

貯水池の堆砂問題について ON THE SEDIMENT PROBLEMS OF RESERVOIRS

吉 良 八 郎*
By Hachiro Kira

1. まえがき

河川開発のため、治水・利水目的のダムが河道に築造されると、人為的または自然的な環境変化により新しいつりあい関係を得るため河道全体の形態を変え、その上流側では *dam up* によって河川流況が変化し堆砂現象が起こる。この堆砂現象は、一応砂防効果や骨材資源の積極的活用面から多少の効用をもたらすものであるが、貯水容量を減少させ、かんがい・発電・上水道または洪水調節など本来の治水・利水目的である貯水機能を低下喪失させ、堆砂の進展に伴ってダム付属構造物の機能障害を誘起する。また貯水池上流側では、河床上昇、洪水位上昇または地下水位上昇現象を誘起し、冠水・排水不良区域の拡大による内水災害や池岸地山の崩壊・地すべりなど土砂災害の多発激甚化の原因となることもある。特に最近は、これら背砂上昇に伴う洪水障害が社会問題として取り上げられるようになり、ダム計画の前途に大きな障壁となってきた。わが国は、地形急しうんであり、地盤運動が激しく、かつ台風常襲地で降水量が多いため河川の流出土砂量がきわめて多く、他方、自然の地形的条件がダム計画面からみて極度に劣っており、欧米の主要貯水池群に比較して一般にその規模・貯水能（たとえば *C/F* 比や *C/I* 比）が小さく、経済効果の面できわめて不利であるとされている。したがって、ダムの堆砂災害もきわめて深刻な様相を呈してきており、平均して貯水容量の約 2% 近くが年々堆砂で減少している現状からみて、今後ますます堆砂現象に基づいた諸災害の傾向は増大するものと考えられる。

他方、ダムの下流区域では、堆砂現象による流砂のしゃ断、河川流量の変化、または流下水勢による洗掘や選別掃砂などによって、一般に河床は低下し、次第に粗砂れきでおおわれる *armorizing* 効果 (*armor coat* の生成)

を呈するに至る。このダムによる土砂抨止作用に基づいた河床低下は、河川構造物の浮き上がりによる損傷、農業用水の取水困難や河床埋設利水施設の露出・損傷、堤内地の地下水位低下による井戸取水困難、堤内地から河川への逆漏水、または海岸侵食の助長など、多くの治水・利水機能の諸障害を誘起するものである。

以上の観点から、ダム堆砂問題の解明は防災計画の面からみて重要度がきわめて高いが、他方ダム計画の技術面からみても、ダムの耐用年数や有効貯水量の評価、放水・取水施設の配置、ダム安定計算における堆砂圧の考慮などの点から、適正な設計堆砂量（または設計比堆砂量）や堆砂分布形状などの推算がぜひ必要になってくる。

このようなダム堆砂問題を合理的に解決するためには、まず堆砂現象の実態を客観的に正しく把握する必要があり、貯水池に流入する土砂量や堆砂分布形状など堆砂機構の究明が先決であり、さらに進んで堆砂防除対策の確立が必要となってくる。この点、近年わが国はもとより国際的にも国際大ダム会議、国際かんがい排水会議または国際水理学会などの主要課題として取り上げられ、土砂水理学の発展に伴って数多くの研究がなされ、種々の特性が明らかにされてきた。

筆者も約 10 数年前から貯水池堆砂問題に关心を持ち、その基礎的問題を水理学的立場から総括的かつ系統的に取りあげ、堆砂率による貯水池寿命の推定^{1), 2), 3)}、貯水池の堆砂分布^{3), 32), 33), 35)}、堆砂機構に関する実験^{3), 36), 40)}・解析^{3), 37), 39)}、水理学的特性（主として密度流）と沈殿堆積^{3), 34), 38)}などの諸問題について若干の究明を行ない、進んで、堆砂防除対策^{40), 41), 42), 43), 44)}に関する技術的な面の検討を続けている。これまでの経験的な堆砂率推定^{1), 2), 3)}では、国内外 337 個（日本 272 個、アメリカ 93 個、フランス 8 個、中華民国-台湾 3 個、トルコ 1 個）のダム堆砂資料（わが国の資料は主として 1957 年度現在のもの）を用いたが、その後日本 430 個（主として 1968

* 正会員 農博 香川大学教授 農学部農業工学科

年度現在の堆砂資料^{2)~7), 22)}、諸外国 338 個（アメリカ 197 個、インド 73 個、中華民国・台湾 12 個、フランス、イタリー、アラブ連合、アルジェリア、パキスタンその他多くの国を含んだもの 56 個）^{2), 3), 8)~20)}、計 768 個のダム堆砂資料が収集できたので、再び堆砂の実態を巨視的に解析し、経験的に貯水ダムの設計堆砂量などを推算する問題について検討した。

2. わが国貯水池の堆砂現況と諸外国における著例との比較

人工貯水池の堆砂現象は、その供給源からみると、流域の規模や地形・地質、地被状態、水文気象条件、渓流・河川の水理学的特性、人為的諸作用などに支配される。他方、ダム建築面からみると、貯水池の環境・立地条件、貯水池の規模、貯水池形態、貯水池の水理学的特性（主として密度流）、貯水位の変動、流入土砂の特性、沈殿阻止率、建築後の経過年数、全堆砂率、貯水池操作または排砂施設の有無・効率などきわめて多くの因子に支配され、堆砂の実態がそれぞれ関係する要素によって異なっている。したがって貯水池の堆砂機構やその防除対策を逐一的に把握・樹立することは困難である。すなわち、堆砂を支配する情報因子がきわめて多いこと、その実測定量化の手法で未開発部分が多く、実測による量的表現が困難であること、また堆砂現象はその給源となる流域からの土砂生産・流出が、長期間の連続的形態をとる場合と、不連続的で偶発的な形態をとる場合が混在していること、さらにまた主要な支配因子と考えられる水文特性と土砂の生産・輸送・堆積の関係は非線型性が強く、情報理論的に取り扱う方法を困難なものにしていること、などのため、適正な把握が困難である。

しかし、堆砂の機構を究明し、その防災・減災対策を確立するためには、堆砂給源となる流域内の土砂生産過程と河道内の土砂輸送過程における機構、さらに貯水池への流入土砂量や阻止率（捕捉率）などを総合した土砂の生産・輸送・堆積のシステム解析が必要となるが、まず貯水池の堆砂に関する実態を、長期間にわたったより広範囲の既往実測資料を収集して適確に把握することが急務である。この意味から堆砂支配因子のうち、比較的容易に情報が得られる流域面積 F 、貯水容量 C 、平均年流入水量 I 、平均年降水量 P 、洪水流量 Q （設計洪水流量、既往最大洪水流量または年最大洪水流量など）、経過年数 Y などを可能な限り収集して、全堆砂率 R_s 、平均年堆砂率 r_s 、または平均比堆砂量 q_s などと対応させて巨視的な検討を行なった。

この際、長期間の堆砂現象を総括してみると、土壤侵食やその他の土砂災害現象でみられるように、期間中の

偶発的なある特定の土砂生産・流出に左右されることが多く、この点、特定ダムの堆砂量を推算する場合にその堆砂過程を確率過程とみなして、いわゆる時系列解析を行なう方法²¹⁾も試みられてきた。しかし、ここでは国内外のより多くのダムについて既往堆砂資料を収集し、普遍性のある経験的な推定を目標としたため、各情報因子の単位を一応年間にとり平均操作によってきわめて巨視的に処理した。

