積割合で堆積していることを示している。ただし、水深が 20 m より深い所で貯水容量の割合よりは多く堆積しているが、これはこの区間の堆積がほぼ水平になっていると考え合わせて、密度流によって輸送されたためではないかと推察される。

貯水池内における堆積土砂の粒度分布は、Fig. 10 の計算結果からも知られるように同じ水深の所でもその

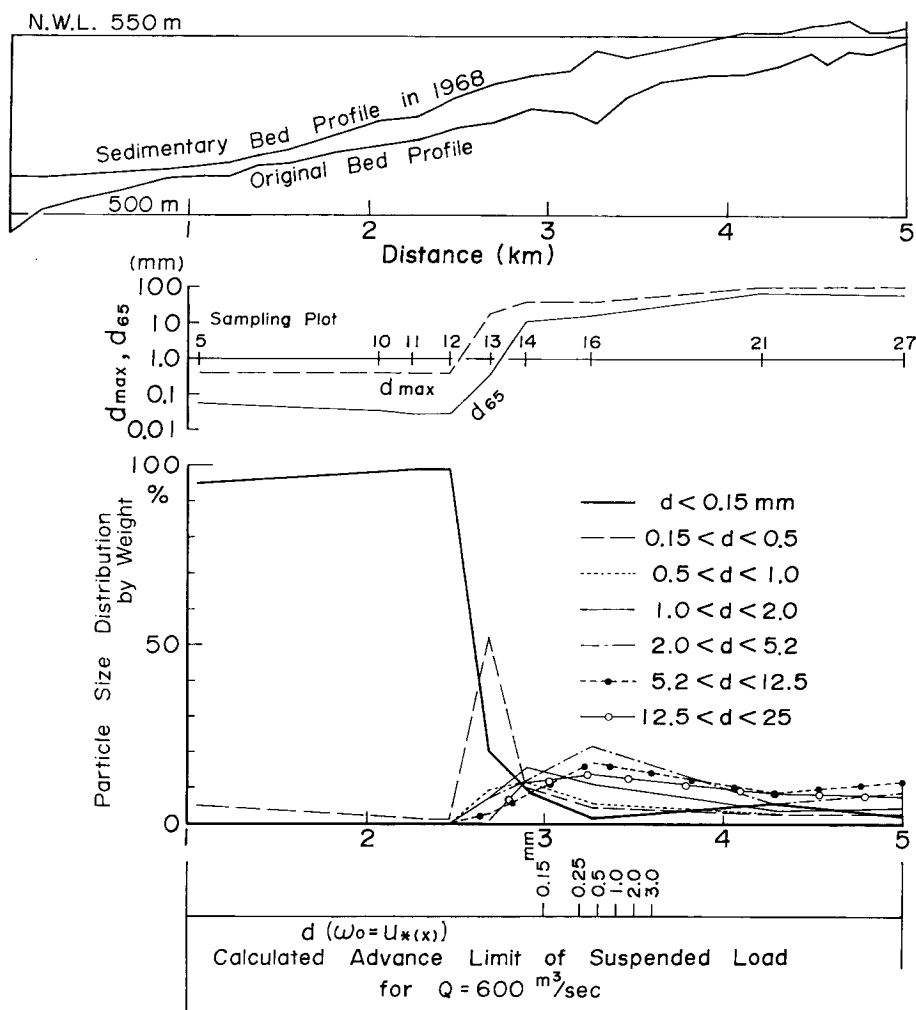


Fig. 9 Longitudinal profile and variation in grain-size distribution in Hatogaya Reservoir.

地点の河幅により若干相違する。しかし、貯水池堆砂の粒径割合の大略を知るためには、同じ水深の所では同一の粒度分布を示すと仮定してもさしつかえないであろう。そこで、Fig. 9 の Sampling plot の深さから隣接する plot の中間の深さまでの層は、その地点の粒度分布で代表できると仮定して、これに Fig. 11 からこの層に堆積している土砂れき量の全堆砂量に占める割合を求めて乗じ、各粒径階が全堆砂量に占める割合を求めたものが、Fig. 12 の貯水池堆積物の粒度分布である。この際、空隙率は粒径のいかんにかかわらず一定とした。

Fig. 12 は、粒径の対数がほぼ一様な頻度分布を示すという関係を表わしており興味深い、これは生産地の砂れきの粒度分布とダム上流域の河道における各粒径に対する砂れきの貯留効果の相違を反映するもので、その一般性については論ずることはできないが、興味ある事実であるので同様な検討を他の地域の貯水池についても行ないたいと考えている。

