

山地小流域における流出特性について

安田 裕*・田熊勝利*・関川桂太郎**

Runoff Characteristics of Small Mountainous Basins

Hiroshi YASUDA*, Katsutoshi TAKUMA* and Keitaro SEKIKAWA**

Rainfall-runoff relationship was observed and analyzed at three small mountainous basins (Basin A, B, C). Basin A and B are located on the downstream of Basin C. Basins A and B have lower gradient and higher ratio of the bare surface, compared to Basin C. The unitgraphs identified by Kalman Filter give a good fit of hydrographs and these optimum unitgraphs show generalized runoff characteristics of each basin. Due to the differences on surface cover and the gradient, runoff characteristics of Basin C are different from those of other two basins. While the optimum unitgraphs for Basins A and B have a peak at time step 2 hours, those for Basin C have a peak at time step 1 hour.

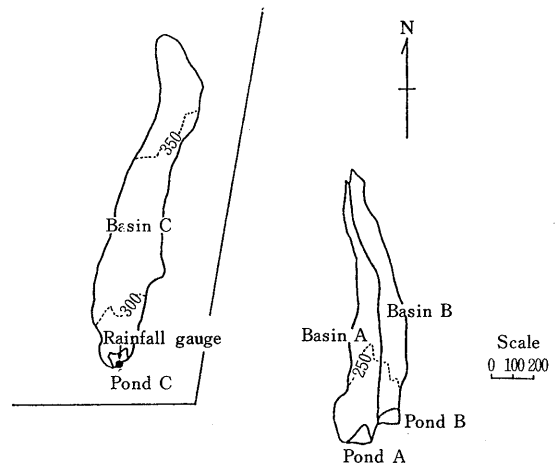
結 言

山地小流域においては不安定な気象条件に加え、地形が急峻で、小面積であることから、流出現象は複雑であり、定量的な評価は多くの場合困難なものになっている。本論では、岡山県北部の山地小流域3カ所を選び、それぞれの降雨流出特性を定量的に評価しているものである。各流域毎に単位図をカルマン・フィルターにより最適化することにより、各流域の流出特性を定量的に比較しようとするものである。

調 査 概 要

試 験 流 域

1 試 験 流 域 の 概 要



第1図 流域概略図

*鳥取大学農学部農林総合科学科生存環境科学講座

*Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University

**農用地整備公団

**Japan Agricultural Land Development Agency

本調査は、岡山県北部、標高200m~400mの黒ボク地帯からなる丘陵地で地区内に3つの試験流域（流域A、流域B、流域C）において行なわれた³⁾。

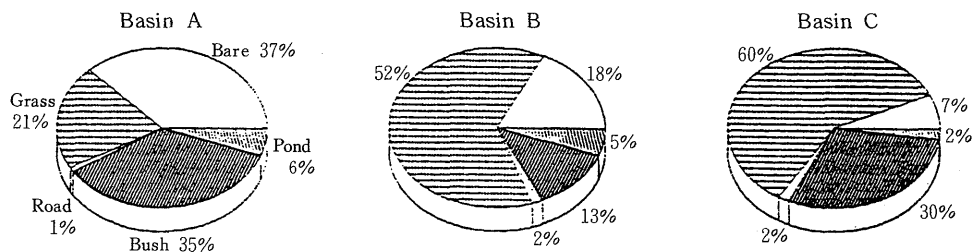
第1図に流域の概要図を示す。3流域の末端には、貯留池があり流域からの降雨流出水は貯留池に流入し、越流水は下流域へ流出する。

2 流域面積及び形状

流出濁水調査の対象とする3流域は、それぞれ独立しており、第1図に示したように、どの流域も全体的に縦長な形をしている。各流域の面積の内訳、流域緒元を第1表及び第2図に示す。

第1表 流域諸元 (km²)

	流域 A	流域 B	流域 C
流域面積	0.127	0.128	0.361
裸地	0.047	0.023	0.025
草地	0.027	0.080	0.215
疎林	0.045	0.016	0.108
道路	0.001	0.002	0.006
貯水池	0.007	0.007	0.007
平均勾配(°)	1.7	1.6	4.5



第2図 流域地被状態

各流域の特性

1) 流域 A

流域Aは相対的にもっとも裸地の面積率が高く、オフロード車などの影響でかなり土壌構成が乱されていることが分かる。表層の黒ボク土と下層土の黄色土層が混合した状態にある。

