

ダム流域におけるウォッシュロード量の評価

QUANTITY EVALUATION OF WASH LOAD ON UPPER DAM RESERVOIR BASINS

角 哲也¹・塚原千明²

Tetsuya SUMI and Chiaki TSUKAHARA

¹正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 建設省土木研究所 水工水資源研究室研究員 (〒305-0804 つくば市旭1)

It is important to know quantity of wash load for the integrated sediment management from upstream through downstream river basins. Besides on downstream areas, those data have been very scarcely measured and reported on upper river basins. Those are essential for river planning, particularly for sediment management of reservoirs.

This paper focuses on wash load on upper dam reservoir basins. Relationship among discharge, suspended solid concentration and quantity of wash load are investigated using existing field data on several measuring points. Duration of suspended solid concentration in those natural floods is also discussed. This would be helpful for adaptive management of sediment flushing operations on dam reservoirs since those may cause high turbidity discharge to downstream river and it is requested to minimize damage on aquatic ecosystems.

Key Words : wash load, integrated sediment management, reservoir sedimentation, Miwa dam, Katagiri dam

1. はじめに

流砂系における総合的な土砂管理を実現するためには、土砂の量と質に関するモニタリングが重要とされている。幸い、我が国の主要河川の上流域には多目的ダムを含めた多くのダム貯水池が既に建設され、主として洪水時に流入する浮遊砂・掃流砂はその大部分が補足されている。従って、従来、主要なダムについて行われている毎年の堆砂量調査を活用するとともに、さらに進んで堆積土砂の粒度分布調査を行うことにより、ダムを流砂系における貴重な土砂観測点として位置付けることができる。

これに対してウォッシュロードは、一般にダムでは貯水池に流入しても一部が補足されるものかなりの部分が流出してしまう。従って、その全容を明らかにするためには、ダム流入河川を対象とする洪水時の系統立てた採水調査の実施や自動観測システムの整備が必要である。

ウォッシュロード量に関しては、従来、大河川下流域における観測事例は多いが、ダム流域のような山地河川においては少ない。その理由として、一般にダム上流域の山地河川は急流であることから調査が難しく、また予算的な制約から濁水問題などの必要性があるところに調査が限定されていることがあげられる。また、山地河川においては降雨流出が極めて早く、洪水の立ち上がりか

らを十分にとらえた資料が少ないのが現状である。

一方、このような自然洪水時のウォッシュロード量の見積もりは、近年注目されている排砂バイパス方式などのダム堆砂対策の計画策定はもとより、フラッシング排砂を行った場合に下流河川に発生する高濁水が水生生物に与える影響を評価する上で極めて重要な情報となる。

そこで本論文では、まず、ダム流域などの山地河川における既往の観測事例を系統的に収集・整理するとともに、流量 (Q (m^3/s)) と浮遊土砂濃度 (SS (mg/l))、ウォッシュロード量 (Q_s (m^3/s)) の関係について考察を行う。次に、主要な洪水を対象に、一洪水中における SS とその継続時間についても整理を行い、これら既存資料の活用方法について検討を行う。

2. ダム流域におけるウォッシュロードの考え方

ダム流域のような山地河川においてウォッシュロードを考える場合には、次のような3つの視点が重要である。

- (1) 流砂系の基本情報
- (2) ダム堆砂問題を考える場合の基礎情報
(自然洪水時の $Q \sim Q_s$ の関係 (土砂量が問題))
- (3) ダム排砂による環境影響評価のための基礎情報
($Q \sim SS$ (\sim 継続時間) の関係 (濃度が問題))