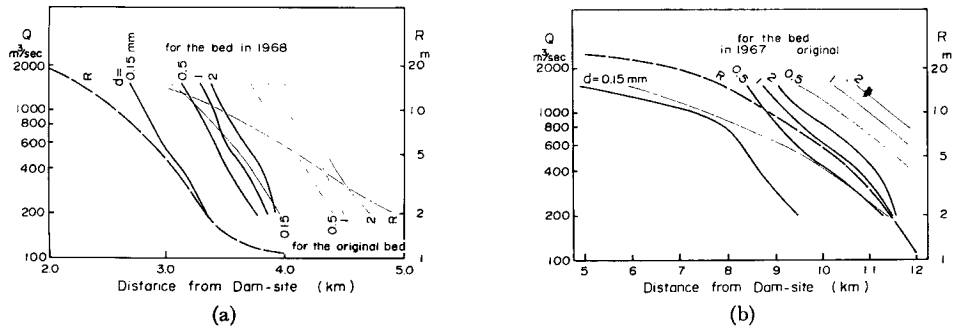


Fig. 10 Calculated advance limit by suspension in Hatogaya Reservoir (a) and in Komaki Reservoir (b).

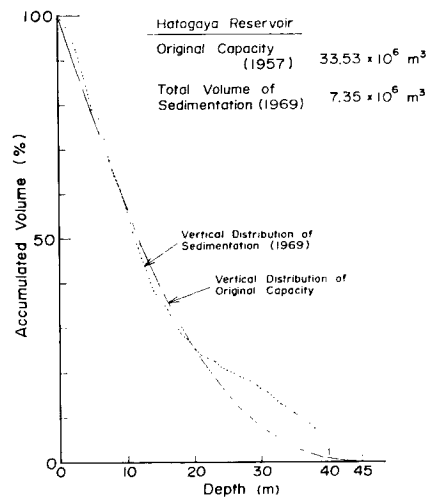


Fig. 11 Vertical distribution of original capacity and sedimentation in Hatogaya Reservoir.

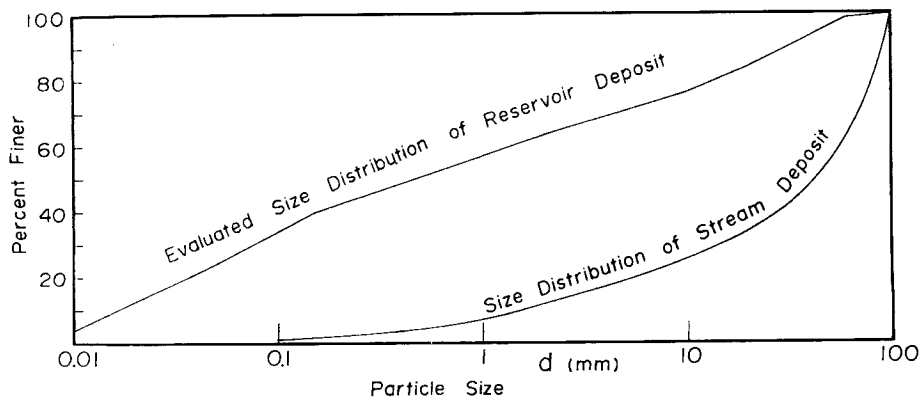


Fig. 12 Evaluated size distribution of deposit within Hatogaya Reservoir.

4.2 背砂と上流域河床砂礫の粒度分布

前節において述べたように、浮流砂の堆積領域と掃流砂のそれとでは、粒度特性は著るしく異なる。前節では、主として浮流砂の堆積領域について考察したので、ここでは、掃流堆積物なかでも背砂の粒度特性について検討を加えてみよう。背砂の粒度分布は、その量と相俟って、貯水池上流の河床勾配を大きく支配し、河床上昇にともなう災害発生に直接結びつく要素となるものであるから、この分布の予測が的確になされるならば、いわゆるダム災害軽減防止の一助ともなる点で、この検討の必要性は大きい。また、ダム背砂の粒度は、山腹斜面から供給された土砂礫のうち、いわゆる wash load となる部分が速やかに除去されてしまっているうに、その流送経路の勾配、流量の変化にしたがって流送可能な粒径の上限がおのづと決まってくる河床堆積現象あるいは流量の変動にしたがう一時的貯留の影響を受けているものと考えられるから、逆にダム背砂、河床堆積物、山腹生産砂れき等の粒度分布を比較検討することは、それぞれの量的な結びつけの途を拓くものともなりうる。その詳細な検討は機会を改めて行なうとして、ここでは粒度の変化の実態に関する現地調査の結果について多少述べておくことにする。

