

砂防ダムのもう一つの機能について

ANOTHER ROLE OF SABO DAM

小葉竹重機¹・清水義彦²・藤井隆一³・向井正大⁴・吉澤拓実⁵

Shigeki KOBATAKE, Yoshihiko SHIMIZU, Ryuichi FUJII,
Masahiro MUKAI and Takumi Yoshizawa

¹正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

³建設省渡良瀬川工事事務所所長 (〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

⁴建設省渡良瀬川工事事務所調査課長(〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

⁵建設省渡良瀬川工事事務所砂防調査課長(〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

We have started observations of rainfall amount and water stages at Sabo dams in some devastated basins and a natural basin which was chosen as a basin for comparative studies. This paper points out another role of Sabo dams after describing some characteristics of runoff and sediment yield from devastated basins and a forested basin. The obtained results are as follows :

1)The ratio of runoff/rainfall during June to November of the devastated basin exceeds that of the forested basin. These phenomena may be occurred by high intensity of evapo-transpiration in the forested basin and high storage capacity of water in group of Sabo dams constructed in the devastated basin.

2) The peak specific discharge from the forested basin exceeds that of from the devastated basin for large flood. These phenomena may be also occurred by storage effect (namely, flood regulation effect) of group of Sabo dams constructed in the devastated basin.

Key Words : runoff characteristics, devastated basin, natural basin, role of ,sabo dam

1. まえがき

我々は砂防事業の効果を定量的に把握することを目的として、かつて銅精錬の煙害等によって著しい荒廃を受けた利根川支川渡良瀬川上流の足尾地域を対象に試験地を設定し観測を1997年より行っている。

洪水時と低水時の水位差が大きく、また河床変動も激しい山地河川で、できるだけ安定的に水位を計測するために、砂防ダムの副ダムに水位計を設置して水位を計測している。用いるべき水位・流量曲線については前報¹⁾で報告している。

本報告は1998年の観測結果をもとに、荒廃流域と自然流域からの流出特性および流出土砂量の相違を検討し、これらの特性に砂防ダムの存在が大きく関与していることを明らかにしたものである。

2. 砂防ダムの概要

図-1に足尾対象流域の下流に位置する草木ダム流域（以下の検討で草木ダムの資料も用いる。流域面積254km²）と対象砂防ダムの位置関係を示した。また、表-1はこれら砂防ダムの名称と概要をまとめ

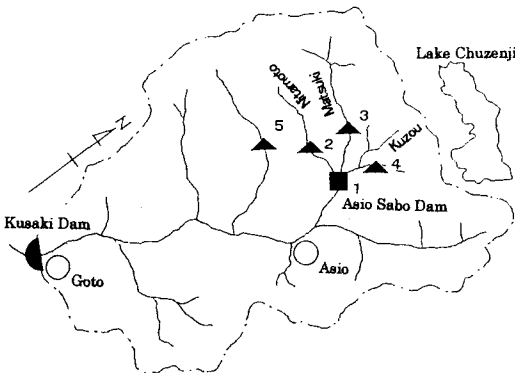


図-1 流域の概要と砂防ダム位置図
表-1 砂防ダムの概要

図中番号	流域名	流域面積 (km ²)	高度 (m)
1	足尾	54.2	730
2	仁田元	6.3	821
3	松木	27.5	802
4	久蔵	8.6	775
5	銀山平	20.3	776

たものである。図-1中の番号1が足尾、2が仁田元、

3が松木、4が久蔵、5が銀山平である。銀山平が自然植生と見なしている流域である。

3. 1998年の観測結果

図-2は流量データの揃っている1998年6月から9月までの松木と銀山平の比流量時系列を比較したものである。松木流域は荒廃が最も進んでいた流域で、現在でも観測サイト上流の1／3は植生が全くないか、極めて少ない状態である。一方、銀山平は現在では全流域が植生で覆われている流域である。

図-2から次の2点が指摘できる。まず一点は、全流域が植生で覆われている銀山平流域における初期損失は荒廃地を含む松木流域に比べて大きいことである。これはとくに6月、7月の各降雨と、8月27日～31日の出水の初期に顕著に見てとれる。