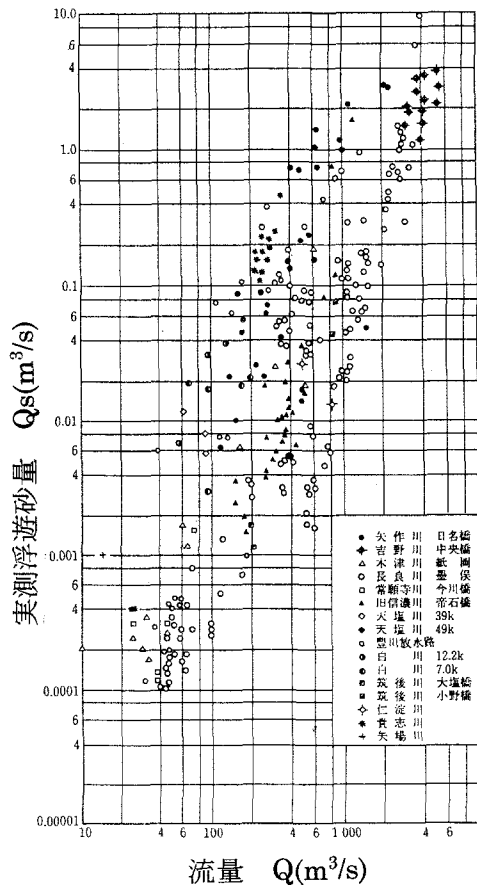


図-1 実測浮遊砂量と流量の関係¹⁾

ウォッシュロードに関しては、建設省河川砂防技術基準(案)同解説や土木学会水理公式集に採用されているチャート(図-1)があり、(1)式のようにウォッシュロード量の算定式が提示されている。

$$Q_s = (4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}) Q^2 \quad (1)$$

表-1 ウォッシュロード観測事例

ダム名	水系	観測地点	流域面積 (km ²)	観測年	主要洪水ピーク流量 (m ³ /s)	主要洪水ピーク比流量 (m ³ /s/km ²)	参考文献
一庫	淀川	国崎	33.9	1986	70	2.06	6)
一庫	淀川	千軒	67.5	1986	100	1.48	6)
下久保	荒川	柏木	322.9	1986	500	1.55	6)
美和	天竜川	ダム上流	311.1	1976~	350	1.13	4)
小洪	天竜川	ダム上流	288	1976~	300	1.04	4)
横山	揖斐川	広瀬	114	1976	350	3.07	7)
横山	揖斐川	杉原	272	1976	700	2.57	7)
横山	揖斐川	本郷	226.1	1976	550	2.43	7)
横山	揖斐川	徳山	254.5	1994	800	3.14	7)
大戸川	淀川	馬門橋	14.2	1975~78	15	1.06	2)
片桐	天竜川	上流砂防ダム	15.1	1997	45	2.98	5)
二風谷	沙流川	上流貯砂ダム	1215	1997	1800	1.48	8)

しかしながら、これらは大河川の下流部における観測データが中心であり、ダム流域のような山地河川におけるものは少ない。これに対して、山地河川におけるウォッシュロードの観測事例は、代表的なものとして淀川水系大戸川²⁾、新宮川水系川原樋川³⁾、天竜川⁴⁾などが知られているが、これらを体系的に整理したものはない。

近年、先の(2)の観点から、このような山地河川におけるウォッシュロード量の見積もりを行う必要性が生じている。正確を期するためには、評価地点での観測を行って実際に(1)式のような算定式を作成することが望まれるが、概略検討時点では(1)式がそのまま代用される場合があり、場合により過小に評価されることが懸念される。

3. ダム流域におけるウォッシュロード観測事例

既往の観測事例は多くないが、建設省所管の多目的ダム流域を中心にデータが収集されてきている。また、ダムによっては、堆砂問題の発生を契機に継続的に自然洪水時の流砂観測を行い、その流域におけるQ~Qsの関係式を作成している例も見受けられる。

今回の検討を行うために収集・整理を行った既往の観測事例の一覧を表-1に示す。なお、これら観測データの多くは、洪水時に貯水池上流河川の定点(橋梁など)において一定時間間隔(概ね1時間)で採水を行い、これらを分析したものであり、必ずしも洪水の立ち上がりからを十分に捕えたものばかりとは限らない。