図-1 は、全堆砂率 R_s から貯水池の寿命を推定するために、日本 316 個（発電用ダム 300 個と $Y=160\sim450$ 年のかんがい用溜池 16 個含む）、アメリカ 171 個、インド 59 個、中華民国（台湾）12 個、その他の国 33 個、計 591 個のダム堆砂資料をもとにして、経過年数 Y (year) と全堆砂率 $R_s = 100 S/C, \%$ (S : 全堆砂量, m^3 , C : 原貯水量, m^3) の関係を、埋没曲線をパラメーターにとって両対数紙に点描したものである。この際の R_s は各貯水池の観測年次における全堆砂量 S のダム建設当初の総貯水量に対する百分率を示すものであるから、図-1 のように経過年数 Y と対応させると、埋没年数 Y_s (year) の長短の比較ができる、 $Y \leq 70$ を示す世界の主要ダムでは、特例を除いて $Y_s=10$ 年のはなはだ短いものから、 $Y_s=10000$ 年に至るはなはだ長いものまで、その変化のふれが著しい。この資料は観測最終年度の比較であるが、個々の貯水池では、全堆砂率の年変化曲線が複雑な様相を示し、わが国の主要貯水池群では一応緩慢型・中間型および急速型埋没貯水池に 3 分類できる^{2), 3)}。また図-1 には、表-1、表-2 にある $Y=160\sim450$ 年の貯水池年令を示す小規模かんがい用溜池群（ボーリングによる実測資料）²²⁾も併記してあるが、ほとんど $Y_s=700\sim5000$ 年型の埋没曲線範囲であり、現に香川県内約

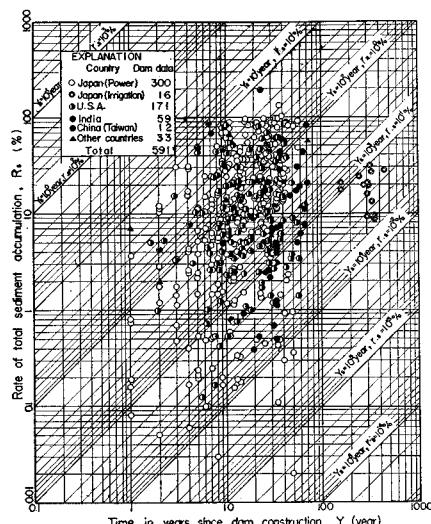


図-1 経過年数 Y と全堆砂率 R_s の関係

表-1 収集ダム堆砂資料の総括

国 别	収集ダム 資 料	平均年堆砂率 r_s		平均比堆砂量 a_s	
		供 ダ ム 試 数	平 均 (%)	供 ダ ム 試 数	平 均 値 ($m^3/km^2/year$)
日本*	414	366	1.71	277	533
日本**	16	16	0.07	—	—
アメリカ	197	189	1.16	185	580
インド	73	59	0.57	59	537
中華民国(台湾)	12	12	4.51	12	6 465
その他の国***	56	35	3.41	41	319
計	768	677		524	

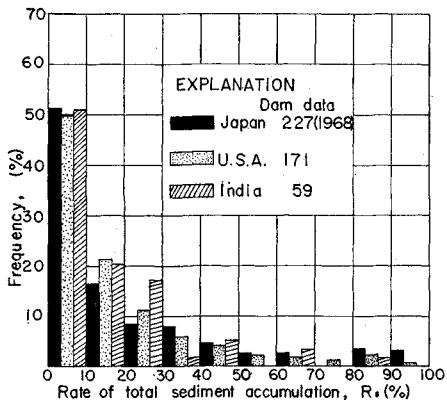
備考 *: 主として発電用ダム

**: 番川県内の $Y=160 \sim 450$ 年のかんがい用溜池、表-2 参照

***: フランス、イタリー、アラブ連合、アルジェリア、パキスタン、オーストラリア、その他多くの国を含んだ主要ダム

表-2 かんがい用溜池の環境別堆砂状況
資料の総括(香川県)²²⁾

貯水池相	実測数	全堆砂率 R_s (%)	経過年数 Y (年)	平均年堆砂率 r_s (%)
山 池	3	22.9	260	0.092
麓 池	5	20.7	304	0.074
野 池	8	18.9	314	0.051
計(平均)	16	(18.5)	(300)	(0.066)

図-2 全堆砂率 R_s の頻度分布

18 000 個のかんがい用溜池群の中には、1 200 有余年の貯水池年令を示し、かさ上げ修築を重ねたとはいえ、いまなお $C=154 \times 10^5 m^3$ の湛水をしている長寿型の満濃池もある。

以上の全堆砂率資料のうち、日本 227 個(1968 年度現在的主要発電用ダム堆砂資料)、アメリカ 171 個およびインド 59 個について全堆砂率 R_s の頻度分布を示したのが図-2 である。これによると、わが国主要発電用ダム群で、経過年数が $Y=60 \sim 70$ 年以下のものを同一レベルで論じることには多少の無理があるが、いま 1968 年度現在の実態を比較してみると、 $R_s=50\%$ 以上に達して貯水容量の過半が埋没しているダムが約 12%、 $R_s=80\%$ 以上に達して、本来の機能を喪失しているものが約 7% にも達している現状である。これに対し、silt problems では世界の両雄と称するアメリカ、インドに

おける主要ダム群の例をみると、母集団のとり方が基準年、資料数などの点で異なっているが、その頻度分布がわが国のそれに類似していることは興味深い。

経過年数がそれ程異なる貯水池群の埋没危険性を、全堆砂率 R_s の値のみで比較するのは必ずしも適正でない。この意味から、式(1)で求められる平均年堆砂率 r_s で比較すると、貯水池相互の堆砂による埋没速度が巨視的に比較検討できる。

図-3 は、日本 366 個、アメリカ 189 個、インド 59 個の主要ダムを対象にした r_s 階級別頻度分布を示したもので、さらに表-1 に示す r_s の総括平均値などからみると、わが国主要ダムは、ほとんど河川の本流または主要支川を山間渓谷において締切った mountain reservoir に相当するものであるから、水文・気象環境などがさらに悪条件を示す中華民国(台湾)の例には及ばないとしても、埋没速度が一般に高いものといえよう。この

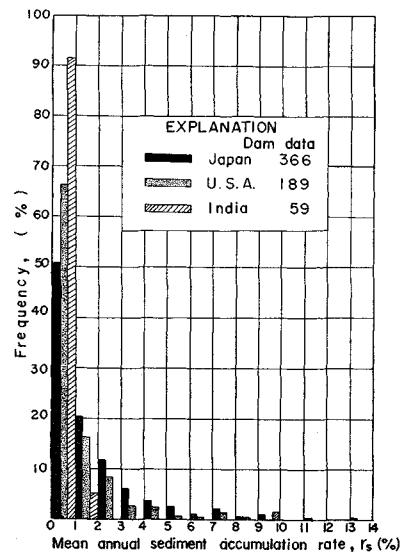
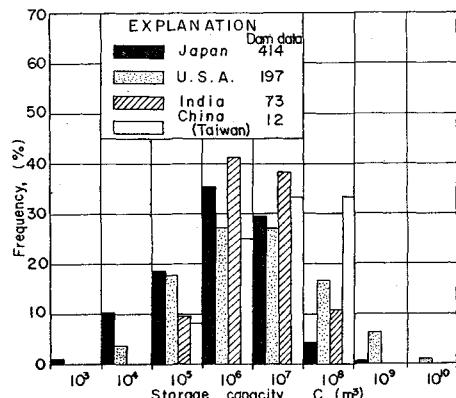
図-3 平均年堆砂率 r_s の頻度分布

