

ダム貯水池の堆砂形態

櫻井寿之* 柏井条介** 大黒真希***

1. はじめに

ダム貯水池の堆砂量及び堆砂形態を把握することはダムの計画、設計および管理運用において重要である。堆砂に関係する技術的な事項としては、貯水池容量の決定、ダム安定計算における堆砂圧、放流施設の設置標高の設定等があげられる。また、近年関心の高まっている水系一貫の土砂管理の観点からみると、水系の土砂輸送状態を把握する上で重要な土砂輸送量や粒度分布などの情報は、河道などでは精度良く観測することが困難であるが、土砂を捕捉するダム貯水池の堆砂を調べることによって得ることができる。堆砂対策及び下流への土砂供給方策を検討したり、貯砂ダムや土砂バイパス施設、排砂施設などの具体的な堆砂対策施設を設計する場合においても、堆砂の量とその貯水池内での分布、粒径などの情報やそれらの将来予測が必要である。

表-1 調査対象ダムの諸元

No.	地域	ダム名	堤高 (m)	直轄流域面積 (km ²)	総貯水容量 (×1000m ³)	実績堆砂量 (×1000m ³ , 1996年時点)	比堆砂量 (m ³ /km ² /年)	経過年数 (1996年時点)
1	北海道	桂沢	63.6	298.7	92,700	1,894	163	39
2		金山	57.3	470.0	150,450	612	45	29
3		大雪	86.5	291.6	66,000	2,421	395	21
4		漁川	45.5	113.3	15,300	718	396	16
5		芦別	22.8	147.5	1599	1,057	184	39
6	東北	石瀬	53.0	154.0	16,150	3,112	470	43
7		田瀬	81.5	740.0	146,500	1,654	53	42
8		湯田	89.5	583.0	114,160	5,913	317	32
9		鳴子	94.5	210.1	50,000	6,088	763	38
10		御所	52.5	635.0	65,000	2,822	296	15
11	関東	釜房	45.5	195.3	45,300	3,561	701	26
12		藤原	95.0	401.0	52,490	1,643	105	39
13		相模	67.0	110.8	25,000	931	227	37
14		蘭原	76.5	507.6	20,310	1,944	124	31
15		五十里	112.0	271.2	55,000	1,442	133	40
16	北陸	川俣	117.0	179.4	87,600	3,804	684	31
17		川治	140.0	144.2	83,000	3,647	1,945	13
18		二瀬	95.0	260.0	26,900	3,525	387	35
19		大石	87.0	69.8	22,800	844	672	18
20		手取川	153.0	428.4	231,000	5,470	751	17
21	中部	美和	69.1	311.1	29,952	14,177	1,232	37
22		小波	105.0	288.0	58,000	13,035	1,676	27
23		新豊根	116.5	136.3	53,500	966	308	23
24		丸山	98.2	2409.0	79,520	33,622	340	41
25		横山	80.8	471.0	43,000	12,771	847	32
26	中国	矢作	100.0	504.5	80,000	7,925	604	26
27		菅沢	73.5	121.2	19,800	475	135	29
28		土師	50.0	307.5	47,300	1,143	162	23
29		柳瀬	55.5	170.7	32,200	4,191	571	43
30		石手川	87.0	72.6	12,800	765	439	24
31	四国	野村	60.0	168.0	16,000	560	222	15
32		大渡	96.0	688.9	66,000	2,156	313	10
33		鶴田	117.5	805.0	123,000	10,256	411	31
34		緑川	76.5	359.0	46,000	4,065	436	26
35		耶馬溪	62.0	89.0	23,300	419	392	12

現状では、各ダム貯水池において年1回の堆砂測量が行われており、堆砂形状や堆砂量についての情報はある程度蓄積されてきている¹⁾が、粒径や間隙率などの堆砂の質の情報は特定の貯水池のみでしか得られていない。そこで、本稿では、全国の30程度の貯水池において実施された現地調査結果を整理・解析することにより得られた堆砂形態および堆砂の質に関する知見をとりまとめて報告する。