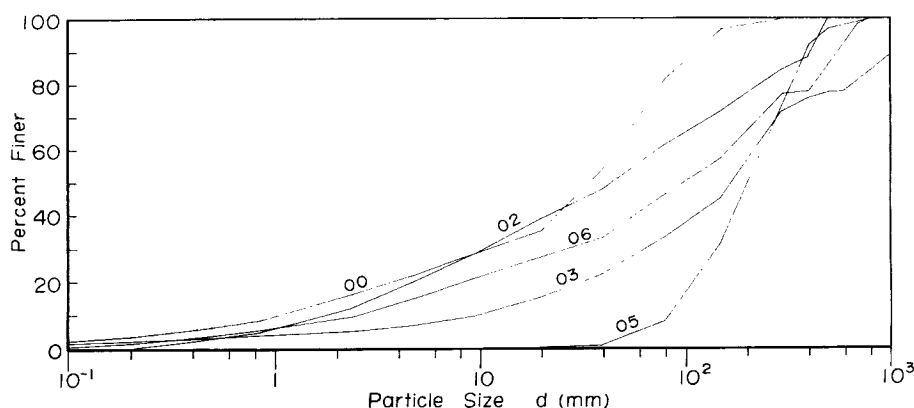


Fig. 13 Grain-size distribution of the sediments on the delta due to the reservoir and on the river bed, and of the sediments yielded in Hatogaya Watershed.

Fig. 13 は、鳩ヶ谷貯水池背砂の主たる供給源となっている大白川流域において調査した河床砂礫粒度分布の2,3の例である。00は鳩ヶ谷ダムの背砂のもので、さきの q_B の計算には、この曲線を使用している。02はダムより 17 km 上流、勾配 3° の河床におけるもので、狭窄部上流の堆積物である。03は、標高 1700 m にある雪溪上を覆う堆積物で、冬期の雪崩や、融雪期に斜面から崩落したものと思われる。8月の調査時にも、浸透水に伴なう崩落による供給が続いていることから、これを山腹から生産される砂礫の粒度と考えていだろう。05は、この雪溪に合流する文溪の合流点に、約 30° の勾配で堆積しているもので、流れは伏流してしまっているうに、この部分だけがすでに河床を露出していることから、夏期の出水を幾度も経験して、なお残存したものである。06は、この雪溪下流端から 30 m ほど下流の勾配 12° の溪床上に形成された土石流通に伴なう小段丘を構成する砂礫である。なお粒度調査は、河床横断方向の数ヶ所において、1 m $\times$ 1 m の河床面を写真撮影し、この写真から 2 cm 以上の礫を計数し、この個数分布を重量分布に換算するとともに、試料を持ち帰り篩分けした 38.1 mm 以下の粒度曲線と、重複する 20 (19.1) mm $\sim$ 40 (38.1) mm が同重量になるように接合して加積曲線とした。

Fig. 13 にもとづいて若干の考察を行なった結果、次の点が指摘できるようである。

- 1) 流送砂礫の粒径選択は、生産地にごく近い短区間で行なわれている。
- 2) 各地点での粒度曲線のちがいは、100 mm 以上の粒径割合によって支配されており、100 mm 以下の粒

度は流送区間においてはほとんど変化しない。

3) 100 mm 以下の粒径範囲では、さきに主として浮遊形式の輸送が行われるとした 1 mm 程度以下の砂の存否が粒度を大きく左右するようであって、その割合は、生産地におけるものと背砂のものとは非常に近いものとなっている。

5. 結 語

流域内の土砂流送過程に大きな影響を持つダムの堆砂について検討を加えた。

まず、ダム堆砂量を算定する上で重要な流域の平均年比流砂量について全国的な立場から検討を加えた。平均年比流量は十分な捕捉率を有する貯水池を対象として、その貯水池の堆砂量のみならず、上流域に存在する総ての貯水池の堆砂を加算して求めるべきであって、その規準によって貯水池堆砂資料を取捨選択すれば、平均年比流砂量は Fig. 2 に示すようにいくつかのグループごとに流域面積と密接な関係があることが示された。