図-4 供試ダム原貯水容量の頻度分布

表-3 アメリカにおける貯水容量階級別ダム堆砂の総括 (Dendy, 1968)²³⁾

貯水容量 C (acre-ft)	ダム数	原貯水容量の総計 $\Sigma C(m^3)$	全堆砂量の総計 $\Sigma S(m^3)$	全堆砂率の平均 $R_s(%)$	平均経過年数 $Y(年)$	平均年堆砂率 r_s	
						平均値 (%)	中央値 (%)
0 ~ 10^1	161	844 948	222 030	26.3	11.0	3.41	2.20
10^1 ~ 10^2	228	10 113 467	2 110 519	20.9	14.7	3.17	1.32
10^2 ~ 10^3	251	119 703 774	20 012 304	16.7	23.6	1.02	0.61
10^3 ~ 10^4	155	602 409 329	63 026 916	10.5	20.5	0.78	0.50
10^4 ~ 10^5	99	5 197 142 555	454 897 531	8.8	21.4	0.45	0.26
10^5 ~ 10^6	56	22 535 837 772	782 343 675	3.5	16.9	0.26	0.13
10^6 <	18	47 072 279 326	1 650 696 837	3.5	17.1	0.16	0.10
計 (平均)	968	75 538 331 171	2 973 309 812	3.9	18.2	1.77	0.72

際、供試ダム母集団の貯水容量階級別頻度分布は、図-4 のように供試ダム数の少ない台湾を除いて大体類似しており、mode は $C=10^6 \text{ m}^3$ の order である。

ここに、 r_s : 年平均堆砂率(%)、 R_s : 全堆砂率(%)、
 Y : 経過年数(年)、 S : 全堆砂量(m^3)、 C : 原貯水容量(m^3)で、この際の C は総貯水容量を採用しており、現実に堆砂量の対象となるのは洪水吐越流頂部以下の容量であるから、式(1)の R_s 、 r_s から貯水池寿命を推定するには過大評価の恐れはある。

また、平均年堆砂率は貯水容量の規模によって異なるもので、Dendy²³⁾がアメリカ968個のダム資料をもとにまとめた表-3によると、貯水容量の増大に伴って平均年堆砂率の平均値や中央値が減少する傾向が明瞭となる。

他方、堆砂の供給源から比較する場合には、式(2)から求められる平均比堆砂量 q_s ($m^3/km^2/year$)、すなわち、流域単位面積あたり年堆砂量がよく用いられる。表-4は平均比堆砂量の頻度分布を示すもので、表-1に示した総括平均値からみると、中華民国（台湾）の値は特例として、日本、アメリカおよびインドなどでは $q_s=500$ の order で近似している。

いま、わが国主要ダム堆砂量をもとにした平均比堆砂量から、国土総流出土砂量 S_T を概算すると、 $S_T=5\times$

表-4 平均比堆砂量 q_s の頻度分布

qs (m ³ /km ² /year)	日本		アメリカ		インド		中華民国 (台湾)	
	ダム数	%	ダム数	%	ダム数	%	ダム数	%
0~ 200	129	56.8	89	48.1	18	30.5	1	8.3
200~ 400	27	11.9	39	21.1	11	18.6	0	0
400~ 600	20	8.8	11	5.9	8	13.6	1	8.3
600~ 800	11	4.8	14	7.6	9	15.3	0	0
800~ 1 000	9	4.0	14	7.6	3	5.1	0	0
1 000~ 2 500	18	7.9	13	7.0	10	16.9	4	33.4
2 500~ 5 000	10	4.4	3	1.6	0	0	0	0
5 000~ 7 500	2	0.9	0	0	0	0	1	8.3
7 500~10 000	1	0.5	0	0	0	0	2	16.7
10 000~25 000	0	0	2	1.1	0	0	3	25.0
計	227	100	185	100	59	100	12	100

$10^3 (\text{m}^3/\text{km}^2) \times 369 \times 10^3 (\text{km}^2) = 1845 \times 10^5 (\text{m}^3)$, すなわち、年間に約 1.8 億 m^3 の土砂流出が見込まれることになる。しかし、この値は、比較的土砂流出が大きい貯水池の堆砂量から算出された数値であり、また国土の約 $1/3$ の流出土砂量の少ない平坦部も含まれているわけであるから、過大評価となり、矢野⁽⁴⁾が $q_s = 400 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ として概算した $S_T = 1.5$ 億 m^3 程度が妥当な数値と考えられる。他方、農林省林野庁調査⁽⁵⁾では、国土の約 $2/3$ の山地からは $S_T \doteq 1010 \times 10^5 \text{ m}^3$ (有害土砂量 $740 \times 10^5 \text{ m}^3$, 無害有効土砂量 $270 \times 10^5 \text{ m}^3$) の土砂流出を推定している。いま国土からの総流出土砂量は約 $1.0 \sim 1.5$ 億 m^3 とし、無害有効土砂量を約 20% 見込むと、制御対象となる有害土砂量は $S_T \doteq 0.8 \sim 1.2$ 億と推算される。この際、無害有効土砂量 $S_T \doteq 0.2 \sim 0.3$ 億 m^3 は、それぞれ河道の安定、海岸侵食の誘起防止または建設のための河川砂利給源として効用をもたらすことになる。

また、河川上流部のダム堆砂の未利用骨材資源の開発も、有害土砂としてのダム堆砂障害の防除と未開発資源活用の両面から一石二鳥の効果が期待されているが、この点、わが国発電用ダムのうち、総貯水量 $C=100$ 万 m^3 以上でダム高 15 m 以上の 240 地点の結果（1968 年度現在⁴⁾では、貯水容量合計 $C_T=734\,538 \times 10^4 m^3$ に対して、堆砂量合計は $S_T=45\,786 \times 10^4 m^3$ で約 6 % に達している。いま砂利採取可能率を約 50% と見込むと、 $S_T=22\,893 \times 10^4 m^3$ が採取可能堆砂量となり、他方全国砂防ダム 19,991 個の堆砂採取可能量は $S_T=1\,999 \times 10^4 m^3$ と見込まれており、その他の主要ダム堆砂を合計すると、全国的には $S_T \approx 5$ 億 m^3 以上の未利用砂利資源が考えられる。

ダム堆砂は、環境立地条件によっても左右されるもので、地域、水系または同一水系内でも立地によって異なるてくる。表-5はわが国の堆砂資料を地域別にまとめたもので、東海・北陸を含む中部地方が最も著しく、他方堆砂給源からみれば台風災害の頻発する四国地方が流域単位面積あたりの流出土砂量が最も多いことがうかがえる。また水系・河川によっても堆砂現象が異なるもので、表-6はわが国の同一水系内に堆砂資料3個以上得られ

表-5 わが国における地域別主要ダム群の堆砂

地域別	平均年堆砂率 r_s		平均比堆砂量 q_s	
	供試ダム数	平均値(%)	供試ダム数	平均値 ($m^3/km^2/year$)
北海道地方	21	2.17	11	297
東北地方	50	1.28	28	237
関東地方	31	1.51	16	492
中部地方	115	2.38	83	594
近畿地方	30	1.46	15	469
中国地方	37	1.34	24	388
四国地方	31	1.82	17	1 220
九州地方	51	1.15	33	523