2. 現地調査概要

大規模多目的ダムにおける堆砂状況を調査するために、旧建設省²⁾により堆砂の現地調査が行われた。調査の対象とされたダムの諸元を表-1に、その位置を図-1に示す。調査対象ダムは、総貯水容量が1千万m³以上の規模であること、竣工後10年以上経過していることを基準として選定さ



図-1 調査対象ダム位置

れた。調査では、堆砂のボーリング調査が行われた。ボーリング数は貯水池によって異なるが、平均で4地点程度実施されており、地点は河床の堆砂縦断形状等を参考に選定されている。ボーリングによって得られたコア試料から、性状が同じ区間もしくは適切な間隔で試料が採取され、土質試験による分析が行われた。また各貯水池のダム建設前の貯水池内河床形状(元河床形状)およびボーリング実施年度の河床形状の測量データを収集した。測量データは、縦断方向におよそ200~400mピッチの横断面について横断方向に5~20mピッチで行われた深浅測量によって得られている。

3. 調査結果

3.1 調査結果の例

各貯水池において、ボーリングサンプルの土質試験結果と河床形状測量データを整理した。紙面の都合からここでは一例として、緑川ダムの調査結果を示す。貯水池の最深河床縦断図を図-2、貯水池平面図を図-3に示す。これを見ると、ダムからの距離3,000m程度のところに、比較的粒径の大きい土砂が掃流状態で輸送されて形成されと考えられる「堆砂の肩」(図-12 参照)が確認できる。ボーリングは堆砂の肩の位置とその前後、及びダム直上流付近の4地点で実施されており、ダム堤体から上流に向かってボーリングにB-1~B-4と名前を付けた。図-4に貯水池河床の表層土砂の粒度分布を示す。これより、下流に行くに従い、粒度分布が小さい方へシフトしていくのがわかる。堆砂の肩より下流のダムから100m、1,700mの地点では、粒径0.1mm以下の細粒土砂がほとんどであり、これらは浮遊状態で貯水池内を輸送されて堆積したものと考えられる。図-5に各ボーリングの深さ方向の粒度構成、図-6にボーリングコア全体の粒度構成を示す。ここで、粒径区分としては粒径0.005mm以下を粘土、0.005~0.075mmをシルト、0.075~2mmを砂、2mm以上を礫とし、粘土とシルトを微細成分と定義し、以降の解析においてもこの定義を用いる。0.1mm程度以下の粒径はウォッシュロードと定義されることが多い。図-5より、堆砂の肩から下流のB-1、B-2では、深さ方向にほぼ一様に0.075mm以下の微細成分が堆積しており、上流のB-4では、ほとんど微細成分はなく粗い粒子が堆積していることがわかる。また、堆砂の肩付近のB-3では、深度8mあたりで、粒度分布が変化し微細成分の割合が大きくなっている。これは、

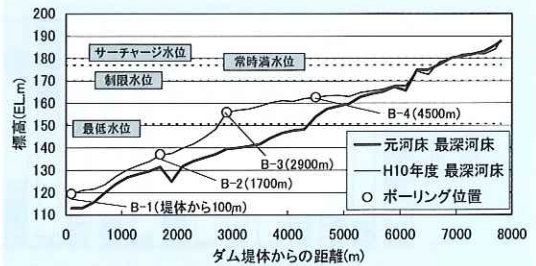


図-2 最深河床高縦断図(緑川ダム)

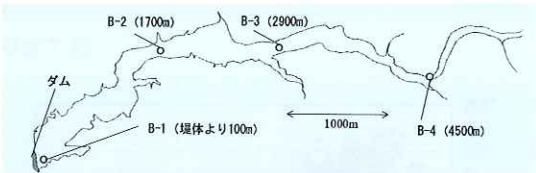


図-3 貯水池平面図(緑川ダム)

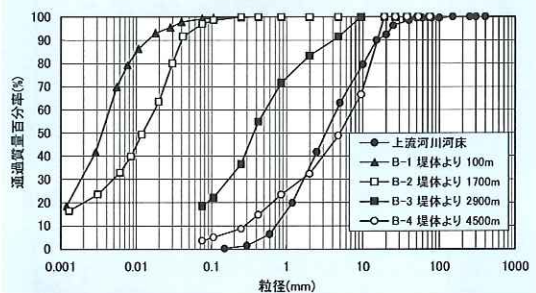


図-4 河床表層土砂粒度分布(緑川ダム)

