

確率過程を考慮したダム貯水池計画堆砂量推定法

A Method to Estimate Amount of Sedimentation as Stochastic Process in Dam-reservoirs

竹林征三*, 廣瀬昌由**

by Seizou TAKEBAYASHI, Masayoshi HIROSE

In order to make full use of dam-reservoir's capacity economically, it is very important to estimate amount of sedimentation in dam-reservoirs. Based on accumulation of long series data of annual sedimentation in dam-reservoirs, long series meteorological data, and various kinds of numeric data which figure characteristics of catchment areas, it is tried to fit annual amount of sedimentation to stochastic process. It is clear that distribution of annual amount of sedimentation is treated as logarithmic normal distribution or Gumbel distribution. And then, a new method to estimate the sedimentation capacity in dam-reservoirs, which involves stochastic approach using precipitation data, is proposed and its accuracy is verified.

Keywords: dam-reservoir's sedimentation, stochastic approach

1. はじめに

ダム貯水池を有効に利用する上で、容量を効率的に配分することは、非常に重要な問題である。特にその内、計画堆砂量をどのように算出するかは、ダム貯水池の規模にも大きく影響を及ぼし、それに伴いダム建設に要する費用も大きく変動する。計画堆砂量をあまりに小さく算出すれば、貯水池がすぐに満砂になり、治水・利水の効果が失われる事になり、また、大きく見積もりすぎれば不経済な投資となる。そのため、計画堆砂量を適切にどのように算出するかが大きな課題である。本報では、最近までの全国のダム貯水池における年堆砂量データの蓄積により、年堆砂量実績を確率過程として表現することの可否について検討を行い、貯水池計画堆砂量の新たな推定方式として、確率的な考え方を導入することについて、考察を加えるものである。

2. 堆砂量の確率表現

2.1 堆砂量の経年変化

堆砂量の観測値は、年による変動が大きい。図-1に代表的なダム貯水池の堆砂量の経年変化を示す。昭和38年から平成2年の間で、年堆砂量が最大なのは昭和57年で、最小年堆砂量の20倍以上の堆砂が観測されて

* 正会員 建設省土木研究所ダム部長

** 正会員 建設省土木研究所水資源開発研究室研究員

(〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)

いる。昭和57年には、流域にある2つの降水量観測所のうちの1つの観測所で観測以来平成2年までで最大の年降水量を観測している。Bダムでは、例えば42年から51年の10年間の年平均堆砂量は $9,280\text{m}^3$ 、52年から61年の10年間では、 $35,400\text{m}^3$ となり、10年のオーダーのレンジでみてもその差はかなり大きい。Bダムでも年堆砂量の多い昭和54、55及び56年の年降水量は、平年に比べてかなり多く（昭和54年 $2,104\text{mm}$ 、昭和55年 $2,278\text{mm}$ 、昭和56年 $2,441\text{mm}$ なお、32年平均値 $1,701\text{mm}$ ）、既往最大日雨量や最大時間雨量を記録した日時は、これらの年に含まれている。このように、年堆砂量の経年変化は大きく、また降水量の及ぼす影響は大きいことがうかがえる。