表-6 わが国における水系別主要ダム群の堆砂

地域別 配列	水系	平均年堆砂率 r_s		地域別 配列	水系	平均比堆砂量 q_s	
		供試 ダム数	平均値 (%)			供試 ダム数	平均値 ($m^3/km^2/year$)
東北	北上川	3	1.94	北海道	石狩川	7	266
"	最上川	9	1.79	東北	最上川	8	452
関東	利根川	16	1.22	"	北上川	4	266
中部	神通川	8	4.16	"	阿賀野川	15	252
"	黒部川	3	3.57	関東	利根川	12	590
"	天竜川	6	2.64	"	相模川	3	112
"	大井川	11	2.61	中部	黒部川	3	2 973
"	富士川	6	2.25	"	大井川	9	1 530
"	庄川	10	2.24	"	常願寺川	3	499
"	常願寺川	5	2.07	"	庄川	8	415
"	木曽川	21	1.94	"	天竜川	5	410
"	信濃川	17	1.88	"	木曽川	19	364
中国	太田川	4	1.11	"	信濃川	13	279
四国	那賀川	3	2.48	"	富士川	3	112
"	物部川	3	1.42	近畿	熊野川	4	597
"	奈良利川	3	1.41	四国	吉野川	6	865
"	仁淀川	3	1.38	九州	小丸川	5	1 321
九州	大淀川	7	2.16	"	耳川	5	794
"	小丸川	5	1.20	"	大淀川	6	322
"	一ツ瀬川	3	1.19	"	大分川	3	247

た主要 20 水系について、水系別に平均年堆砂率および平均比堆砂量を概略的にまとめたもので、荒廃河川の多い中部地方が最も埋没危険性が高いことがうかがえる。

さらに同一水系内に分布する棚池的ダム群でも、上流側ダムが最も埋没危険性が高く、中・下流側のダムが堆砂速度が緩慢となりその堆砂機構も異なってくるはずであり、現にダム築造による河川開発が進んでいる。庄川、神通川、黒部川、常願寺川、木曽川などの水系では、一般に上流側のダムほど r_s が大きくなる傾向を示している。この点前川²⁴⁾は香川県内に古くから分布しているかんがい用溜池群 711 個の調査により、その環境別標高は、field reservoir が 20 m 前後に、mountain reservoir は 100 m 付近に多く、また hill-side reservoir は 20~80 m の中位に立地するものが多い傾向を認めており、表-2 のように、一般に高標高に立地する山池、麓池の方が低標高に立地する野池に比較して平均年堆砂率が高い傾向を示している。以上の資料のうちには、調整池ダムのようにすでに洪水吐越流頂部まで満砂しているもの、また本流筋と流砂条件が異なる支流を含

表-7 わが国主要ダムの堆砂状況 (貯水容量 $C=10^7 m^3$ 以上、平均比堆砂量 $q_s=10^3 m^3/km^2/year$ 以上の主要ダム)

順位 (q_s)	ダム名	水系	q_s ($m^3/km^2/year$)	r_s (%)	C/F (m^3/m^2)
1	黒部川第四	黒部川	8 600	0.89	1.0733
2	畠瀬第一	大井川	6 089	1.80	0.3377
3	渡川	小丸川	4 432	1.13	0.4185
4	井川	大井川	3 954	1.21	0.3290
5	上椎葉	耳川	3 621	1.15	0.3144
6	三奥只見	木曾川	3 114	0.35	0.8965
7	永瀬	阿賀野川	2 936	0.24	1.2492
9	長沢	吉野川	2 550	0.56	0.4556
10	立花	一ツ瀬川	2 010	1.06	0.2433
11	二又	犀川	1 886	0.80	0.2353
12	黒又川第一	信濃川	1 741	0.54	0.3231
13	河本	高梁川	1 722	2.24	0.0769
14	松尾川	吉野川	1 660	0.46	0.3648
15	笛生川	九頭竜川	1 447	0.18	0.8322
16	笠置	信濃川	1 329	0.65	0.2043
17	八久和	最上川	1 197	0.38	0.3152
18	丸山	利根川	1 132	0.16	0.6904
19	猿田間	三面川	1 093	0.83	0.1325
20	佐久間	天竜川	1 031	1.21	0.0854
21	朝日	木曾川	1 009	0.89	0.1134

めた水系全体のダム資料を加味している関係で適正な水系別代表値とはいえないが、一応同一の地域、水系または環境内にダムを築造する場合の堆砂量評価の目安となる。

表-7 は、比堆砂量が $q_s=10^3 (m^3/km^2/year)$ 以上のダムのうち貯水容量 $C=10^7 (m^3)$ 以上のわが国主要ダムの堆砂指標 ($q_s, r_s, C/F$) を示したものである。これによると、中華民国(台湾)での例、 $q_s=10^4 (m^3/km^2/year)$ 以上²⁵⁾の記録にはおよばないとしても、黒部川第4ダムなどでは土石流の頻発で設計比堆砂量を超過した堆砂実態を示しており、巨額の経費を投じて築造された貯水池が、土砂堆積によってみすみすその機能を低下・喪失する問題が重要視してきた。たとえば、黒部川第4ダム設計当初の設計堆砂量は 100 年堆砂で $S_{100}=13 540 000 (m^3)$ 、設計比堆砂量 $q_s=734 (m^3/km^2/year)$ とされているのに対し²⁵⁾、1968 年度現在(経過年数 $Y=7$ 年)の実測全堆砂量は $S_7=11 117 628 (m^3)$ で、設計堆砂量の約 82 年堆砂に達している計算になり、平均堆砂量も表-7 のように設計比堆砂量の約 10 倍以上 ($q_s=8 600 m^3/km^2/year$) に評価される。

さらに、その後 1969 年度²⁶⁾の年間堆砂量をみると $S=6 521 995 m^3 (r_s=3.27\%, q_s=35 254 m^3/km^2/year)$ のごとく異常な値を示しており、しかもその大部分が 8 月豪雨出水に基づくものであることからみて、このような個々のダム堆砂災害の適正評価には、さらに時系列的取り扱いの必要性が痛感される。たとえば、特定の水系・流域における貯水池の堆砂を考慮する場合なら、堆砂支配因子のうち地形・地質・地被条件などの変化は一般に

緩慢であり、設計堆砂 100 年程度の期間内における土砂の流出・堆積の系列を支配する主要因子は水文時系列特性であると考えられる。この点、確率事象としての土砂収支に対する支配水文量の評価決定については若干の指摘^{21), 26), 32), 47)}がなされてきたが解決の域に達していない。

