砂防ダムを含む山地小流域の水文諸量と出水遅延効果について

梅津健一¹・戸松 修²

Hydrological measurements and efficiency of runoff peak response time in small drainage basin which include a Sabo dam

Ken-ichi Umezu¹ and Osamu Tomatsu²

Abstract: Over the past few decades, some of the Sabo dam studies have been focused on the entrapment function of debris flow and structural of dam. Few attempts have been made to investigate the hydrologic data of Sabo dam. Therefore, we have been observed hydrological measurements in small drainage basin which include a Sabo dam. An observation was conducted to determine the effects of concentration time and runoff peak response time at downstream of a Sabo dam in discharge. The concentration times were 50-490 minutes and almost were longer than value of Kadoya expression. The runoff peak response times were 20-190 minutes. Moreover, we have been analyzed this hydrological measurements data by Sugawara tank model. As a result, we have concluded that we identified Sugawara tank model parameter using 30 minute runoff peak response time.

Keywords: Sabo dam; Concentration time; Runoff peak response time; Heavy snowfall; Tank model

1 はじめに

山腹保護を目的に建設される治山ダムが一定の理水効果を持っていることはこれまで水文の分野でいくつか指摘されており、既往の研究として次のような報告がある。志水ら（1981）が治山ダムの流量調節効果について水路実験を行った例¹⁾、地頭菌ら（1992）の治山ダム群が流出に及ぼす影響についてハイドログラフから検討した例²⁾、鈴木ら（1983）の堆砂地通過にともなうハイドログラフの変化を透流モデルでシミュレートした例³⁾などで、いずれも流水が治山ダムを通過する際、出水遅延とピーク流量低下が生ずることを報告している。しかし治山分野の一方で砂防ダムに関する研究は、土木や砂防の分野において主に流送土砂やダムの構造について着目されることが多く、これまで砂防ダムを含んだ流域の出水遅延効果について実証的に検討を加えられたレビューは少ないようである。

治山ダムは森林法に基づき林野庁の所管で行う治山事業で設置されるダムのことであり、砂防ダムは砂防法に基づき国土交通省や都道府県の所管で行う砂防事業によって設置されるダムのことで、山地にあるこの2つの構造物は行政上の線引きや設置目的、土石流に対する強度が異なるほかは、ほとんど構造的には類似している。このため砂防ダムにも治山ダムと同じように理水効果が期待できると考え、砂防ダムを含んだ流域の出水遅延効果を明らかにすることで、砂防ダムの設置に伴う影響評価や今後の設置基準にとって重要な研究成果を蓄積できると著者らは考えた。

そこで砂防ダムを含んだ流域の水文諸量と出水遅延

効果について明らかにすることを目的に、山地小流域にある砂防ダム付近に水文観測所を設置し、得られた観測データから考察を行った。水年は2005年12月から2006年12月の豪雪年になったため、今回融雪についても併せて検討し、この1ヵ年の結果を本論文としてまとめた。

2 試験流域の概要と観測方法

2.1 試験流域の位置と流域特性

試験流域を岐阜県揖斐郡揖斐川町日坂の貝月谷に設定した。図1に岐阜県GISベースの1/5000森林基本図図を使用してコンピュータによって図化及び求積した本試験流域の位置と流域地形を示す。

貝月谷は岐阜県西濃地方を流れる揖斐川支川日坂川の最上流部に位置し、標高（600 m～1000 m）の地点にある。地質は脆弱な貝月花崗岩に属し、溪流は荒廃しやすく周辺にガリーや崖などが見られる。2006年の平均気温は12℃前後と比較的低い。水文観測所は標高600 m付近の貝月第1砂防ダム（写真1）下流にある貝月第2砂防ダムの袖部に百葉箱を設置し水文観測所とした。貝月第1砂防ダムは1975年⁴⁾に竣工された堤高14 mの重力式砂防ダムである。貝月第1砂防ダムは2006年現在で未満砂状態であるが、貝月第2砂防ダムは既に満砂しており河床は平坦で緩勾配になっている。貝月第1砂防ダムから上流には治山・砂防施設は存在していないため、観測地点より上流の構造物の影響はないと考える。貝月第1砂防ダムの河川流出水は定常時において水抜き口からの流出がほとんどであり、観測期間中に砂防ダム水通しからの越流は見ることができなかった。本試験流域では積雪量の観測を行っていないため、必要に応じて図1（右上）に示した樽見観測所の積雪深データを使用した。