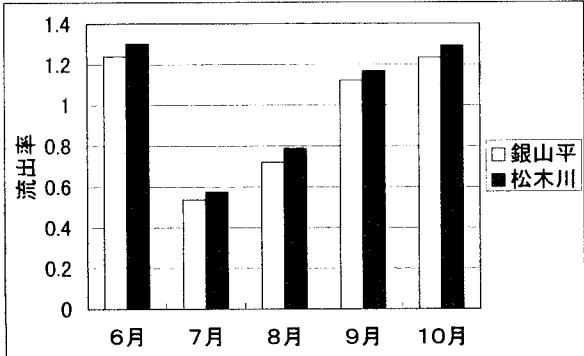
第二点は、これに対して明らかに矛盾するような結果であるが、8月27日～31日の出水の最後のピークや、9月17日の出水では、植生の豊かな銀山平流域の方が大きな比流量を示している。これは通常の傾向からは異なるものであり、松木流域の砂防ダム群による貯留効果の結果であるとして、章を改めて議論することとする。

ところで、以上の図からは流出ボリュームの検討は行えないので、表-2に6月～10月の期間の月雨量と月流出高および月流出率（月流出高／月雨量）を示した。また、これを図化したものが図-3である。

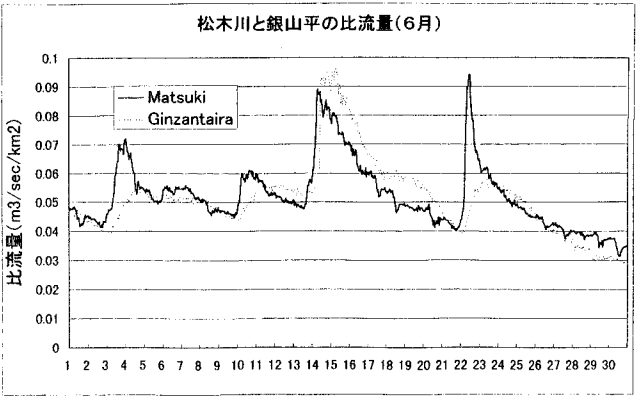
表-2あるいは図-3から、松木流域の方が常に月流出率が高いことがわかる。この理由の一つとしては、植生の豊富な銀山平流域における蒸発散が大きいことが考えられる。一方、荒廃地を含む松木流域で渇水流量が維持されるのは、砂防ダム群における貯留効果もあると考えられる。この件についても前記のピーク比流量と併せて章を改めて若干議論を行う。

表－2 松木と銀山平の月雨量・流出高の比較

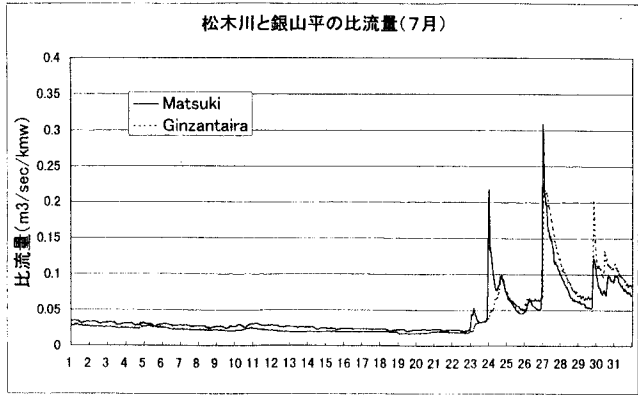
	銀山平			松木川		
	降水量 (mm)	流出量 (mm)	比	降水量 (mm)	流出量 (mm)	比
	a	b	b/a	a	b	b/a
6月	107	132.7	1.24	103.5	134.8	1.302
7月	202.5	108.5	0.538	197.5	113.7	0.578
8月	514.5	371.1	0.721	530	417.6	0.788
9月	579	649.8	1.122	544.5	635.9	1.168
10月	254	313.7	1.235	261	337.6	1.293
計	1657	1575.8	0.951	1836.5	1639.6	1.002