3. 貯水池の C/F 比と平均年堆砂率ならびに平均比堆砂量の関係

土砂給源の広狭を表わす流域面積は、その流域に加え

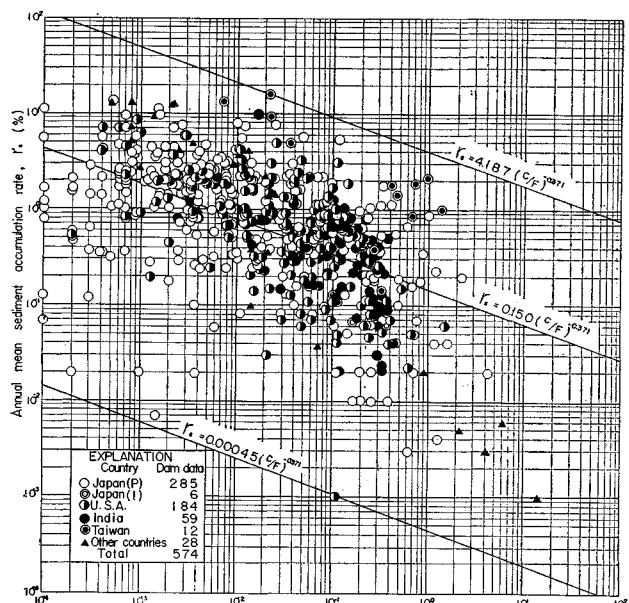


図-5 C/F 比と平均年堆砂率 r_s の関係

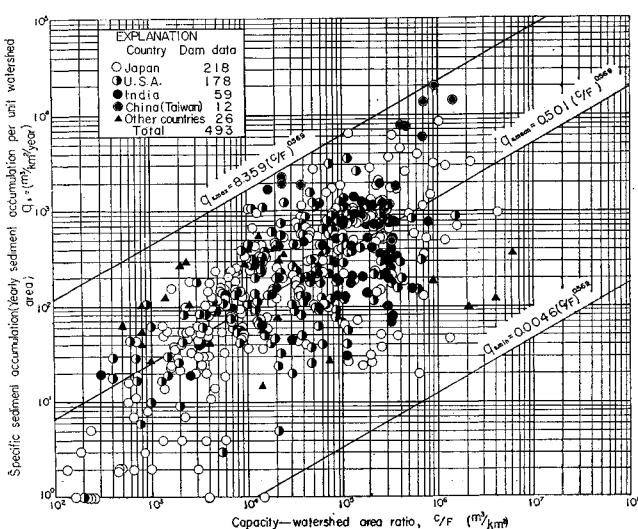


図-6 C/F 比と比堆砂量 q_s の関係

られる外力としての降雨量、流出水量などの大小を表わす重要な因子であり、したがって流出土砂量ひいては貯水池の堆砂量に密接な関係を有してくる。他方貯水池自体からみれば、堆砂能を表わす貯水容量の大小が直接埋没年数の長短に密接な関係があり、堆砂率や trap efficiency などを左右する重要なパラメーターとなってくる。このような観点から、日本 291 個、アメリカ 184 個、インド 59 個、中華民国（台湾）12 個、その他の国 28 個、計 $N=574$ 個のダム堆砂資料をもとにして、情報の収集が容易な貯水容量 C と流域面積 F との比、 C/F を採用し、平均年堆砂率 r_s との関係について再検討した。その結果を示したのが図-5 であり、 $\log r_s$ と $\log C/F$ の相関係数は $r=-0.540^{***}$ (以下、*: 有意水準 $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$ でそれぞれ有意、非常に有意な相関を示す) で非常に有意な逆相関が認められる。したがって最小自乗法により経験式を求める式 (3) が得られ、 K 値は $\max(4.187)$, $\text{mean}(0.150)$, $\min(0.00045)$ となる。ここに単位は $r_s(\%)$, $C(m^3)$, $F(m^2)$ である。

$$r_s = K(C/F)^{-0.371} \dots \dots \dots (3)$$

また、日本 218 個、アメリカ 178 個、インド 59 個、中華民国（台湾）12 個、その他の国 26 個、計 $N=493$ 個のダム堆砂資料をもとにして、 C/F ratio と平均比堆砂量 q_s との関係を示したのが、図-6 であり、 $\log q_s$ と $\log C/F$ の相関係数は $r=0.686^{***}$ で非常に有意な順相関が認められる。また経験式としては式 (4) が得られ、 K 値は $\max(8.359)$, $\text{mean}(0.501)$, $\min(0.0046)$ となり、この場合の単位としては、 $q_s(m^3/km^2/year)$, $C(m^3)$, $F(km^2)$ をそれぞれ用いた。

$$q_s = K(C/F)^{0.569} \dots \dots \dots (4)$$

このような C/F ratio を単一または複合的に貯水池の堆砂量、堆砂率または沈殿阻止率 E_T などと関連づけた経験式の算出は表-8 (式 5~16) のように、Witzig²⁷⁾, 鶴見²⁸⁾, 著者^{1), 2), 3)}, Jenkins¹³⁾, Flaxman²⁹⁾, Gottschalk³⁰⁾, Woodburn³¹⁾, Brown¹⁸⁾, Brune¹⁹⁾などにより試みられているが、広範囲の資料を用いた解析とはいえ、特定の国または地域に限られたものである。この点本解析では、より広範囲の国・地域にわたった主要ダム資料 (493~574 個) を用いたものであり、有意な相関が認められることからしても、国際的な広範の地域全体としてのダム堆砂の傾向を総括的につかみ得る点で一般性があるものといえよう。しかし、要因解析にあたって

表-8 C/F 比, C/I 比を単一または複合的に用いた経験式

式番号	著 者	発表年	経験式の形	係数 α			供試ダム数	相関係数 r	国・地域	単 位
				max	mean	min				
(5)	Witzig ²⁷⁾	1943	$q_s = \alpha(C/F)^{0.83}$	0.247 0.498	0.011 ~ 0.067				U.S.A., 南太平洋岸, 北部中央, 南部中央, 南東部, 北部平野地方のダム	$q_s(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year})$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{km}^2)$
(6)	鶴 見 ²⁸⁾	1954	$q_s = \alpha(C/F)^{0.8}$	0.8	0.1	0.0006	116		日本全国のダム	$q_s(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year})$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{km}^2)$
(7)	Jenkins ¹³⁾	1960	$q_s = \alpha(C/F)^{0.308}$		8.95		56	0.303	U.S.A., 南東地方のダム	$q_s(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year})$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{km}^2)$
(8)	吉 良 ¹⁾	1955	$r_s = \alpha(C/F)^{-0.43}$		0.17		101		日本全国のダム	$r_s(\%)$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{m}^2)$
(9)	吉 良 ^{2), 3)}	1960 1963	$r_s = \alpha(C/F)^{-0.42}$		0.14		316	-0.544	日本全国(223個), U.S.A. 各地(90個), 台湾(3個)のダム	$r_s(\%)$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{m}^2)$
(10)	吉 良 ^{2), 3)}	1960 1963	$r_s = \alpha(C/I)^{-0.473}$	0.920	0.214	0.0076	146	-0.547	日本全国(106個), U.S.A. 各地(39個), 台湾(1個)のダム	$r_s(\%)$, $C(\text{m}^3)$, $I(\text{m}^3)$
(11)	吉 良 ³⁾	1963	$r_s = \alpha(Q/F/C/F)^{0.572}$		138.39		90		日本全国主要ダム	$r_s(\%)$, $Q(\text{m}^3/\text{sec})$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{km}^2)$
(12)	吉 良 ³⁾	1963	$r_s = \alpha(R_f/C/F)^{0.868}$		0.00012		36		日本全国主要ダム	$r_s(\%)$, $R_f(\text{m})$, $C(\text{m}^3)$, $F(\text{m}^2)$
(13)	Gottschalk ³⁰⁾	1950	$Q_s = \alpha F^{-0.7664} \cdot (C/F)^{0.3701} \cdot Y^{0.7867} \cdot E^{1.0545}$		0.0417		30	0.967	U.S.A., W. Iowa, Missuir R.	$Q_s(\text{ton})$, $F(\text{sq-mile})$, $Y(\text{year})$, $C/F(\text{acre-ft/sq-mile})$, $E(\text{ton/sq-mile/year})$
(14)	Flaxman ²⁹⁾	1955	$Q_s = \alpha F^{-0.2059} \cdot (C/F)^{0.4694} \cdot Y^{0.7374} \cdot P^{0.8705} \cdot F_s^{0.2082}$		8.7619		38	0.893	U.S.A., Columbia River Basin	$Q_s(\text{cuyds/sq-mile/year})$, $F(\text{acre})$, $P(\text{inch})$, $C/F(\text{acre-ft/sq-mile})$, $Y(\text{year})$, $F_s(\text{acre/sq-mile})$
(15)	Woodburn ³¹⁾	1955	$Q_s = \alpha F^{0.8957} \cdot (C/F)^{0.3423} \cdot Y^{0.6578} \cdot E^{0.8578}$		0.0087		23		U.S.A., N. Mississippi	$Q_s(\text{ton})$, $F(\text{acre})$, $Y(\text{year})$, $C/F(\text{acre-ft/sq-mile})$, $E(\text{ton/acre/year})$
(16)	Brown ¹⁸⁾	1943	$E_T = \frac{F}{100 \left\{ 1 - \frac{1}{(1 + \alpha \cdot C/F)} \right\}}$		0.1		34		U.S.A.	$E_T(\%)$, $C/F(\text{acre-ft/sq-mile})$

