

ダム堆砂の支配要因について

CONTROL FACTORS OF RESERVOIR SEDIMENTATION

河田恵昭¹・植本 実²
Yoshiaki KAWATA and Minoru UEMOTO

¹フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 工修 日本工営株式会社 大阪支店 (〒160 大阪市福島区福島7-20-1)

In order to construct and manage dam reservoirs, it is very important to estimate volume of sedimentation. However, it is very difficult because reservoir sedimentation is effected by many control factors such as rainfall in flood, geology, scale of reservoirs, catchment area, etc. In this paper, mechanism of reservoir sedimentation is divided into three areas; production in the mountain area, transportation of the flood channel, and trapping in the reservoir. The control factors of reservoir sedimentation are discussed in detail. On the basis of the field data of the reservoirs in the Tenryu River, a method to estimate volume of reservoir sedimentation is proposed. Volume of sedimentation calculated by this method is good agreement with the field data.

Key Words : reservoir sedimentation, sediment budget, estimation of sedimentation

1. 緒 論

ダムの貯水池計画を行ううえで、堆砂計画は事業の経済性や妥当性を左右する極めて重要な問題である。なぜなら、堆砂容量を過小評価すれば、長期間にわたって貯水池の機能を維持していくために堆砂の除去が必要となる危険性が高く、また、過大な計画堆砂量を設定すれば事業の経済性が悪化し過大な投資となる。

しかしながら、堆砂は、降雨、地形・地質、土砂の粒度構成、流域面積、貯水池規模など多くの要因が複雑に関連した現象であるため、精度の高い堆砂量予測は難しく、現在のところまだ合理的かつ適切な堆砂量の設定方法は定まっていない。多くのダム計画では、地質や水文条件が類似した近傍のダム貯水池の実績比堆砂量をもとにしているのが現状である。

堆砂量の予測に関する研究は、これまで数多く行われている。これらの成果によって、貯水池堆砂量と定量化が可能な支配要因の相関関係にある程度推定することが可能である。しかし、これらの研究当時には貯水池実績が少なかったことや、多くのものが統計的な相関関係で求められているため、実際の貯水池計画における汎用性は低い¹⁾。

このような堆砂計画の現状から、本論文ではダム堆砂機構に基づき、ダム堆砂量の予測方法について検討を行った。ここでは、山地での土砂生産、河道の輸送、および貯水池での捕捉に区分し、それぞれ

について堆砂の支配要因との関係を詳細に評価するとともに、堆砂の合理的な予測方法について述べる。さらに、我が国で最も土砂流出の大きい河川の一つである天竜川を取り上げ、提案した予測方法の適用性を検証する。

2. 堆砂機構に基づく堆砂量予測式

(1) 堆砂の支配要因

従来の堆砂量予測式に用いられている支配要因を大きく区分すると、次のようになる。

- A: 流域での土砂生産量を表す指標として、岩種、崩壊地の割合など地質条件や、山地の斜面勾配
- B: 河川流量や、洪水時の降雨量などの外力
- C: 貯水池での捕捉能力

また、堆砂量を支配する現象および関連する要因を表-1にまとめて示した。

表-1 堆砂機構と関連する支配要因

	堆砂機構	現象
A	山地での土砂生産	表面浸食 地すべり 斜面崩壊
B	河道での輸送	土砂輸送 堆積物の流出
C	貯水池での捕捉	微細土砂の捕捉 堆積

(2) 堆砂機構に基づいた堆砂量予測式の基本形

ダムは一般に山地の溪谷に築造されるため、河道内の土砂生産は山地と比べて非常に少なく、それぞれを、土砂生産、輸送、堆積機構という独立した機構であると仮定する。

堆砂率が大きくない一般的な貯水ダムを対象とすれば、堆砂量予測式の基本形は次のようになる。

$$\text{堆砂量} = \text{掃流砂の流送量} + \text{ウォッシュロード生産量} \times \text{貯水池の捕捉率} \quad (1)$$

上式は、江崎(1966)²⁾が提案した予測式とほぼ同様であるが、堆砂のうち掃流砂(bed load)の捕捉率は100%と考え、ウォッシュロード(wash load)のみが貯水池内での滞留時間によって捕捉率が変化すると考えた。

