

植生の回復に伴う洪水及び長期の 流出特性の変化

CHANGE OF THE RUNOFF CHARACTERISTICS DUE TO THE RECOVERY OF VEGETATION

小葉竹重機¹・荒井良介²・清水義彦³・松本健作⁴・藤井隆一⁵
Shigeki KOBATAKE, Ryosuke ARAI, Yoshihiko SHIMIZU,
Kensaku MATSUMOTO, Ryuichi FUJII,

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 建設省新丸山ダム工事事務所 (岐阜県加茂郡八百津町八百津3351)

³ 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)

⁴ 正会員 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁵ 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)

The current paper investigates how storm and long term runoff characteristics changed with the growth and increase of vegetation in the Ashio basin. Ashio basin was damaged by wood fire and smoke pollution resulting from copper refining. However, tree planting and sand control works have been carried out and vegetation is recovering.

In order to study the change of runoff characteristics due to the recovery and growth of vegetation, we installed rainfall and water gauges at 5 points in the Ashio basin. For the sake of accuracy, beside our observations, we also considered in our study, results of water stage observations made by the Ministry of Construction and by the Forestry Agency. As a results peak discharge, total outflow of flood, as well as outflow of long term have been decreasing due to vegetation increase and recovering.

Key Words : runoff characteristics, devastated basin, vegetation recovery, flood runoff, long term runoff

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。

一方、我々が行っている観測以外に、建設省渡良瀬川工事事務所により足尾砂防ダム主堰堤で1970年代より水位観測が行われている。また、1976年から1988年にかけて林業試験場によって流域内に流出試験地が設けられ、詳細な流出観測が行われた。

ところで、荒廃した足尾流域に対して、まず大規模な足尾砂防ダムが建設着手されたのはカスリン、アイオン、キティ台風以後の昭和25年である。一方、

昭和31年には銅精錬の方法がこれまでのベッセマー精錬法に代わり、亜硫酸ガスを排出しない自溶式精錬法となり、ようやく亜硫酸ガスの排出は止まった。これを受けて昭和32年に栃木県林務部、前橋営林局、建設省渡良瀬川砂防事業所の三者協議が行われ、栃木県は足尾民有林の治山事業、前橋営林局は足尾国有林の治山事業、建設省は砂防ダムおよび溪岸沿いの山腹工と河川の護岸工をそれぞれ分担することが確認された。

前述の林業試験場による試験地は、このようにして始まった治山事業によって植生が蘇りつつある時期に、植生と流出との関係を調査する目的で設置されたものである。

我々が1997年より始めた観測の目的の一つも、この植生量と流出特性との関係を明らかにすることであるが、我々の観測はまだ始めたばかりであり、これから植生量の増加に伴う流出特性の経年変化を算定することは無理である。これに対して前記の2つ

の観測はある程度観測期間が長く、流出特性の経年変化をつかむことが出来ると期待される。

そこで、この2つのデータを用いて洪水流出と長期流出の特性の経年変化を検討した。本報告はこの検討結果をまとめたものである。

2. 解析に用いた資料の概要

図-1は渡良瀬川上流域の草木ダム流域（流域面積254km²）と我々が水位観測を行っている5基の砂防ダムの位置を示したものである。番号を付けた5基の砂防ダムのうち、1番のものが前述の足尾砂防ダム（貯砂容量500万m³、流域面積54km²）で、この副ダムに我々は水位計を設置している。

