

宮の森小試験地（札幌）における流出特性 と横流入ハイドログラフに関する研究

Runoff characteristics in the MIYANOMORI small watershed and a study
on runoff from valley side-slope and stream-head hollow

北海道大学工学部	学生員	洪	延芳
同 上	正 員	藤田	睦博
同 上	正 員	山田	正

1. はじめに

流出機構に重要な位置を占める中間流出・表面流の発生は1960年代後半から盛んに研究されており、様々な地形・地質の斜面流域における飽和・不飽和流、地中パイプ流のトレーサーを使った間接測定が精力的に行われて来た。しかし流域の中で斜面全体からの河道への横流入を直接測定した例は極めて少ない。森林源流部においては地下水流出の影響が非常に小さいので斜面流出の研究に最適であると思われる。本研究は源流部に位置する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。観測の日が浅くて豪雨の経験も少ないのでいまのところ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。流域諸元は以下のようである。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離れた所で転倒桝型雨量計を用いて測定した。

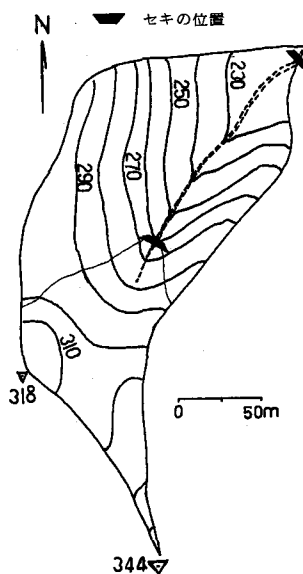


図-1 流域地形

3. 流出特性

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、Qd：流域下流端からの流量、Qs：谷頭部を除く流域斜面からの流量、S：貯留高。

1) 流出ハイドログラフの特性：a) 図-2(a)に示すように総降雨量60mm以下の中

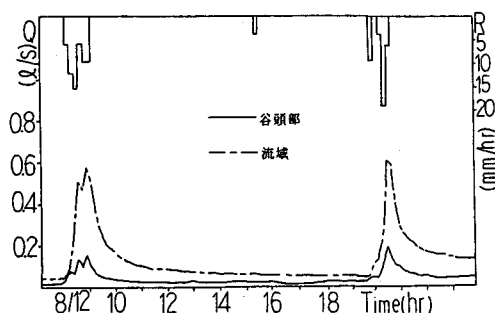


図-2(a) 小降雨のハイドログラフ

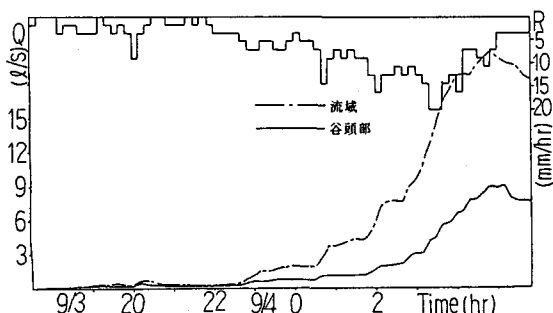


図-2(b) 大降雨のハイドログラフ

小降雨に対する流出応答が非常に速く、流量ピークは雨量ピークが発生後、データ観測時間間隔幅の10分以内に到達する。流出寄与域をすべて急勾配斜面とし早い中間流出によると仮定すれば、ダルシー則による試算では透水係数は約 1 cm/s になる。b) 雨量が60mmを超えるとピークの遅れ時間が長くなり、得られたデータの中に最大総雨量140mm場合図-2(b)では流域流出のピーク遅れは 30分になり谷頭部の流出では 50分にもなった。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。また谷頭部が横斜面よりも飽和域が発達していると考えられる。

c) 降雨終了後、急な逓減部を示し比較的長継特性を有する。これは降雨の大部分が緩勾配斜面に貯留されるためであると思われる。

2) 降雨量、流出量に対する流出率及び流量ピークの特性：a) 表面流出が発生していない中小降雨において雨量ピーク強度が大きくなるほど流域と谷頭部との流量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

(図-3)。このことは大降雨時、谷頭部において表面流が発達するためと考えられる。

b) 図-4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同じ降雨番号を比較すれば初期流量が大、あるいは同じ効果の多ピーク降雨においては谷頭部より流域の流出率が大きい。それ以外はほぼ同じである。c) 中小降雨の流出率は0.1以下であり、大部分の流出は急斜面からであると思われる(急斜面の全流域に占める割合は 0.055)。