¹岐阜大学大学院連合農学研究科博士課程, Ph.D. Student, United Graduate School of Agricultural Science, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193 Japan

²岐阜大学応用生物科学部教授, Professor, Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193 Japan

図 1：試験流域の位置と流域地形

2.2 水文諸量の観測

水文観測所は管理が容易で、雪崩や流出土砂の影響が少ないと考えられる貝月第2砂防ダム袖部のコンクリート地盤上に設置した。観測所には百葉箱を地上から高さ1.5 mに設置し、そのすぐ傍に転倒ます型口径20 cmの雨量記録観測装置をアルミ製4脚で固定した。百葉箱の中には水圧式自記水位計、自記温度計を固定し、水位計センサーはダムの袖小口に固定した。自記水温計、自記照度計は河川に沈め観測を行った。それぞれの記録計はすべて10分インターバルで記録している。流量 (m^3/sec) は記録した水位データから水位流量曲

写真 1：貝月第1砂防ダム（重力式）

線より算出した。

3 水文諸量とその特性

3.1 これまでの最深積雪の推移と豪雪年について

本試験流域における過去5カ年の最深積雪を表 1に示す。本試験流域は豪雪地に属し過去5カ年における最深積雪の平均は約96 cmと比較的多いが、2005年12月から2006年2月は岐阜県では50年ぶりの記録的な大雪に見舞われ、本観測所付近では最深積雪171 cmを記録した。当時気象庁はこの大雪を「2006年豪雪」と命名した。そのため本論文では例年よりも多い降雪が山地に蓄積されたため豪雪年の水年となり、貴重な流出量の観測データが得られたと考える。

表 1：過去5カ年の最深積雪 (cm)

Year	Max snowfall (cm)
2002	97
2003	53
2004	66
2005	94
2006	171
Mean	96

3.2 河川水温と気温の時系列特性

図 2に融雪期における河川水温と気温の時系列変化の一例を示す。これは2006年3月から4月上旬までの観測記録を日平均で示したものである。ここで3月までの河川水温は2～3℃の変動域内で増減し、常に気温より高く推移しているが、4月上旬には好天に恵まれたこともあり気温が上昇しやすく、3月27日(図 2 矢印)には河川水温と気温が逆転し始めている。次に表 2に1日の温度の最大値と最小値の差を月別に平均し変動係数(C_v)で示した。ここで気温は河川水温に比べ変動係数の値が常に大きい値を示している。また3月と4月は河川水温、気温共に1年中で最も変動係数が高く、1日の温度差が顕著であることが分かる。

このように観測所付近は4月頃の気温の上昇と顕著な気温変動から、この頃が融雪最盛期で積雪の融解は漸次始まっていったであろうと推定した。なお、変動係数(C_v)の計算は次式を用いた。ここで σ は月別温度の標準偏差、 μ は月別の平均温度を示す。

$$C_v = \sigma / \mu \quad (1)$$

3.3 雨量と流出量の時系列特性

今回対象とした水年における出水例は表 3に示すように、3月に発生したNo. 1の出水を初めに7月までに毎月発生した。出水の規模によって大小さまざまな出水例が見られるため、ここでは概ね流量 $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上を出水とし計17例を扱うこととした。融雪期の開始日は前節で述べた融雪最盛期と推察される4月上旬頃に発生したNo. 6の4月2日とし、消雪日は気温の変化と試験地での目視による判断からNo. 11の5月13日とした(表 3矢印)。以後この融雪期の期間と、それ以外の期間を通常期として解析を進めることとした。

次に図 3に対象とした出水例の降雨量及び流出量の変化を共に10分間隔で示した。いずれの出水においてもハイドログラフの変化はハイエトグラフの波形とよ

表 2：2006年月平均の河川水温と気温の変動係数

Month	C_v (%)	
	Water temperature	Temperature
1	20.2	51.0
2	21.4	55.0
3	29.8	80.0
4	27.2	60.3
5	16.6	28.9
6	11.5	18.7
7	8.5	12.9
8	13.8	14.6
8	8.7	17.6
10	8.1	24.7
11	4.2	39.1
12	3.5	40.0

く一致した。中でもNo. 9とNo. 10やNo. 16とNo. 17などはハイドログラフがいずれも2山となっており、ハイエトグラフの波形と良く一致している。またハイドログラフはハイエトグラフの波形に追従して鋭いピークを持ち、その後急激に減少している。No. 16とNo.17の出水例は長期に渡って梅雨前線が停滞し各地に被害をもたらした「2006年7月豪雨(気象庁命名)」によるもので、これまでの観測の中で最も規模の大きな雨量と流量を観測した。今回の出水例は台風の影響はなく、梅雨前線の停滞による長雨の影響がほとんどで、降雨は1～2昼夜に渡り継続的に降り続いたのが特徴である。