この足尾砂防ダムの主ダムに渡良瀬川工事事務所によって水位計が設置されており、1970年代より観測が行われている。観測開始から20年以上が経過しており、これが流域内の植生が回復する期間と一致するために、流出特性の変化を検討するには良いデータと考えられる。しかし、水位観測のみで流量には変換されていない。そこで、我々は1997年から始めた副ダムでの水位観測と観測期間が完全にオーバーラップする1998年を選んで、1年間の観測結果から主ダムでのH～Q曲線を作成し、流量への変換を試みた。図-2は同時刻の主ダムの水位と副ダムの水位の関係を見たもので、水位変動の激しい水位の高い場合を除けば両者にはきれいな相関関係が認められる。したがって、この関係から主ダム水位を副ダム水位に変換し、副ダムですでに得られているH～Q曲線から、主ダムのH～Q曲線を求めた。しかし、主ダムに1970年代に設置以後、主ダムの嵩上げや水位計の交換が行われており、それに伴う水位標の零点調整は行われていると見られるが、厳密には零点の±数mmの変化はあると考えられる。このため、水位が高い洪水時での流量推定精度はある程度確保できるが、低水時の流量精度は極端に悪くなり、長期流出解析にこのデータを用いることはできないと考えられる。したがって、この主ダムでの観測データは洪水流出特性の検討のみに用いることとした。

つぎに、1976年から1988年の間に林業試験場によって行われた試験地観測は、図-1の4番の砂防ダムの直上流右岸側支溪を対象に行われた。この結果は近嵐¹⁾によって報告されている。それによると、流域面積は9.95ha、水位は既設治山堰堤を嵩上げして60°三角堰を設けて観測された。したがって流量の観測精度は高いと考えられる。また、雨量計も合計3台設置されている。

この試験地の植生の変遷について近嵐は次のようにまとめている¹⁾。「試験に着手した昭和50年頃の状態と、観測を打ち切った昭和63年頃とでは植生の復旧により大きな変化が見られた。なかでも試験流域とその周辺には露岩状態であったところに進入してきた草本類も、ヘリコプターによる実播の種子等を含むイタドリ、ヨモギ、ウイーピング、ススキ

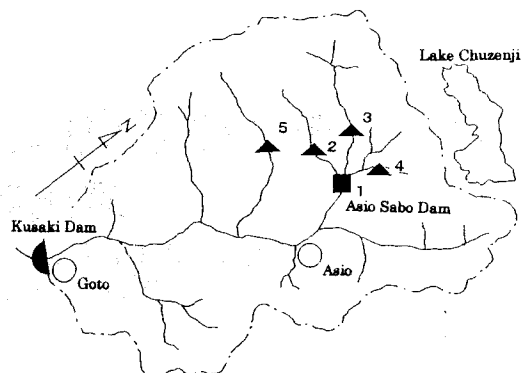


図-1 渡良瀬川上流域と対象流域の概要

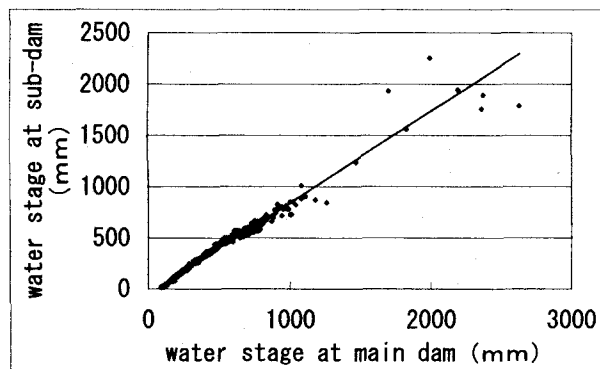


図-2 足尾砂防ダムの主ダムと副ダムの水位の相関

等の第一世代の植生が、ヤシャブシ、リョウブ等やや丈の大きい第二世代の植生に遷移しつつあり、その上、土壌の安定した所には、ニセアカシア、ハンノキ、ダケカンバ等木本の植物が優位を占めつつあり、植栽されたクロマツも成長している。また、尾根筋には広葉樹を主とした樹林状態のところも一部には見られる。」

このように試験流域でも観測当初から観測終了までの間に顕著な植生回復が進んだことが分かる。

この試験流域における観測結果が論文の形で公表されており¹⁾、この結果を用いることとした。ただし、公表資料の時間単位が日単位であるために、洪水流出特性の検討には用いられず、長期流出特性のみを検討することとした。