このようなことから、筆者らは極めて流出の早い小流域におけるウォッシュロード観測を自動で行うシステムを検討し、これを長野県の管理する天竜川水系片桐ダムに適用して観測を行った⁵⁾。今回の検討においては、この結果も含めて行っている。

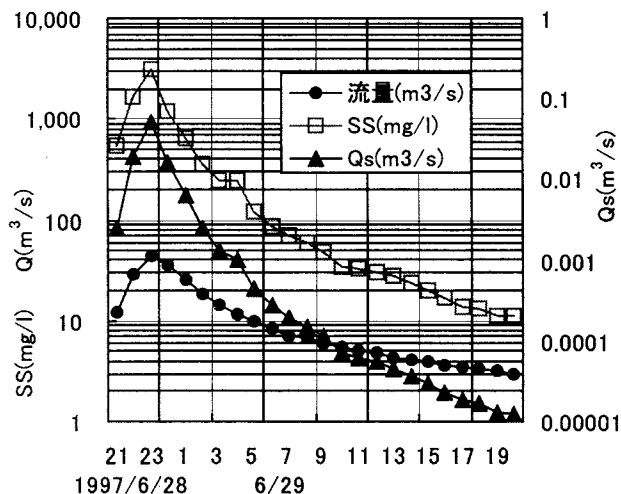


図-2 片桐ダムにおける観測例

図-2, 3に片桐ダムにおけるその観測結果の一例を示す。なお、ここに示すウォッシュロード量 (Q_s) は、観測されたSSおよびQを用いて次式により求めている。

$$Q_s = Q \times SS / \rho_s / 10^6 \quad (2)$$

ここに、 ρ_s :土砂の単位体積重量 (=2.6t/m³) である。

4. ウォッシュロード量に関する検討

表-1に示した観測データを、 $Q \sim SS$ の形で整理したものを図-4に示す。流域面積、観測された洪水流量規模、対象流域ごとの特性によりかなりのばらつきが見られるが、ここに示したものはいずれも土砂生産レベルの高い地域であり、特に、天竜川上流域に位置する美和ダムや小洪ダムなどにおいて高い土砂濃度が観測されている。我が国の河川において、自然洪水時にどの程度の高いSSが観測されているかは従来明確にされていなかったが、10,000~20,000mg/l 程度の高いレベルが場合により生じていることが明かとなった。

次に、観測されたSSより(2)式と同様にウォッシュロード量を求めて $Q \sim Q_s$ の形で整理したものを図-5に示す。流量を乗じることにより図-4よりもばらつきは小さくなる。これを図-1と比較すると、全般にかなり高いウォッシュロード量が観測されており、(1)式との比較で考えれば、係数が 10^5 を超えて 10^4 に近いものまで存在する。これより、ダム流域のような山地河川においては、場所によってかなり高いウォッシュロード量が洪水時に流下しているものと考えられる必要がある。

ところで、図-5においては流域面積の異なる観測点のデータが混在している。当然のことながら、同じ流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ であっても、 100km^2 の観測地点と 10km^2 の観測地点とでは当該河川の状況は大きく異なり、流下するウォッ

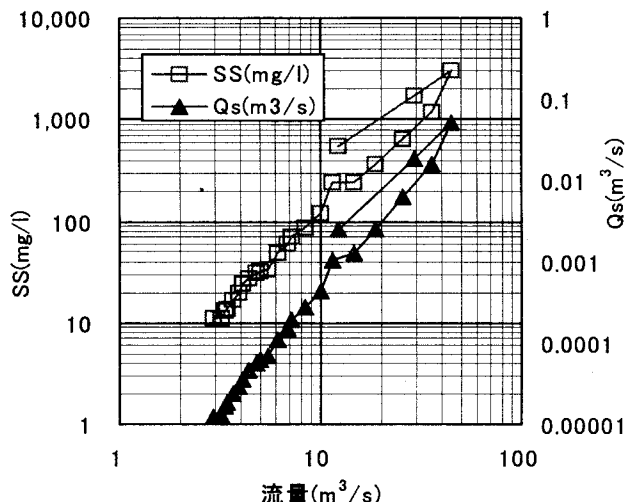


図-3 $Q \sim SS \sim Q_s$ の関係 (片桐ダム)