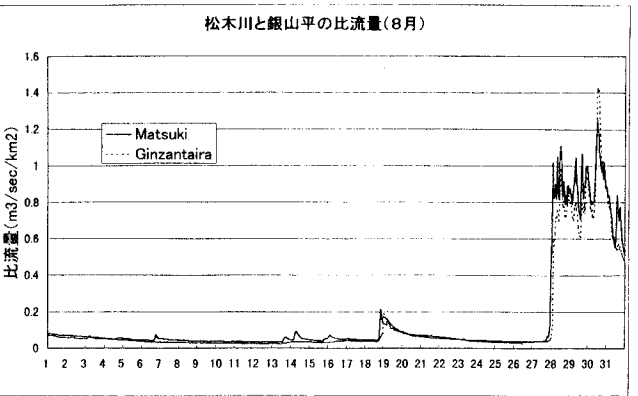
図－3 松木と銀山平の月流出率の比較



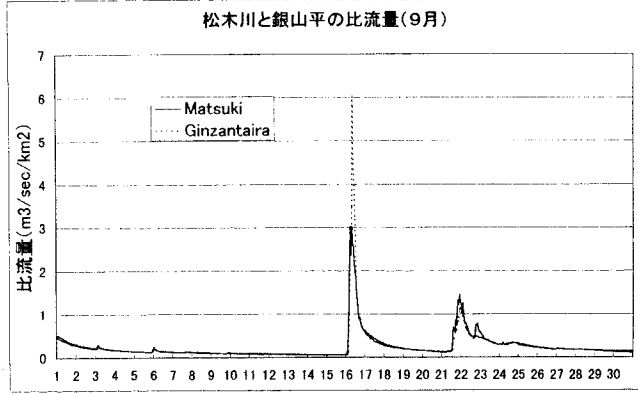
(a) 6月



(b) 7月



(c) 8月



(d) 9月

図－2 松木と銀山平の比流量時系列の比較

4. 過去のデータを用いた土砂生産量の検討

足尾砂防ダム上流は、図-1に示すように仁田元川、松木川、久蔵川の3本の溪谷で構成されているが、何れの溪谷においても河川横断測量が行われている。ここでは、松木川の1981年、1983年、1993年、1997年のデータを用いて、区間堆積土砂量の変化を検討してみる。図-4は1981年から1983年の間の区間堆積量を、図-5は1993年から1997年の間の区間堆積量を示したものである。

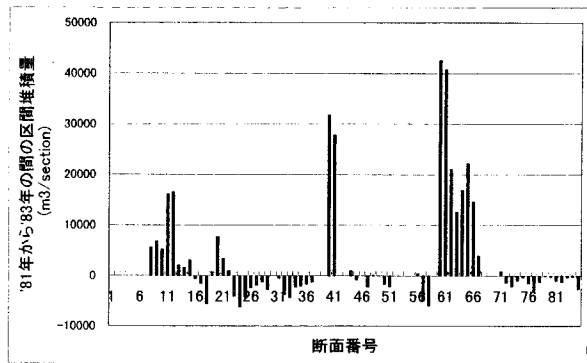


図-4 '81~'83の期間での区間土砂堆積量

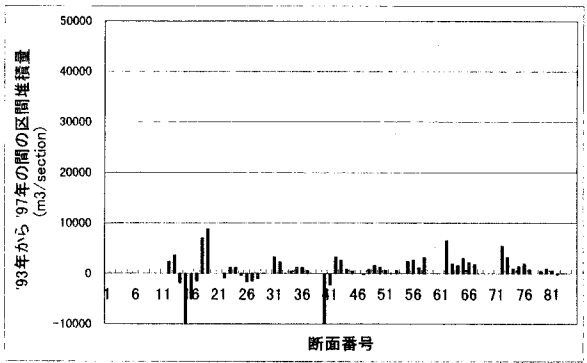


図-5 '93~'97の期間での区間土砂堆積量

図-4、図-5において横軸は測量断面番号、縦軸は測量区間内の堆積量（上下流測量断面の横断面積の変化量の平均に区間距離を乗じて求めている）を示している。測量断面は、7,300mの区間に85断面あるが、最初のNo.8断面以降はほとんどの区間が100m間隔である。

この区間内には現在までに6基の砂防ダムが完成しており、下流から順次、断面番号30の位置に1号ダム（完成年1963年、貯砂量16万m³、この副ダムで水位計測を行っている）、断面38の位置に5号ダム（1985年、貯砂量24.2万m³）、断面46の位置に2号ダム（1967年、貯砂量10万m³）、断面54の位置に3号ダム（1970年、貯砂量14.3万m³）、断面59の位置に4号ダム（1979年、貯砂量60万m³）、断面69の位置に6号ダム（1994年、0.6万m³）がある。これらの砂防ダムの貯砂量を合計すると、約125万m³となる。なお、後述のように6号ダム以外は満砂である。