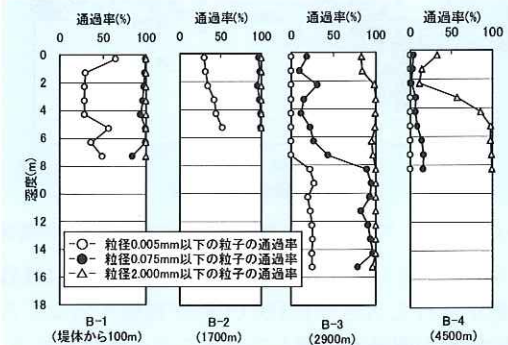


図-5 ボーリング深さ方向の粒度構成(緑川ダム)

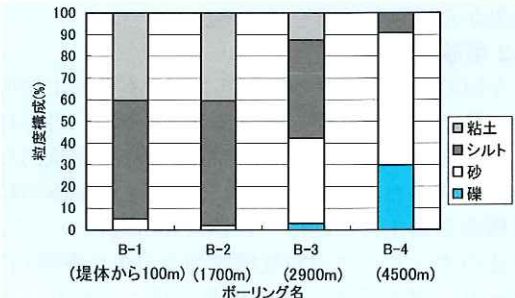


図-6 ボーリングの粒度構成(緑川ダム)

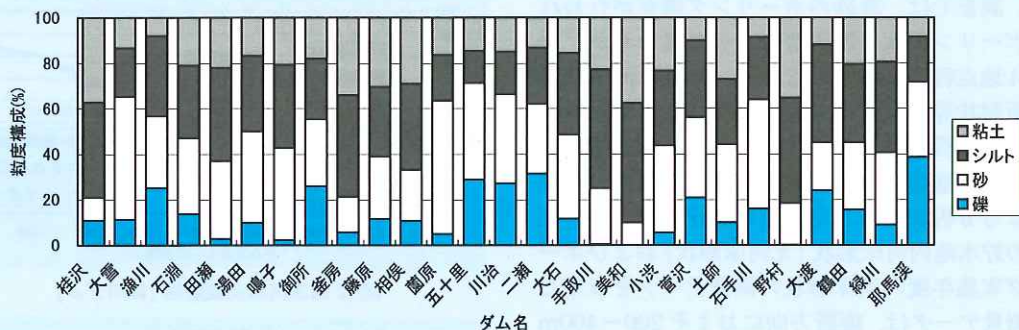


図-7 堆砂全体の粒度構成

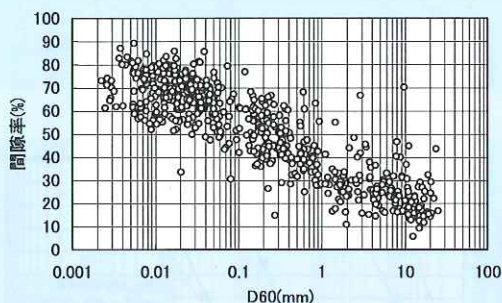


図-8 ボーリングサンプルの60%粒径と間隙率の関係

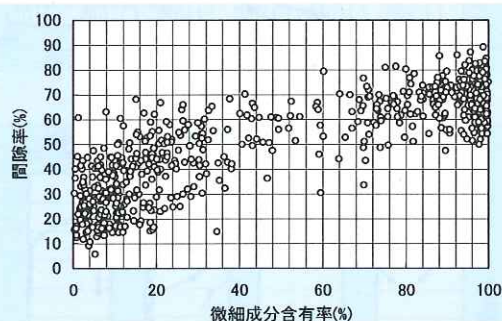


図-9 ボーリングサンプルの微細成分含有率と間隙率の関係
はじめに小さい粒子が堆積した後に、その上に堆砂の肩が進行し大きな粒径の土砂が堆積するなどの堆砂現象の履歴が関係していることが推測される。