3. 洪水流出特性の変化の検討

前章で述べたように、洪水の流出特性の変化の検討は、足尾砂防ダムの主ダムで1970年代より行われてきた観測結果を用いる。表-1は観測資料の中から総降雨量200mm程度以上の出水を選んで、総降雨量、ピーク流量、これに対応する時間雨量（洪水到達時間1時間）、これら両者の比であるピーク流出係数をまとめて示したものである。また、図-3は表-1に示したピーク流出係数を経年的に示したものである。この図からピーク流出係数は近年になるにしたがって着実に小さくなってきていることが認められる。

ここではさらに流出モデルによる計算を通して、洪水流出特性の変化について検討してみる。流出

表-1 流出解析対象洪水の一覧表

date	total rainfall amount (mm)						peak discharge (mm/hr)	rainfall (mm/hr)	peak runoff coefficient
	Ashio	Shazan	Matsuki	Kurobi	Kousin	average			
1974.8	295.5	-	-	323	317	311.5	8.41	14.3	0.59
1976.9	229.7	189	187	288	-	223	4.22	11.6	0.36
1979.1	263	-	210	-	162.5	238	13	27	0.48
1982.9	312	149	147.5	226	256	224.4	6.4	19.1	0.34
1983.8	369	375	305	-	-	357.5	8.3	15.8	0.53
1986.9	205	228.5	-	216.5	281.5	232.9	5.32	20.3	0.26
1989.8	210	147	170	251	251	205.8	6.98	20.6	0.34
1990.8	272	301.5	227	284.5	324	281.8	10.1	28.8	0.35
1991.8 a	248	280	258.5	240.5	367.5	278.9	8.58	31	0.28
1991.8 b	154	143	171	220	203	178.2	7.25	26.7	0.27
1998.8	341	304	370	487.5	466.5	393.5	3.76	12.1	0.31
1998.9	255	253	231.5	245.5	302	257.4	15.4	40.4	0.38

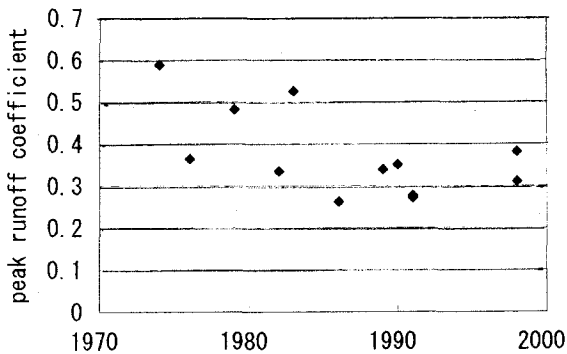


図-3 実測値によるピーク流出係数の変化

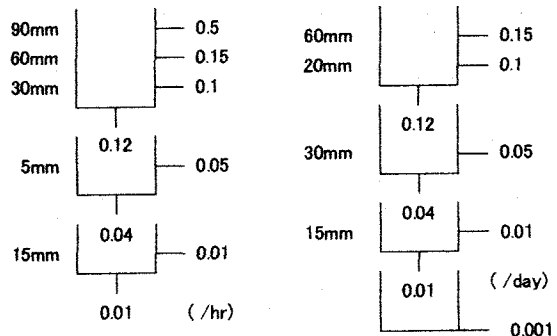


図-4 (a)洪水用モデル (b)長期流出用モデル

モデルとしては我々の既往の検討で図-1に示した草木ダム流域を対象に得られているタンクモデル²⁾、³⁾をそのまま用いることとした。図-4(a)がそのモデルの構造を示すもので、後述の図-5、図-6から判断して、この構造でほぼ妥当な結果が得られていることが分かる。この構造を初期と近年の資料に対し

て共通に用いて計算を行った結果の一例が図-5、6である。初期の図-5に比較して図-6の近年では洪水のピーク付近で実測値よりも計算値が大きくなっていることが明瞭にうかがえる。