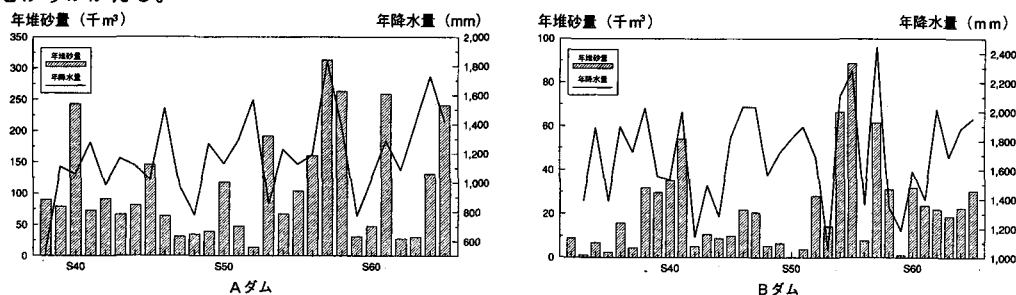


図-1 年堆砂量と年降水量の経年変化

2.2 堆砂量の確率表現

堆砂の経年変化が大きいこと、降水量との相関が比較的高いことを考慮し、堆砂量の確率表現を試みた。なお、貯水池への流入土砂量についても、降雨との関係において、確率過程として処理できることを示唆した、室田の先見的な報告¹⁾があるが、実際の貯水池堆砂過程を確率評価した事例はほとんどない。今回収集した多くのダム貯水池の堆砂量実績に基づき、ダム貯水池堆砂量を確率評価することについて詳細に検討を行った。堆砂の観測期間の長いダム貯水池を対象に、正規確率紙、対数正規確率紙及びグンベル確率紙を用いて評価すると、堆砂量の確率分布は概ね対数正規分布あるいはグンベル分布に従う事が確認された²⁾。代表的なダムにおいて、対数正規確率紙上に各年比堆砂量をその中央値で除してプロットしたものを示す（図-2）。

2.3 確率分布を利用した堆砂量の推定

2.2で示したように年堆砂量は、概ね対数正規分布または極値分布に従う事がわかったので、これらを用いて100年間の平均年堆砂量を次式により計算した。

$$V = \sum_{k=2}^m (P_{k-1} - P_k) \times (L_{k-1} + L_k) / 2 \quad (3)$$

V：比堆砂量の期待値、P：超過確率、L：実績比堆砂量、m：計算対象期間（ここでは100）

これらの値を、計画堆砂容量、現在までの観測データからの100年堆砂量と比較して示したのが表-2である。ここにあげた貯水池は、概ね現在までの平均堆砂量が計画値と一致しているものが多い。確率分布より算出した値を比較すると、年変動の大きな貯水池では、確率分布より算出した値の方がかなり大きくなっている。

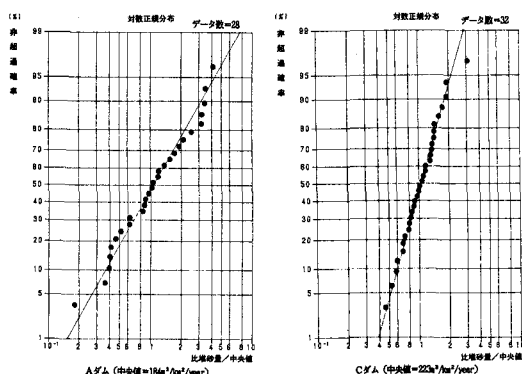


図-2 年比堆砂量の対数正規確率紙へのプロット

3 新しい堆砂量推定式の提案

3.1 現在の計画堆砂量算出の問題点

現在の計画堆砂量の算出の一般的な考え方は、以下の様に分類される。

(1) 同一水系或いは近傍類似水系に設けられている既設貯水池及び砂防ダムの堆砂実績を経過年数で除した平均年堆砂量から類推する方法

(2) 貯水池流入端の河道を流下する流量と流砂量との関係を実測によって

求め(実測データ不足でやむを得ないときは、適当な流砂量公式を用いる)、この関係を用いて流量から貯水池の堆砂量を推算する方法

(3) 堆砂量に影響する地形・地質など各種因子との関係を既設の貯水池の実測資料から統計的に処理した結果より求める方法(多くの各種堆砂量推定式はこの方法である)

(4) 集水区域内の航空写真をもとに、崩壊の変化状況を把握し、更にそれらを現地踏査により崩壊地の土砂量を測定し、毎年の崩壊流入土砂量を推定する方法

(5) 偶発的な土砂の生産、堆砂過程を確率過程とみなして時系列解析を行う方法

現在、実際の貯水池の計画堆砂量の算出に用いられているのは(1)と(3)の方法がほとんどであり、集水区域が狭い等の特殊な場合で、(4)の方法が行われることがある。(5)については、先述の室田の先見的な示唆の報告¹⁾があるが、ダム貯水池実堆砂量に関する具体の適用事例は報告されていない。ところで(3)の方法の場合、用いる各堆砂量推定式によってそのバラツキが大きい。そこで、それらの値を参考にしつつ総合的に工学的な判断を加味し、(1)によって定めているのがほとんどである。しかし、2.1でも示したように、堆砂量は年ごとの変動が大きく、10年単位でもその堆砂量の実績値が大きく異なる場合がある。そのため対象とした期間によって堆砂量の算出が大きく異なる場合がある。