融雪期における流出の特徴について述べると、一般に融雪期では流出量が多いと言われており、例えば杉

図 2: 融雪期における日平均の河川水温と気温の変化

表3 対象とした出水例 (No. 1~No. 17) の観測降雨・観測流量の状況 (2006 年)

No.	← 融雪期 →																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Date	3/1	3/6	3/12	3/16	3/28	4/2	4/11	4/20	5/7	5/10	5/13	5/20	6/9	6/15	7/2	7/17	7/19
R (mm/h)	5	9	6	28	14	11	15	11	17	22	8	15	13	25	13	* <u>40</u>	29
AR^{*2} (mm)	43	51	18	52	26	69	177	34	142	133	21	98	89	261	71	88	<u>326</u>
Q_{max} (m^3/s)	0.63	0.40	0.51	0.79	0.77	1.25	4.32	0.77	2.04	3.55	0.99	0.79	0.55	3.07	1.03	4.34	<u>5.49</u>

※¹: アンダーラインはそれぞれの項目の最高値を示す。※²: 降り始めからピーク流量までの累加雨量

図3: 対象とした出水例 (No. 1~No. 17) のハイエト・ハイドログラフ

山ら⁵⁾ (2003) が融雪期に積雪山地小流域で観測した報告の中で、融雪期における総流出量は年間総流出量の40%ほどを占めると言われている。また今回の観測では融雪期であるNo. 7の出水例と融雪期を過ぎたNo. 14では、No. 14のほうが1時間当りの降雨量 (R)、ピーク流量までの累加雨量 (AR) 共に多いにも関わらず最大流出量はNo. 7のほうが多く表れている。これは融雪による流出量の増加傾向を示すものと考えられる。したがってNo. 6～No. 11の流出成分には、降雨による流出のほかに豪雪年によって降り積もった山腹地表面の積雪融解の流出成分を含んでいると言える。

3.4 洪水到達時間とその特性

降雨に対する流出特性を表現する因子の一例として洪水到達時間 (t_p) が上げられ、図4に示すように、流量ピーク時刻 (t_2) の雨量と同じ値の雨量の時刻 (t_1) までに要した時間として定義される。洪水到達時間は洪水波の事前予測や防災面から重要とされており、その推定にはこれまでKraven式や土研式などの推定式が使われてきた⁶⁾ が、この2式は地形の状態に関するパラメータがないことや、流路内の洪水伝播速度を与える式であるため、流域面積が小さい山地小流域に適用した場合、計算結果が過少になることが指摘されている

図4：洪水到達時間 (t_p) と流出遅れ時間 (t_d) の定義

⁷⁾ これらの欠点を改良し、日本の急峻な山地小流域に比較的適合性が良いとされているのは角屋ら(1976)⁸⁾ の次式で、今日広く使われている推定式である。そこで得られた試験流域の観測データから洪水到達時間を算出し、次式の角屋の推定式から求めた値と比較し考察する。ここで、 t_p ：洪水到達時間 (min)、 C ：土地利用係数、 A ：流域面積 (km^2)、 r_e ：洪水到達時間内の平均有効降雨強度 (mm/hr) で、 C は丘陵山林地流域での設定値である290を使用した。

$$t_p = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (2)$$

洪水到達時間は、概念的には「流域の力学的最遠地点に振った雨水の騒乱が最下流端に到達する時間」と定義される。しかし概念的には定義されていても、実際の水位雨量データには複雑な自然要因を含んでおり、洪水到達時間の推定は容易でない⁹⁾ と言われている。この点について角屋(1980)⁹⁾ は実際に例題を挙げ合理的な計算方法を先に示しており、今回この流出解析手法と洪水到達時間の概念に基づいて算出を行った。算出を行うためまず得られた雨量データ (mm/10min) の中で変動の著しい降雨波形を持つ出水ケースでは、10分雨量から20～30分雨量へ移動平均し、一様な降雨波形のケースではそのままの値を用いて算出した。有効降雨強度 (r_e) は次式から算出し、算出された有効降雨強度の値と等しい雨量を持つ時刻 (t_1) を、流量ピーク時刻 (t_2) からさかのぼり決定し、その間の時間を洪水到達時間 (min) とした。ここで Q_p ：ピーク流出量 (m^3/sec) である。

$$r_e = 3.6 Q_p / A \quad (3)$$

洪水到達時間の算出と推定は出水例No. 1～No. 17までのすべてのケースで行い、結果を通常期と融雪期に分けそれぞれ図5に示す。その結果、通常期と融雪期で異なる傾向が示された。算出された洪水到達時間は通常期で100～490分、融雪期で50～160分となり(図中の□) 通常期では角屋の推定式(図中の点線)よりも