各ダムについて同様の整理を行っており、この結果から以降の検討を進める。

3.2 堆砂の粒度構成

今回の調査におけるボーリングの本数および河床測定の断面数は限られたものであるが、得られたデータの範囲内で、堆砂の粒度分布の定量的な把握を試みた。図-7に調査ダムの堆砂全体の粒度構成を示す。これは、各ダム貯水池について、前述のボーリングの粒度構成割合(図-6参照)にボーリングの代表する堆砂量を掛け合わせ、そ

の後足し合わせて求めたものである(いくつかのダムについては、ボーリングデータまたは測量データの不足のため解析を行っていない)。ここで、ボーリングの代表する堆砂量については堆砂横断測量結果から領域を割り振って求めた。なお、堆砂の肩が明確な貯水池については、堆砂の肩の終端を境界に上流と下流で粒度が異なっていると考へて、その終端位置をボーリングの代表する領域の境界とした。図-7より、貯水池によって、粒度構成はかなり異なっており、今回の調査の堆砂体積に占める微細成分の割合の最大値は90%、最小値は28%、平均値は54%であった。また、平均的な粒度構成としては、礫:14%、砂:32%、シルト:34%、粘土:20%であった。

3.3 間隙率と土粒子実質量

各ダムのボーリングサンプルの土質試験結果より求めた各試料の間隙率と60%粒径、微細成分含有率の関係を図-8、図-9に示す。これを見ると、60%粒径が小さいほど、また微細成分含有率が大きいほど間隙率は大きくなっている。なお、図-9より、微細成分含有率は、小さい領域と大きい領域に集中しており、中間の値を持つサンプルは少ない。微細成分が100%近い場合には、間隙率は60~80%の値、微細成分が0%に近い場合は10~40%の値を示している。これらの情報は、貯水池内における浮遊砂の輸送・堆積等の解析における間隙率の設定等に有用であろう。

それぞれの試料の間隙率を考慮して求めた堆砂全体の土粒子実質部分についての粒度構成を図-10に示す。すなわち、この図は、堆砂体積を基準として示しており、100%に満たない部分は堆砂容積中に空隙(水)が占める割合を表している。図-11に貯水池内の堆砂全体の微細成分の占める割合と間隙率の関係を示す。これを見ると、微細成分が占める割合が大きいダム貯水池ほど間隙率は大き

