

貯水池堆砂量の経年変化と比堆砂量に関する 考察

宮崎洋三*・大西外明**

本研究は、主として電力用の貯水池における堆砂量データを検討し、その経年変化状況および堆砂の速度と、流域や貯水池の諸因子との関係を調べ、我が国における堆砂特性の傾向を把握しようとするものである。堆砂量の経年変化には、大別して三種のタイプがあり、比堆砂量はタイプに応じて算定する必要があることを示すとともに、タイプや比堆砂量に関わる要因・タイプと貯水池計画との関連についても論じた。

Key Words: reservoir sedimentation, types of sedimentation changes, specific sedimentation

1. まえがき

貯水池にかかわる環境問題において、堆砂現象と濁水長期化現象は、近年とくに重要な社会的関心事となっている。この二つの現象に大きな影響を持つのは、その集水域が本来持っている土砂流出に関する個性と、その流域に造られる貯水池の特性であり、さらに気象条件や人為的な開発等の外因がこれに加わるものと考えられる。したがって、堆砂や濁水長期化に対処する適切な方策を確立するためには、これらの現象と、流域の個性・貯水池の特性・外因との関係を明確にしておく必要がある。

以上の見地から、著者らは、現地調査データに基づき、主として電力用貯水池の堆砂量の経年変化を解析し、各貯水池の堆砂特性の体系づけを目的として研究を進めている。すなわち、全国各地の貯水池における堆砂量の経年変化を整理し、その変化状況および堆砂の速度と、流域の個性・貯水池の特性・外因との間の関係を調べ、巨視的に見た我が国における堆砂特性の傾向を把握しようとするものである。

このような研究は過去にもいくつか試みられてはいるが、それらはいずれも、堆砂に関する現地データがごく少ない頃になされたものである。しかし、近年、竣工したダム数の増加に伴ってデータ量が次第に豊富となり、それに伴って多様な解析が可能となっている。本論文では、主として堆砂の「量」に注目して考察を加えるが、今後はさらに、堆砂の形状・粒度分布等をも考慮に入れた考察が必要であると考えられる。この点については、電力以外の貯水池・貯水池計画上の比堆砂量の設定へのアプローチ等を含めて、今後の課題とした。

2. 本研究で検討対象とする貯水池の選定条件

国内諸貯水池の堆砂実績として、電力各社によって公表されている、1962年以降の発電用貯水池のデータ¹⁾を用いる。現在、その貯水池数は351個(1990年現在)に達しているが、本論文では、水系における貯水池の位置・経過年数・規模・堆砂の進み具合等を考慮して、118個の貯水池を検討対象として選定した。これらの選定条件は以下のとおりである。(堆砂量は、総貯水容量内の堆砂量すなわち満水位以下のすべての堆砂量である。したがって、満水位以上の堆砂[いわゆる背砂]の部分は含んでいない。また、流域面積は直接流域の値であり、間接流域は含まない)。

- 1)原則として各河川の最上流に位置すること
- 2)竣工後の経過年数が原則として10年以上であること(1990年現在)
- 3)流域面積が20 km²以上であること
- 4)貯水池の貯留高(総貯水容量/流域面積:V/A)が30 mm以上であること

これは、貯水池による土砂の捕捉率が70%以上となることを目安としたものである。現地データに基づいて作られた図²⁾を用いて捕捉率70%を貯留高に換算すると30mmとなる。

- 3)と4)を考え合わせると、総貯水容量については $V > 600 \times 10^3 \text{ m}^3$ (20km² × 30mm)の貯水池を対象とすることになる。なお、本文で検討対象とした貯水池のVは、最小のものでも $1,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ を超えている。
 - 5)現在の堆砂量(1990年現在)が $100 \times 10^3 \text{ m}^3$ 以上であること
 - 6)現在の堆砂率(堆砂量/総貯水容量:Vs/V)が70%以下であること
- 以上1)~6)の諸条件を満たす貯水池は351個中、118個(118/351=34%)である。

* (株)アトアドサイエンス (前(株)アイエー)(〒162 東京都新宿区水道町3-1)