2) 流域 B

流域Bも裸地が目だつ流域であるが、黒ボク土の堆積が薄く下層土の黄色土が露呈しているところが多く、降雨時にガリに表面流が集水して流下を促進していることが認められた。

3) 流域 C

流域Cは、他の流域より標高の高い所にあり黒ボク土が最も厚く堆積している流域である。流域平均勾配は4.5度であり、流域A、Bがそれぞれ1.7、1.6であるのでこれらに対しておよそ3倍の勾配を持っている。

第2図に示された地被状態から、流域A、Bと流域Cには大きな相違があることがわかる。上述のように流域A、Bでは平均勾配が小さく、高い裸地率、低い植被率となっている一方で、流域Cでは平均勾配が大きく、低い裸地率、高い植被率となっているので、流域Cが最も山地的性質を持っているといえる。

調査目的

1 流域特性と降雨流出

種々の地質、植生、傾斜などの諸要素が複雑に絡んでいる流域において、降雨流出特性を比較検討する。

2 流出モデルの適応

本論においては単位図を降雨流出関係に適用し、カルマン・フィルター理論によりモデルの最適化を行う。

3 流域特性と流出モデルの関連

最適化された流出モデルから流域特性を探る。

調査内容

1 水文調査

降雨量

降雨量は、流域Cに設置した転倒升型自記雨量計(0.5mm/1転倒)を用いて測定し、欠測分については近隣観測所の毎時降雨量データを使用した。なお、対象降雨は、降雨開始後無降雨が6時間以上続くまでの降雨を一連続降雨とし、一連続降雨の累計が13mm以上のものとした²⁾。

流出量

降雨流出量は、まずそれぞれ流域下端の貯留池に設置した石田式自記水位計により水位を測定した。貯留池には短形堰が設けられており、流出量はこの堰を越流する水位に対して短形堰の公式を適用して計算した。

2 流出率について

本研究では、降雨流出特性を各流域について検討するために主に流出率を用いる。流出率は、一連続降雨量に対する有効降雨量の比として定義される。

流出率を求める場合流出量としてハイドログラフのどの部分までとるかが問題となる。ハイドログラフの減水部を片対数グラフに描いた時の勾配急変点をとる手法や、地下水流出の通減状態を考慮した手法などいくつかの手法があるが、今回は比較的容易で実用上あまり問題がないとされる初期流量によって水平分離する手法を用いた。これは、洪水の始まる直前の流量でハイドログラフを水平に切り上の洪水流量を流出量と考えるものである。このようにして求めた流出量が流域内における一連続降雨量のどのぐらいの割合かを求めたものが流出率となる。

3 降雨流出モデル

流出モデルは多くが提案され、実用化されている現状であるが、本論においては流域ごとの流出特性を視覚的に比較することのできる単位図法を用いる。単位図法では、ある時間ステップ i における流出量 $Q(i)$ が単位図 $u(k)$ により以下のように示される。

$$Q(i) = \sum_{k=1}^{k_{max}} u(k) R(i-k) \Delta t$$

ここに、 k_{max} は単位図の基底長。

本研究では単位図を用いて流出シミュレーションをおこなう。

4 単位図の同定

本研究ではカルマン・フィルターにより単位図の同定を行った¹⁾。

単位図 $u(k)$ により i step における流量 $Q(i)$ は次の離散化式で示される。

$$Q(i) = \sum_{k=1}^{k_{max}} u(k) R(i-k) \Delta t$$

ここに、 R は雨量時系列である。

単位図は定常であるので、

$$u(n+1) = I u(n) + v(n)$$

ここに、 I は単位行列、 v は雑音である。

カルマン・フィルターにおける観測系は

$$Q(k) = M(k-1) u(k-1) + w(k-1)$$

ここに、 $M(k-1)=[R(k-1), R(k-2), \dots, R(k-i)]$ であり、 $w(k)$ はガウス性白色雑音である。

k step までの情報から得られる $k+1$ step における最適な単位図は

$$\begin{aligned} &\hat{u}(k+1 | k+1) \\ &= P(k+1 | k) + K(k+1) \{Q(k+1) - M(k+1) \\ &\quad \hat{u}(k+1 | k)\} \end{aligned}$$

ここに、 P は共分散行列、 K はカルマンゲイン行列であり、

$$\begin{aligned} &K(k+1) \\ &= P(k+1 | k) M^T(k+1) \end{aligned}$$

$\{M(k+1) P(k+1 | k) M^T(k+1) + r(k+1)\}^{-1}$ で与えられる。ここに、 $r(k+1)$ はガウス性白色雑音の分散行列である。共分散行列は

$$\begin{aligned} P(k+1 | k) &= \Phi(k+1 | k) P(k | k) \Phi^T(k+1 | k) \\ &\quad + \Gamma(k+1 | k) Q(k) \Gamma^T(k+1 | k) \end{aligned}$$