表-2は実測値の図示期間内（5日間）の総流出量と計算の総流出量との比（実測／計算）を示したも

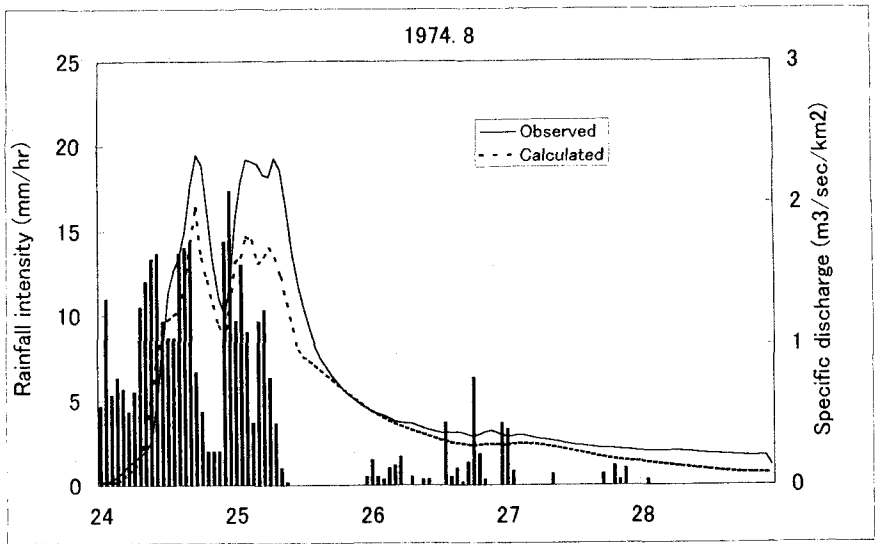


図-5 観測初期の実測値と計算値の比較

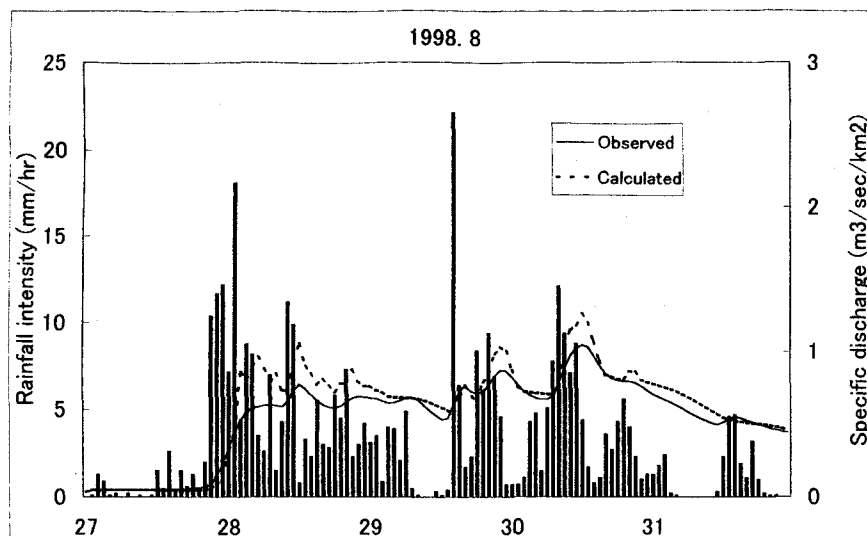


図-6 観測後期の実測値と計算値の比較

表-2 期間内洪水流出総量の比

flood	total runoff (mm)		ratio
	observed	calculated	
1974.8	288.0	229.7	1.25
1976.9	235.8	186.1	1.27
1979.10	216.0	193.7	1.12
1982.9	168.8	187.2	0.90
1983.8	300.6	260.6	1.15
1986.9	181.4	204.8	0.89
1989.8	173.2	175.0	0.99
1990.8	187.6	229.3	0.82
1991.8a	211.0	232.2	0.91
1991.8b	142.9	156.6	0.91
1998.8	237.6	263.5	0.90
1998.9	215.3	235.8	0.91