** 正会員 東京理科大学教授 工博

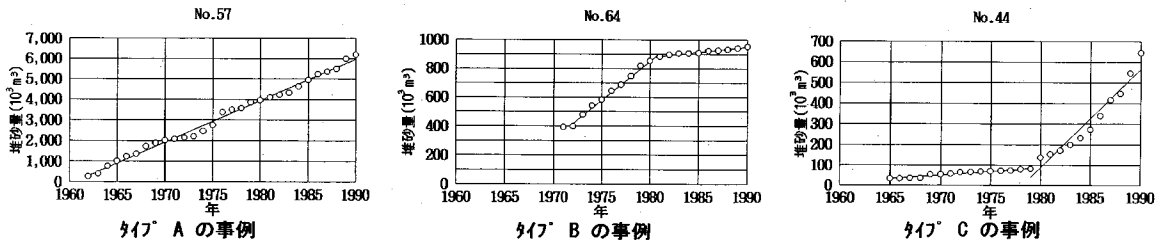


図-1 堆砂量経年変化のタイプ別事例

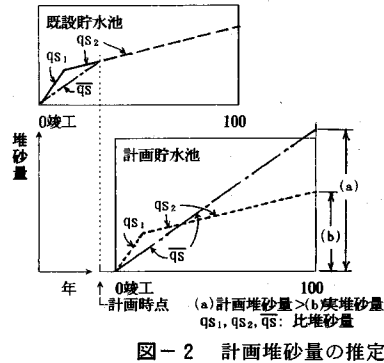


図-2 計画堆砂量の推定

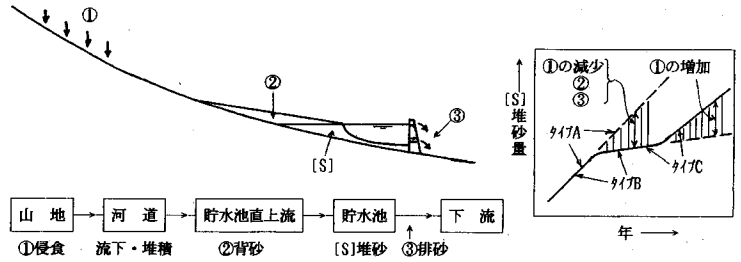


図-3 流域と堆砂

3. 貯水池堆砂量の経年変化特性に関する検討

各貯水池における堆砂量の経年変化をプロットすると、つぎの三種類のタイプに大別されることがわかる。

タイプA: 堆砂量が一様に増加する貯水池

タイプB: 堆砂量の増加が途中から遅くなる貯水池

タイプC: 堆砂量の増加が途中から速くなる貯水池

また、数は少ないがBとCの組み合わせられたものも見られる。各タイプの代表的な例を、図-1に示す。

タイプBの存在は、従来の貯水池計画の考え方を考える必要があることを示唆している。すなわち、従来は貯水池の計画に際し、図-2に示すように、竣工年を始点とし直線的に増加するものとして100年後の堆砂量を想定する。この時、必要となる比堆砂量は、計画時点での累計堆砂量を竣工後の年数と流域面積で割って求められるが、通常、同一水系あるいは近傍における貯水池の堆砂実績を参考としてきめられる。現在、我が国の既設貯水池の多くは、竣工後、10～40年程度を経たものが多いが、図-2に示すように、計画中の貯水池が、完成後、タイプBの堆砂経過をたどるとすれば、計画堆砂量は過大なものとなるであろう。したがって、タイプBが生ずる原因や条件を把握することは、貯水池の計画に重要なことである。

4. 堆砂量の経年変化タイプ分類法の提案

3.で述べたように、従来の算出法による貯水池の比堆砂量は竣工後の平均値を表す。しかし図-1に示したように、堆砂量の増加状況は必ずしも一様ではないため、

一律に平均値を用いるのは適当でなく、実状に合致する比堆砂量の表現法を確立する必要があると考えられる。そのためにはまず、堆砂量の経年変化のタイプを支配する要因を十分に把握しておくことが重要である。

(1) 種々のタイプを生ずる原因

ここで、堆砂の経年変化特性に差異が生ずる原因を明らかにするため、図-3に示すモデルを考える。流域から流出する土砂の挙動は、上流から

1) 山地の侵食・崩壊と河道における流下・堆積

2) 貯水池内における堆砂とそれに伴う貯水池直上流での堆積(背砂)

3) 貯水池からの放流に伴う排砂または人為的堆砂排除に配分される。1)はダム建設前からあったものであり、貯水池の有無に関係のない上流部での現象である。

上述のA, B, Cの各タイプの中で、後で述べるようにタイプBはタイプAに次いで事例が多い。タイプBにおいて、堆砂速度が減少する原因として考えられるのは、山地の侵食速度の減少、貯水池直上流での背砂、貯水池からの排砂等である。

また、タイプCで堆砂速度が増加する原因としては、山地の侵食速度の増加、流域または河道に堆積した土砂の再侵食、タイプB→Cの場合には背砂の再侵食等が考えられる。

a) 山地の侵食

山表面の侵食の経年変化を図示すると図-4のようになると考えられる。図中で侵食が急激に増加している部分は、何年かに一度発生する豪雨・地震などによるか、あるいは大規模な道路工事・造成工事・森林伐採の

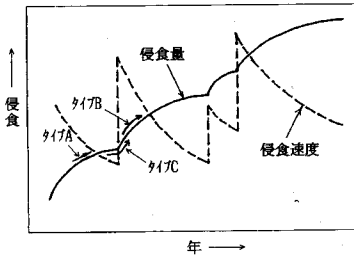


図-4 侵食の経年変化概念図

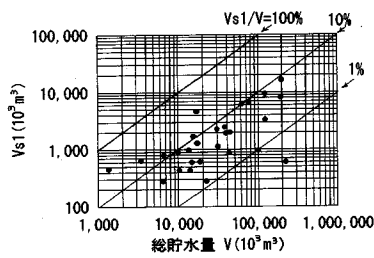


図-5 堆砂速度減少年における堆砂率

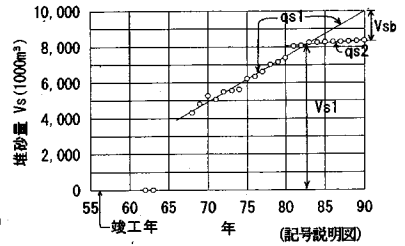


図-6 初期堆砂速度による仮想堆砂量と実堆砂量の差

ような人為的な原因による大規模な侵食増加を表している。これが一段落すると、侵食されやすい部分が取り除かれるため、その後しばらくは安定する。すなわち、山地崩壊の「免疫性」⁸⁾が現れる。

堆砂量の経年変化に種々のタイプを生ずる原因が、山地表面の侵食状況の変化にあると仮定して、各タイプを図-4にあてはめてみると、図中に示したように、タイプAは曲線の緩い勾配の一部分か、あるいは、本質的に侵食が一定速度で進む領域に相当することになる。同様に、タイプB・タイプCもそれぞれ図-4に示す領域に相当すると考えられる。その結果は、タイプBはタイプAに次いで発生事例が多く、タイプCは事例がきわめて少ない事実と一致する。

しかし、各タイプが生ずる原因を山地の侵食に求める場合、タイプCについては理解できるものの、タイプBについては疑問が残る。それは、タイプBの経年変化曲線を見ると、堆砂速度が減少する状況は、必ずしも前述の免疫性の性質から想像されるような、侵食が徐々に減少する形状とはなっておらず、急激に減少する例が多いからである。このように考えてくると、タイプBの事例が多いのは、貯水池上流端における背砂のため貯水池への土砂流入が減ること、あるいは貯水池からの放流に伴う排砂がむしろ支配要因になっていると推論される。

b) 貯水池における背砂と排砂

堆砂速度減少時の状況を知る一つの手掛りとして、その時点での堆砂の進み具合を調べることは重要である。図-5は、タイプBの貯水池について、総貯水量Vと堆砂速度減少年における堆砂量Vs₁の関係を図示したものである。堆砂率Vs₁/Vは、大部分10%以下である。すなわち、満砂状態には程遠いにもかかわらず、堆砂速度が減少しはじめていることがわかる。このことは、貯水池からの放流に伴う排砂よりも、上流端における背砂の方に、堆砂速度減少の原因を求めることが妥当であることを示唆していると考えられる。

しかし、タイプBになる原因が、量的に背砂のみで説明できるかどうかを確認できる現地データはない。そこで、初期の堆砂速度が現時点まで続いたとした場合の堆砂量と現在の実際の堆砂量との差Vs₂。(図-5参照)