である。

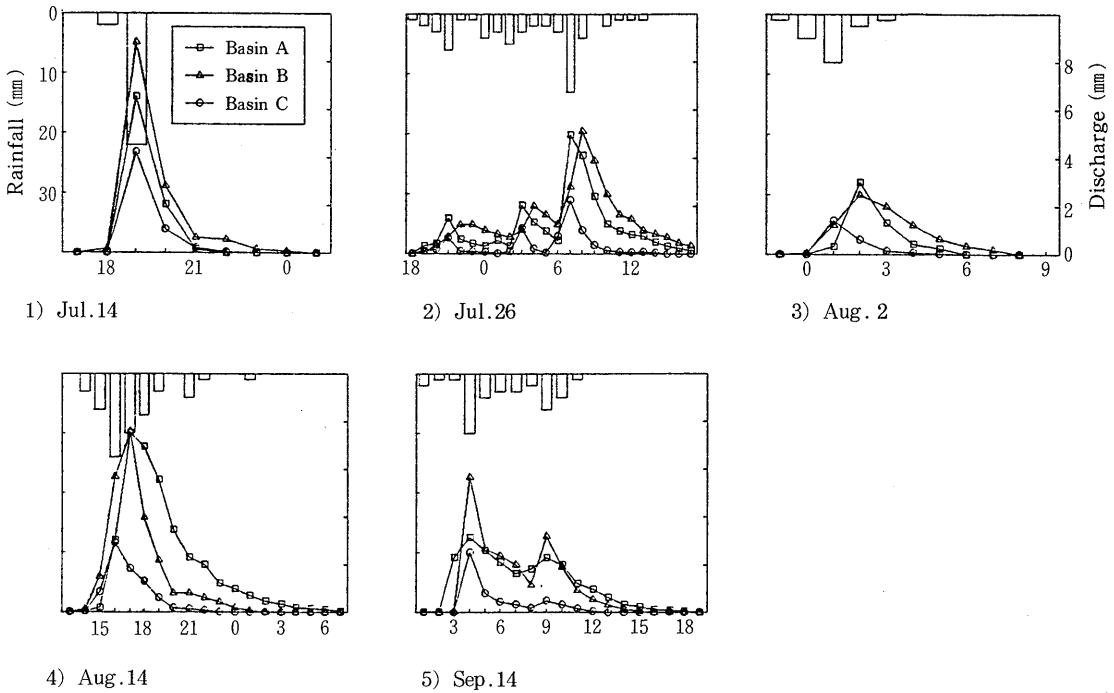
ここに、 Φ は状態変換行列、 Γ は状態行列である。

結果および考察

1 降雨による流出特性

第3図-1)に1993年7月14日の降雨による各流域(A, B, C)の流出高を示す。7月14日の降雨は2mmの先行降雨の後に22mmの強い降雨強度が出現し、単位図の概念が各流域毎に示されている。ピーク流出高は流域B, A, Cの順になっており、流域Cの流出高が流域A, Bの半分ほどになっている。第3図-2)は7月26日から続いた降雨による流出を示している。降雨のピークは3つあり、3番目のピークが最大になっている。最初の2つの降雨ピークに対しては流域Aが最大の流出高を示しているが、3番目のピークに対しては流域Bの流出高が最大となっている。また、流出のピークは流域A, Cでは降雨のピークと一致しているが、流域Bでは1時間遅れている。第3図-3)は8月2日の降雨を表しているが、流域Cの流出ピークには遅れはないが、流域A, Bでは1時間のラグが認められる。第3図-4)は8月14日の降雨流出を示しているが、やはり流域Cの流出高は低く、ラグはなく、流域A, Bは1時間のラグを持っている。一方で、流域Aの流出の低減部が高く長くなっている。第3図-5)は9月14日の降雨流出関係を示しているが、ここでは3流域ともラグを持っていないようであるが、流域Bの流出高が7月14日の降雨流出関係と同様に最大となっている。

一連の降雨流出関係をまとめると、①流域Cの流出高は小さい。②ある程度の先行降雨があり、降雨強度が卓越した場合は流域Bの流出高が最大となる。③流域Cの流出ピークは降雨に対し1時間のラグを持つ場合が多い。しかし、この程度の面積の流域に対し、1時間の測定値