さて、図-4から断面39の5号ダムの上流（区間41~41）と、断面59の4号ダムの上流（区間60~68）で大きな堆積が生じていることが分かる。この堆積

量を合計すると2.1x10⁵m³となり、この量は後ほど検討する草木ダムの堆砂量と比較しても、ほぼ同程度の堆積量となっている。

次に図-5においては顕著な堆積は認められない。これはこの期間での出水が少なかったためと考えられる。断面14と40で起こっている洗掘は砂利採取によるものである。多くの堆積量ではないが、断面62-67の間で生じている堆積は4号ダムによるもの、断面72-77の間で生じている堆積は最も最近完成（1994年）した6号ダムによるものである。6号ダムは平成11年の現時点でも満砂にはなっていない。6号ダムの上流は日光国立公園の範囲に入っており、松木川荒廃の原因となった坑木用材木の切り出し、山火事、亜硫酸ガスの洗礼を受けておらず、従来より植生豊かな流域となっている。

さて、図-5において4号ダムの上流に堆積した量は、6号ダムがまだ満砂でないことを考えると、主として6号ダムと4号ダムの間の区間で流送されてきた量と考えられる。一方、6号ダムの堆積量は上流からの流送土砂が堆積したものと考えると、4号ダムと6号ダムの堆砂量を比較することによって、荒廃の激しい地域とそうでない地域からの概略の生産土砂量の比較が行えると考えられる。

表-3は断面69より上流（6号ダム上流）と断面59と69の間に1993年から1997年の期間に堆積した土砂量とそれを流域面積で割った値を示したものである。

表-3 1993年~1997年の期間の比堆砂量

	堆砂量 (m3)	流域面積 (km2)	比堆砂量 (m3/km2)
69より上流	15549	18.7	832
59と69の間	17015	2.4	7090

必ずしも生産土砂量の正確な見積もりとは言えないが、荒廃の進んでいる流域の方が数倍の生産土砂量をもっていることが推定できる。ただし、4年間で7,000m³/km²程度の堆砂量は関東地方の砂防ダムとしては平均的な値³⁾である。

さて、ここで再び図-4に示す堆積量の多かった期間の考察に戻る。図-1に示した草木ダムは1973年に完成したが、1977年以降は毎年のダム堆砂量のデータがあり、図-6にその結果を示している。

図中には江崎のダム堆砂量予測式²⁾で計算した結果も示している。江崎の式は掃流砂分とウオッシュロード分とから成るが、足尾の荒廃地をウオッシュロードの生産場として計算すると、1オーダー高い堆砂量が計算され、これは足尾は荒廃地ではあるが岩肌が露出した荒廃地であって、ウオッシュロードを生産するような崩壊地とは性質が異なることを意味しているものと考えられる。そこで、図中には掃流砂分のみを示しているが、これで堆砂量の傾向がよく説明されていることがわかる。

黒の棒グラフが実測、白の棒グラフが計算掃流砂である。この図を見ると、ある顕著な変化に気がつく。

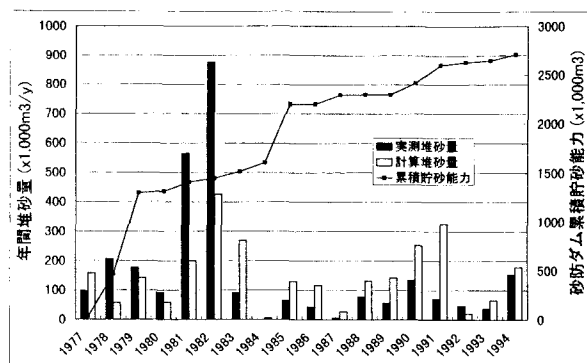


図-6 堆砂量の実測値と計算値の比較

すなわち、1982年までは実測値の方が多いのに対して、それ以降は計算値の方が多くなっている点である。また、白棒の計算値が同程度ということはその年の洪水流出規模が同程度であったことを示すが、明らかに1983年以降の方が同程度の出水規模に対して実測堆砂量が少なくなっていることが分かる。（例えば1979年と1989年の比較）