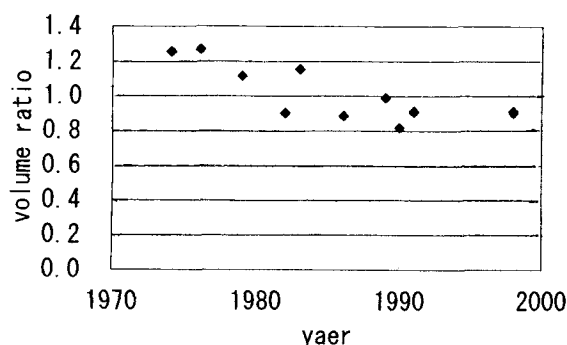


図-7 洪水流出ボリュームの比の変化

ので図-7はこれを図化したものである。近年になるにしたがって、洪水流出はピークのみならず総流出量に関しても小さくなってきていることが明瞭にうかがえる。これらは流域内の植生量が増加し、土壌も発達してきたことによる、洪水流出の緩和によるものと考えられる。

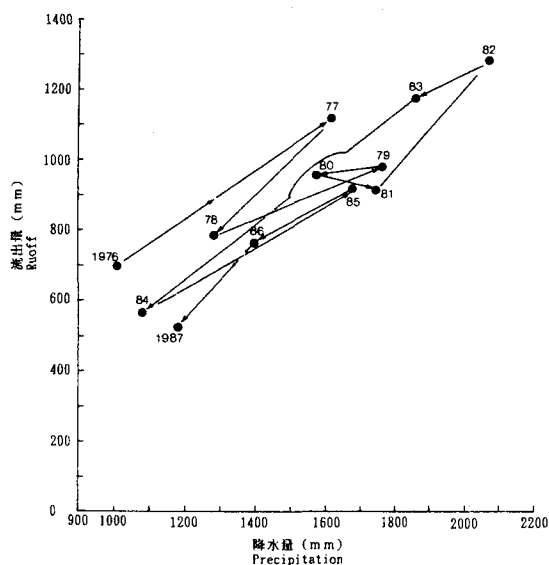


図-8 林業試験場試験流域における降雨量と流出高の経年変化（近嵐¹⁾による）

4. 長期流出特性の変化の検討

第2章で述べたように長期流出特性については、林業試験場による試験地観測の結果を用いる。近嵐は報告書¹⁾の中で図-8を示し、近年は降水量に対して流出量が減少してきていることを示した。これは植生量の増加によるものであろうとしているが、それ以上の定量的な検討は行っていない。

そこで、我々は公開されている日降雨量と日流出高の資料を用いて流出解析を行ってみた。なお、観測期間は毎年4月から11月末程度までの期間で、冬期には降雪と結氷のために観測は中断されている。

長期流出解析モデルとしては図-4(b)に示すタンクモデルを用いた。このモデルについてもこれまでに草木ダム流域を対象に同定されたもの^{2), 3)}をそのまま用いている。

表-3 計算に用いた月別蒸発散強度

April	1.80	August	4.14
May	2.76	September	2.76
June	3.66	October	1.62
July	4.38	November	0.98

(mm/day)

流出解析の中で用いる蒸発散強度については表-3に示す値（Hamon式から計算、定数は前橋のものを使用）を用いている。蒸発散の引き方は、無降雨の場合にのみ引くこととした。

計算の対象は観測期間中に欠測のないもので、観測初期と後期からそれぞれ2年間ずつ選んだ。初期として、1977年と1978年、観測後期として1986年と1987年を選んだ。

計算結果の例として初期のもの（1977年）について示したものが図-9、後期のもの（1986年）について

て示したものが図-10である。

図-9において実線は実測流量、破線は計算流量である。なお、この場合には蒸発散強度は表-3の値を0.5倍した値を用いている。

つぎに図-10においては実線は実測流量、破線は図-9の場合と同じ蒸発散強度（表-3に0.5を乗じたもの）を用いた場合、細い実線は図-9の蒸発散強度に対して一定倍率（図-10の場合には1.3）を乗じて計算を行った場合のものである。この説明は以下の通りである。

まず、図-10から観測初期と同じ蒸発散強度を用いた破線が大きく実測よりはずれていることが分かる。そこで、観測初期の蒸発散強度にある倍率を乗じて計算を行ってみた。このあたりの検討方法と全体の水収支をまとめて示したものが表-4である。