以下、天竜川水系の貯水池堆砂実績資料を取り上げて、上式を実用的な形へ展開してみることにする

3. 天竜川水系ダム群の堆砂実績

(1) 天竜川水系の概要

a) 流域

天竜川水系は、その源を長野県中央部に位置する諏訪湖に発し、諸支川を集めながら伊那谷を経て、中流部山岳地帯を南下流し、天竜市鹿島地先において遠州平野に入り遠州灘に注いでいる。流域面積は5,090km²、幹線流路長は213 kmの一級河川である。

諏訪湖より上流域の支川はすべてここに集められ、ほとんどすべての土砂を捕捉していると推定されることから、流域の土砂収支を考える上では諏訪湖が上流端と考えることができる。

ダム群が設けられている山地流域は河床幅が比較的狭く、両岸が切り立った山岳地帯であるのに対し、鹿島地点より下流域は河床幅が広い丘陵地もしくは平地であるのが特徴である。流域の構成は山地面積93%、平地面積7%となっており、土砂生産地である山地の割合が大きい。

本川の縦断勾配は上流で1/200~1/250、中流で1/500、下流部の河口付近でも1/900程度であり、一般的に急峻である。支川においては極めて急勾配であり、1/30~1/40 となっている。

b) 降雨量

降雨量は、諏訪湖下流の山地流域から下流にかけて、年間2,000~3,000mm程度であり、標高の高い地点ほど降雨量が大きくなる傾向があるが、地域的に特に大きな差は見られない。

c) 地 質

天竜川は中央構造線に沿って形成された河川で、北から南方向に流下している。このため、本川の左右岸で地質が異なっている。中央構造線の西側(天竜川右岸)は、古~中生代にかけて堆積岩の変性作用と花崗岩の貫入によって形成されたもので、主に花崗岩類、片麻岩等からなっている。花崗岩類には、

貫入時代の違いにより新期花崗岩と古期花崗岩に大別されている。

前者は、中央アルプスを構成する岩相であり、特に高標高域での生産土砂量が多い。後者は、伊奈山脈南部一帯に分布しており、比較的生産土砂量は少ない。中央構造線より東側(天竜川左岸)は、順に三波川帯、秩父帯および四万十帯に属する中・古生層の堆積岩からなる。この地域は、複雑な地殻変動の影響を受けており、全般に生産土砂量が多い。