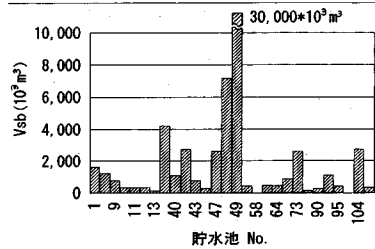


図-6 初期堆砂速度による仮想堆砂量と実堆砂量の差

が、背砂量の値として妥当な範囲内にあるかどうかを調べる。すなわち、現地調査や新旧地形図の比較により、実際の背砂量の値のオーダーを把握し、Vs₂と比べるわけである。この結果、図-6のNo.49貯水池をはじめとして、とうてい背砂だけでは量的に説明できない貯水池が幾つかあることがわかった。

このように、タイプBの原因は主として背砂にあると考えられるものの、今後さらに検討を要する疑問点も残されている。

(2) 堆砂の経年変化に及ぼす降雨の影響

つぎに、タイプBの貯水池について、その流域内または近傍における観測所の、日降雨量の年間最大値(以後「年最大日雨量」と呼ぶ)との関連について考える。降雨量の年間最大値を用いるのは、山地の侵食・崩壊には、降雨の総量よりも集中的な雨量の方が影響が強いと判断されるからである。また、日雨量の代わりに、2日雨量や3日雨量の方がよいのか、あるいは1日より短い時間に対する雨量を対象にした方がよいのかについては議論の余地があるが、ここでは日雨量を使用する。図-7は年最大日雨量と年堆砂量の関係を示したものである。(a)の年堆砂量と(b)の年最大日雨量を見比べると、当初の堆砂量増加期間では両者は比較的よい対応を示すが、堆砂量増加率が大幅に減少し定常状態に近づいた後では、年最大日雨量の如何にかかわらず年堆砂量はきわめて少ない。(c)はこの両者を縦軸と横軸にとったものであるが、堆砂量増加期間と、増加がほぼ停止し定常状態になった期間とで、明らかに異なる二つの傾向に分かれているのがわかる。このような傾向は、これらの貯水池のタイプがBであることを支持するものである。

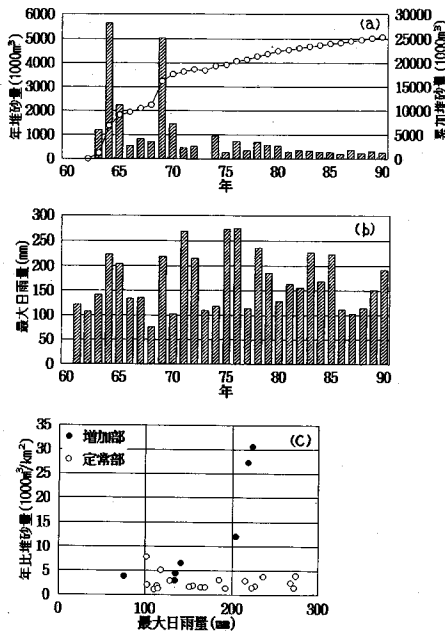


図-7 年堆砂量と年最大日雨量

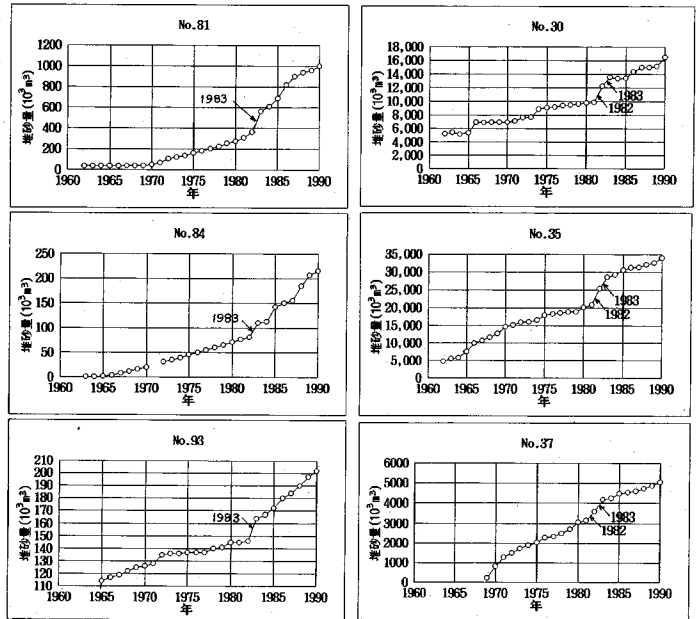


図-8 近接流域における経年変化の比較

図-9 同一年における急増貯水池

(3) 近接した貯水池における堆砂特性の比較

前述のように、貯水池の堆砂の経年変化特性を支配する要因として、山地の侵食や降雨量が重要であることから、近接した流域に設けられる貯水池間の堆砂の経年変化には、共通した傾向が生じるものと予測される。前節まではタイプBに関する考察が主題であったが、本節では山地の侵食に着目するため、主としてタイプCの貯水池についてこの推論の妥当性の検討を行うことになる。図-8はタイプCの経年変化特性を示す近接する三貯水池である。これらの貯水池は1983年の豪雨によって著しい山地侵食を起こした結果、侵食状況に変化を生じ、貯水池堆砂に大きく影響を与えたものと考えられる。

(4) タイプ分類時の留意点

以上述べたように、経年変化曲線のタイプ分類は判断の難しいことが多い。しかし、細部にとらわれずに、以下に論ずる事からを考慮に入れることにより、大局的なタイプ分類が可能となる。

a) 竣工直後のデータに対する信頼度

竣工直後の堆砂に関するデータには測定上の誤差が含まれがちであり、また、工事中に発生した土砂のような人為的な流出土砂が含まれている可能性が多い⁴⁾。したがって、このような部分は除外して考える必要がある。

b) 堆砂急増年の解釈

同一年に堆砂量の急増する貯水池が近傍地域に集中する場合、梅雨前線・台風等による集中豪雨が原因となって流出土砂が増える可能性が大きい。図-9は、1982年と1983年に堆砂量が急増した近接貯水池群の経年変化を