シュロード量にも相違があるものと考えられる。特に、小流量時のデータが同時にプロットされることにより、かえって整理が困難となることが想定されるため、各観測点における主要な洪水の、しかも一定規模以上の流量におけるデータのみを抽出する必要がある。

図-3に示した片桐ダムのデータを見ると、 $8\text{m}^3/\text{s}$ 程度を境にしてウォッシュロード量の増加傾向が変化している。従来、ウォッシュロードの生産源は流域内の裸地法面および溪岸堆積物といわれており、特に、洪水時に河床のアーマ・コートが破壊されると溪岸堆積物の侵食が急激に進行するために流水中のウォッシュロード量が上昇すると言われている。従って、各観測点ごとに、このウォッシュロード量の増加傾向が大きく変化する流量(以下、限界流量と呼ぶ)が存在するものと考えられる。

いま、この限界流量が流域面積のみの関数で表現できるものと仮定すれば、(3)、(4)式のようにウォッシュロード量の算定式を考えることができる。

$$Q_s = a(Q - Q_c)^b \quad (3)$$

$$Q_c = cA^d \quad (4)$$

ここに、 Q_c : 限界流量 (m^3/s)、 A : 流域面積 (km^2)、 a, b, c, d : 定数である。

金屋敷³⁾は、新宮川水系川原樋川における流砂観測から、このウォッシュロード量が急激に上昇する限界流量がアーマ・コート破壊流量とほぼ同一となることを指摘しており、流域面積の異なる各観測点ごとに限界流量を推定している。そこで、これを流域面積との関係として新たに整理してみたものが図-6であり、(4)式の係数がそれぞれ図中のように求められる。前述のように、ダム流域において洪水時のウォッシュロード量を考える際には、主にこの限界流量以上のデータに着目して整理を行えばよいと考えられる。