図-6には1977年以降に草木ダム上流に建設された砂防ダムの累積貯砂量も折れ線グラフで示してある。18年間の間に約270万 m^3 の貯砂量が加わったことになり、前述の実測貯砂量と計算掃流砂分との逆転はこうした砂防ダムの建設によることは明らかであり、防災的意味のみならず貯水池堆砂の防止という経済効果も費用便益を考える上では考慮すべきであることが分かる。何れにしても、これらは砂防ダムの本来の目的に沿った機能であるが、以下ではこうした本来の機能以外に期待される別の機能について若干の考察を行う。

5. 砂防ダムのもう一つの機能

第3章の1998年の観測結果の項で述べたように、自然植生に近い銀山平流域と荒廃地を含む松木流域の流出特性の比較において、常識とは異なる結果が得られた。すなわち、大きな出水の場合には裸地の多い松木流域の方が比流量が小さくなる、という現象である。これは明らかに砂防ダムによる貯留効果と考えられるので、ここではこの点について検討を加える。まず、両流域について洪水流出解析を行ってみる。図-7は計算に用いたタンクモデルで、これはすでに著者らが草木ダムの流出解析に用いたモデル⁴⁾である。

図-8、図-9はこのモデルを用いて計算した結果を示したもので、図-8は松木流域、図-9は銀山平流域のものである。いずれも1998年8月27～31日の出水と9月15日～19日の出水を対象としたものである。8月の出水は降雨強度はあまり強くないが降雨期間は長い場合、9月の出水は降雨期間は比較的短いが降雨強度の強い雨（30～40mm/hr）が数時間連続した場合である。このように緩やかなピークをもつ降雨と、鋭いピークをもつ2つの降雨を選んだ理由は、

後述の貯留効果の判定に際して有効な判断材料となるからである。

なお、図-8と図-9において降雨強度の目盛りは流量目盛りの値と同じで、単位をmm/hrとすればよい。また、図中の太い実線が実測流量、細い実線が計算流量を示している。これらの図から、用いたパラメータの値が必ずしも良いとは言えないが、以下の理由でとくにパラメータの最適化は行っていない。

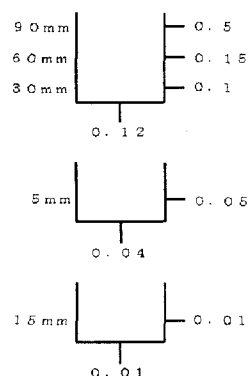


図-7 洪水用タンクモデル

- ①合わせるべき真値がない。これはすでに実測値自身が貯留の影響を受けていると予想され、自然状態での流出ではないと考えられること、
- ②8月の降雨事例では明らかに水収支が合っていないが、他の降雨事例から考えてこの原因はパラメータ以外にあると予想されること、
- ③このパラメータは下流の草木ダムの流出計算に当たって、流域分割を行った上で決定したパラメータであることから、個々の小流域に対しても大きな変更はないと考えられること、などである。

さて、図-8と図-9から流出ピークが大きく鋭い9月の波形の場合が実測流量と計算流量との差が極端に異なっていることが分かる。このことから、9月の出水では流量は大きな貯留効果を受けていることが推定できる。これを確かめるために、この計算結果に対して貯留計算を行ってみることとする。

貯留計算は言うまでもなく、対象区間の貯留量を S 、流出量を Q 、流入量を I とすると、

$$dS/dt = I - Q$$

$$S = K * Q^P$$

と表される。ここに、 K 、 P は定数である。

水位計を設置している松木川1号ダムの上流には1号ダムを含めて6基（総貯砂量 $1.3 \times 10^6 m^3$ ）、銀山平ダムの上流には自身も含めて3基（総貯砂量 $0.41 \times 10^6 m^3$ ）の砂防ダムがある。砂防ダム間の流出解析を行いながら、貯留計算を個々の砂防ダムについて順次行っていくのは大変なので、これらをまとめて一つの仮想的な砂防ダムを考えて貯留計算を行ってみた。

定数は以下のようにして定めた。まず、1つの砂防ダムを考え、その水通しの幅を50mとして広頂堰の式を用いて流量と水深の関係を求めた。つぎに、砂防ダム満砂面の谷幅は松木川での平均的な値である80mとし、貯留効果の存在する範囲は越流面から測った水深の1,000倍の長さまでと仮定して貯留量を求めた。こうして求めた定数 P の値は約1.3、定数 K の値は約200となった。