表-4では観測初期の2年間と後期の2年間について、計算対象期間内（4月～11月）の(a)総雨量、

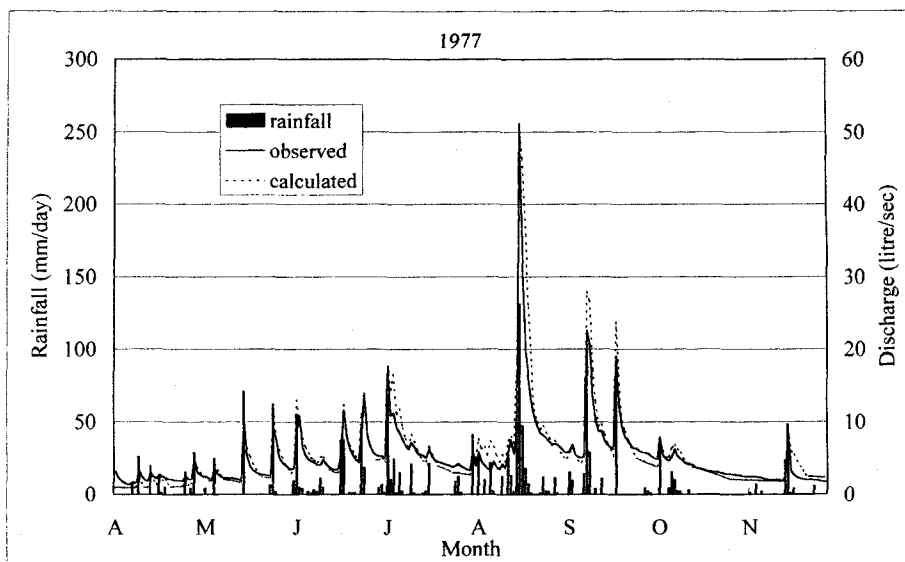


図-9 観測初期における実測流量と計算流量の比較

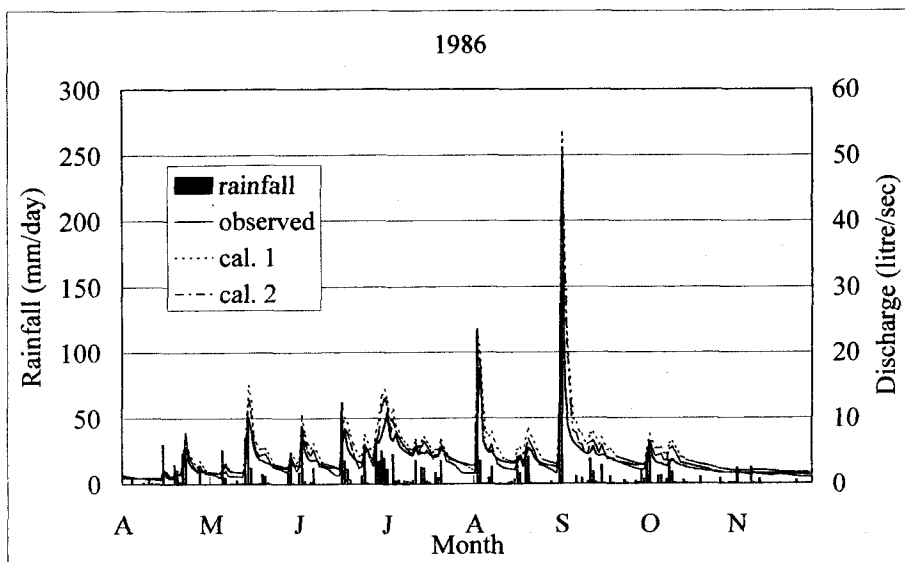


図-10 観測後期における実測流量と計算流量の比較

表-4 観測初期と後期における実測水収支と計算水収支の比較

	a	b	c	d	e	f	g
year	rainfall (mm)	observed (mm)	ratio b/a	calculated (mm)	ratio d/b	calculated (mm)	ratio f/b
1977	1619	1119	0.69	1211	1.08	-	-
1978	1286	784	0.61	895	1.14	-	-
1986	1388	760	0.55	1036	1.36	838	1.10
1987	1177	517	0.44	864	1.67	586	1.13