注) q_s : 比堆砂量, C : 原貯水容量, F : 流域面積, r_s : 年平均堆砂率, I : 年平均流入水量, Q : 設計洪水流量, R_f : 起伏量, Y : 経過年数, E : 侵食率, P : 年雨量, F_s : 侵食面積, E_T : 沈殿阻止率

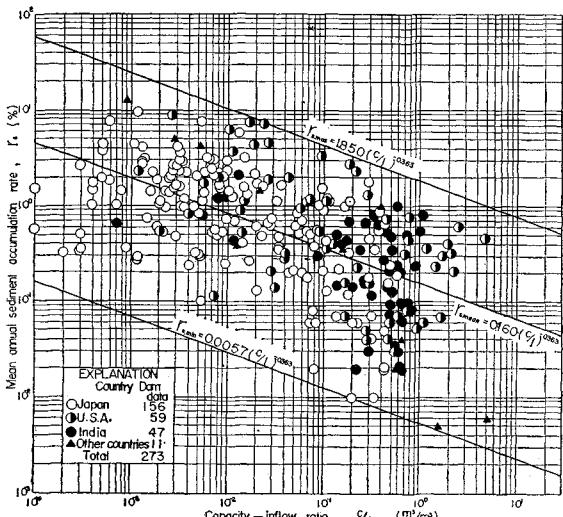
収集しやすい2変数処理を行なったため資料の描点がばらついており、 K 値も平均値の外に総括上限および下限値のみで、これを流域個々のダム堆砂量の推定には利便性の面があることは否定できない。すなわち、元来ダム堆砂量は流域の地形・地質・地被条件や水文・気象条件などの要因により地域性がきわめて高いものであるから、式(3),(4)において regional index を意味する地域別 K 値の評価がぜひ必要となる。この点、一般には同一環境内資料の集積不足の点で至難であり、一応年降水量などについて検討したが、妥当な結果が得られなかつた。

4. 貯水池の C/I 比と平均年堆砂率ならびに平均比堆砂量の関係

前項では、貯水能を表現する指標として C/F ratio を用いたが、流域面積より直接土砂の流送に関係深い平均年流入水量 I に対する貯水容量の比、 C/I ratio を採用して、平均年堆砂率 r_s および平均比堆砂量 q_s と対応させた。

図-7 は、日本 156 個、アメリカ 59 個、インド 47 個、その他の国 11 個、計 $N=273$ 個のダム堆砂資料を

もとにして、 C/I ratio と平均年堆砂率 r_s の関係を示したもので、 $\log r_s$ と $\log C/I$ の相関係数は $r=-0.600***$ で非常に有意な逆相関が認められる。したがって、この際の経験式は式(17)となり、 K 値は max(1.850), mean(0.160), min(0.0057) が得られる。なおこの場合の単位は $r_s(\%)$, $C(\text{m}^3)$, $I(\text{m}^3)$ である。

図-7 C/I 比と平均年堆砂率 r_s の関係

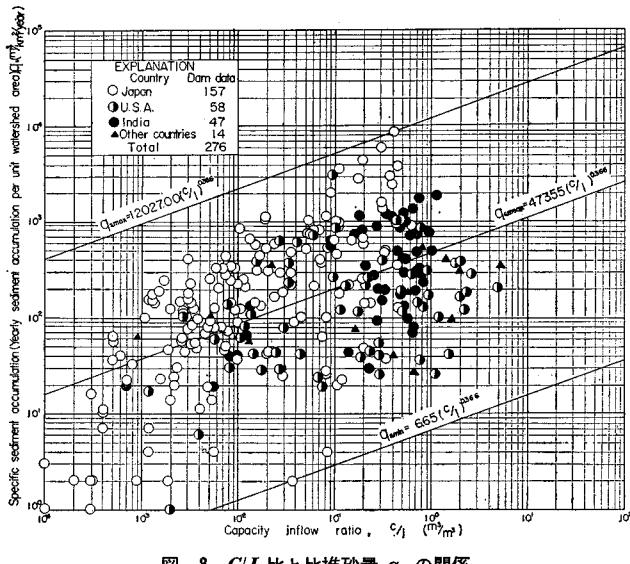


図-8 C/I 比と比堆砂量 q_s の関係

$$r_s = K(C/I)^{-0.363} \dots \quad (17)$$

同様に、図-8は日本157個、アメリカ58個、インド47個、その他の国14個、計 $N=276$ 個のダム堆砂資料を用いて C/I ratioと平均比堆砂量 q_s の関係を点描したもので、この際の $\log q_s$ と $\log C/I$ の相関係数は $r=0.545$ ***で非常に有意な順相関が認められる。したがって経験式として式(18)が得られ、 K 値は $\max(12027.00)$ 、 $\text{mean}(437.55)$ 、 $\min(6.65)$ となる。なお単位としては $q_s(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year})$ 、 $C(\text{m}^3)$ 、 $I(\text{m}^3)$ をそれぞれ用いた。

C/I ratio を単一に貯水池の堆砂率や阻止率などと関連づける試みは、Brown¹⁸⁾, Brune¹⁹⁾, 著者^{2), 3)}などによりなされてきたが、この解析では、より広範囲の国・地域にわたった主要ダム堆砂資料(273～276 個)を用いた点、さらに C/I ratio は長期間にわたる retention time の平均を表わすこと、 C/F ratio の場合と異なり無次元表示であること、または r_s との対応の場合には C/F ratio を用いた場合より相関が高いことなどの点から、国際的な広範囲の地域全体としてのダム堆砂の傾向を総括的につかみ得る点で、相当信頼度も高く応用性があるものと考えられる。

すなわち、平均年堆砂率 r_s のような平均的状態を指向する場合には、流域の状態や降雨・出水量がさほど変動しない限り、同一貯水池では大体一定とみなされるから、 C/I ratio が重要な支配要因となってくる。しかし、前述 C/F ratio の場合と同様に、要因解析にあたって 2 変数処理を行なった結果、その描点も多少ばらついており、さらに regional index としての地域別 K 値の

評価をしなければ、これを流域個々のダム堆砂量の推定に利用しがたい面があることは否定できない。また C/F ratio の方は貯水池計画に際して容易に得られる要因であるが、 C/I ratio の方は、ダムサイト地点における長期間にわたった年間流入水量の観測資料が必要となり、資料収集の点で難点がある。この点に関し、日本 180 個、アメリカ 60 個、インド 52 個、その他の国 20 個、計 312 個のダム資料について、 C/F ratio と C/I ratio の関係を両対数紙に点描してみると図-9 のごとく、日本 (C/F と C/I の相関係数は $r=0.851^{***}$)、インド ($r=0.613^{***}$) などでは、ほぼ linear な有意な相関を示しており、傾向として日本のダム群が最も retention time が短く、 $C/I = \alpha(C/F)^\beta$ の関係で示すと α 値が最も小さく、したがって堆砂支配因子としての流域内からの降雨の流出がきわめて多いことがうかがえる。この際の単位としては $C(m^3)$ 、 $F(m^2)$ 、 $I(m^3)$ を用いた。

5. 貯水池の比流量 Q/F と平均比堆砂量の関係

個々の貯水池堆砂量は、主として期間内の異常な水文・気象条件や流域内の人為的作用などに支配される場合が多い。たとえば長安口ダム³²⁾の年最大洪水流量 Q_{\max} (m^3/sec) と年間比堆砂量 $q_s(m^3/km^2/year)$ の関係をみると式(19)に示すように linear な順相関が認められ、