3.2 新しい堆砂量推定式の提案

以上の検討を踏まえて、新しいダム貯水池の堆砂量の考え方について考察を行う。地域的な堆砂の進行の現状や、既存の堆砂量推定式をみてもわかるように、流域の平均傾斜や勾配、表層地質が貯水池堆砂現象に影響を及ぼしている事はまちがいない。日本の場合、これらの要因は地域的に大きく異なっているので、全国を一律に評価するのは極めて難しい。また2.2で示したように、堆砂量は相当な精度で確率分布に従う事がわかり、ダム計画への導入が必要であると思われる。これらを踏まえて、ダム貯水池の堆砂量算出に関して、以下のような考え方をとる。

(1) 貯水池堆砂量に関係する因子を、流域特性(地質的条件、地形的条件、地被条件など)と、水文気象的特性(降雨量、降雨強度、降雨継続時間、洪水流量など)に分けて考える。

(2) この内、流域特性は非常に複雑であり、ダム計画時点で個々のダム貯水池毎に、量的にある精度をもって全国を一律に評価する事は難しく、また、得られる精度には限界がある。そこで、これらの複雑な流域特性を代表するものとして、地理的に近傍で信頼できる堆砂データがある流域特性の類似している近傍ダム貯水池や砂防ダムでの堆砂量や崩壊量の過去の実績値を用いる。この近傍類似ダムのデータを用いる方法は、現在のダムの計画で一番信頼できる実績値として参考とされている方法でもある。

(3) 2で示したように、年堆砂量は確率表現できるとしても、同じような流域特性と見なせる近傍においては、堆砂量のデータが比較的長期にわたって存在するダムはむしろまれである。流域の近傍ダム実績として、十分な長期間の堆砂実績値が得られず、それだけでは確率処理するにはややデータ量が不足するのが一

表-1 100年堆砂量の推定

ダム名	流域面積 (km ²)	貯水池 容量 (千m ³)	計画 堆砂量 (千m ³)	実績年堆砂量(千m ³)			推定100年堆砂量(千m ³)			堆砂データ 収集期間
				最大	最小	平均	I	II	III	
A	410.0	12700	4100	312.75	13.69	109.85	10985	13704	12699	S38~H2
B	118.0	27500	2700	88.56	0.16	21.50	2150	3372	2688	S32~H2
C	126.9	36600	3600	87.79	13.05	32.01	3201	3685	3578	S34~H2
D	33.8	5000	650	30.02	0.73	7.74	774	925	1019	S38~H2
E	150.3	92700	2270	447.0	4.1	66.41	6641	7458	9330	S35~H2
F	109.7	21589	10231	198.0	4.0	60.76	6076	8815	7694	S45~H2
G	9.9	1375	133	20.08	0.3	2.25	225	218	345	S42~H2
H	18.9	3030	400	41.49	0.79	7.70	770	899	1055	S39~H2
I	26.0	14300	4379	368.0	0.0	47.94	4794	10278	9308	S30~H2
J	32.0	4210	100	1.3	0.8	1.02	102	105	104	S53~H2

I : 実績堆砂量の単純引き伸ばし
II : 年堆砂量が対数正規分布に従うと仮定した場合
III : 年堆砂量がタンベル分布に従うと仮定した場合

般的である。そこで、一般に堆砂量のデータよりはるかに長い期間の観測データとして、当該地点近傍も含めた日降雨量等の水文量を用いることが考えられる。その場合に、当該地点において、事前に適当な雨量等の水文量と堆砂実績値との間のある程度以上の相関性を有する関係式を求める一方で、長期間ある水文量を確率評価し、さらにその水文量と堆砂実績との関係式から近傍ダムの確率堆砂量を算出する。

(4) (2)で示した、流域特性を考慮するための近傍という概念は極めて曖昧な概念である。そこで(3)で算出した近傍ダムの確率堆砂量を当該ダムに適用するために以下のような手法を採用する。まず代表的な堆砂量の説明因子(標高や流域面積等)を当該ダム流域と近傍ダム流域で算出し、これらの説明因子の比のべき乗の積として補正係数を求め、この補正係数によって、近傍ダムの確率堆砂量を補正し、当該ダムでの確率堆砂量を算出する。

本報で提案する新しい堆砂量の推定式は、図-3で示すようなフローチャートで表されるが、簡潔に言えば、近傍ダムの実績堆砂量をベースとして、ダムの堆砂量を確率過程現象として捉え、ダムの堆砂量の確率量を算出するのに、より観測データ量が多く精度も高い降水量の確率分布の算出と、堆砂実績と降水量の関係分析を踏まえ、更に年堆砂量を平均的な現象として捉えた既存の多くの堆砂量推定法による説明変数の補正係数を加味して、確率的にダム計画堆砂量を算出する手法である。