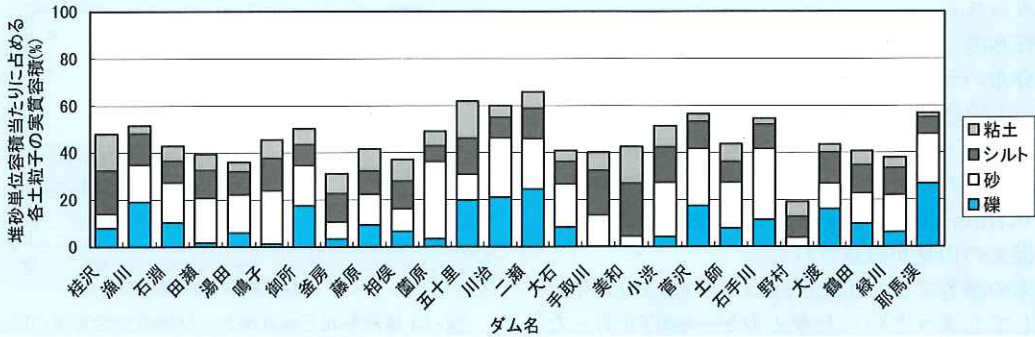


図-10 堆砂の土粒子実質部分の粒度構成

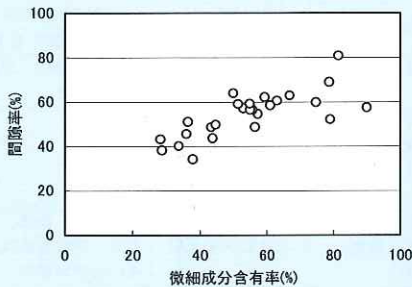


図-11 堆砂全体の微細成分含有率と間隙率の関係

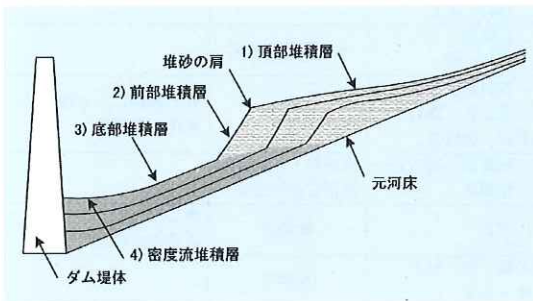


図-12 典型的な堆砂形状

なっている。また粒径の小さい土塊ほど間隙率が大きいので、土粒子実質部分の中の粒度構成は、堆砂水中体積のそれと比較して大きい方にシフトしている。実質容量でみた場合の、堆砂に占める微細成分の割合は、平均で約 44% である。

各貯水池で捕捉される微細成分実質容量の比堆砂量を求めると $10 \sim 468 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ の範囲にあり、平均値は $100 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ であった。

3.4 堆砂形態

従来の研究³⁾における堆砂形状と粒度分布についての知見を以下に示す。貯水池内の典型的な堆砂形状は、図-12 に示すような縦断形状であり、下記の 4 つの部分から形成される。

1) 頂部堆積層 (top-set beds)、2) 前部堆積層 (fore-set beds)、3) 底部堆積層 (bottom-set beds)、4) 密度流堆積層 (density current beds)

1) と 2) は、いわゆるデルタと呼ばれているもので、河床を転動してきた掃流砂および浮遊砂のうち粒径の比較的粗い部分 (0.1~0.2mm 以上) で構成される。このデルタの凸部は「デルタ肩」、「堆砂の肩」等と呼ばれ、一般に時間の経過とともに前進する。同時にデルタの上流端は上流へ遡上していく。2) の領域はデルタの肩を通過した掃流砂がその直下流に堆積し、それに浮遊砂による堆砂の影響が加わって形成される比較的勾配の急な部分である。3) と 4) の領域の堆積物はほとんど粒径が 0.1mm 以下のウォッシュロードの成分であり、4) の領域はウォッシュロードが密度流を形成してダム地点まで輸送されて堆積したものである。従来の日本の貯水池の堆砂調査では、頂部堆積層より上流ではほとんどが粒径 1mm 以上の砂礫であり、底部堆積層には 0.1mm 以上の粒子はほとんど流下せず、かつ 0.01mm より細粒分の大半は貯水池から流出していることが認められている。

今回収集した堆砂形状データの最深河床縦断面図 (図-2 参照) から判断したところでは、データを収集した 28 の貯水池のうち、明確に堆砂の肩が認められるものが 12、小規模な堆砂の肩が認められるものが 6、堆砂の肩が認められないものが 10 であった。図-13 に上記の堆砂形状と堆砂率および全堆砂中の細粒分含有率との関係を示す。堆砂率が 10% 以上のものは全て堆砂の肩が明確に認められており、大規模貯水池では、ある程度堆砂が進行すると堆砂の肩が形成されと考えられる。また、堆砂の肩が明確に認められた 12 の貯水池のうち、肩の先端の標高が最低水位または制限水位とほぼ一致しているものが 11 あり、従来の研究でも指摘されているが、堆砂の肩の標高は貯水池の運用 (貯水位の変化) に大きく影響を受けていることがあらためて確認された。さらに、図-13 の堆砂率の小さい領域の分布をみると、細粒分含有率が大きい場合には堆砂の肩が形成され難い傾

向がみられる。

各貯水池の最深河床縦断データと、縦断方向の粒度分布のデータを整理した結果、底部堆積層または密度流堆積層と判断される領域では、ほとんど 0.1mm 以下の粒径によって堆砂が形成されていた。今回の調査によっても、デルタ下流の領域には 0.1mm 以上の粒径はほとんど到達しないという従来の知見が確認された。

従来の調査では、0.01mm 以下の粒径の大半は流出してしまうといった考え方が一般的であったが、今回の調査では、粒径 0.005mm 以下の粘土が堆砂体積における割合は、最大で 38%、最小で 8%、平均で 20% となっており、かなりの割合で非常に小さな粒子も捕捉され堆積していることが明かとなった。