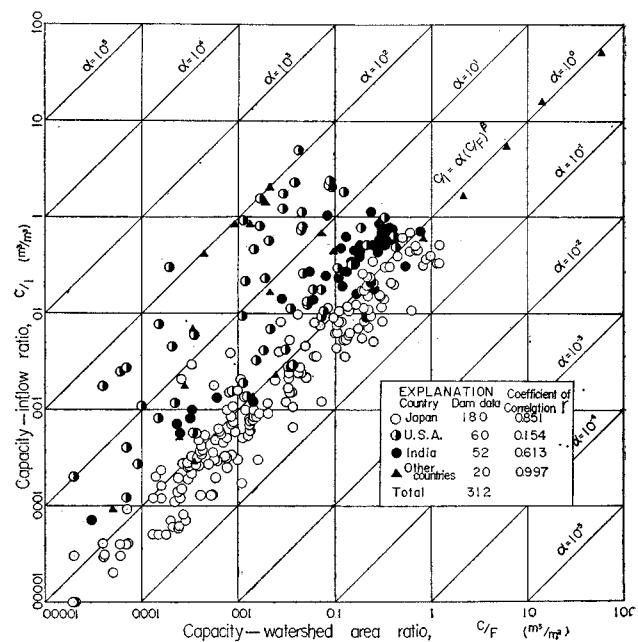


図-9 C/F 比と C/I 比の関係

その他千頭・王泊・久瀬などのダムの例⁴⁷⁾では比堆砂量 q_s の年変化と年最大洪水比流量の年変化との間には密接な関係が認められており、同様なことは黒部川第4ダム²⁶⁾でもいえ、年最大日流量と年間流入土砂量の関係では流量の2乗に比例するような関係が得られている。

このような観点から、個々の貯水池ではなく、わが国 $N=137$ 個の主要貯水池について、設計洪水流量の比流量 Q/F (Q : 設計洪水流量, m^3/sec , F : 流域面積, km^2 を採用) と平均比堆砂量 $q_s(m^3/km^2/year)$ の関係を総括してみると、図-10 に示すように $\log q_s$ と $\log Q/F$ の相関係数は $r=0.533^{***}$ で非常に有意な順相関が認められる。したがって総括的な経験式として式(20)が得られ、 K 値の範囲として $\max(308.4)$, $\text{mean}(14.2)$, $\min(0.5)$ が与えられる。

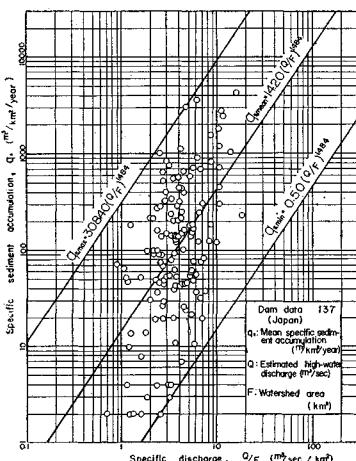


図-10 比流量 Q/F と比堆砂量 q_s の関係

この場合も、regional index としての地域別 K 値の評価が必要となるが、 C/F や C/I と対応させた場合の図-6、図-8、式(4)、式(18)などと比較すると、わが国のみの資料とはいって q_s の回帰指數曲線 ($K = \text{mean}$ の場合) からの分散・標準偏差などが小さく、総括的にみても、このような土砂輸送過程における流量との対応がよくなる傾向を示している。

以上の解析結果は広範囲の国または地域にわたった主要貯水池の堆砂について巨視的な傾向を示したものであり、個々のダムについて、設計堆砂量などを適確に推算する場合には、たとえば各経験式の K 値を地域・水系別に決めて利用する必要があり、この点については、主としてわが国の主要貯水池群を対象にして地形・地質・地被条件などを考慮した regional index の分類を検討中である。さらに、同一地域・水系内における個々の貯水池については、確率事象としての土砂収支に対する支

配水水量の評価決定が重要であり、たとえば、貯水池の堆砂現象を支配する主要水文因子として洪水流量を採用する場合には、既往洪水流量の時系列的水文統計処理により、堆砂現象を対象にしたいわゆる支配流量を決めるべきである。この点に關しても、その支配流量が年洪水流量の何%の超過確率洪水流量に相当するかなどについて多くの観測資料によって検討中である。

6. あとがき

貯水池の管理・保全の面から最も重要な問題として堆砂現象による諸障害があげられているが、その対策面はもちろんのこと合理的なダム計画画面から貯水池の堆砂量や堆砂分布などの予知が必要となってくる。このような観点から、内外 768 個の主要貯水池に関する既往堆砂実測資料を収集し、堆砂現象の実態を客観的に正しく把握するため巨視的な解析を行ない、経験的に貯水池の設計堆砂量などを推算する方法について検討した。

その結果を要約すると、わが国主要ダム群は経過年数 $Y=60\sim70$ 年以下のもので全堆砂率 $R_s > 50\%$ のものが約 12%, $R_s > 80\%$ に達し本来の機能を喪失しているものが約 7% に達しており、諸外国の主要ダム群に比較して平均年堆砂率 r_s からみた埋没速度が一般に高い。環境・立地の面から地域的には中部地方のダム群が最も埋没速度高く、堆砂給源からみると台風災害の頻発する四国地方のダム群が最も比堆砂量が大きく評価される。さらに水系別、貯水池相別にも埋没危険性が異なっているが、個々のダムでは比堆砂量が $q_s = 10^3 (\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year})$ の order を示して、計画当初の設計比堆砂量を超過しているものもみられ、このような貯水池の堆砂問題がダム計画の前途に大きな障壁となりつつある。

普遍性のある経験的な貯水池堆砂量の推定を目標にして、 C/F 比、 C/I 比または Q/F 比などの情報因子を平均年堆砂率 r_s や平均比堆砂量 q_s と関連づけた巨視的な解析を行ない、それぞれ式 (3), (4), (17), (18), (20) なる経験式を得た。これらの結果は、国際的な広範囲にわたる地域全体としての貯水池堆砂実態を総括的につかみ得る点で一般性が認められるから、ダム計画に際し堆砂量の推定に供用できる。

しかし、流域内個々のダム堆砂の適正な推定には、さらに地域的特性を示す regional index の加味が必要である。また、このような堆砂災害は、その給源となる流域の土砂生産・流出が長期間の連続的現象を示す場合より、むしろ不連続的で偶発的な異常現象を示す場合に主として支配されるものであるから、この点個々のダム堆砂量の適正評価には、さらに水文時系列特性などと関連づけた時系列的取り扱いが必要である。