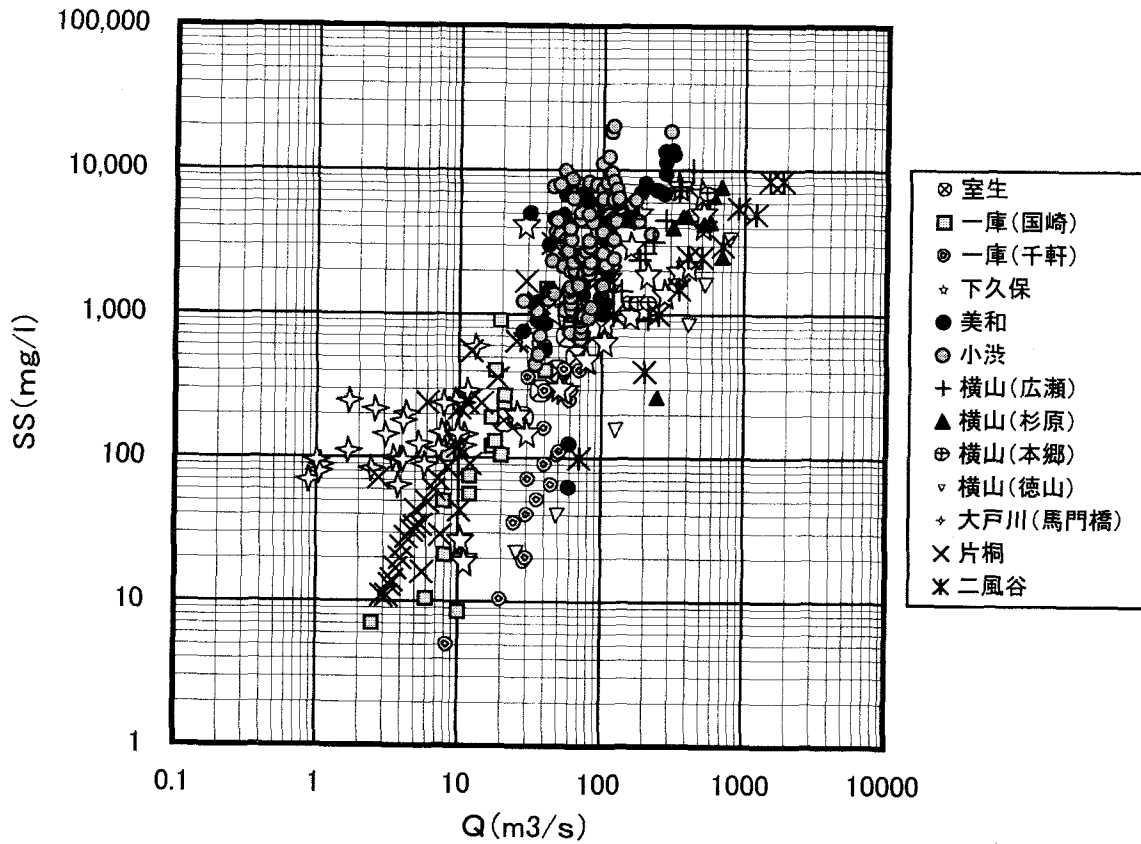


図-4 Q-SSの関係

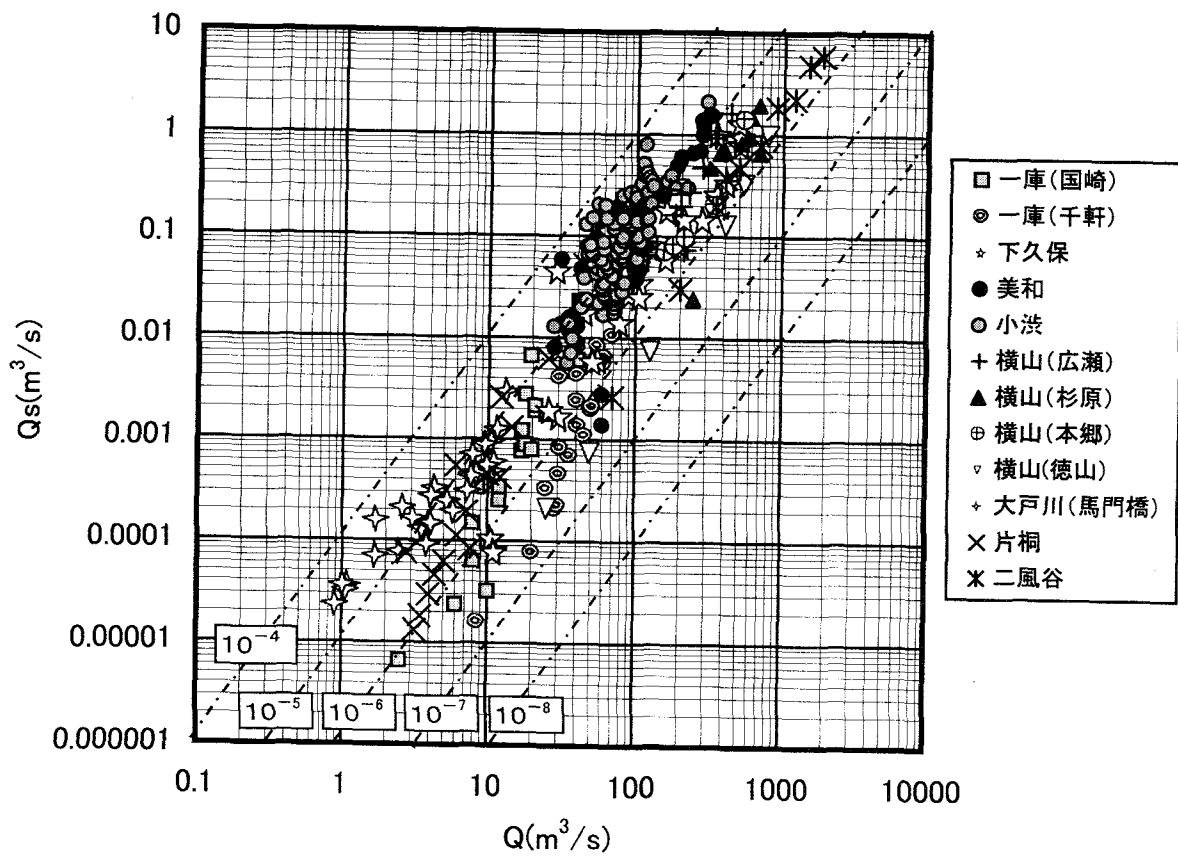


図-5 Q-Qsの関係

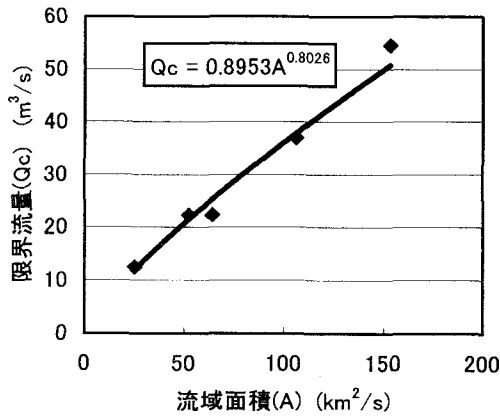


図-6 流域面積と限界流量の関係

そこで、いま仮に図-6に示した関係式が他流域にも適用可能なものと仮定し、表-1の各観測点における限界流量以下のデータを棄却して図-5を再整理したものが図-7である。各観測点における小流量時のデータが除かれ、よりまとまりのあるものが得られた。これより、(3)式の係数を(1)式も参考に考えると、 $a = 5 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-8}$ (ただし $b=2$) と(1)式よりも上限を1オーダー程度上げる必要があるものと考えられる。

以上の検討により、ダム流域においてはウォッシュロード量が場合によっては従来のものよりもさらに大きくなるのが改めて確認された。このことは、例えばダム

