

II-13 宮の森小試験地における流出特性 と横流入に関する研究

北海道大学工学部	正 員	藤田 睦博
同 上	学生員	洪 廷芳
同 上	正 員	山田 正
同 上	正 員	長谷川和義

1. はじめに

流出解析の分野では1960年代に入ってから量的な把握だけではなく流出機構の解明、言わば質的な理解が注目され特に表層中の不飽和流・飽和流から表面流の発生にいたる連動過程は様々な地形・地質の斜面流域において盛んに研究されてきた。山地流域の上流に当たる谷頭部はその他の流域斜面より表面流が発生しやすい特性を持つことがしばしば観測報告で見られるが詳細な流出特性の解析例は少ない。本研究は源流部に位置する山地小流域における降雨流出の実測を行い、降雨流出における谷頭部及びその他の流域斜面の果たす役割及び流出特性の違いを検討することを目的としたものである。今のところ観測資料の収集に努めているが観測の日が浅くて豪雨の経験も少ないので流出特性を明確にする段階に至っていないがこれまでの観測資料によるとほかの多くの報告で見られるような強降雨に対する遅れ時間の短縮、減水部の指数関数などと違う興味ある流出特性が得られたので取りあえずこれまでの観測データに基づいて流出特性の吟味を試みた結果について述べる。

2. 対象流域及び流出測定

1) 流域概要：小試験地は札幌市北西部の火山岩分布域に位置しその流域地形概要を図-1に示す。流域諸元は以下のである。a) 面積 0.026Km^2 、河道延長 120m、河道勾配15度(0.26)程度、上流部の河道幅は0.8m、下部流域は2mまで漸拡。河道近傍の左右岸は長さ 6m程度で45度の急勾配斜面(全流域の5.5%)であり、それ以外は平均15度の緩勾配斜面である。b) 夏季に斜面は5cmぐらいの枯れ葉に覆われ、急勾配斜面のA層は約20cmでこの層にはザリガニによると思われる穴が多数分布している。c) 降雨はほとんど樹木の葉で遮断され地表へは主に樹幹流で到達している。

2) 流出測定：1次谷の上流($A=0.01\text{Km}^2$)及び下流にそれぞれ三角堰を設置しこれに差圧式水圧計を取り付けることにより上下流2地点における流量測定を行った。測定されたデータを用いて斜面からの横流入量を評価している。降雨量は流域下流端から約200m離れた所で転倒枰型雨量計を用いて測定した。

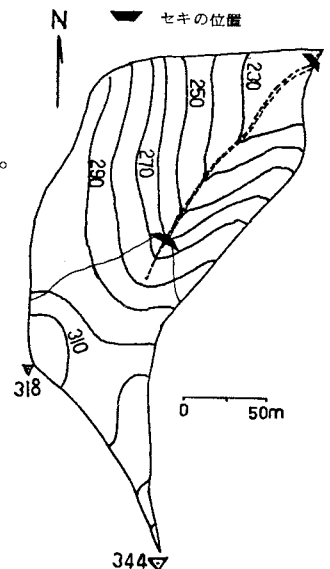


図-1 流域地形

本論文で使用する記号は以下のような意味を持つ。R：降雨強度、Rt：総降雨量または累加雨量、Q：流量、Qt：総流出量または総流出高、Qu：谷頭部からの流量、Qs：谷頭部を除く流域斜面からの流量、Qp：流出ピーク、S：貯留高。

3. 流出ハイドログラフの特性及び横流入の検討

1) 図-2 は小降雨時のハイドログラフを示す。雨量ピークと流量ピークの発生時間は一致しすなわち降雨に対する流出応答が非常に速く、雨量ピークが発生後、データ観測時間間

幅の10分以内に流量ピークが到達する。ハイドログラフ増水部の立ち上がりは急であるが比較的長い減水部を持つ。また降雨量40mm以下の小降雨では流出率は0.1以下である。急斜面が全流域に占める割合は0.055であるから小降雨における大部分の流出は急斜面からでありまた降雨の大部分が緩勾配斜面に貯留され则认为られる。