3.5 粒度構成に関係する

要因

今回の調査の結果、貯水池によって粒度構成が異なることが明かとなったが、これらを支配する要因について検討を試みた。

ダム直上流の堆砂面が放流設備標高まで達していない貯水池においては、粒径が大きく貯水池内を掃流状態で輸送される土粒子は、ほぼ 100% 捕捉されると考えられる。今回の調査ダムは全て上述のような状態なので、堆砂の粒度構成は、貯水池に流入してくる土砂の量及び粒度分布と流入した微細成分が貯水池にどれだけ捕捉されるかによって決まる。流入土砂の量、粒度に関係する要因としては、地形的条件、地質的条件、土砂生産源の条件、水文・気象条件、土砂輸送の条件、貯水池の立地条件等が挙げられる。微細成分の捕捉に関係する要因としては、貯水池の規模・形状、貯水位の変化、水温成層の状態、流入ハイドログラフ、放流条件、土粒子粒径等が挙げられる。以上のように粒度構成に関係すると考えられる要因は非常に多い。ここでは、粒度構成を表す指標として、堆砂体積における微細成分含有率を用いて検討を進める。

流入土砂の量と質に大きな影響を与えると考

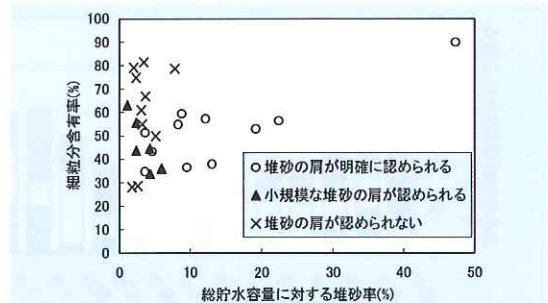


図-13 堆砂形状と堆砂率および細粒分含有率の関係

表-2 貯水池流域の地形、地質

ダム名	微細成分含有率 (%)	流域に存在する岩石	流域に占める割合の多い岩石 *	その他の地形・地質に関する事項
細粒分の少ない貯水池				
耶馬溪	28	安山岩、玄武岩、凝灰角礫岩	火成岩・変成岩	火砕流堆積物、沖積層、崖錐堆積物
五十里	29	花崗岩、流紋岩、黑色粘板岩、砂岩、チャート、石灰岩、礫岩、凝灰岩	火成岩・変成岩	
川治	34	流紋岩、花崗岩、安山岩、粘板岩、砂岩、チャート、凝灰岩	火成岩・変成岩	急峻な崖、崩壊、ガリ、崖錐堆積物、火山砕屑堆積物
石手川	35	花崗岩、閃緑岩、ホルンフェンス、角閃岩、安山岩、砂岩、泥岩	火成岩・変成岩	
藺原	36	波紋岩、花崗岩、安山岩、斑れい岩	火成岩・変成岩	
細粒分の多い貯水池				
手取川	75	花崗岩、波紋岩、片麻岩、安山岩、礫岩、砂岩、頁岩、凝灰岩	堆積岩	火山活動による地質の劣化、荒地
釜房	79	安山岩、花崗岩、凝灰岩、軟砂岩、粗礫岩	火成岩・変成岩と堆積岩がほぼ半々	
桂沢	79	緑色岩、泥岩	堆積岩	著しく急峻、波状褶曲構造
野村	81	未固結の礫・砂・粘土、砂岩、チャート	堆積岩	
美和	90	片麻岩、結晶片岩、砂岩、粘板岩、頁岩	堆積岩	中央構造線、破砕作用を受けた脆弱部、急峻な地形、大規模な断層

*) 岩石を「火成岩・変成岩」と「堆積岩」の二つに大別し、地質図等から判別した。

られる流域の地形・地質については、定量的な評価をするための指標の選定や数値の算出が困難なこともあり、微細成分含有率が大きい貯水池と小さい貯水池を抽出して、地形・地質概要の文献調査を行った。土粒子実質体積における微細成分含有率の小さい順に 5 つ、大きい順に 5 つのダム流域の調査結果を表-2 に示す。表中には、流域を構成する主な岩石を火成岩・変成岩と堆積岩の二つに大別し、地質図などから、どちらが主な構成要素となっているかを判別した結果についても示した。これをみると、流域が主に火成岩・変成岩によって構成される貯水池は細粒分が少なく、堆積岩で構成される貯水池は細粒分が多い傾向が認められる。また、崖錐堆積物が流域に存在する貯水池