第3図 降雨 - 流出

は十分な分解能とはいえない。

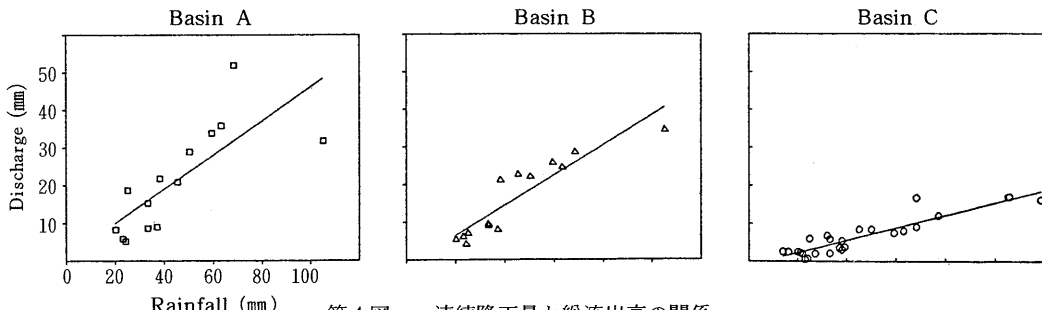
2 一連続降雨と流出量との関係

第4図に各流域の一連続降雨と流出高の関係を示す。それぞれの流域において一連続降雨量と流出高の間には相関が認められた。これらの図から流域A, B, Cの流出率がおよそ45, 40, 16%であることがわかる。よって、一連続降雨量と流出高の間には流域ごとに流出率によって表されるような特有の関係があるといえよう。流域Aは第1表が示すように他の流域と比較して裸地の面積率が37.0%と高い。裸地状態では土粒子が雨滴で分散され土中の空隙を土壌クラストや乾湿の繰り返しによる団結

が考えられ、浸入能が低くなり表流水が発生しやすい状態である。このため、流域Aの流出高が高くなっているものと思われる。同様に流域Bにおいても裸地の面積率が高く、この流域はガリが多くみられ表流水が発生する

第2表 一連続降雨量Rと総流出高Dの関係

Basin	Regression	Correlation coefficient
A	$D = 0.45R + 0.86$	0.76
B	$D = 0.40R - 1.56$	0.91
C	$D = 0.16R - 1.06$	0.90