ただし、これは砂防ダム1基当たりの値としているので、単純に K の値を6倍（6基ある）して松木川

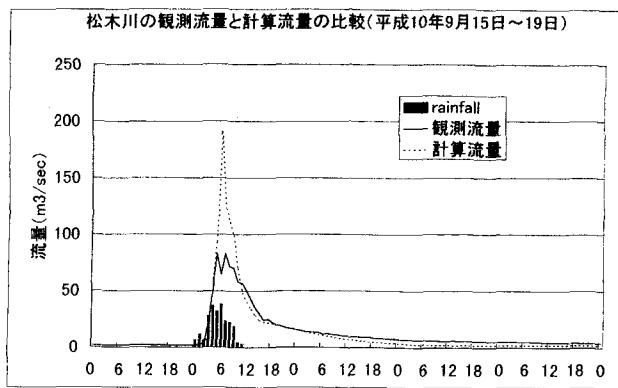
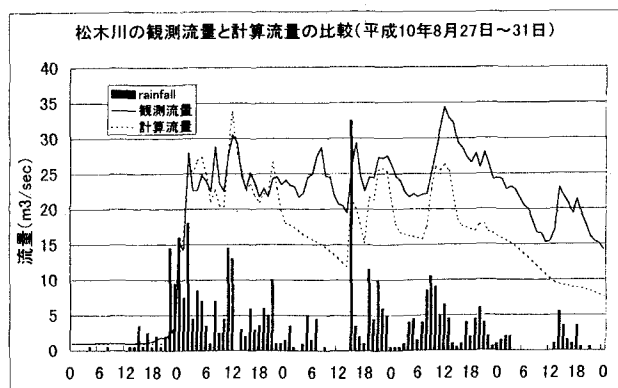


図-8 松木流域の実測ハイドログラフと計算ハイドログラフの比較

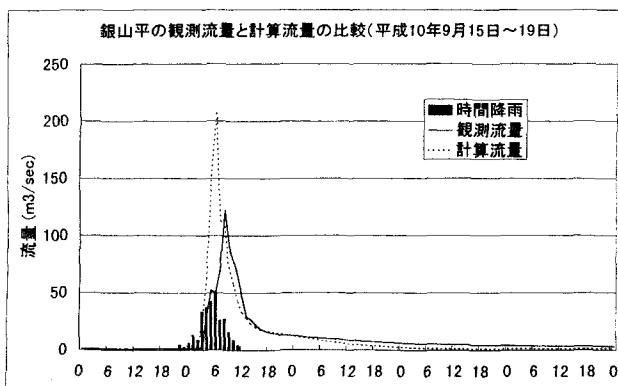
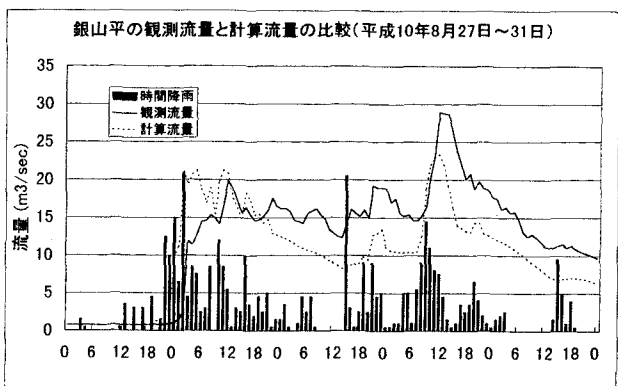