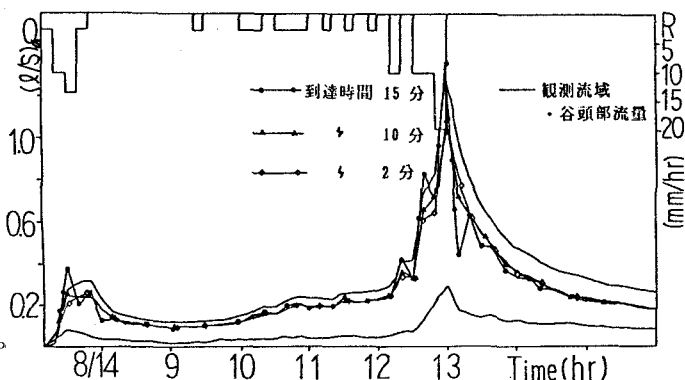


図-2 小降雨時のハイドログラフと横流入

2) 図-3は得られたデータの中に最大雨量140mmのハイドログラフを示す。雨量ピークに対する流出ピークの遅れ時間が長くなり、また斜面より谷頭部のほうはより遅れていることがわかる。このことは斜面長の増大に伴う集中時間の増大、流出寄与域が変動していることを意味しているのではないと思われる。また谷頭部が斜面よりも飽和域が発達していると考えられる。

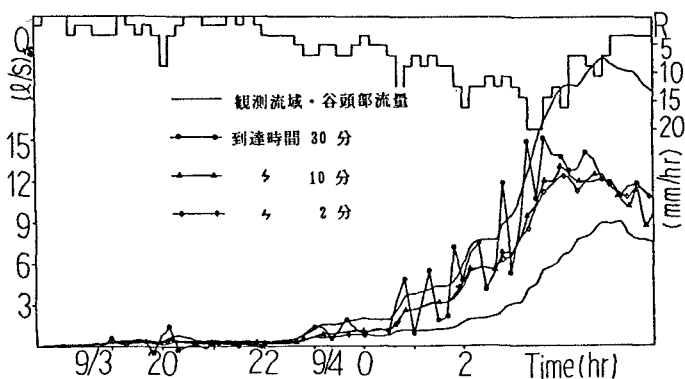


図-3 大降雨時のハイドログラフと横流入

3) 斜面流出量の算定：河道にKinematic waveモデルを適用すると連続式及び運動式は(1)式と(2)式になる。ここにA:流積、Q:流量、 q_s :単位幅横流入量、h:水深、 α 、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_s \quad (1)$$

$$Q = \alpha h^m \quad (2)$$

m:定数である。ここで貯留高S(mm)と流出高Q(mm/hr)において指数関数(3)式が成立す

$$S = i Q^j \quad (3)$$

るとし、mはjの逆数¹であることを利用すれば運動式の指数mが得られる。式(1)、(2)を次ぎの境界条件、初期条件 $x=L$ で $Q=Q_d$, $x=0$ で $Q=Q_u$, $t=0$ で $Q=0$ のもとに q_s を逆算することを考える。m≠1のとき基礎式は非線形になるので q_s を容易に求めることができない。そこで式(2)を最小二乗法で(4)式のような折線で近似し線形化する。(1)式と(4)式より特性曲線法で横流入が求められる。図-2、図-3は小降雨及び大降

$$\begin{aligned} Q &= a h & h < H_0 \\ Q &= b h + c & h > H_0 \end{aligned} \quad (4)$$

雨における計算例である。求められた結果は河道粗度係数と河道幅の値、すなわち(2)式の α の値に左右されるがその到達時間は2分から7分までが得られた。仮に到達時間を強制的に10分以上与えれば激しく振動する結果が得られる。求められた到達時間は流量観測時間間隔10分以内であるので下流端流出量より上流側流出量をひいた結果を横斜面の流出量としても大差がない。以下の解析では大・小降雨において河道の流下時間を無視して求めた流域斜面の流出に基づいて谷頭部とその他の流域斜面流出の特性を比較検討する。

4. 谷頭部と流域横斜面における流出特性の比較

1) 貯留

特性：図-4
(a)は総雨量
140mm、最大
降雨強度20mm
/hr、12時間
連続降雨、流
出率 0.3の流
出高・貯留高
の関係を示す
が減水部は欠
測である。