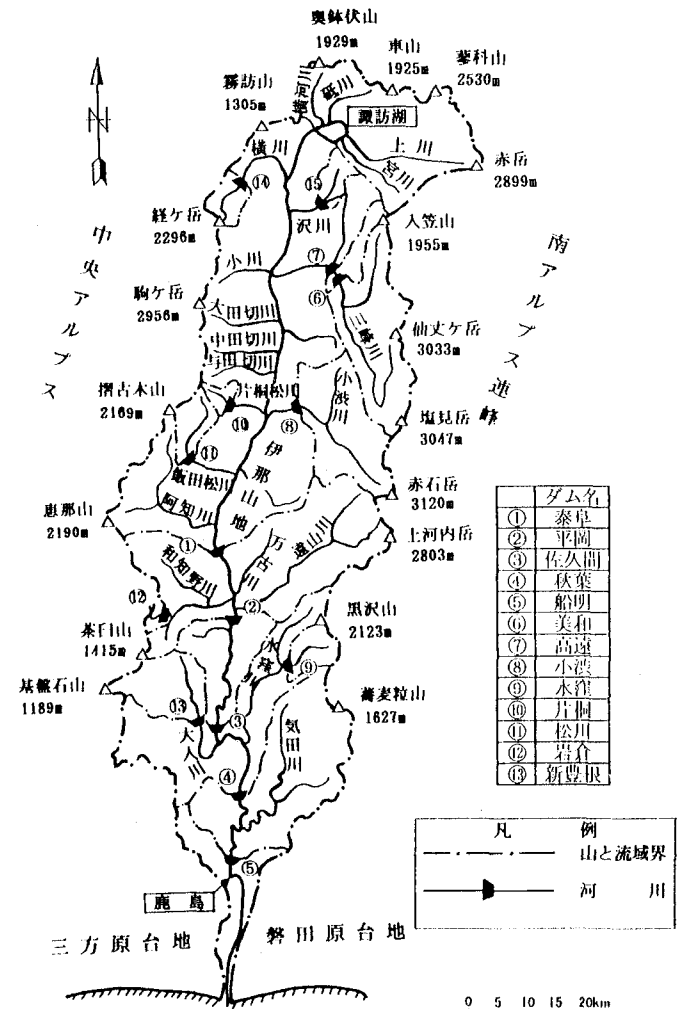


図-1 天竜川流域とダム建設地点

(2)既設ダム貯水池の堆砂状況

天竜川水系は、豊富な水量と大きな落差を利用して、本川に泰阜、平岡、佐久間、秋葉、船明の5ダム、支川には水窪、岩倉の2ダムの発電用ダムが建設されている。さらに戦後には、洪水による沿岸地域の被害を軽減するため、洪水調節を主目的とする美和、小渋、新豊根など8ダムが設けられ、水系全体では15のダムが完成している。(図-1参照)

表－2 ダム、貯水池の諸元と1994年時点の堆砂量

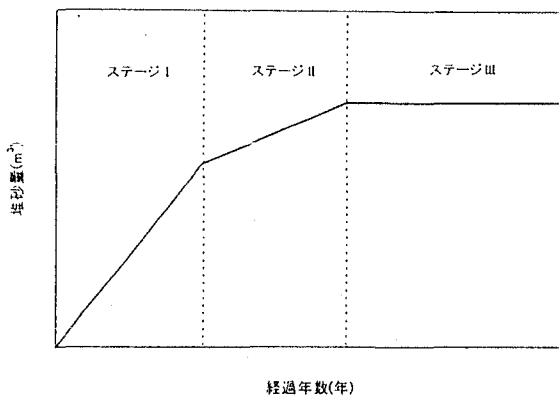
No.	ダム名	対象流域 (km ²)	総貯水容量 (1000m ³)	1994年時点 での総堆砂量	堆砂状況 (ステージ)	満砂した年	満砂時の 堆砂量	竣工年	経過 年数	比堆砂量 (m ³ /km ² /年)
①	泰阜	2,201.4	10,761	9,618	III	1943	9,618	1936	8	546.1
②	平岡	2,871.4	42,425	39,414	III	1965	39,414	1952	14	980.5
③	佐久間	2,323.0	326,848	108,533	II	未		1956	39	1,198.0
④	秋葉	469.7	34,703	14,459	III	1976	14,242	1958	19	1,595.9
⑤	船明	405.0	10,900	675	III	未	－	1977	18	92.6
⑥	美和	311.1	29,952	19,588	II	未	－	1959	36	1,749.0
⑦	高遠	66.3	2,310	860	II	未	－	1958	37	350.6
⑧	小渋	288.0	58,000	17,574	II	未	－	1969	26	2,347.0
⑨	水窪	57.6	30,000	5,670	II	未	－	1969	26	3,786.1
⑩	片桐	15.1	1,840	160	II	未	－	1989	6	1,766.0
⑪	松川	60.0	7,400	2,142	II	未	－	1975	20	1,785.0
⑫	岩倉	8.8	435	103	データなし			1937	58	201.8
⑬	新豊根	136.3	53,500	1,338	II	未	－	1973	22	446.2

注) 天竜川本川のダムの流域面積は、諏訪湖(流域面積778.6 km²)を除いた値

表－2 には、最近完成して堆砂がほとんどない2ダムを除いた13ダムにおける1994年時点の堆砂量を示している。ここに示した流域面積は、上流の未満砂ダムの流域を差し引いたものである。ダム全体の堆砂量の総量は約2億m³で、総貯水容量に対する堆砂率は32%となっている。