図-9 銀山平流域の実測ハイドログラフと計算ハイドログラフの比較

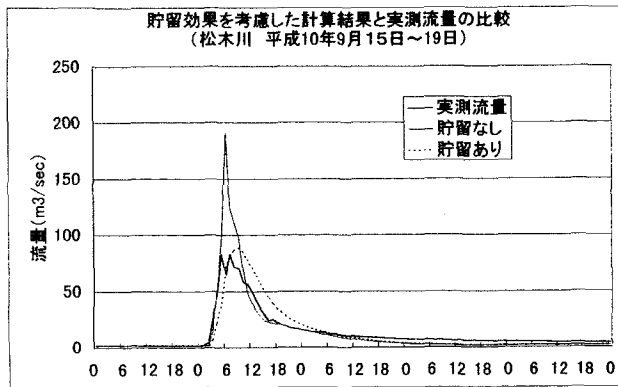
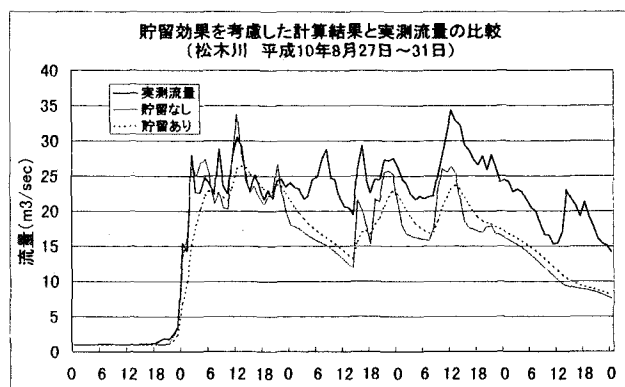


図-10 砂防ダムによる貯留効果を考慮した計算ハイドログラフ（松木流域）

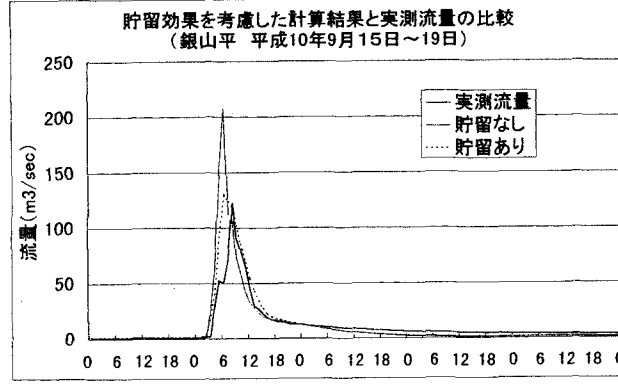
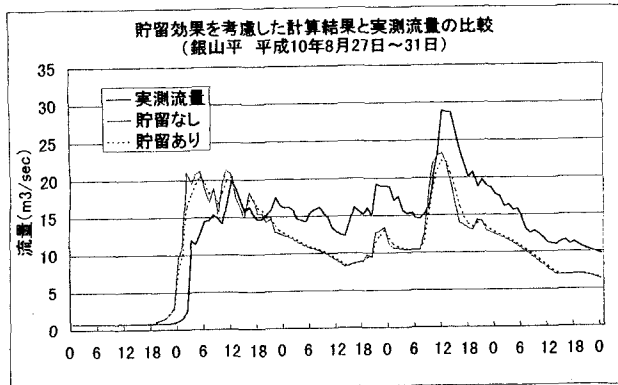


図-11 砂防ダムによる貯留効果を考慮した計算ハイドログラフ（銀山平流域）

の値とし、3倍したものを銀山平の値として、計算を行ってみたが、実測に近くならなかったため、Pは1.3に固定したままで、実測に近くなるKの値を求めた。その結果、松木で3,000、銀山平で1,300とした。

複数のダムの効果を1つのダムで表現する際に、Kのみを変えればよいわけではないが、それにしても、松木では15倍、銀山平では6.5倍となっていることから、不合理な値のようにも見える。しかし、実際には主ダム下部には副ダムが必ず設置され、貯留の場が増していること、砂防ダム上流の貯留の場は水位が上昇すれば川幅方向にも増すこと、など貯留現象の複雑さを考えれば、考え得る範囲の値である。

貯留計算の結果を示したものが図-10と図-11である。図-10は松木、図-11は銀山平の場合で、それぞれ図-8、図-9に対応している。図中の太い実線が実測、細い実線が貯留効果を考える前のもの、破線が貯留効果を考えた計算結果である。この計算結果から緩やかなピークの場合にはあまり効かず、鋭いピークにはよく効いてくる、という貯留効果独特の特徴をうまく表現しており、またその結果も実測の流量に近づいていることから、現実の砂防ダムでもこうした貯留現象が生じているものと予想される。

この効果は、砂防ダムの機能としてはこれまで考慮されてこなかった^{注)}が、流域面積と砂防ダムの規模との関係次第では、機能として充分考慮し得るものであることが分かる。