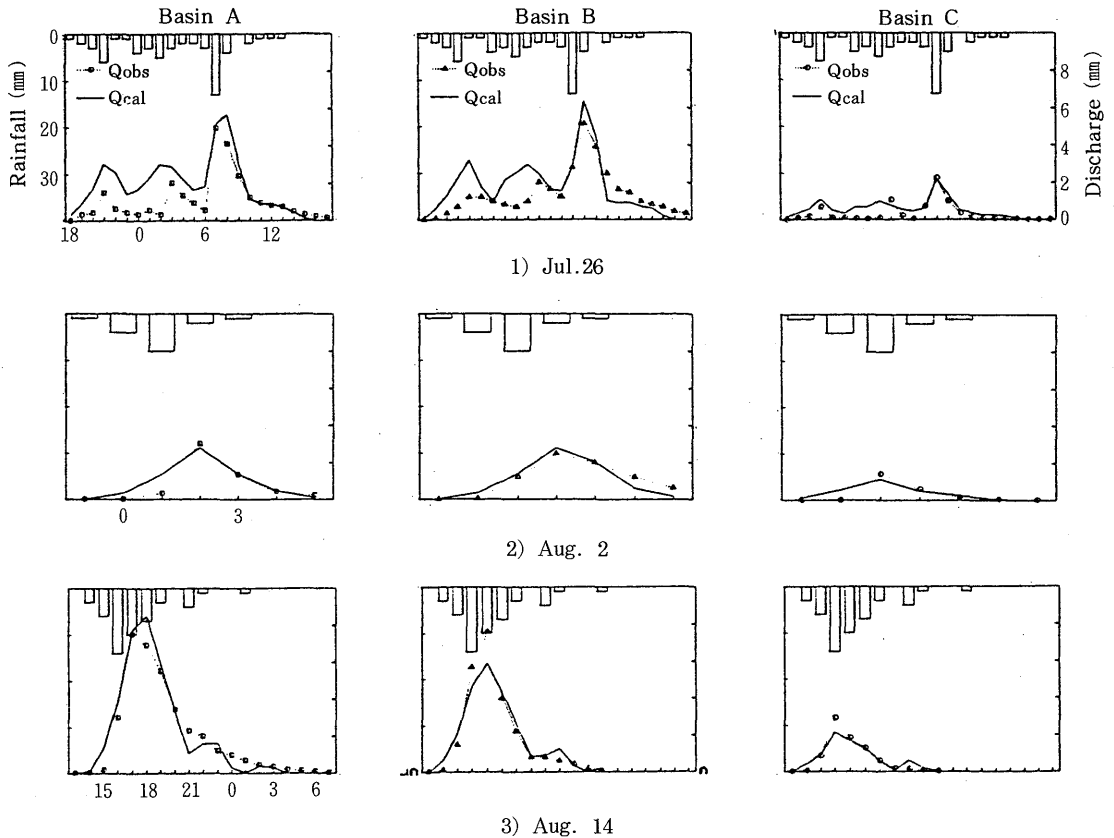
第4図 一連続降雨量と総流出高の関係

と流下が促進され、流出高が高くなる要因になっているものと思われる。流域Cは裸地の面積率は低いが、勾配が他流域よりも急であることから高い流出高が予想されたが、流出高は低く勾配の影響はみられなかった。流域Cは植被率が高く、貯留性が大きい。このように、流域の裸地の面積率が流出高を左右する要因となるようである。この他に、流域Cは流域A、Bに対し上流、高位部

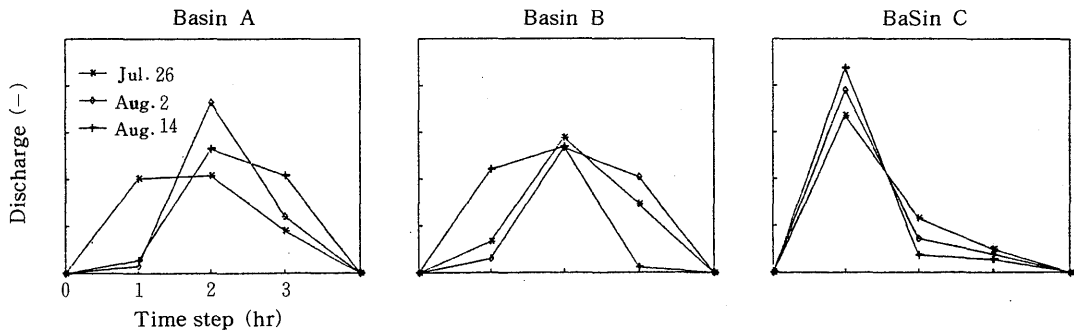
である山地側に位置しており、黒ボク層が卓越しているので中間流となって流域A、Bに流出する成分があることが予想される。

3 単位図の適応

1993年7月26日、8月2日、8月14日の3度の降雨に対する各流域に最適な単位図をカルマン・フィルター理論により同定し、第5図-1), 2), 3)のような流出



第5図 同定した単位図による流出高のシミュレーション



第6図 同定単位図

高シミュレーションを得た。用いられた単位図は基底長3時間のものであり、有効雨量の推定は行わずに実測雨量に対し、単位図の最適化を行ったものである。8月2日、8月14日の降雨流出関係に対しては流出高の実測値と計算値はほぼよく一致しており、用いられた単位図は最適同定されたことがわかる。第6図は1993年7月26日、8月2日、8月14日の降雨-流出に対し最適化された各流域の単位図を示している。これらの図は各流域ごとに最適同定された単位図 $u(k)$ を比較のため