最後に、経験式の算出には、情報量が多いため、香川大学計算センターの電子計算機を用いたことを付記する。

参考文献

- 1) 吉良八郎：貯水池の堆砂に関する研究(1), 香川県立農科大学学術報告, Vol. 17, No. 1, 1955, pp. 15~26.
- 2) 吉良八郎：堆砂率による貯水池寿命の推定, 土地改良, Vol. 10, No. 12, 1960, pp. 1~22.
- 3) 吉良八郎：貯水池の堆砂に関する水理学的研究, 香川大学農学部紀要, No. 12, 1963, pp. 1~191.
- 4) 通産省公益事業局水力課：昭和38·40·42·43年度貯水池土砂堆積状況表, 発電水力, No. 75, 1965, No. 87, 1967, No. 100, 1969, No. 105, 1970.
- 5) 通産省公益事業局水力課編著：日本発電用高堰堤要覧, 発電水力協会, 1954, pp. 1~404.
- 6) 田中治雄：わが国における貯水池築造に関する応用地学的研究, 電力中研・技術研究所報告, 土木 No. 57011, 1957, pp. 173~254.
- 7) 建設省河川局利水課：河川堰堤の堆砂量について, 資源調査会土地部会資料, No. 114, 1950.
- 8) Khosla A.N. : Silting of reservoirs, Central Board of Irrigation and Power, Publication No. 51, India, 1953, pp. 1~206.
- 9) Wu Chian-Min : Sediment problems of watershed in Taiwan, Quarterly Journal of Chinese Forestry, Vol. 1, No. 3, 1968, pp. 20~80.
- 10) Borland W.M. and Miller C.R. : Distribution of sediment in large reservoirs, Proc. A.S.C.E., Vol. 84, No. HY-2, 1958, pp. 1~18.
- 11) Renfro G.M. and Moore C.M. : Sedimentation studies in the Western Gulf States, Proc. A.S.C.E., Vol. 84, No. HY-5, 1958, pp. 1~15.
- 12) Rouse H. : Engineering hydraulics, John Wiley and Sons, New York, 1958, pp. 772.
- 13) Jenkins J.E., Moak C.E. and Okun D.A. : Sedimentation in reservoirs in the southeast, Proc. A.S.C.E., Vol. 86, No. SA-4, 1960, pp. 55~70.
- 14) Moore C.M., Wood W.J. and Renfro G.W. : Trap efficiency of reservoirs, debris basins, and debris dams, Proc. A.S.C.E., Vol. 86, No. HY-2, 1960, pp. 69~87.
- 15) Fox C.S., Cassidy W.C., Lane E.W., Maddok T. & Borland W.M., Duquesnois H., Raynaud J.P., Drouhin, Mallet & Pacquant, Reminieras & G. Braudeau G., Ehrmann P., Rao K.L. & Raghavachari S., Hoon R.C., Nizery A. & Rousselier M., Holecek V. : Paper R-18·27·34·41·47·49·50·51·55·72·83·111, Ques. No. 14, IVth Congress on Large Dams, 1951.
- 16) Eakin H.M. : Silting of reservoirs, U.S. Dept. of Agriculture Tech. Bull. 524, 1939.
- 17) Hartung F. : Ursache und Verhütung der Stauraumverlandung bei Talsperren, Die Wasserwirtschaft, 49-1, 1959.
- 18) Brown C.B. : Discussion of "Sedimentation in reservoirs" by Witzig, Proc. A.S.C.E., Vol. 69, No. 6, 1943, pp. 793~815, 1493~1499.
- 19) Brune G.M. : Trap efficiency in reservoirs, Transactions, A.G.U., Vol. 34, No. 3, 1953, pp. 407~418.
- 20) Summary on reservoir sedimentation surveys made in the United States through 1953, U.S.I.A.C. on Water Resources, Subcomm. on Sedimentation, Sedimentation Bull. 6, August, 1957, Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1964, pp. 17, 28~29.
- 21) Murota A. : Some proposals of the stochastic method of forecasting for deposits in reservoirs, Proc. I.H.S., Fort Collins, Colorado, U.S.A., Vol. 1, 1967, pp. 376~383.
- 22) 前川忠夫・脇谷 武：かんがい用貯水池相に関する研究（堆砂による貯水池形態の変移）, 香川大学農学部学術報告, Vol. 13, No. 1, 1961, pp. 73~80.
- 23) Dendy F.E. : Sedimentation in the Nation's reservoirs, Journal of Soil and Water Conservation, July-August, 1968, pp. 135~137.
- 24) 前川忠夫：かんがい用貯水池相に関する研究（貯水池の環境について）, 香川大学農学部学術報告, Vol. 8, No. 1, 1956, pp. 36~43.
- 25) 関西電力建設部：黒部第4貯水池の堆砂量について, ダム設計資料, No. 4, 1957.
- 26) 京大防災研究所富山地区災害調査グループ：富山地区災害調査, 昭和44年8月水災害の総合的調査研究報告, 1970, pp. 39~93.
- 27) Witzig B.J. : Sedimentation in reservoirs, Proc. A.S.C.E., Vol. 69, No. 6, 1963, pp. 793~815.
- 28) 鶴見一之：貯水池堆砂量の一算定法, 土木学会誌, Vol. 39, No. 3, 1954, pp. 143~145.
- 29) Flaxman E.M. and Hobba R.L. : Some factors affecting rates of sedimentation in the Columbia River Basin, Trans. A.G.U., Vol. 36, No. 4, 1955, pp. 293~303.
- 30) Gottschalk L.C. and Brune G.M. : Sediment design criteria for the Missouri Loess Hills, U.S. Soil Conservation Serv., SCS-TP-97, 1950.
- 31) Woodburn R. : Sediment production in small watershed, Agr. Eng., Vol. 36, No. 7, 1955, pp. 467~473.
- 32) 吉良八郎：堆砂防除に関する土砂水理学的研究(III), 農業土木学会論文集, No. 21, 1967, pp. 42~49.
- 33) 吉良八郎：かんがい用貯水池の堆砂に関する研究(III, IV), 香川大学農学部学術報告, Vol. 8, No. 1, 1956, pp. 65~75, 76~79.
- 34) 吉良八郎：かんがい用貯水池の堆砂に関する研究(V, VI, VII, VIII, IX, X), 貯水池における密度流について, 香川大学農学部学術報告, Vol. 9, No. 1, 1957, pp. 11~17, Vol. 9, No. 2, 1957, pp. 79~93, Vol. 9, No. 3, 1958, pp. 171~194, Vol. 10, No. 1, 1959, pp. 51~73, Vol. 10, No. 2, 1959, pp. 125~136, Vol. 11, 1959, pp. 111~137.
- 35) 吉良八郎：貯水池の堆砂分布予知法について, 農業土木研究, Vol. 26, No. 7, 1959, pp. 58~60.
- 36) 吉良八郎・横瀬広司：貯水池の堆砂に関する実験(I, II, III), 農業土木研究別冊, No. 1, 1960, pp. 55~61, 62~68, 68~74.
- 37) 吉良八郎・玉井佐一：特性曲線法による貯水池の堆砂機構に関する解析, 農業土木研究, Vol. 28, No. 6, 1961, pp. 17~24.
- 38) 吉良八郎：貯水池における池水の流動と水質分布について, 香川大学農学部学術報告, Vol. 12, No. 1, 1960, pp. 52~63.
- 39) 吉良八郎：貯水池の堆砂面勾配について, 香川大学農学部学術報告, Vol. 13, No. 1, 1961, pp. 87~96.
- 40) 吉良八郎ほか：堆砂防除に関する土砂水理学的研究(I, II, IV), 香川大学農学部学術報告, Vol. 17, No. 1, 1965, pp. 50~66, Vol. 20, No. 2, 1969, pp. 135~166, 農業土木学会論文集, No. 15, 1966, pp. 21~30.
- 41) Kira H. : Studies on sediments in irrigation channels, Sixth Congress International Commission on Irrigation

- and Drainage, New Delhi, Question 20, R-19, 1966, pp. 20-435~20-447.
- 42) Kira H. : Problems concerning the improvement of sand elimination facilities for the Amagawa Derivation Channel, Seventh Congress, I.C.I.D., Mexico, Question 24, R-23, 1969, pp. 24-333~24-352.
- 43) 吉良八郎・佐々木 孝:特殊転倒ゲートの排砂特性について, 農業土木学会誌, Vol. 36, No. 9, 1968, pp.15~22.
- 44) 吉良八郎・佐々木 孝:天川頭首工改修に伴う水理模型実験報告 (3), 天川導水路中の土砂吐工に関する実験, 1968, pp. 1~31.
- 45) 山口岩介:山地災害, 水経済年報; 1960 年版, 水利科学研究所編, 1960, pp. 403~412.
- 46) 矢野勝正:土砂災害とその対策, 水工学シリーズ, 67-06, 土木学会水理委員会, 1967, pp. 1~37.
- 47) 石外 宏:貯水池の堆砂量について, 発電水力, No. 86, 1967, pp. 28~36.

(1971.1.14・受付)