堆砂問題を考える場合には、いま以上にウォッシュロード量の流入を考慮する必要がある場合があることを意味している。この場合には、これを如何に貯水池内に堆積させることなく通過させるかが重要となってくる。

5. ウォッシュロード濃度と継続時間に関する検討

ここでは、視点を変えて2. (3)の観点、すなわち、SSとその継続時間について検討を行う。ここで、SSの継続時間は、各洪水波形ごとに図-2のようなグラフを描き、SSの高いところから概ね1, 2, 4, 6, 10 hrなどの各継続時間に対応するSSを順次読み取ることにより求める。

表-1に示した既往の観測事例の中で、美和ダムにおける主要な洪水について整理したものが図-8である。各洪水ごとにSSレベルに相違が見られるが、高いものでは数時間10,000mg/lを超えているものも見られる。

さらに、表-1に示した他の主要ダムのデータを加えて整理したものが図-9である。ここに示した波形は、各観測地点における大規模な出水時のものと考えられるが、やはり美和ダムをはじめ、下久保ダムや二風谷ダムなどにおいて高レベルのSSが発生していることがわかる。

このSS~継続時間の関係は、ダムの堆砂対策として流水とともに堆積土砂をフラッシングするダム排砂操作を検討する場合に極めて重要である。ダム排砂に伴う高濃度の浮遊土砂が魚類へ及ぼす影響については欧州を中心