また、表－2 に示した各ダムの堆砂状況区分(ステージⅠ～Ⅲ)は、図－2 のように石川・浅田(1972)³⁾ による区分に従ったものである。

ステージⅠは完成直後から数年間で、工事中の掘削法面の崩壊、掘削土砂など人為的な要因による土砂が貯水池に堆積するため、堆積量が比較的大きい期間であり、ステージⅡは洪水の発生による変動はあるものの、ほぼ一定量の堆砂が見られる期間である。ステージⅢは満砂状態に近づき、貯水池の土砂捕捉能力がほとんどないため、堆砂量は変化しない。戦前に建設された、本川の泰阜および平岡ダムは、すでにこの状況に至っている。



図－2 一般的なダム堆砂の経年変化

(3) 堆砂データの整理

a) 比堆砂量の算出

流域の土砂生産量を評価する際の指標として、各ダム地点での比堆砂量(単位面積当たり1年間平均の流出土砂量)を求めた。なお、上流に未満砂のダムがある場合は流域面積を適宜補正して算出している。砂防ダムは比較的短期間で満砂し、長期間にわたる土砂捕捉機能がないことから、無視できるものと考えた。

比堆砂量は水窪ダムの4,000 m³/km²年を最大として大きなバラツキがある。特に、本川に連続して設けられている泰阜、平岡、佐久間の3ダムは、満砂した時期の違いから相互の影響を受けていないのにも関わらず、比堆砂量には大きな差が生じている。

b) 貯水池堆砂の粒度分布

堆砂の粒度分布に関する調査結果は少ないが、天竜川では5ダムの資料⁴⁾ が得られている。

表－3 には、河床付近を移動する掃流砂・浮遊砂(bed material load)と、流れに一樣な濃度で分布する微細粒径のウォッシュロードに区分した構成比率を示している。ウォッシュロードの上限の粒径は、研究者によって若干異なっているが、ここでは便宜上0.1 mmとした。

表－3 堆砂の粒度分布

ダム名	d < 0.1 mm (%)	d ≥ 0.1 mm (%)
泰阜	0.0	100.0
佐久間	51.6	48.4
秋葉	5.6	94.4
美和	45.5	54.5
小渋	41.2	58.8

ウォッシュロードは、貯水池での滞留時間、貯水池規模、流入量の大きさなどによって捕捉率が変化し、これが比堆砂量のバラツキの一因となっていると考えられる。

泰阜ダムおよび平岡ダムは、佐久間ダム完成時には満砂しており、互いの貯水池の堆砂量にはほとんど影響を与えていない。しかし、泰阜ダム貯水池堆砂では、粒径0.1 mm以下のウォッシュロードが確認されていないのに対し、佐久間ダム貯水池では全体の約60%を占めており、極めて大きな違いが認められる。この差は、貯水池の大きさ、すなわち沈降時間の差によって生じたものと考えられる。

一方、地質条件や流域面積、ダム規模がほぼ同等の美和、小渋の両ダムではウォッシュロード割合が同じであることは興味深い。

(4) その他の支配要因の整理

その他、従来の堆砂量予測式に用いられている代表的な支配要因を、ダム貯水池毎に算出し、表-4に整理した。

表-4 堆砂に関する諸要因

No.	ダム名	流路延長 (km)	起伏量 (m)	平均高度 (m)	河床勾配 (1/i)
①	泰阜	90.0	544.7	1,077.9	600
②	平岡	105.0	581.8	1,193.9	300
③	佐久間(残流域)	150.0	681.5	765.4	390
④	秋葉(残流域)	25.0	675.8	71.5	420
⑤	船明(残流域)	17.0	643.0	640.7	550
⑥	美和	32.5	1,040.9	1,695.6	128
⑦	高遠(残流域)	11.3	614.3	1,314.8	60
⑧	小渋	21.3	993.9	1,520.5	54
⑨	水窪	15.0	1,082.0	1,225.8	76
⑩	松川	16.5	870.2	1,533.1	50
⑬	新豊根	17.5	438.3	860.8	130