3.3 堆砂で寄与する降雨特性の評価

貯水池堆砂現象は、大きくわけて、①山地における土砂発生過程、②発生した土砂が流送される過程、及び③貯水池における捕捉・沈降過程の3つの段階にわけて考える事ができる。これらそれぞれの現象に支配的な因子はそれぞれ異なり、現象相互も複雑に関係しあっているために、貯水池堆砂現象の生産から堆積までのメカニズムを厳密に追跡する事は難しい。個々の問題に関しては多くの検討がなされているので、ここではそれらを参考に、また確率表現する事を念頭に、観測データの多い降雨量について、どのような降雨特性が堆砂量に寄与するかの分析を行った。

生産土砂は、大きく崩壊と侵食に分けて考える事ができるが、崩壊に関しては、崩壊発生面積率 y と降雨量 x に関して、 $y = a(x - b)^n$ 型(a, b, n は定数)の予測式を採用しているものが多い³⁾。侵食についても、例えば河村⁴⁾はRillの侵食量は、流出係数と降雨強度の積の15/8乗に比例するとしている。また、金屋数⁵⁾によれば裸地斜面における微細土砂の生産量は、有効降雨(=降雨量-浸透能)の2/3乗に比例するとしている。生産された土砂の流送に関しても多くの研究が行われており、輸送形態によりその整理の仕方は大きく異なるが、ウオッシュロードは、流量の指数乗に比例すると言われている⁶⁾。そこで本報でも、年堆砂量と日単位の降水量データにこの型の関係式を採用する。地すべりによる土砂の崩壊は、ダムの堆砂に大きな影響を及ぼすので、図-4にある地すべりでの実効降雨と地すべり移動量の関係を示す。ここでの実効降水量(R_c)は、次式で定義している。

$$R_c = \sum_{m=0}^p \alpha^m R_m \quad , \quad R_m: m \text{ 日目の降雨量}, \alpha: \text{低減係数}, p: \text{経過日数} \quad (4)$$

これは、地すべり移動量にはその当日の雨量だけでなく、それまでにどれだけの降雨があったかが大きく影

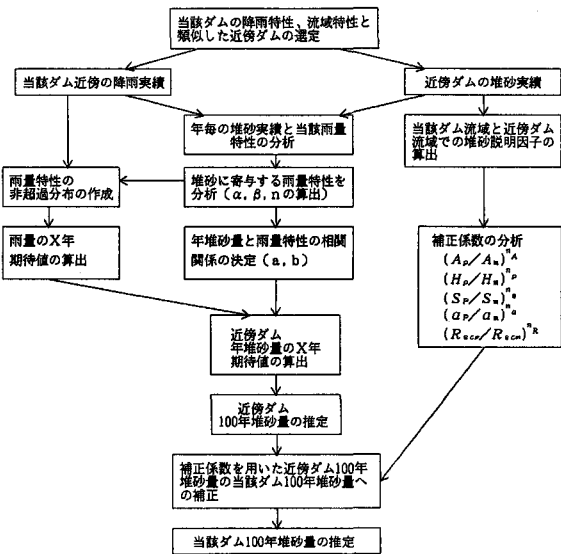


図-3 新しい堆砂量推定式のフローチャート

響すると予想されたためである。日平均移動量と実効降水量の相関係数を(4)式中の α を指標に比較したのが図-5である。 $\alpha=0.8\sim0.9$ 付近で相関が高い。他の多くの土砂崩壊現象においても、 $\alpha=0.8\sim0.9$ 付近で相関関係がピークになることが確認されている⁷⁾(図-6には、 $\alpha=0.84$ の時の実効降雨と日平均移動量の関係を示す)。そこで、堆砂に影響する降水量としても(4)式で示す実効降雨の概念を導入する。また、従来の生産土砂に関する研究は、一般に一出水を対象にしたものが多いが、ここでは、年間の堆砂量を取り扱うので、年間の堆砂量に影響を及ぼす降水量として出水毎の降水量の和とする次式を採用し、堆砂実効降雨(R_{sc})と呼び、またその一年間のトータルを年堆砂実効降雨(R_{sc})と呼ぶ。

$$R_{sc}=\sum_i R_i \quad ; \quad \{i: R_i \geq 0\}, \quad R_i=\sum_{l=0}^m \alpha^l R_l - \beta \quad , \quad m: \text{連続降水日数(日降水量1mm以上)} \quad (5)$$