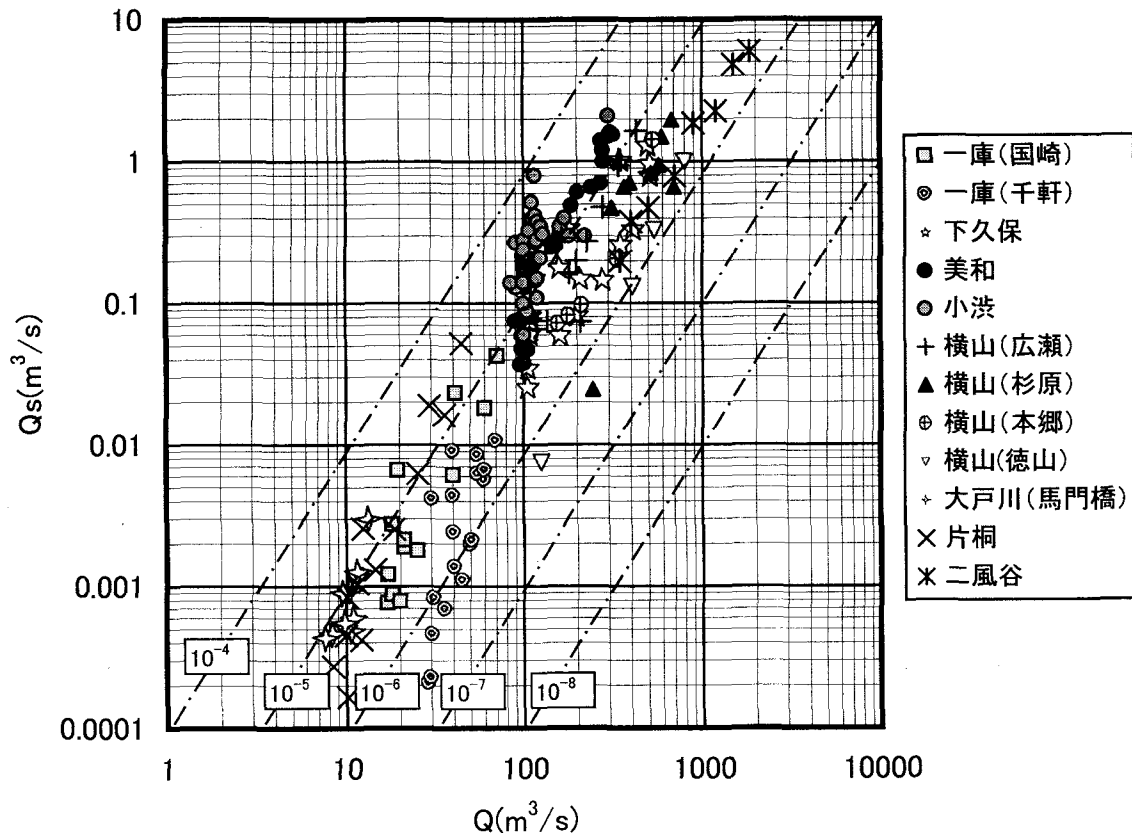


図-7 Q-Qsの関係 (限界流量以下のデータを除去したもの)

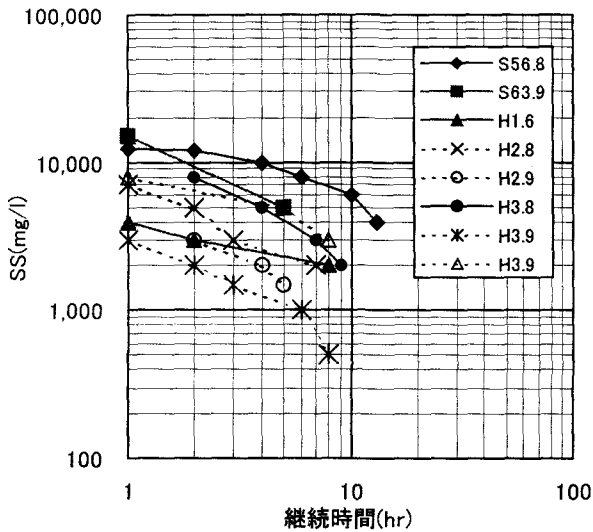


図-8 SS～継続時間の関係 (美和ダム)