4. 堆砂機構に基づいた堆砂量予測式

(1) 土砂流送に関わる支配要因と掃流砂量の予測式

a) 河床勾配

天竜川水系での比堆砂量とそれぞれの貯水池における河床勾配の関係を表した結果が図-2である。

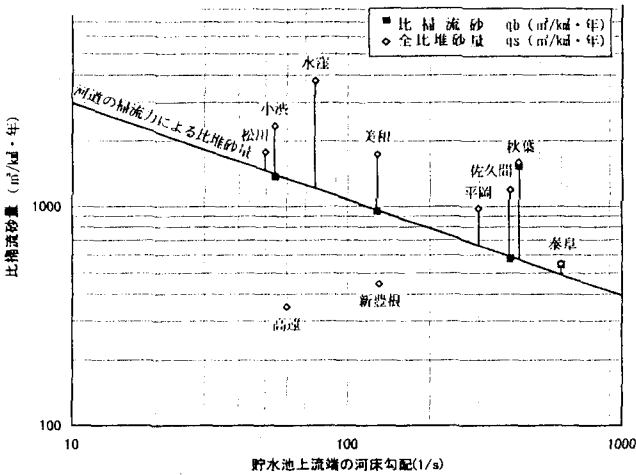


図-2 比堆砂量と貯水池上流端での河床勾配の関係

堆砂全量を対象とした場合には、河床勾配との明瞭な関係は認められないが、掃流砂比率が判明している貯水池では、佐久間ダムの影響が大きい秋葉ダムを除いて、次式のような比掃流砂量 (q_b) と河床勾配 (s) との関係が明瞭に認められる。

$$q_b \propto \sqrt{s} \tag{2}$$

掃流砂量が摩擦速度 u_* を用いて $q_b \propto u_*^3$ で表され、流量 Q と水路幅 B の間に regime 則 ($B \propto \sqrt{Q}$) が成立するとすれば式(3)が成り立つ。式(2)との差は天竜川水系の河床勾配と洪水比流量の関係が影響しているものと考えられる。

$$q_b \propto \sqrt{Q} s \tag{3}$$

高遠および新豊根ダムは河床勾配との関係が不明瞭であるが、古期花崗岩流域では土砂生産が少なく、河道の流相能力を下回っていることが原因であろう。
b) 洪水時雨量

洪水時の雨量と堆砂量は強い相関を持つことが既に久津見ら(1996)⁵⁾によって指摘されている。

図-3は、洪水時の雨量として年最大2日雨量で代表させ、年当たりの堆砂量から河床勾配の影響を除いた値との関係を表した結果である。

美和、小渋ダムなど流出土砂量が大きい地域では、雨量200mm/2days付近に屈曲点が見られるが、他では明瞭な屈曲点は認められない。この雨量は、飽和雨量に相当すると考えられる。

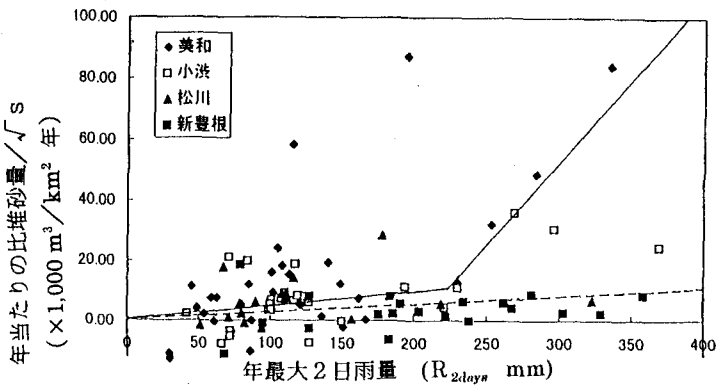


図-3 年最大2日雨量と年当たり堆砂量の経年変化

c) 掃流砂量の予測式

以上より、年当たりの比堆砂量は地質別に区分すれば、年最大洪水時雨量と貯水池上流端の河床勾配で表すことができる。飽和雨量を越えた場合の、浮遊砂比率がどのように変化するか不明な点が残るが、洪水時掃流砂量の算定式を、斜面勾配、洪水時雨量、流域面積等の支配要因を用いて次のように提案する。

$$\begin{aligned} V_B &= \alpha_1 (R_{2days} - r_a) \cdot F \cdot \sqrt{s}, & (R_{2days} \geq r_a) \\ V_B &= \alpha_2 R_{2days} \cdot F \cdot \sqrt{s}, & (R_{2days} < r_a) \end{aligned} \tag{4}$$