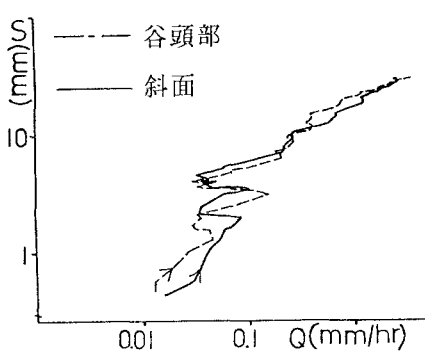


図-4(a) 大降雨時の貯留

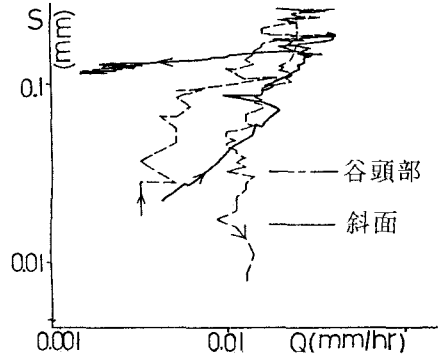


図-4(b) 小降雨時の貯留(I)

図-4(b)は総雨量 25mm、10時間ほぼ等強度の連続降雨の場合である。同じ小降雨であるが無降雨の10時間を挟んで前後にそれぞれ継続1時間総雨量12mmと継続40分総雨量8mmの降雨があった場合を図-4(c)で示す。a)(3)式の指数関数が成立とすれば図-4(a)の谷頭部及び流域斜面における指数 j の値はそれぞれ 0.52と0.62 である。また同じ増水部の比較で図-4(b)では j の値はそれぞれ 0.78 と1.02、図-4(c)では0.08と0.23になる。これらの値はいずれも谷頭部のほうが小さい。また初期流量が大きい図-4(c)のほうが同じ小降雨の

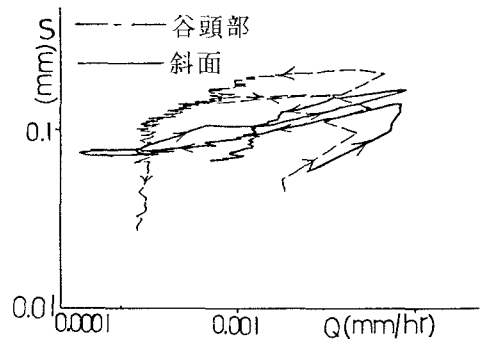


図-4(c) 小降雨時の貯留(II)

図-4(b)の場合より流量 Q の指数 j ははるかに小さいことがわかる。b) 大・小降雨の場合ともに最終貯留高は流域斜面より谷頭部のほうが高い。これは谷頭部の比較的収束円錐型地形を持つためであると思われる。c) 増水部と減水部に対し(3)式の貯留指数関数は2価関数であるが同じ小降雨の図-4(b)と図-4(c)を比較してループの方向違うことがわかる。その原因は比較的短時間に強い降雨強度で降った雨が表層に貯留され、降雨終了後、ゆっくり流出するのに対し長い継続時間・弱い降雨強度で降った雨が降雨期間中に流出してしまうので降雨終了後、貯留量が急に減少すると考えられる。

2) 増水部の特性

a) 図-5(a)に示すように中小降雨における累積雨量に対する累積流出量の関係はほぼ一定である。累加雨量が約100mmまで図-5(a)の曲線の切線勾配または降雨量に対する流出量の増加率は谷頭部より流域斜面のほうが大きい。b) 図-5(b)は総雨量140mm、最大降雨強度 21mm/hr、継続10時間、連続降雨のケースであり流出量を半対数に取って谷頭部・流域斜面の流出を比較する。