さらに、もう一つの機能として同じく第3章で指摘したように、荒地である松木流域においても低水流量は銀山平流域と変わらない、という点がある。これも砂防ダム群に貯留されている大量の土砂の中に地下水のような形で保持されている水が、徐々に流出してくるものと考えられる。

この点に関して若干の検討を行ってみる。いま、松木川の砂防ダムの総貯砂量を前述の約130万 m^3 とする。(6号ダムはまだ満砂ではないが、前記のように満砂でも0.6万 m^3 である)。堆砂の有効空隙率を0.4と仮定すると、52万 m^3 となり、約19mm分となる。実際には砂防ダム上流の渓流にも堆積することから、少なくとも30mm分程度は貯水されていると考えられる。また、松木川、仁田元川、久蔵川の3本の渓流の合流点にある500万 m^3 の貯砂量をもつ足尾砂防ダムについて同様に考えてみると、流域面積を54.2 km^2 として37mm分の貯水量となる。上流側での堆砂の効果も考えると、松木川、足尾砂防ダムのみで約60mm～80mm程度の貯水能力はあるものと予想される。これは下流にある草木ダムの貯水能力(総貯水量6,050万 $\text{m}^3=238\text{mm}$ 、有効5,050万 $\text{m}^3=199\text{mm}$)と比較しても、無視できない貯水能力であると言える。

せき止められた雨水は砂防ダム下端に設けられている水抜き孔から徐々に流出してくるものと考えられる。これも砂防ダムの予期せぬ機能^{注)}と言える。

以上のように、流域面積に対して大きな貯砂量

(例えば松木川1号ダム上流のように27.5 km^2 に対して130万 m^3 もの貯砂量)をもつ砂防ダムについては、通常の土砂流出抑止機能の他にも、小さな貯水池並のピーク低減・貯水機能を考えてもよい、ということが言えそうである。

6. あとがき

われわれは砂防事業の効果判定、植生回復に伴う流出特性の変化の把握などを目的として、1997年より渡良瀬川上流の足尾流域で観測研究を開始している。ここでは、このうち1998年に得られた6月から10月までの観測結果に基づいて、植生の豊かな銀山平流域と荒地を含む松木流域からの流出特性を比較した。その結果、植生の効果と思われる効果の他に、砂防ダムの効果として通常の機能以外に、規模によっては貯水池並の機能が認められることが明らかとなった。得られた主な結果は次のようである。

- 1) 植生の豊かな流域では洪水初期のいわゆる初期損失量が大きい。
- 2) 夏期に植生が豊かな流域からの流出高が小さいのは蒸発散の効果とも考えられる。
- 3) 夏期に荒地を含む流域からの低水流出が持続するのは、砂防ダムに堆砂している土砂に雨水が貯留されている可能性がある。
- 4) 流域面積に対して比較的大きな貯砂量をもつ砂防ダムの場合には、出水の場合にピーク低減効果をもつ。
- 5) 以上の3)と4)の効果は従来砂防ダムの効果としては認められてこなかったものであり、今後は砂防ダムの規模によっては機能として新たに考慮してもよいことを示唆するものと考えられる。

最後に、本研究を進めるに当たり、記録計の保守、その他現地での流量観測等を行って頂いている共和技術株式会社の方々、および群馬大学大学院の荒井良介君、川上弘君、当時4年生の依田岳人君に篤く感謝の意を表します。

注) 砂防ダムの設計に当たって、対象となるものとして利水が考えられる場合がある。⁵⁾ただし、この場合でも、流出土砂量が少ない場合に、土砂が堆積するまでの期間、利水が考えられる程度である。

参考文献

- 1) 小葉竹重機・清水義彦、他3名：砂防ダムの水位・流量曲線の検討、水工学論文集、第43巻、1999年3月
- 2) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究、(水理公式集、土木学会編、p.136、1971年)より
- 3) 水理公式集：土木学会編、p.135、1971年
- 4) 小葉竹重機・清水義彦、他3名：植生の回復に伴う流出性の変化、水工学論文集、第42巻、pp.217-222、1998年2月
- 5) 野口陽一、他8名、砂防工学、朝倉書店、昭和53年
(1999.9.30受付)