ここに、 VB : 1洪水による掃流砂量, ra : 土砂流出が増加する屈曲点の年最大2日雨量で、美和ダム、小渋ダム貯水池の場合、約220 mm, F : 洪水調節を行う上流ダムの面積を差し引いた流域面積である。

α_1 , α_2 は定数で、図-3より地質別の近似直線の傾きから求め、降雨mm, 流域面積 km^2 の単位ではおよそ表-5となる。なお、古期花崗岩地帯は適用範囲からはずれるが参考として値を算出した。

表-5 地質別の定数(α)の値

岩種	α_1	α_2
堆積岩	600	50
新規花崗岩	600	50
古期花崗岩	27	27

(2)土砂生産に関わる支配要因とウォッシュロード量の予測式

ウォッシュロードは流れと一体となって輸送され、掃流砂量のように河床勾配および流量によって制限されない。したがって、その流送量は土砂生産量に支配されると考えたほうが適当である。ここでは、ウォッシュロードの堆砂量と支配要因について検討を行う。

a) 降雨量

斜面崩壊と降雨量との関係について、ここでは吉松(1977)⁶⁾が提案した崩壊地の面積比率の予測式を適用する。この式では、雨量および山腹斜面の勾配が支配要因として用いられている。

$$\frac{F_d}{F} = g R_{fr} (R - r)^{1.5} \quad (5)$$

ここに、 g : 定数, R_{fr} : 起伏量比(近似的に傾斜度), R : 継続雨量, r : 崩壊無効雨量, F_d および F : それぞれ崩壊地面積, 流域面積である。

図-4は、式(5)の右辺 $R_{fr}(R-r)^{1.5}$ を、美和、小渋、松川、および新豊根の4ダムについて算出し、年当たりの比浮遊砂量との関係を示した結果である。なお、松川ダム、新豊根ダムのウォッシュロード比率は、河床勾配と掃流砂量の関係から逆算した値を用いて算出している。

流域の地質は、それぞれ堆積岩地域(美和ダム及び小渋ダム)、古期花崗岩地域(新豊根ダム)および新規花崗岩(松川ダム)である。堆積岩および古期花崗岩では明瞭な相関関係が認められ、新規花崗岩ではデータが少ないためやや相関が低いものの、地質区分を行うことで崩壊面積を予測する式として十分実用になるとと思われる。

b) 地形

斜面の傾斜度を、ここでは起伏量 R_f と斜面幅 B による幾何学的な関係で与える。

流域面積と河道延長の間には、式(6)で与えられる地形則(Hackの法則)が認められている。

$$L = u F^v \quad (6)$$

ここに、 L : 流路長(km), F : 流域面積(km^2), u および v : 定数で、km単位の場合 $u=1.35\sim 1.45$, $v=0.6\sim 0.65$ 程度であり、天竜川水系のダム流域諸元から求めると、およそ $u=1.4$, $v=0.6$ となる。

これらの流域の多くは直線的な河道を形成しており、流域を左右岸対称な長方形と仮定すれば、流路延長 L を用いて近似的に斜面幅 B および斜面勾配 i は、次式のとおりととなる。

$$B = \frac{F}{2L}$$

$$i = R_f/B = 2.8 R_f F^{-0.4} \quad (7)$$

なお、この方法で算出した斜面勾配は、支川では現状とほぼ一致するが、本川では主幹川延長を用いるため極端に緩い勾配となる。大流域のダムでは、主要な支川の延長を考慮することが必要となる点に注意が必要である。