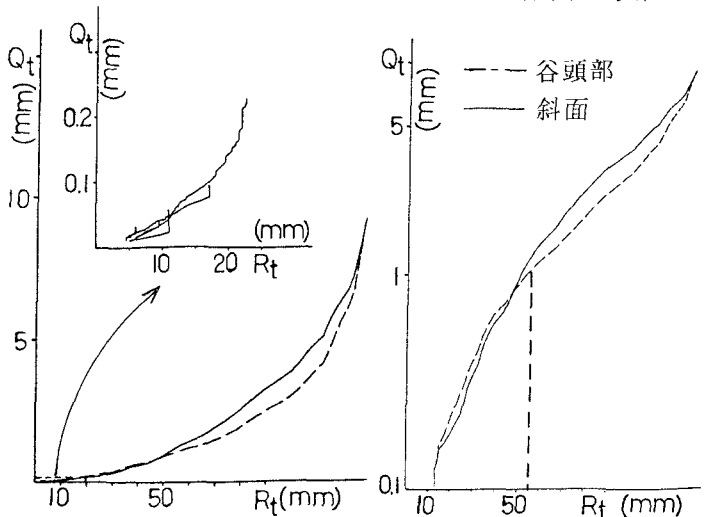


図-5(a)(b) 降雨量と流出量の関係

谷頭部のほうは反曲点をはっきり判別できる。降雨量が約55mmになるこの反曲点で降雨量に対する流出量の応答が大きく変化することを示す。すなわち谷頭部の流出は寄与域の拡大により表面流が優勢になるのではないかとと思われる。また降雨量が110mmのところでは流域斜面のほうもこのような反曲点が存在するように見える。

3) 逓減部の特性：図-6(a)(b)は谷頭部流出の逓減部をそれぞれ両対数と片対数で表示する。図-7(a)(b)は流域斜面流出の逓減部を同じように示す。a) 降雨流出の逓減部を両対数で取れば折れ線のようになり一般に言われる不圧逓減式(5)式では説明できるが本研究の例は図-6、図-7からわかるように時間だけを対数で取るほうがもっと直線性が強いようである。すなわち(6)式で表すことができる。b) 得られたデータは一つを除き、ほぼ一本の直線で表せる。すなわち二次減水あるいは早い中間流出の減水を示す。例外のデータは10分間に11mmの雨が降った場合(降雨強度66mm/hr)であり二本の直線近似になり、一次減水または表面流出の減水をも含めていると考えられる。

$$Q = Q_0 / (1 + b \sqrt{Q_0} t) \quad (5)$$

$$Q = a \ln t + c \quad (6)$$

データは10分間に11mmの雨が降った場合(降雨強度66mm/hr)であり二本の直線近似になり、一次減水または表面流出の減水をも含めていると考えられる。

4) 流量ピーク及び流出率の特性：a) 図-8は降雨量及び最大降雨強度に対する流域斜面と谷頭部のピーク流出高比を示す。表面流出がほとんど発生していない、あるいは少ない中小降雨において最大降雨強度が大きくなるほどピーク比は大きくなる傾向がある。しかし大降雨においては逆である。このことは大降雨時、谷頭部において表面流がより発達するためであると考えられる。また小降雨時、ピーク流出高に対する降雨強度、初期流量の影響は谷頭部より流域斜面のほうが大きいことがわかる。b) 図-9は中小降雨における総降雨量及び総流出量に対する流出率の関係を示し降雨ゲースごとに番号を付ける。降雨量に対する流出率のばらつきは目立つが流出量が大きくなるほど流出率が大き