比較的観測期間の長いDダムにおいて、(5)式により算出した年堆砂実効降雨と年堆砂量の相関が良くなるように、従来の研究⁹⁾を参考に試行錯誤的に各定数を求めた。 $\beta=50\text{mm}$ 、 $\alpha=0.8$ の時の、 n に対する相関係数の変化を図-7に示すが $n=1.8$ 付近で相関が非常に高い(相関係数=0.87)。年堆砂量 V とこの年堆砂実効降雨の関係は、以下の式で表す。

$$V=aR_{sc}+b \quad , \quad a, b: \text{定数} \quad (6)$$

図-8には、Dダムの25年間の観測データに基づいた年堆砂実効降雨と年堆砂量の関係を示す。

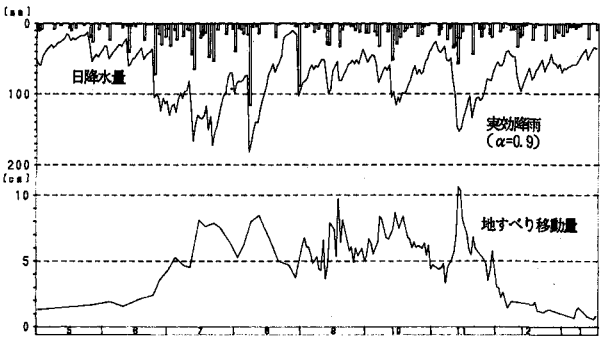


図-4 実効降雨と地すべり移動量

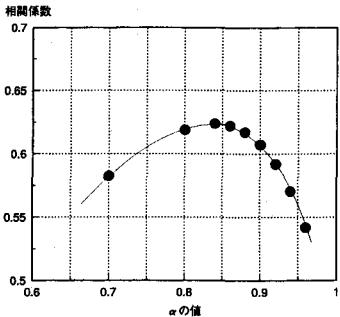


図-5 日平均移動量と実効降雨の相関係数 (α 指標)

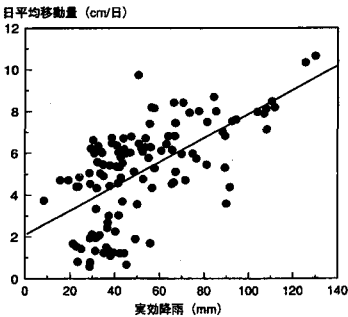


図-6 実効降雨と日平均移動量の関係 ($\alpha=0.84$)

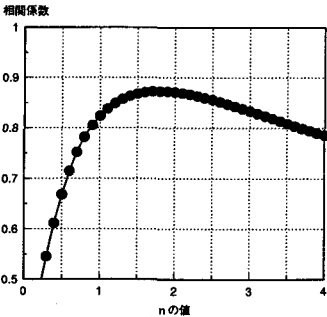


図-7 年堆砂実効降雨と年堆砂量の相関係数 (n 指標)

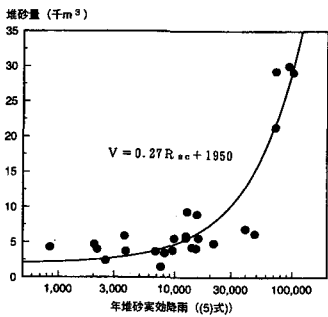


図-8 年堆砂量と年堆砂実効降雨の関係

3.4 近傍類似の補正

計画堆砂量の推定を必要とするダム貯水池地点と堆砂実績のある近傍類似地点とは、一般的には2地点が①同一河川水系、②地理的に距離が近い、③地形条件が酷似、④地質的ないしは地被条件が酷似、⑤降雨特性が同一、⑥流域におけるダム貯水池の計画規模がほぼ等しい等のいくつかの条件で選ばれるが、両ダムの間で、説明因子の相違が考えられる。これまで、近傍ダムの堆砂実績を参考とする場合には、以上の様な堆砂現象の各説明因子の相違について実測値を補正する事は特別に行われていない。今回の提案のダム堆砂量