d: 蒸発散強度は表-3の0.5倍

f: 蒸発散強度は表-3の1.3倍または1.9倍

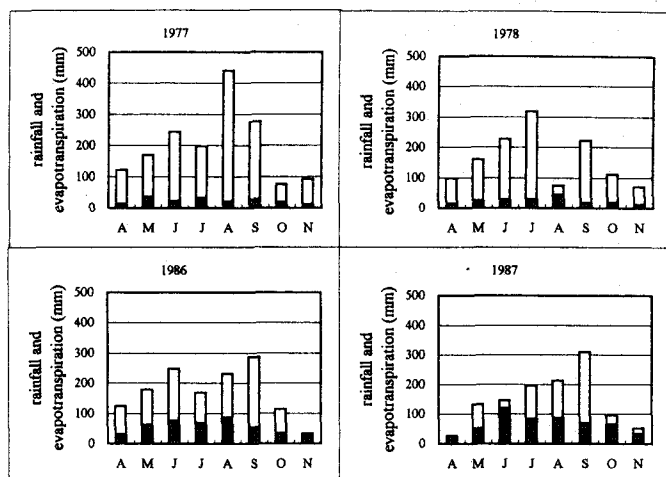


図-11 観測初期と後期における蒸発散量（損失量）の推定値

(b) 観測流出高、(c) これら実測値による流出率、(d) タンクモデルによる計算流出高、(e) この計算流出高と実測流出高の比(d/b)、などを示している。

ここで、(d) 欄は表-3の蒸発散強度に0.5を乗じて計算した結果であり、(f) 欄は表-3の値を1.3倍(1986年)または1.9倍(1987年)して用いた場合の結果である。このような倍率を選んだ理由は、観測初期の1977年、1978年の計算値と実測値の比(d/b)が1.1前後であることから、これにほぼ合うような結果を与える蒸発散強度を試行錯誤して求めたことによる。なお、初期の計算値と実測値の比(d/b)を1.0になるようにモデル定数をチューニングしていないのは、かつてこの流域を含む流域での検討でこのモデルを用いていることと、データが年間を通じてではなく、タンクの初期値も不明であることによる。事実、(d/b)の値も1.1前後であり大きな間違いはないものと考えられる。(計算上全ケースの初期水深は各タンクごとに一定とした)。

ところで、もともと現在対象としている降雨量と流出高との関係を支配するものは、蒸発散のみではなく地中での保水量も大きく影響している。しかし、ここでは植生の回復による様々な効果を蒸発散という現象にまとめて説明するとこのようになる、という立場で検討を行うことにした。すなわち、観測初期と後期で(e) 欄の比を合わせるためには、蒸発散強度をこの程度大きくしなければダメである、という方針での検討結果である。

さて、こうして得られた蒸発散量（損失量）と降雨量とを比較したものが図-11である。これはあく

までも計算の上での差し引いた値という意味であるが、観測後期には差し引くべき量が降雨量の30～40%程度を占めていることが分かる。植生の回復に伴う土壌の発達の影響なども含む、蒸発散の増加と考えることができる。

5. あとがき

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。我々の観測期間は短く、植生の回復に伴う流出特性の変化を議論するにはまだ充分でないために、他官署によって行われている観測資料を用いて、洪水流出と長期流出の特性の変化について検討した。その結果、1970年代と比較して1990年前後では、洪水、長期流出とともに、流出量が減少してきていることが明らかになった。

参考文献

- 1) 近嵐弘栄：足尾久蔵沢試験流域水文観測報告、一 1976年～1988年 無降雪期一、新潟大学農学部付属演習林研究報告、第27号、1994年
- 2) 小葉竹重機、清水義彦、赤羽忠志、藤田浩、藤森実：植生の回復に伴う流出特性の変化、水工学論文集、第42巻、pp. 217-222、1998年
- 3) 小葉竹重機、清水義彦、藤井隆一、向井正大、吉澤拓実：砂防ダムのもう一つの機能について、水工学論文集、第44巻、pp. 389-394、2000年

(2000. 10. 2受付)