図5：有効降雨強度 (r_e) と洪水到達時間 (t_p) の関係

長く示されたが、融雪期では短く示された。またKraven式、土研式でも算出を行ったが、それぞれ11分、44分となり今回得られた値よりもかなり過少に算出された。それぞれの推定式の値は角屋式>土研式>Kraven式の順で、角屋式が最も長く算出されたが、今回得られた洪水到達時間はそれよりも更に長い時間となった。

3.5 流出遅れ時間とその特性

流出遅れ時間 (t_d) は降雨ピーク (R_p) から流量ピーク (Q_p) が発生するまでに要した時間によって示される (図 4)。そこですべての出水ケースの観測データから通常期と融雪期において、降り始めからピーク流量までの累加雨量 (AR) に対する流出遅れ時間の関係をそれぞれ図 6に示す。ここで通常期の流出遅れ時間は20~190分 (平均106分)、融雪期では30~100分 (平均56分) と算出され、融雪期のほうがやや短く示されたようである。またこの結果は本試験流域から近隣の花崗岩地質の流域で観測を行った加藤ら (2000) ¹⁰⁾ の「遅れ時間は0分~35分」という結果よりもかなり長く示された。近藤ら (2006) ¹¹⁾ は砂防ダム上流の極めて荒廃した流域で観測を行い、砂礫堆積帯によって流出遅れ時間は長くなると結論づけ、そこで観測された流出遅れ時間は最長で180分という結果を得ているが、今回の通常期の結果のほうがそれより長い。一般に流出遅れ時間は主に地質、地形、植栽の被覆状態などの因子によって支配されやすく、花崗岩地帯では降雨に対する流出の応答が速いとされ、著しく荒廃し粗度係数の大きい流域で逆に遅いとされている。しかしこれらには砂防ダム等の貯留効果まで加味されていない場合が多いため、そのまま適用することは困難であると考えられる。しかし加藤ら (2000) ¹⁰⁾ と近藤ら (2006) ¹¹⁾ の報告はいずれも本試験流域と地形、地質、流域面積など類似点が多いにも関わらず、洪水到達時間、流出遅れ時間についてはここでは両方とも過大に示され、更に前節では推定式よりも過大に示されたことは、砂防ダムの出水遅延効果を示唆するものと考えられる。

図 6から流出遅れ時間は累加雨量の増加に伴いやや短くなるようでもあるが、今回のデータからは明確には示されなかった。

4 出水遅延効果を考慮した流出解析

今回対象とした砂防ダムには出水遅延効果が存在することが推察される。そこで菅原のタンクモデル¹²⁾を用いて出水遅延効果を検討する。タンクモデルの解析には遅滞時間を与える必要がある¹³⁾とされている。そのため砂防ダムによる出水遅れ時間を考慮するため、

(4) 式を用いて観測で得られた流量 (Q_{obs}) に遅滞時間 (t_g) 分移動した流量を、遅滞時間を与えた観測流量 (Q_{prt}) とし、これを用いて t_g を変化させながらタンクパラメータの同定を行った。ここで Q_{prt} : 遅滞時間を与えた観測流量 (m^3/sec)、 Q_{obs} : 観測流量 (m^3/sec) である。

$$Q_{prt}(t) = Q_{obs}(t - t_g) \quad (4)$$

計算は雨量及び流量データの精度を確保させるため、いずれも10分間隔のデータでコンピュータを用いて行った。パラメータの最適化は得られた計画流量の波形を目視で確認すると同時に、次式の平均相対誤差 (MRE) を用いて誤差範囲の小さいものとした。ここで Q_{cal} : タンクモデルによる計算流量 (m^3/sec)、 N : 流量データのレコード数である。融雪期は降水量の割増し¹²⁾を通常期のおよそ1.2倍とし算出を行った。