示したものである。これらの堆砂量急増年には豪雨が発生していることから、堆砂量の急増と降雨との因果関係は明確であると言える。しかし、この急増年の後は再び1981年以前の増加速度に戻っており、これらの貯水池のタイプはAであると判定される。すなわち、この急増は、タイプを左右するものとは言えず、その年だけの特異な変化と考えるのが妥当である。しかし、急増する年が何年も継続する場合には、タイプを左右する変化(例えば、山地の侵食速度の変化)があったと見なすのが自然である。本論文では、その判断を5~10年以上継続する場合に限ることとした。

c) 堆砂減少年の解釈

堆砂量減少の原因として、自然排砂・人為的な堆砂排除(排砂ゲート操作・浚渫等)・データの何らかの誤り等が考えられるが、減少の原因を経年変化のデータだけから判断するのは非常に難しい。しかし、原因がいずれであっても、何年も連続して減少することはないため、タイプの判定にはそれほど大きな影響を持たない。むしろ影響を持つのは、後述の比堆砂量の算出においてであり、できるだけ堆砂減少部分を外して算出するように努めた。

d) タイプAとBの区別が難しい場合の処置

経年変化曲線において、その勾配を一樣と見るか(タイプA)、二本以上の折線と見るか(タイプB)の判断は難しいことが多い。このような場合には、後者と仮定した時の各々の折線の勾配を求め、その比率(比堆砂量変化率)により判断する。図-10は、勾配変化前の比堆砂量

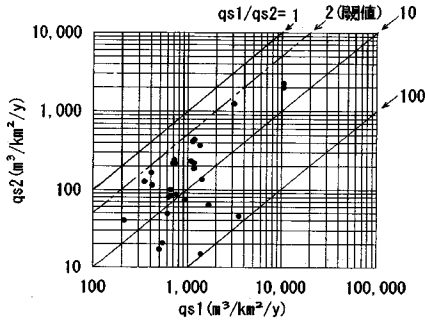


図-10 比堆砂量変化率

を横軸に、変化後の比堆砂量を縦軸にとって、比堆砂量変化率を示したものである。この比率と実際の経年変化曲線とを数多く見比べることにより、おおよそ比率2を以て閾値とするのが妥当であると判断される。

(5) タイプ分類の結果

検討対象とした118個の貯水池のうちで、タイプ分類の判定ができたのは(すなわち、比堆砂量を算出できるのは)77個(77/118=65%)であり、その分類の内訳は次のとおりである。

- タイプ A : 41 (41/77=53%)
- タイプ B : 23 (23/77=30%)
- タイプ C : 8 (8/77=10%)
- タイプ B→C:1 (1/77= 1.3%)
- タイプ C→B:4 (4/77= 5.2%)

上記の分類を原因別に見るとつぎのとおりである。

- ・山地侵食の経年変化に由来すると考えられるタイプ(Cが含まれるタイプ)——タイプC:8, タイプ B→C:1, タイプ C→B:4, 計13(13/77=17%)
- ・貯水池の背砂または排砂に由来すると考えられるタイプ(Bが含まれるタイプ)——タイプB:23, タイプ B→C:1, タイプ C→B:4, 計28(28/77=36%)

なお、判定できなかった41貯水池は、主として極端な急増年を含むため判定することができなかったもの、経年変化の状況が不可解なもの、竣工後の年数は1.の選定条件を満たしているが、記載されたデータの年数が少なすぎるもの等である。

5. 堆砂の経年変化特性に基づく比堆砂量の算定

(1) 流域の侵食速度と比堆砂量の関係

貯水池の流域が本来持っている土砂流出に関する特性は、その流域の侵食速度に相当する量で表すのが適当である。この場合、タイプAのように、求められる比堆砂量が1個だけの場合には問題はないが、タイプB, タイプC等では堆砂勾配の数だけの比堆砂量が求められることとなり、その中から侵食速度に相当する量を選び出す必要がある。

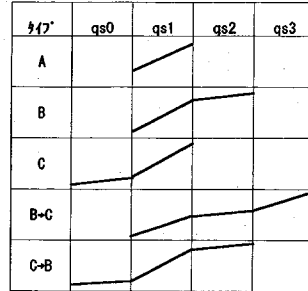


図-11 経年変化のタイプと比堆砂量の関係

なお侵食速度はm/1000y あるいはmm/y等の単位で表される。一方、比堆砂量はm³/km²/yで表されこれも速度の次元を持つ。この両者の関係は、例えば地盤の見掛け比重を2.6, 貯水池内堆砂のそれを1.7とすれば、侵食速度1mm/y は比堆砂量約1500m³/km²/yに相当することになる(地盤の量:1mm/y=1000m³/km²/y→堆砂の量:1000m³/km²/y×2.6/1.7 ≈1500m³/km²/y)。しかし、侵食速度を比堆砂量と同じ単位で測ることにすれば、両者間の「比例する」は「等しい」と言いかえることができる。

(2) 比堆砂量の算定

前述のように、比堆砂量は堆砂量経年変化の増加勾配毎に求められる。これらの比堆砂量に記号を付け、各タイプ毎に示したのが図-11である。侵食速度を表す量としての比堆砂量は、堆砂のタイプ毎に異なる特性を有する。まずタイプAについてであるが、この場合の比堆砂量の特性は比較的単純である。しかし、タイプBの場合には、堆砂速度減少の原因が背砂や排砂であるとすれば、減少後の比堆砂量qs2は侵食速度を表さないことになる。またタイプCについては、流域の侵食状況変化が原因と考えるのが自然であるから、勾配変化の前後も侵食速度の対象となる。

比堆砂量算出に際しては、原則として勾配一様の継続期間が10年以上であることを条件とする。

6. 要因分析

(1) 要因の選定

本節では、求められた二つの目的変数である「経年変化のタイプ」と「比堆砂量」が、どのような要因によって支配されているかにつき考察する。

経年変化のタイプの分類方法としては、山地侵食の経年変化に基づいた分類(Cが含まれるか否か)と、貯水池の背砂または排砂に原因を求める分類(Bが含まれるか否か)とが考えられる。前者については、現時点での予測の及ぶ範囲を超えるものである。一方、後者の考えによって堆砂の経年変化タイプを分類することは、前述のように、貯水池計画面に密接に関係することが多い。そこで、ここでは堆砂の経年変化の支配的要因の中で、