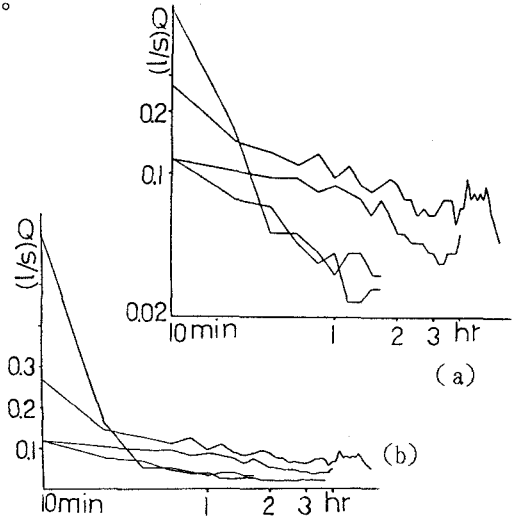


図-6(a)(b) 谷頭部の流出逓減部

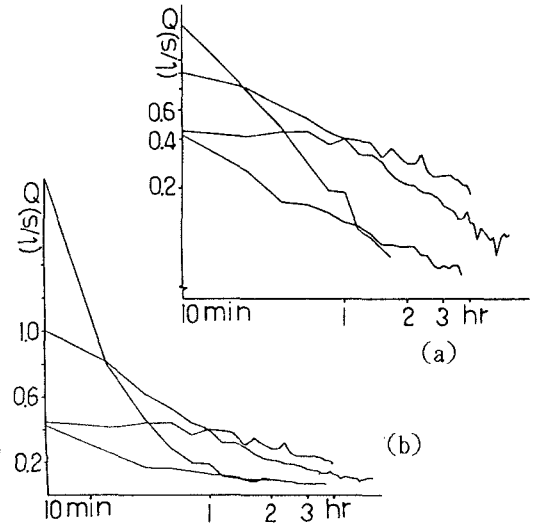


図-7(a)(b) 斜面の流出逓減部

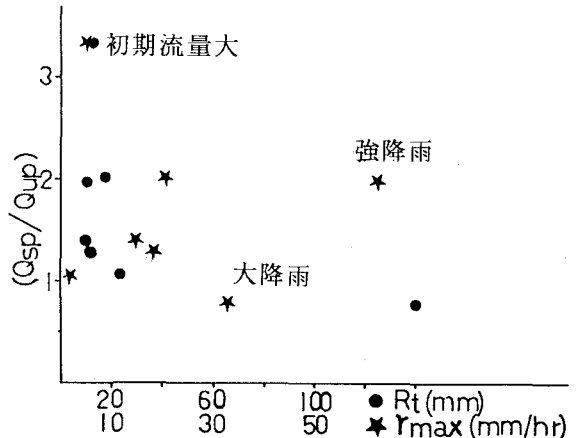


図-8 ピーク流出高比と降雨強度、降雨量の関係

いように見える。同じ降雨番号で谷頭部と斜面を比較すれば初期流量が大のNo.5、あるいは同じ効果の2ピーク降雨のNo.3においては谷頭部より流域斜面の流出率が大きい。それ以外はほぼ同じである。

5. 単位図及びKinematic wave による解析

1)単位図における計算：降雨の始点を時間の原点にとると雨量Rと流出量Qの関係を(7)式のよのように重み関数hを以て表現できる。単位図hを求める方法には各種の変換法、時系列解析手法

$Q(t) = \int_0^t R(t-\sigma) h(\sigma) d\sigma$ (7)
 を利用する相関法などがある。図-10はフーリエ変換法で求めた単位図及びそのシミュレーションである。この単位図を利用してほかの降雨の流出計算例は図-11に示す。ハイドログラフ前半では