さらに、各河川の流量条件、砂れきの生産に関係する地形・地質の条件ならびに流送砂れきの特性を的確に表示する指標を導入して、これらの直線群を統一的に説明する関係式を明らかにすることが重要である。そうした試みの一つとして、庄川水系のダム群とくに鳩ヶ谷ダムによる堆砂に関する資料にもとづいて年比流砂量に関して考察した。Fig. 5 に示したように、過去40年間に、土砂流出の面からみて様相を異にする4つの期間が含まれているが、いずれの期間においても、流域の崩壊面積率に対しては、かなり強い相関を有している。崩壊面積率は、土砂供給源の多少そのものを表現するものであるが、それと同時に、時間的にいくらか変動するけれども、平均的に表示できれば、流域の地質、地形条件、長期的な降雨量の多寡を端的に表現するものであるから、多くの河川における比流砂量の差違を統一的に取り扱おうとするとき、有用な指標となる。もっとも、地質条件、地形条件、平均降雨がいかに関連しあって、ある崩壊率を与えることになるかすでに1つの研究課題となるところであるが、うえの4つの期間の比流砂量の差違は、おそらく各期間内における平均流量の変動によってもたらされたものと考えられる。

ところで、流量と堆砂量との関係を論ずるばあい、ダム堆砂量を浮流によるものと掃流によるものに区分して取り扱うのが適当であると考え、鳩ヶ谷ダムの堆砂全量を粒度分布にもとづいて二分したうえで、それぞれ流量との関係を検討した。計算に使用した基礎数値そのものが精確さを欠いていることによる誤差はあるが、式(8)～(11)による算定が可能であることがわかった。さらに、堆砂の進行に伴って、浮流砂が堆積を開始する位置が各粒径ごとにどの様に前進するか、したがって貯水池内の粒度分布がどの様に変化していくかの予測に結びつく計算手法も示した。これによって、流量頻度の予測が的確に行なわれれば、上流河床の砂れき粒度にもとづいて、ダム堆砂の進行の予測が可能になるものと思われる。

上流河床あるいは生産地に近い場所での砂れき粒度とダム背砂の粒度の変化について最後に検討した。鳩ヶ谷ダムの背砂は、100 mm 程度以下の粒度は生産源に近いものとあまり変化しないこと、途中の河床堆積物はいわゆる Wash load となる 0.1～0.2mm 以下の粒径部分が少ないことがきわだった差であり、その変化はかなり短い流送区間内におわってしまい、それからダムに至る長い流送区間ではあまり変化していないことがわかった。この欠除した部分がダムに捕捉され、ダム堆砂のうち、浮流による堆砂と掃流による堆砂が量的にほとんど同程度のものとなっている。したがって、このような粒度変化の検討によって、生産地からダムに至る、さらには水系にわたっての流砂の量的な追跡も可能になってくるであろう。

なお、Fig. 12 の貯水池内堆砂の粒径の対数がほぼ同一の頻度を与えるという関係は興味深い。これらは庄川流域の流送砂礫の特性、流域の特性に大きく支配されているものであって、今後こうした研究を他の流域についても行ないさらに一般性のある比流砂量と粒度分布を算定する手法を確立していかなければならない。

なお、本研究を推進する上で、貴重な資料を御提供下さった関西電力株式会社の関係各位、現地調査、資料整理に多大の労を煩わした吉田義則技官、大学院生田中健二君に深謝するとともに、本研究が文部省科研費(自然災害特別研究)―土砂の流送・運搬に伴う自然環境の変化に関する研究、(研究代表者石原藤次郎名誉教

授)一の援助を受けたことを付記し、関係各位に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・芦田和男：土砂の流出流送とそれに伴う自然環境の変化—総論的問題—，第9回災害科学総合シンポジウム論文集，1972.
- 2) 石川晴雄・浅田 宏：発電用貯水池土砂堆積状況に関する調査報告書，電力中央研究所技術第二研究所報告：72019，昭和48年6月.
- 3) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究，建設省土木研究所報告，第129号の2，昭41.
- 4) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一：ウォッシュ・ロードの流下過程に関する数値解析，第18回水理講演会講演集，1974.2.
- 5) 芦田和男・高橋保・奥村武信・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出，(1)，(2)，(3) 京大防災研究所年報，15号B，16号B，17号B，昭47.4，48.4，49.4.
- 6) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972.10.