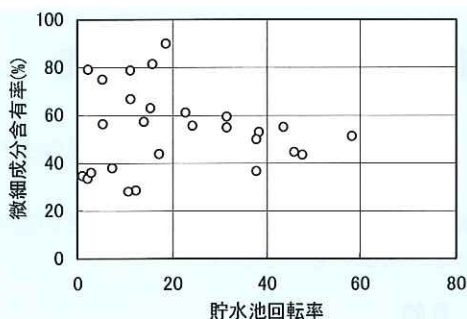


図-14 貯水池回転率と微細粒分含有率の関係

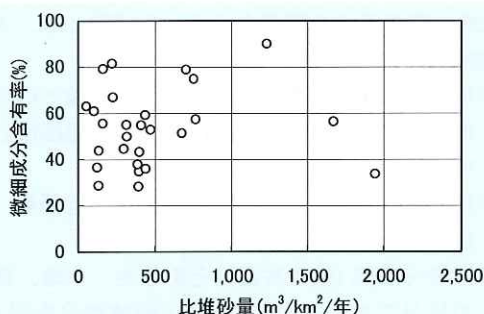


図-15 比堆砂量と微細粒分含有率の関係

で、細粒分含有率が小さいものがあるが、このような流域からは粗い粒子が多く流入してくることが推測される。

次に微細成分含有率の大小に関係する要因を検討するため、貯水池回転率、貯水池水深、貯水池延長および貯水池容量との関係を調査した。ここでは、紙面の関係から貯水池回転率のみにについて示す。貯水池回転率は、過去の流入量データから1年間の総流入量の平均値を求めてこれを代表容量で割ったものであり、1年で貯水池の水が何回入れ替わるかを表した指標である。代表容量としては、洪水期の出水前の状態を想定して、制限水位以下の容量か、制限水位のない場合は常時満水位以下の容量を用いた。回転率の値が大きいほど、微細成分も流水と共に流出しやすくなる。微細成

分含有率と貯水池年回転率との関係を図-14に示す。これより明確な相関関係は認められなかった。ここに示さなかった他の要因についても明確な関係はみられなかった。さらに、堆砂の進行の速さとの関係を調べるために、図-15に比堆砂量と微細成分含有率の関係を示した。これについても両者の相関は小さいようである。

これらの原因としては、堆砂の粒度構成は流入する土砂の粒度に大きく依存すること、実現象では微細成分は洪水時に大部分が流入するため、洪水時の捕捉状況を考慮する必要があること及び関係する要因が多く単一の要因による説明が困難であることが挙げられる。洪水時の微細成分の捕捉については、柏井⁴⁾によって洪水毎に捕捉率を求めてダム堆砂の捕捉率を算定する方法が提案されており、今後こういった手法による解析との比較を行う必要がある。

4. おわりに

本稿では、全国的なダム貯水池における堆砂についての粒度構成や間隙率等の土砂性状、堆砂形状・形態に関する知見を報告した。今後、これらの知見が堆砂予測、堆砂対策、土砂管理のための基礎情報として活用されることが期待される。最後に各種のデータをご提供いただいた国土交通省の各ダム管理事務所の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 柏井条介：ダム貯水池の堆砂問題，土木学会誌，Vol.86，pp.50-52，2001. 6
- 2) 建設省河川局開発課：ダム貯水池の土砂管理に関する研究，平成 11 年度建設省技術研究会指定課題，pp.13-1-23，1999.
- 3) 芦田和男、高橋保、道上正規：河川の土砂災害と対策，森北出版，pp.151-165，1983.
- 4) 柏井条介：ダム貯水池における細粒成分の捕捉率に関する一考察，ダム技術，No.181，pp.21-28，2001.10

櫻井寿之*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム水理チーム研究員
Toshiyuki SAKURAI

柏井条介**



同 ダム水理チーム首席研究員
Josuke KASHIWAI

大黒真希***



同 ダム水理チーム研究補助員
Maki OGURO