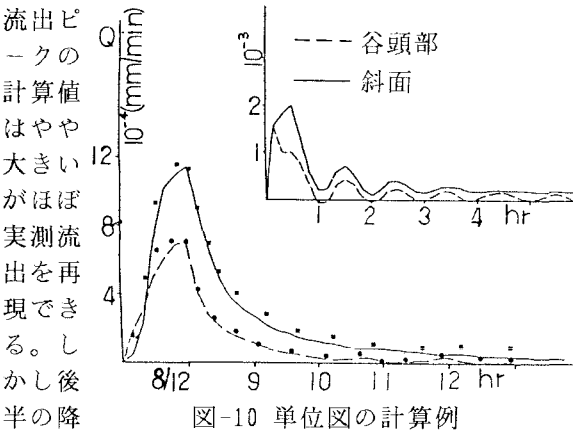


図-10 単位図の計算例

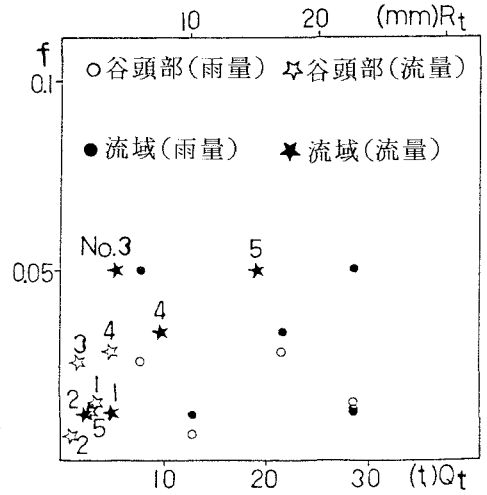


図-9 流出率と雨量、流量の関係

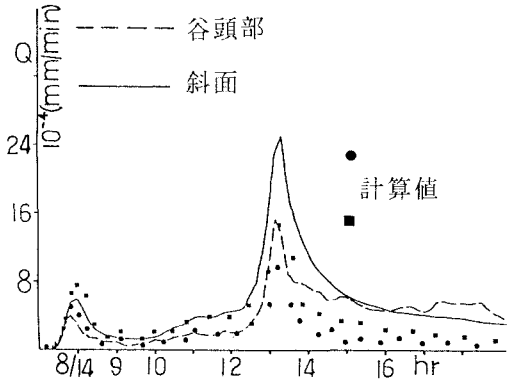


図-11 単位図によるシミュレーション

雨において流出の計算値は実測値より著しく少ないことがわかる。このことは前半の降雨による土層の湿潤で後半の降雨に対する流出応答が速くなることを示すすなわち流出の非線形性を表すことである。

2)Kinematic wave 法による計算：斜面に降った雨が等高線に垂直する最急勾配に沿って流下するものとし全流域を台形ブロックに分割してKinematic wave 理論により特性曲線法で計算した例は図-12に示す。計算で使用するパラメーターの値は以下のようなである。河道のManning粗度係数：0.2、斜面表層透水係数：1.22cm/s、表層厚：23cm、有効空隙率：0.5。流出ピーク及び減水部では実測値と少しの不一致が見られるがほぼ再現できたと思われる。しかしこの

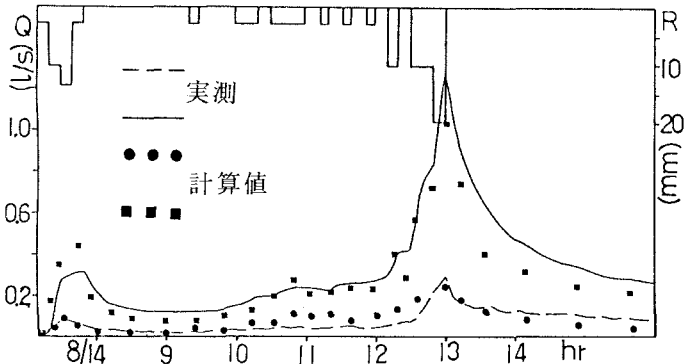


図-12 Kinematic wave 法による解析

ような全域にわたり、土質工学上、砂利に属する大きい透水係数が得られたのは適当だろうかという疑問がある。これらは等価係数にすぎないと考えられる。現実により近似するには例えば表層中の水みち、層と層の間でできた平坦な空洞などを考慮に入れなければならない。しかしこれらをモデル化するために、また詳細な実測データが必要である。

6. まとめ

宮の森小試験流域で今まで得られた流出データは要するに降雨に対する流出応答が非常に速いが大降雨時においてピーク遅れ時間が大きくなり、また比較的長い逓減部を持つ特性がある。本論文は現象論的な把握を重視する立場から一次谷の源流部及びその他の斜面域の大・小降雨に対する流出応答の違いについて検討した。これまでの結果を要約すると以下のようなものである。 1) 中・小降雨において谷頭部と流域斜面の雨量に対する流出応答は共に早いが出流は主に早い中間流であり流量ピークに対する降雨強度、流出率に対する初期流量の影響は谷頭部より流域斜面のほうが大きい。最終貯留高は谷頭部のほうが大きい。減水部において谷頭部のほうが流量に対する貯留高の減衰が早い。 2) 大降雨時において流量ピークの遅れが大きくなり流出増水部の解析で降雨量に対する流出量の急変点が変わりそれは飽和域の拡大と共に表面流出が優勢であることを示す。今後、観測施設の改良と共に融雪流出についても測定し夏期の降雨流出と融雪流出の相異を比較検討する予定である。本研究は財団法人北海道河川防災研究センターの『河川の水質保全に及ぼす水源林の機能に関する研究』（代表岸力）の一部である。

参考文献

1) 藤田睦博(1981): 確率流量の算定に関する総合的研究、文部省科学研究費一般研究報告。