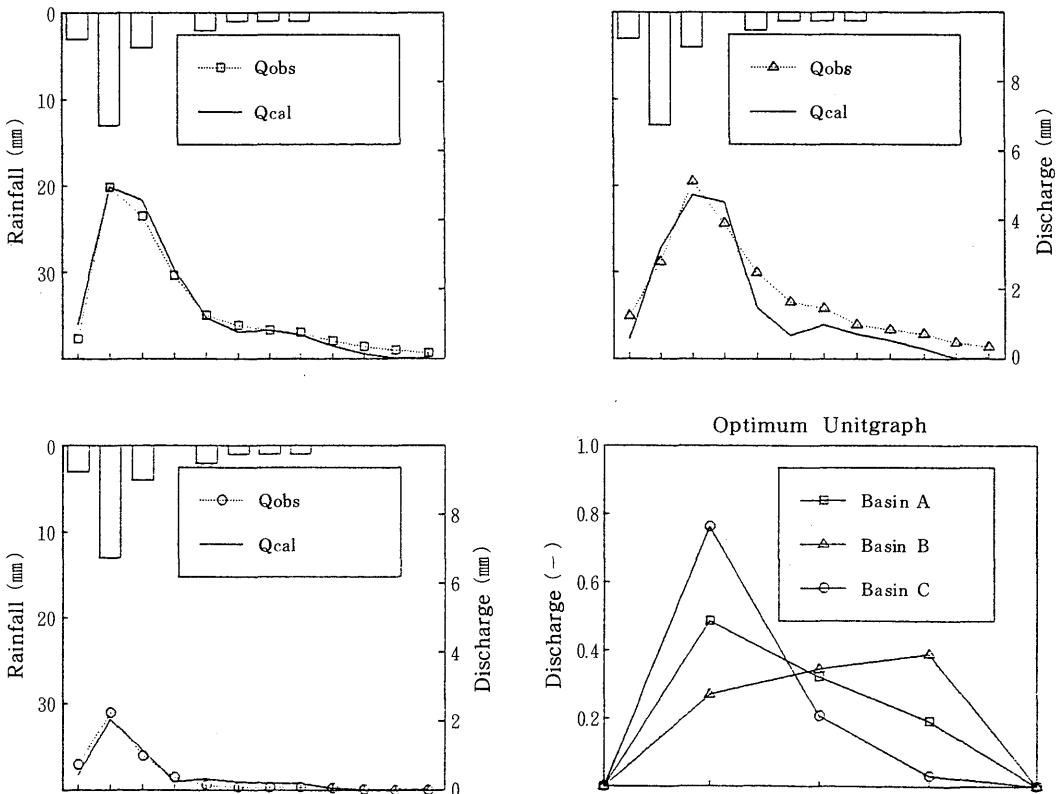
$$\sum_{k=1}^{k_{max}} u(k) = 1$$

にて規格化することにより求められたものである。3降雨事象に対して得られた単位図は各流域毎に同様の流出パターンを持っている。流域Aの単位図は2時間目にピークがあり立ち上がりが遅く、低減が長い。流域Bの単位図も1時間目にピークがあり、3時間目で急激に流出が落ち込んでいる。一方、流域Cの単位図は1時間目に全体の90%にもなる著しいピークを持ち、2、3時間目で

は急激に流出が落ちている。3つの異なった降雨事象に対し3流域それぞれが固有の最適単位図を持っていることから、3流域にはそれぞれ固有の流出システムが存在することがわかる。

流域の位置関係をみると、流域Cは最上流部に位置し山地が平野部に接する境界にあると判断されることから、流出成分のうち、表面流出分だけが流量として観測されたものであると推定される。中間流出分がより下流に位置し緩勾配である流域B、Cで表面流出化し流量として測定されたものであると推定される。第2表でも流域Cの流出率は低いものになっている。流域Cの流出が常に1時間目にピークがあり、流域A、Bでは2時間目にピークがある。

7月26日分の流出シミュレーションについては適合性が高いとはいえない。これは3つの降雨ピークに対して、3つの流出ピークが存在しているものであるが、流出形態が3つのピークそれぞれに応じて異なっているので有効降雨が同一の単位図ではモデル化できないものである



第7図 7月27日分の降雨に対する流出高シミュレーションと同定単位図

と考えられる。3つ目のピーク（7月27日分）だけを取り出し、単位図を同定し流出高を求めると第7図のようになり、非常に適合性が高くなる。本論においては単位図そのものが実測降雨から有効雨量への変換も含んでいるので、流出形態により単位図が異なっている。一連続降雨中に流出率が変化していき、有効降雨の算定を非定常過程としてとらえる必要性があることが示されている。

総 括

1. 3つの山地小流域はそれぞれ流出特性を持ち、位置、勾配、地状態などにより大きな相違を示す。
2. カルマン・フィルターにより同定された単位図は適合性の高い流出量を与える。
3. 勾配急峻な流域では流出の降雨に対するラグが短く、流出率は低い。
4. 一連続降雨と一連続流出の間には線形の関係があり、標高が高く、勾配急峻な流域の流出率は低い。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用 土木学会論文集, 221 pp.39-47 (1974)
- 2) 農林水産省構造改善局計画部：土地改良計画指針 農地開発 (改良山成畑工) H.4.5
- 3) 関川桂太郎：流域特性の違いによる流出濁水と貯留池の濁水処理効果に関する研究 鳥取大学農学部修士論文 (1994)