表-1 貯水池の堆砂と諸要因

属性	地形因子	目的変量 記号	経年変化のタイプTp		比堆砂量 qs ₁		
			次元	因子		質的	量的
山地	Mt			質的	○		
流域因子	平均標高	H	L	量的	○		
	平均傾斜	S		量的	○		
	第四紀隆起量	Uq	L	量的	○		
	地質区分	G		質的	○		
	崩壊地分布	LS		質的	○		
	盆地・湖沼	BL		質的	○		
	直上流河床勾配	i		量的	○		
貯水池因子	経過年数	Y	T	量的	○		
	貯留高	V/A	L	量的	○		
	堆砂率	Vs/V		量的	○		
外的因子	10年確率最大日雨量	R	LT ⁻¹	量的	○		
	洪水時流量を表す因子	RA	LT ⁻¹	量的	○		
	流出土砂量を表す因子	qs ₁ A	LT ⁻¹	量的	○		

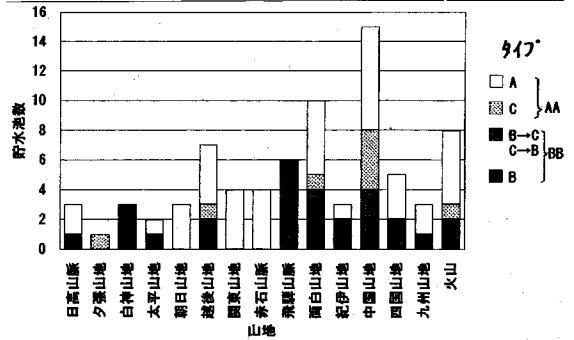


図-12 経年変化のタイプの山地別分布

Bを含まないタイプ(A, C) : タイプAA

Bを含むタイプ(B, B→C, C→B): タイプBB

一方、「比堆砂量」は、主として流域内の高度・起伏等の地形因子や、地質、崩壊地の状況、気象条件等に支配されると考えられる。なお、「山地」は「タイプ」ばかりでなく「比堆砂量」とも相関を持つとともに、地形因子とも相関を持っている。しかしここでは、質的変量を説明する因子には質的因子を、量的変量には量的因子をそれぞれ代表因子として対応させるものとした。

以上の考察に基づいて、経年変化のタイプTpと比堆砂量qsのそれぞれに関係すると考えられる諸因子を選び、表-1に示す(○印)。表にあげた諸因子の他にも、流域内の植生の状況や開発の状況、貯水池の形状・水位変動・運用条件・放流設備や排砂設備の高さや規模等、考えられる因子は数多くあるが、本論文ではこの表に記載した因子についてののみ検討対象とした。

なお、侵食速度qsについては、その最大値qs₁を基本値として使用する(前出の図-11)。

(2) 個々の要因を用いた分析

a) 山地(Mt)

図-12は、検討対象とした貯水池を山地別にタイプ分類した結果である。この図からわかるように、①タイプAの貯水池は、東北南部から関東および中部にかけての、朝日・越後・関東・赤石の各山地で分布率が高い、②飛驒山脈および白神山地では、検討に用いた貯水池のすべてがタイプBBである、③Cを含むタイプの貯水池は中国山地に多い。

b) 流域側の因子

1) 地形に関する因子

地形学の分野においては、地形形成にあずかる地殻変動と侵食の関係が研究されており、隆起と侵食の速さの定量的な比較がされている。これらの研究によれば、侵食の速さに関わる諸因子として、第四紀における隆起量Uq・現在の隆起の速さu・山地の平均標高H・山地の起伏量を表す高度分散量D・山地の平均勾配S等があげられており、我が国の山地においてはこれらの諸因子と侵

特に重要な背砂について考える。

貯水池の背砂は、その形成過程から言えば、背砂の発端となる貯水池内の堆砂が水中で沈降・堆積することによって始まるという意味から、河口部の三角洲に類似している。一方、背砂そのものは陸上堆積であり、その堆積場所あるいは堆積土砂の粒径から言えば、上～中流部の扇状地に類似していると言える。

以上を念頭に置くと、背砂の形成を支配する要因として考えられるのは、流水量(とくに洪水時流量)、流出土砂量、その粒径、堆積場所の地形(とくに河床勾配)、貯水池の水深、流況等である。

以上の考察により、「タイプ」の要因分析に使用する諸因子をつぎのように選定する。

- ・洪水時流量を表す因子として「年最大日雨量×流域面積」を使用する。
- ・流出土砂量を表す因子として「比堆砂量×流域面積」を使用する。
- ・流出土砂の粒径を表すものとして、母岩の性質が粒径を支配するものと考え「地質区分」を使用する。
- ・堆積場所の地形を表す因子として「貯水池直上流の河床勾配」を使用する。
- ・貯水池の規模や流況を表す因子として「貯留高」と「堆砂率」を使用する。
- ・経年変化のタイプは、竣工後、年数の経過とともにAからBに変わる可能性を持っているので、貯水池因子として「竣工後の経過年数」を加える。
- ・この他、後で述べるように、経年変化のタイプの山地別分布には、幾つの特徴が見られることから、「山地」を因子に加える。