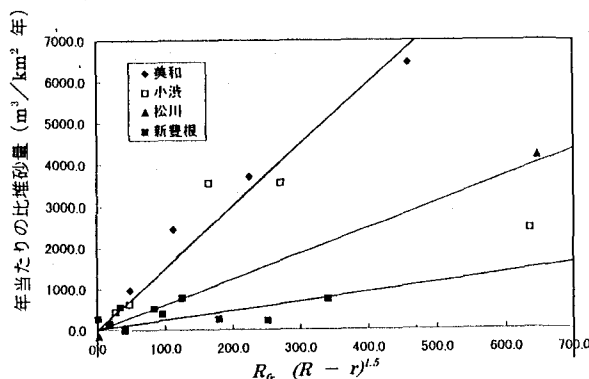


図-4 比堆砂量と $R_{fr}(R-r)^{1.5}$ の関係

c) ウォッシュロード量の予測式

ここで、無効雨量 r は、掃流砂量の場合と同様に、220 mm/2daysを用いるものとする。天竜川流域の山地斜面では大きな地形差がないためか、単位面積当たりの崩壊量はほぼ一定量であると仮定すれば、ウォッシュロードの流出量は次式のように表される。

$$V_S = \beta R_f F^{0.6} (R - r)^{1.5}$$

$$q_S = V_S/F = \beta R_f F^{-0.4} (R - r)^{1.5} \quad (8)$$

ここに、 V_S : 降雨によるウォッシュロード生産量(m^3), q_S : 単位面積当たりの生産量(m^3/km^2), および β : 崩壊地の斜面侵食量を表す定数で、地質によって異なった値をとる。単位を流域 km, 降雨量 mm, 起伏量 kmとすれば、堆積岩流域(美和、小渋ダム)で $\beta=14.0$, 新規花崗岩流域(松川ダム)で $\beta=6.4$, 古期花崗岩流域(新豊根ダム)では $\beta=2.3$ となる。