$$MRE = \frac{1}{N} \sum \frac{|Q_{prt} - Q_{cal}|}{Q_{prt}} \quad (5)$$

流出解析は17出水のすべてを試行錯誤し、計算流量の波形が観測流量と最も適合性のよいとされる t_g と各タンクモデルのパラメータを決定した。その結果、通常期と融雪期ともに図 7に示される直列3段構造のタンクモデルが有効となり、計9個のパラメータを同定した。遅滞時間 (t_g) はNo. 1~No. 4の小規模な出水では多少ばらつきがあったが $t_g=0$ 分となり、遅滞時間を考慮しなくても適合した。それ以外の出水では $t_g=30$ 分が最も適合性がよく比較的観測流量と一致した。 $t_g=30$ 分の場合の計算流量と観測流量の波形を図 8に示す。図 8の上図は7月の観測結果で、夏季の基底流量が極めて低い地点から急激に鋭い流量ピークの波形を描き、その後の減水の波形までよく再現されていると考える。

図 6: 遅れ時間 (t_d) とピーク流量までの累加雨量 (AR) との関係

図 7: タンクモデルにおけるパラメータの同定結果

図 8: 遅滞時間を考慮したタンクモデルによる計算流量と観測流量

下図は5月の波形で、融雪期に特徴的な緩やかな減水曲線に計算流量もほぼ追従しているようである。図 8に

示すように、融雪期と通常期の両方とも同一のタンクモデルで示すことができた。

このように砂防ダムなどによる出水遅延が認められる流域でのタンクモデルの流出解析には、遅滞時間を考慮する必要がある。本試験流域で図 8のタンクモデルを使用して解析した場合、その値は0～30分で観測流量波形と計算流量波形の適合が見られた。

5 結語

今回の研究から示された出水遅延効果は、流域に含まれる砂防ダムのタイプ、規模、流出土砂の満砂状況などによっても変化すると考えられる。また降雨による流出特性には、流域内の森林施業や植生の被覆状態、地形、地質などさまざまな要因が複合的にリンクしており、今回の結果が一樣に他の流域に当てはまるとは限らないであろう。しかし本研究では豪雪年の出水に関するいくつかの知見を示すことができたと考える。

現在貝月第1砂防ダムの上流部に新たな砂防ダムの建設が始まろうとしており、今後砂防ダムが増えた場合、流域内のピーク流量や流出遅れ時間などにどのような影響があるか更に研究する必要があるだろう。

引用文献

- [1] 志水俊夫・菊谷昭雄・河野良治(1981): 治山ダムおよびその堆砂体の流量調節効果に関する実験的研究, 92回日本林学会論文集, pp. 451-453.
- [2] 地頭菌隆・下川悦郎・馬田英隆(1992): 小流域における治山ダム群が流出に及ぼす影響, 鹿児島大学農学部演習林報告, 20号, pp.213-222.
- [3] 鈴木雅一・福嶋義宏・窪田順平(1983): 堆砂地通過にともなうハイドログラフ変化の観測とその検討, 京都大学農学部演習林報告, No. 55, pp. 182-193.
- [4] 岐阜県砂防台帳, 2006
- [5] 杉山博信・A. C. Whitaker・八幡学・広瀬道宣(2003): 積雪山地小流域における寒候期の水文特性, 農業土木学会論文集, No. 228, pp. 57-64.
- [6] 土木学会(1995): 水理公式集, pp 154-156.
- [7] 水山高久・瀬尾克美(1984): 山地小流域の洪水到達時間および短時間降雨強度と継続時間の関係, 新砂防, 37(3), pp. 20-22.
- [8] 角屋睦・福島辰(1976): 中小河川の洪水到達時間, 京大防災研究年報, 第19号B, pp.143-152.
- [9] 角屋睦(1980): 流出解析手法(その8) —洪水到達時間と合理式—, 農業土木学会誌, 4(8), pp. 39-44.
- [10] 加藤祐子・恩田裕一・水山高久・小杉賢一郎・吉川愛・辻村真貴・秦耕二・岡本正男(2000): 揖斐川上流の地質の異なる流域における流出の遅れ時間の違い, 砂防学会誌, 53(4), pp. 38-43.
- [11] 近藤観慈・小林尚也・林拙朗(2006): 土石流多発溪流における降雨に対する流出遅れ時間—三重県いなべ市の西之貝戸川の事例—, 砂防学会誌, 59(3), pp. 32-37.
- [12] 菅原正巳(1972): 水文学講座7 流出解析法, 共立出版, 257p.
- [13] 佐藤勝夫(1982): 洪水流出計算法, 山海堂, p. 209.

この論文の公開の質疑または討議は2008年6月30日まで受付けます。