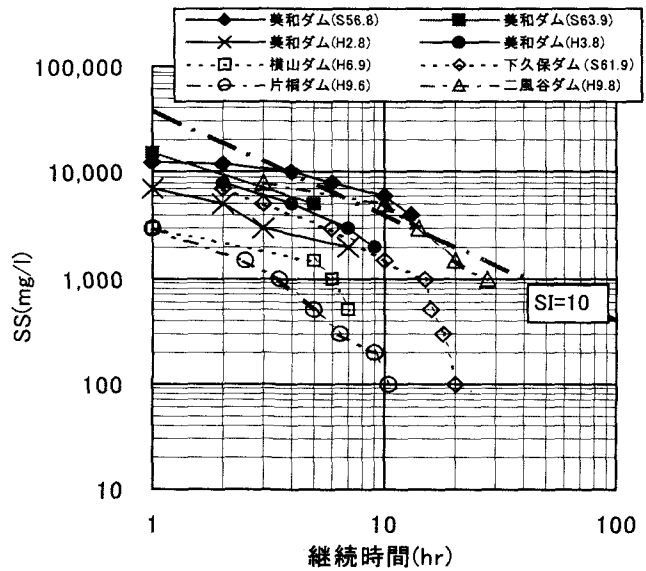


図-9 SS～継続時間とストレスインデックスの比較

に研究が進められてきており⁹⁾、筆者らは我が国の代表種であるアユを対象とした検討を行っている¹⁰⁾。ここで筆者は、Newcombe¹¹⁾の提案した(5)式により定義されるストレスインデックス(SI)を用いて、SI=10程度をダム排砂時の管理基準値とすべきことを提案している⁹⁾。

$$SI = \log e(SS(mg/l) \times \text{継続時間}(hr)) \quad (5)$$

一方、この管理基準を作成する場合には、自然界において最高でどの程度の土砂濃度レベルが生起しているかを参考とすることも極めて重要と考えられる。図-9にこのSI=10のラインを合わせて示しているが、今回整理したデータのほぼ最高値と同等であることがわかる。これより、このレベルをダム排砂時の管理基準値とすることは、自然洪水との比較においても十分妥当であるものと考えられる。

6. おわりに

本論文では、従来、明確な情報が得られていなかった、ダム流域におけるウォッシュロード量に関する検討を行った。得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) ダム流域等の山地河川では $Q_s = 5 \times 10^{-5} Q^2$ 程度までのウォッシュロード量を想定すべき場合がある。
- (2) 流域面積に応じた限界流量以上の観測データを用いることにより、流域面積の異なる観測点の観測データを効果的に整理することができる。
- (3) 自然洪水では、最高で 10,000~20,000mg/l 程度の高いSSが場合により生じている。
- (4) SS～継続時間の関係では、最高でストレスインデックス(SI)=10と同等の自然洪水が生じており、これをダム排砂時の管理基準値として用いることが可能である。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、建設省各事務所より洪水時のウォッシュロード量に関する現地観測資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編, 1997, pp. 282.
- 2) 例えば, 村本嘉雄・道上正規・下島栄一: 大戸川における微細砂の流送過程について, 京都大学防災研究所年報, 第16号B, pp. 433-447, 1973.
- 3) 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.
- 4) 建設省中部地方建設局: 水系における土砂動態と流出土砂の管理に関する検討, 1983. 11.
- 5) 塚原千明・角 哲也・柏井条介: カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性, 土木技術資料 40-11, pp. 56-61, 1998.
- 6) 水資源開発公団試験所: 貯水池における栄養塩の動態に関する研究ノート(その1), 1987.
- 7) (財)ダム水源地環境整備センター: ダム堆砂解析技術資料, 1993.
- 8) 坊野聡子・清水康行・斎藤大作・吉田義一・黒木幹男: 出水時のダム貯水池における濁質観測, 水工学論文集, 第42巻, pp. 715-720, 1998.
- 9) 角 哲也: ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理, ダム技術 No. 127, pp. 30-38, 1997.
- 10) 村岡敦子・角 哲也・柏井条介: 高濃度の濁りがアユに与える影響について, 第25回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 1998.
- 11) C. P. Newcombe and D. D. MacDonald: Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems, North American Journal of Fisheries Management 11, pp. 72-82, 1991.

(1999. 4. 26 受付)