洪水時の降雨が流域内で一様であるならば、流域が大きくなるに伴って単位面積当たりの平均生産土砂量は少なくなる。

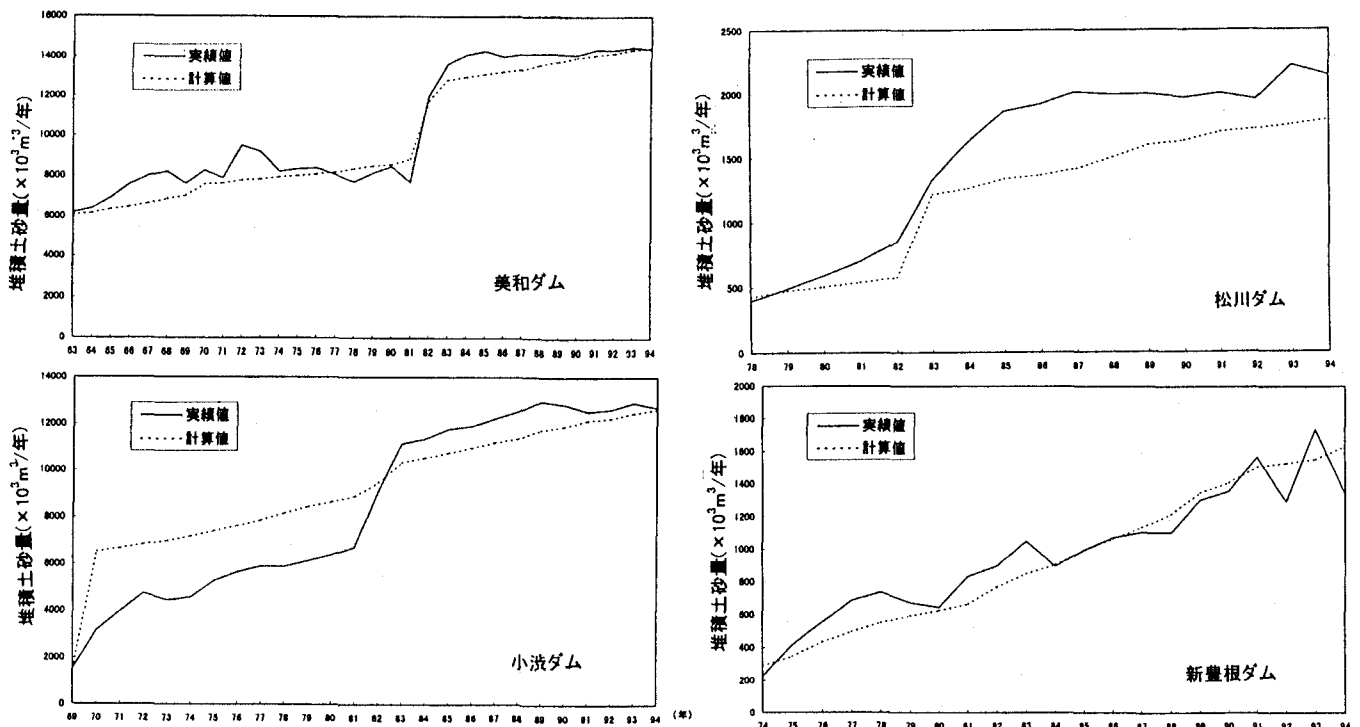


図-5 堆砂量の累年変化実績と計算値との比較

(2) 貯水池の捕捉とその支配要因

筆者ら(1996)⁷⁾は、ウォッシュロードの堆積を考慮した堆砂形状予測の計算法を提案した際に、ウォッシュロードの堆積は沈降速度と、流れの計算を行う断面位置の水面幅に支配されることを示した。

$$Q_w = B \cdot \delta L \cdot w_0 \cdot C_w \quad (9)$$

ここに、 Q_w ：堆積量、 B ：計算断面の水面幅、 δL ：断面間の距離、 w_0 ：ウォッシュロードの沈降速度、 C_w ：ウォッシュロードの濃度である。

さらに、貯水池形状を簡略化し、放流時のウォッシュロード濃度が貯水池の平均濃度に等しいと仮定すれば、捕捉率の予測式として次式が得られる。

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{\overline{BL} \cdot w_0}{\overline{BL} \cdot w_0 + Q} \\ &= \frac{A \cdot w_0}{A \cdot w_0 + Q} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 B ：ウォッシュロード堆積領域での平均幅、 L ：貯水池の延長、 A ：ウォッシュロード堆積領域の貯水池面積であり、近似的に湛水面積で与える、 Q ：洪水時の流入量で $F(R_{2days} - r)$ で与えることができる。ここに、 F ：流域面積、 r ：損失雨量である。

5. 堆砂実績による検証

掃流砂、ウォッシュロード、および貯水池の捕捉に区分して得られた堆砂量予測式を、美和ダム、小渋ダム、新豊根ダムに適用した。累年堆砂量の算出結果を図-5に示すが、堆砂量、累年変化ともに比較的良好に一致している。

6. 結 語

以上、ダム堆砂と支配要因の関係を土砂生産、流送能力、貯水池の捕捉の3機構に区分し、それぞれを、定量化の容易な支配要因との関係で評価した。この結果を天竜川水系のダム貯水池の経年堆砂量実績に適用し、実績と予測値との良好な一致が確認された。また、洪水時雨量は、生産、輸送、捕捉機構に共通した支配要因であり、この大きさによって堆砂量が決定されることを示した。

今後は、他の河川での適用性を検証してゆくとともに、流域の地質、植生等の違いを考慮して、一般性の高めていくことが必要である。

参考文献

- 1) 竹林征三ら(1992)：ダム貯水池堆砂量の推定法の試論，ダム工学No.8，pp.6-20
- 2) 江崎一博(1966)：貯水池の堆砂に関する研究，土木研究所報告，第129号
- 3) 石川春雄・浅田宏(1972)：発電用貯水池堆砂状況に関する調査報告書，電力中央研究所技術第2研究所報告（土木72,019）
- 4) 建設省土木研究所(1993)：河川流域における土砂管理に関する報告書，土木研究所資料3192号
- 5) 久津見生哲ら（1996）：貯水池堆砂量と降雨・流量との相関について，水工学論文集第40巻，pp989-994
- 6) 吉松弘行(1977)：山腹崩壊予測式について，新砂防，29(3)
- 7) 河田恵昭・植本実(1996)：ウォッシュロードを考慮したダム堆砂の実用計算法について，水工学論文集第40巻，pp983-988

(1997.9.30受付)