なおタイプの分類については、前述のように、Bを含むか否かによる分類を使用するが、タイプA, B, Cと区別するため、つぎの記号を用いるものとする。

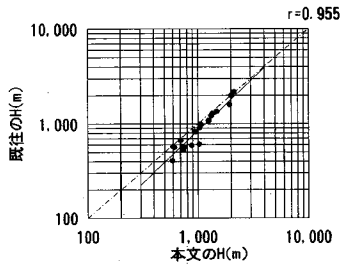


図-13 流域内平均標高と既往の値との比較

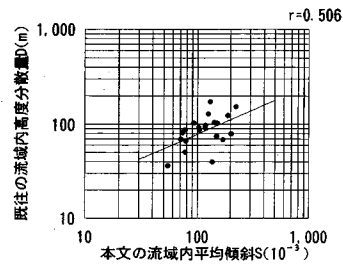


図-15 流域内平均傾斜と既往の値との比較

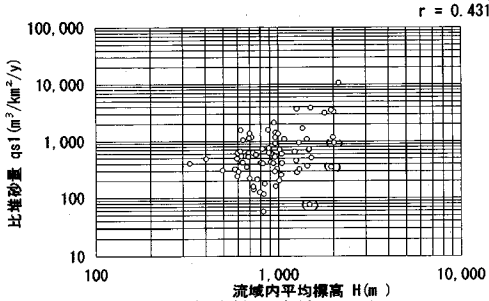


図-14 比堆砂量と流域内平均標高

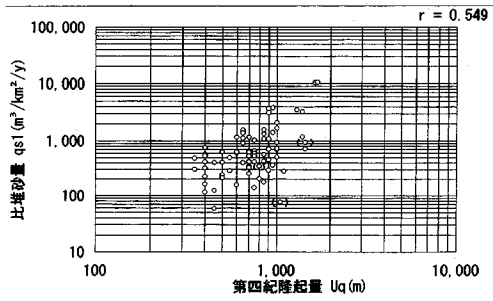


図-16 比堆砂量と第四紀隆起量

食の速さとの間およびこれら諸因子相互間にきわめて高い相関があると言われている⁵⁾。

「侵食」という、地表付近の、しかも短期の現象(10年~10²年程度が対象)が、「隆起」という地殻変動に基づく長期的現象(10⁴年~10⁶年程度が対象)ときわめて相関性が高いとすることには議論の余地がある。しかし、第四紀における隆起量や隆起速度が大きかった(現在でも大きい)地帯が、現在、標高の高い山地となっていることは事実である。また、標高が高ければ傾斜・起伏量が大きく、さらに、地質が悪い・気象条件が厳しい・裸地が多い、といった傾向が加わる。このように考えれば、「侵食」と「隆起」の間に相関が生じることも当然のことと考えられる。

(a) 流域内平均標高(H)

一般に、山地の侵食は平均標高が高くなるほど速くなると考えられる。ここでは、流域の平均標高を求めるのに簡便な方法を取り、流域内の最高標高 H_h と最低標高 H_l (ダム地点の原河床標高) の平均値を平均標高 H として使用する。図-13は、既往の研究において求められた流域内平均標高⁶⁾と、今回求めた簡便法によるそれとを、共通する貯水池流域について比較したものである。図に見られるように、この両者はきわめてよい一致を示し、数多くの流域を扱う場合には、この簡便法が有効であることを示している。

図-14は流域内平均標高 H と比堆砂量 qs₁ の関係を示したものであるが、ばらつきはあるものの、平均標高が高いほど侵食が速いという傾向を見ることができる。

(b) 流域内平均傾斜(S)

一般に、山地は起伏が多いと侵食が進みやすいと言わ

れる。また、高度の分散量(単位面積あたりの高度の頻度分布における標準偏差)と平均傾斜との間には高い相関のあることがわかっている⁷⁾。したがって、侵食速度と傾斜との間にも相関のあることが期待される。

本論文では平均傾斜についても簡便な方法をとる。すなわち、前述の H_h と H_l の標高差を流域面積の平方根で割って無次元化し、平均傾斜 S として使用する。図-15は、前述の研究において求められた高度の分散量 D⁸⁾ と、今回求めた簡便法による平均傾斜 S とを、共通する貯水池流域について比較したものである。この両者は、平均標高の場合ほど高い相関性は示さないがかなり良い相関を示している。

このようにして求めた S と qs₁ の関係についても、H の場合とほぼ同様のことが言える(後述の図-17)。

(c) 第四紀における隆起量(Uq)

各貯水池流域について隆起量 Uq を求め、qs₁ との関係を探ったのが図-16である。この図から、H や S の場合を上回る相関性の得られていることがわかる。なお、Uq の推定には、全国の山地に対して等隆起量線が推定されている⁹⁾ので、これを用いて求めた。

2) 地質区分(G)

一般に用いられる地質細分類は繁雑に過ぎるので、本論文では、我が国においては新第三系以後と古第三系以前の岩石とで地質構造も固結度もかなり異なる¹⁰⁾ことを重視し、堆積岩・火山岩・深成岩・変成岩の4岩種を、この二つの時代に分けた、あらい分類の地質区分 G を用いる。これは、タイプ Tp と G の媒介因子としての「粒径」を意識したものである。

G は、目的変量の Tp と qs₁ の両方に関与すると考えら

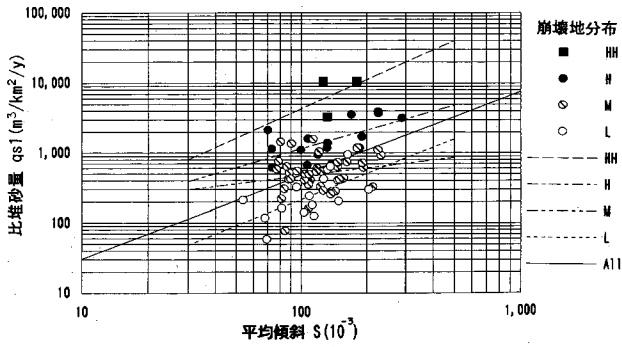


図-17 比堆砂量・平均傾斜と崩壊地分布

れる。Tpについては、タイプBBの流域が、火山岩地帯（とくに新第三紀以後）に多く、これに次いで古第三紀以前の堆積岩地帯に多いという結果が得られた。一方、Gと qs_1 の間には、明確な相関が見られない。

3) 崩壊地分布(Ls)

本論文では、各流域の崩壊地分布密度を定性的に分類して用いる。すなわち、1/50,000地形図を用い、HH：特に大、H：大、M：中、L：小の4種に分類することとした。

崩壊地は、1/50,000地形図記載の「がけ(土)」(道路・造成地等の切り取り部を含む。旧1/50,000地形図の崩土・流土・雨裂に相当)および「がけ(岩)」を対象とし、露岩は対象としない。また、すべてを同等に見るのではなく、自然のがけ(土)、道路・造成地等の切り取り部、がけ(岩)の順序で評価するように努めた。これらの判断は著者らの現地調査によるものである。

崩壊地Lsは qs_1 に影響すると考えられる。 qs_1 と地形諸因子の関係をLsをパラメータとして調べると、いずれの地形因子の場合でも、Lsが qs_1 に顕著な影響を与えていることがわかる。前述のように、地形因子の中で qs_1 と相関性の最も大きいのはUqであったが、Lsのランク別分布を最もよく表している地形因子は、Sである(図-17)。言い換えると、 qs_1 を支配する要因の中で、Lsは、地形因子とは別個の独立した要因であると言うことができ、地形因子の中でもSを用いた場合、そのことが最も顕著であると言える。

4) 盆地・湖沼の有無(BL)

流域内において、盆地や湖沼に関わる部分の占める割合が大きい場合には、大部分が山地で占められる他の流域と同じ基準で比堆砂量を算出することは適切でない。この場合、盆地や湖沼に関わる部分を除いて比堆砂量を算出することも考えられるが、本論文では、これに該当する流域(尾瀬湿原、富士五湖、大正池を持つ3貯水池)についてのみ、定性的に考察するにとどめる。