の推定式としては、この補正の手法が極めて重要なプロセスとして位置づけられる。計画ダム地点と堆砂実績地点との諸元を表-2とすると、計画地点の年平均堆砂量 V_p は、堆砂実績地点の年平均堆砂量 V_m を以下のように補正して求める。ここで挙げた説明因子は、堆砂量と各因子の相関係数を参考に選出した。

$$V_p = \left(\frac{A_p}{A_m}\right)^{n_A} \left(\frac{H_p}{H_m}\right)^{n_H} \left(\frac{S_p}{S_m}\right)^{n_S} \left(\frac{a_p}{a_m}\right)^{n_a} \left(\frac{R_{scp}}{R_{scm}}\right)^{n_R} \cdot V_m \quad (7)$$

表-2 計画ダム地点と堆砂量実績地点の諸元

	計画ダム地点	近傍堆砂実績所在地点	比
集水面積	A_p	A_m	A_p/A_m
平均標高	H_p	H_m	H_p/H_m
起伏量の平均	S_p	S_m	S_p/S_m
崩壊地面積	a_p	a_m	a_p/a_m
年堆砂 実績降雨	R_{scp}	R_{scm}	R_{scp}/R_{scm}

(7)式中の指数に関しては、これまでの数多くの堆砂実績の分析⁹⁾から、次のような範囲にあると推定される。

$-0.47 < n_A < -0.19$ (Fair&Geyer, Varshney, etc.)、

$n_H, n_S, n_a \approx 1$ (石外, 田中, etc.) (8)

n_R に関しては、本検討では1.8程度の値が最適であるとする結果が得られたが、今後多くのダムでの検証が必要である。

3.5 具体的な適用事例

Dダム近傍に建設するダムの計画堆砂量を算出するために、図-3で示したフローに従って計算を行う。まずDダムの確率堆砂量を計算するのに、日単位の降水量のデータが25年間あり、実績年堆砂量のデータが10年間ある場合(Case 1)、降水量のデータは同じく25年間あり、堆砂量のデータが20年間ある場合(Case 2)に、図-3に従ってDダム100年間確率堆砂量の年平均値を計算した(手法①)。また、それぞれのCase毎に2.2で示した、堆砂量の確率分布からその確率値を直接算出した場合(手法②)と、実績のそれぞれ年平均堆砂量、また参考のために、Dダムでの28年間の年堆砂量実績の平均値、それを対数正規分布及びグンベル分布に従うとした場合の100年確率堆砂量の年平均値を表-3に併せて示す。実績の堆砂データが少ないのでこの比較によって精度を論じることは難しいが、この表を見ると、本報で提案した方法により、堆砂量の推定精度の向上ができると期待できる。実際に、当該ダムの100年確率堆砂量を算出するには、上記3.4で示した方法により補正する必要がある。

表-3 各手法による推定堆砂量の比較
(100年平均)

単位(千 m^3)

	Case1	Case2
手法①	11.2	10.2
手法②	18.8	11.4
実績平均	14.4	9.8
28年間実績平均値: 7.7		
対数正規分布仮定: 9.3		
グンベル分布仮定: 10.2		

4. おわりに

本報では貯水池堆砂現象を確率過程として捉えて、計画堆砂量の算定に確率論的アプローチを用いる手法を提案した。今後さらに、多くのダム貯水池のデータを用いて本手法の有効性を検証するとともに、(5)及び(7)式中の各定数の設定について更に詳細な検討分析を行うこととしている。

参考文献

- 1) 室田明: 貯水池堆砂量の推算について、水理学・水文学における最近の進歩、土木学会関西支部、1976
- 2) 竹林征三、廣瀬昌由、尾作悦男: ダム貯水池堆砂量の推定法についての試論、ダム工学、Vol 8、pp.6-20、1992
- 3) 吉松弘行: 山腹崩壊の予測式について、新砂防、102、pp.1-9、1977
- 4) 河村三郎: 斜面侵食量の一推定法、土木学会第37回年次学術講演会概要集Vol12、pp.483-484、1982
- 5) 金屋敷忠儀: 山地流域における微細土砂の生産・流出機構と流出予測法に関する研究、京都大学学位論文、1981
- 6) 土木学会: 水理公式集
- 7) 渡正亮、竹林征三、松田六男: 真名川ダムの原石山切取法面崩壊の特性、地すべり、Vol 113.No.4、pp.1-10、1977
- 8) 例えば、村野義郎: 山地崩壊に関する2、3の考察、土木研究所報告第130号、pp79-99、1967
- 9) 芦田和男編: ダム堆砂文献資料集大成、(株)河鍋書店