図-14, 16においては、これらの3貯水池に()印を

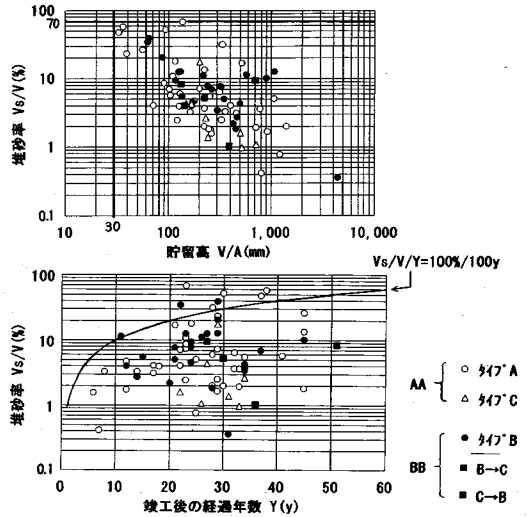


図-18 経年変化のタイプと貯水池諸元

付して、他貯水池と区別した。

5) 貯水池直上流河床勾配(i)

本論文では、貯水池直上流の河床勾配は1/50,000地形図を用いて求める。しかし直上流とは言っても、局所的な河床勾配では測定誤差が介入するため、上流5km程度から貯水池内を経てダム直上流までの河床縦断をとって大局的な把握を行なった上で、貯水池直上流1~2kmの範囲の勾配を重視して求める。

本川・支川と複数の流入がある場合には、それぞれに関わる流域の大きい方を重視し、流域の大きさが同程度の場合には、崩壊地分布の多いことを目安に一川を選定する。

前述のように、この河床勾配iはタイプTpに関わることを予測してとりあげたものであるが、両者の間の相関は見られない。

c) 貯水池側の因子

貯水池側の影響因子としては

- 1) 貯留高V/A
- 2) 堆砂率Vs/V
- 3) 竣工後の経過年数Y

があげられる。

直観的に言えば、V/Aが小さいほど、そしてVs/Vが大きいほどタイプはBBになりやすく、Yが大きくなるほどタイプは最初AAであったものでもBBになる可能性が出てくると考えられる。

図-18は、Vs/VとV/AおよびVs/VとYの関係を使ってそれぞれ各貯水池をTp別にプロットしたものである。

上の図によれば、Vs/VやV/AとTpの間には相関性が認められない。一方、下の図からは、Yが10年以下ではタイプBBが存在しないことがわかるが、Vs/VおよびYとTpとの間に、特徴ある関係を見出すことはできない。

表-2 経年変化のタイプに関する多変量解析の結果

要因	レンジ ¹⁾	数量化理論2類による	
		Tpとの偏相関係数 ²⁾	相関比 ³⁾ 0.534
Mt	3.94	0.546	正答率 ⁴⁾
log(Vs/V)	0.629	0.0846	TpAA 0.755
G	1.76	0.387	TpBB 0.786
log(qs ₁ /R)	2.94	0.547	全体 0.766

注 1) 2) 要因が目的変数Tpに影響する程度を表す量
 3) Tpの2群(AAとBB)への判別の程度を表す量(相関比が1に近い判別が完全であることを示す)
 4) 要因の合成因子によって判別された各貯水池のTpと実際のTpとが一致する率

表-3 比堆砂量に関する多変量解析の結果

要因	レンジ ¹⁾	数量化理論1類による	
		log(qs ₁)との偏相関係数 ²⁾	重相関係数 ³⁾ 0.855
log S	0.301	0.462	
G	0.320	0.374	
Ls	1.35	0.719	
log R	0.204	0.292	

注 1) 2) 要因がlog(qs₁)に影響する程度を表す量
 3) 各貯水池のlog(qs₁)について本結果による推定値と実測値との相関係数

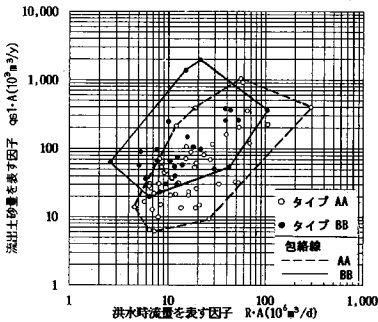


図-19 タイプと洪水時流量・流出土砂量

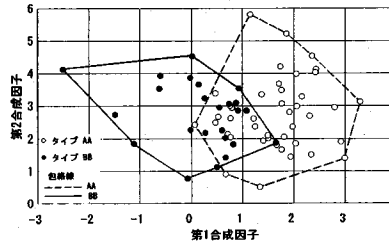


図-20 経年変化のタイプの判別図

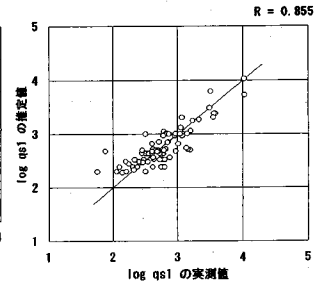


図-21 比堆砂量に関する実測値と推定値の関係

d) 外的因子

1) 10年確率最大日雨量R

気象条件を表す因子として、本論文では4.(2)で述べた理由により、年最大日雨量を用いる。年最大日雨量は年によって異なるため、各貯水池に与える因子としては、その確率値を選ぶのが適当である。これを何年確率にとるかについては議論の余地があるが、ここでは、タイプBBの経年変化曲線を検討の結果、竣工年から堆砂速度減少年までの期間が5年~20年の貯水池が多いことを参考に、10年確率値Rを使用する¹⁾。

Rとqs₁の間には、当初予測したような相関は見られない。

2) 10年確率最大日雨量Rと流域面積Aの積

3) 比堆砂量qs₁と流域面積Aの積

前述のように、洪水時流量を表す因子および流出土砂量を表す因子として、それぞれ上の2)と3)の因子を用いる。図-19は、RAとqs₁Aとを用いてタイプの特徴を見出すことを試みた図である。この図から推論されるのは、流量すなわち流出「水」量が少ないほど、流出「土砂」量が多いほど、言い換えれば、流下させる力と堆積させる力の比が小さいほど、タイプはBBになりやすい傾向を表していることである。このことは、タイプBBの原因の一つが背砂にあることを示唆するものである。

(3) 多変量解析の試み

前節で述べた、目的変数と個々の要因についての分析を参考に、多変量解析を試みる。

a) 経年変化のタイプについての解析

要因として、山地Mt・堆砂率Vs/V・地質区分G・qs₁/Rの4因子を選び、解析を行った結果を表-2に示す。これを要約すると「経年変化のタイプは、1)その貯水池の流域がどの山地に属しているか、2)流出土砂量が流出

水量に比べて大きいかわか、で大部分が決まり、3)流域の地質が何であるか、によっても多少左右されるが、4)貯水池因子にはあまり影響されない」と言うことができる。さらに、前節の結果を考え合わせると、「タイプBBの経年変化は、1)飛驒山脈や出羽丘陵の北部と中部にあたる白神・太平の山地群、2)流出土砂量が流出水量に比べて大きい流域に多く、3)火山岩地帯や古第三紀以前の堆積岩地帯に比較的多い」と言うことになる。

また図-20は、合成因子を用いた判別図であり、前述の図-19と比べると判別の度合いが向上しているのがわかる。

b) 比堆砂量についての解析

要因として、平均傾斜S・地質区分G・崩壊地分布Ls・10年確率最大日雨量Rの4因子を選定し、解析した結果を表-3に示す。結果を要約すると「比堆砂量に最も大きな影響力を持つ要因はLsで、Sがこれに次ぐ。Gの影響は比較的小さく、Rにはほとんど影響されない」結果となっている。この最後の結果は予測しなかったものであり、雨量の選び方に問題があったと考えられる。この点については今後さらに研究を行い、機会をあらためて報告したい。

図-21に、本結果による推定値と実測値の関係を示す。両者間の重相関係数は0.86と高い値を示しているため、上記諸因子による推定法についての今後の発展が期待される。

7. 結論および今後の課題

電力用貯水池における堆砂量の現地調査データを解析した結果、つぎの結論が得られた。

1. 堆砂量の経年変化は三種類のタイプに大別される。

タイプA:堆砂量が一様に増加する貯水池

タイプB:堆砂量の増加が途中から遅くなる貯水池

タイプC:堆砂量の増加が途中から速くなる貯水池

2. タイプの分類結果はつぎのとおりである.

タイプA の貯水池はおおよそ半分を占める.

タイプB を含む貯水池 (BB) は1/3 以上を占める.

タイプC を含む貯水池は17% である.

この中で特記すべきことは、タイプBBの貯水池が1/3 以上を占めることである.

また現時点でタイプA と判定された貯水池も年を経るにしたがいタイプB に変わる可能性を持っている.

3. タイプについての要因分析結果は以下の通りである.

その貯水池の流域がどの山地に属しているかは、タイプ判別の1つの要因となる.

タイプBBと、タイプAA (B を含まないタイプ) の判別には、流出土砂量を表す因子と洪水時流量を表す因子の比 qs_1/R を要因として使用すると、判別できる可能性がある. 流出「土砂」量と流出「水」量の比が大きいほど、すなわち堆積させる力と流下させる力の比が大きいほど、タイプはBBになる可能性がある. これは、土砂流出の激しい流域ほどタイプはBBになりやすいことを意味し、貯水池の計画上有利な傾向を潜在させているものと考えられる.

タイプBBの流域は、火山岩地帯 (とくに新第三紀以後) に多く、これに次いで古第三紀以前の堆積岩地帯に多い.

4. 比堆砂量についての分析結果は以下のとおりである.

地形因子はそれぞれ比堆砂量と相関性を持っている (相関係数: 0.43~0.55).

地形因子と比堆砂量の関係におけるデータのばらつきは、崩壊地分布を要因として使用することにより、ある程度説明することができるものと考えられる.

今後の課題としては以下のことが考えられる.

1. 電力用以外の貯水池のデータを使用した解析
2. 堆砂「量」以外の、堆砂に関する調査解析 (粒度、堆砂形状ほか)
3. 背砂に関する調査解析

4. 諸要因データの精度向上

- ・簡便法によって算定した「平均標高」・「平均傾斜」
- ・定性的なデータを使用した「崩壊地分布」の定量化
- ・雨量を表す適切な因子の選定

5. 多変量解析の本格的な適用

6. 貯水池計画に使用する堆砂量算出法に関する考察

このためには、経年変化タイプの分類のほかに、タイプBBの場合の堆砂速度減少年の竣工後年数・比堆砂量変化率等についても、検討する必要がある.

とくに、1.については、本論文で強調したタイプBBが、比較的貯水位が高く保たれる期間の多い電力用貯水池だけに顕著な現象であるのか否かを検討するためにも、興味ある課題であると考えられる.

参 考 文 献

- 1) 電力土木協会: 発電用貯水池・調整池土砂堆積状況, 電力土木, 1964. 7. -1991. 9.
- 2) Brune, G.M.: Trap efficiency in reservoirs, Trans. A.G.U., 34(3), pp.407-418, 1953.
- 3) 小出博: 日本の地送り — その予知と対策 —, 東洋経済新報社, pp.17 ほか, 1955.
- 4) Tanaka, M.: A map of regional denudation rate in Japanese mountains, Trans. Japanese Geomorphological Union 3(2), pp.163, 1982.
- 5) Ohmori, H.: Characteristics of the erosion rate in the Japanese mountains from the viewpoint of climatic geomorphology, Zeitschr. Geomorph. N. F., Suppl. Bd. 46, pp. 2-4, 1983.
- 6) 5)と同じ
- 7) 5)と同じ
- 8) 5)と同じ
- 9) 第四紀地殻変動研究グループ: 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, 7(4), pp. 183-186, 1968.
- 10) 貝塚爽平ほか: 日本の山, シリーズ日本の自然2, 岩波書店, pp.11-12, 1987.
- 11) 岩井重久・石黒政儀: 応用水文統計学, 森北出版, pp. 241-246, 1979.

(1993. 12. 20 受付)

THE YEARLY CHANGES IN RESERVOIR SEDIMENTATION AND THE SPECIFIC SEDIMENTATION

Yozo MIYAZAKI and Sotoaki ONISHI

Through the investigation of sedimentation in electric power reservoirs, macroscopic tendencies toward domestic sedimentary features are grasped from the yearly changing conditions and the sedimentation rate, relating to various factors of the drainage basins and reservoirs. They are divided into three types of sediment accumulation changes; and the specific sediment accumulation needs to be estimated by its types. It also indicates that factors relating types and specific sediment accumulation, and the relation between types and reservoir plannings.