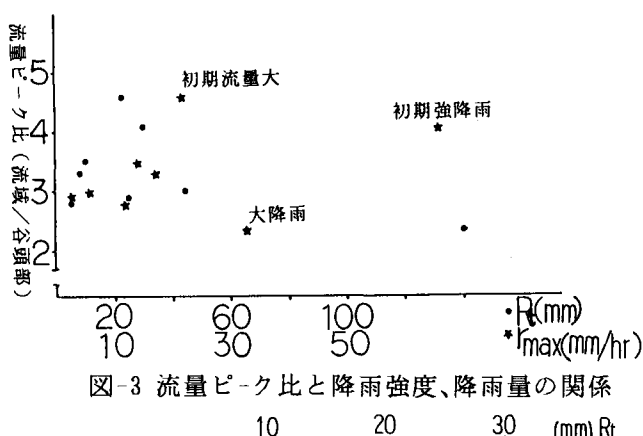


図-3 流量ピーク比と降雨強度、降雨量の関係

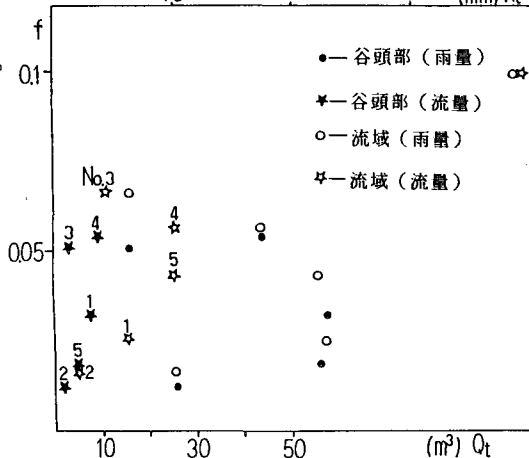


図-4 流出率と流出量、降雨量の関係

3) 増水部の特性: a) 図-5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。これは流出に対する初期流量の影響が小さいことを意味し降雨量からほぼ一意的に流量が予測できると思われる。一方累加雨量が約100mmまで図-5の曲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のほうが大きい。b) 図-6は総雨量140mm、最大降雨強度21mm/hr、ほぼ三角形分布の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・流域の流出を比較する。谷頭部のほうは反曲点がはっきり判別できる。降雨量が約60mm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と思われる。また降雨量が約110mmのところでは流域全体も表面流が優勢のように見える。

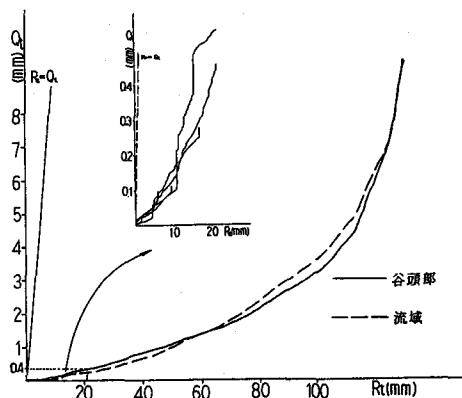


図-5 流出量と降雨量の関係(I)

4) 通減部の特性: a) 減水部を両対数で取れば一般に言われる不圧通減式(1)式でほぼ説明できるが時間だけを対数で取るほうがもっと直線性が強い。すなわち(2)式で表すことができる(図-7(a)(b))。b) 得られたデータは一つを除き、一本の直線で表せる。すなわち二次減水

$$Q = Q_0 / (1 + b \sqrt{Q_0} \cdot t)^2 \quad (1)$$

$$Q = a \ln t + c \quad (2)$$

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。

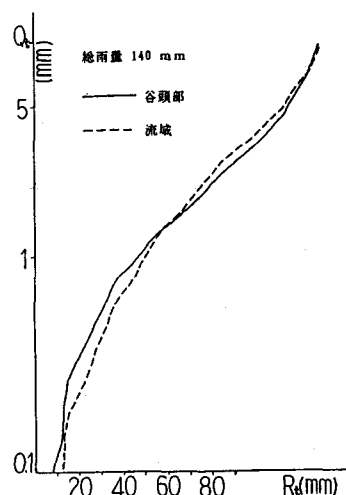
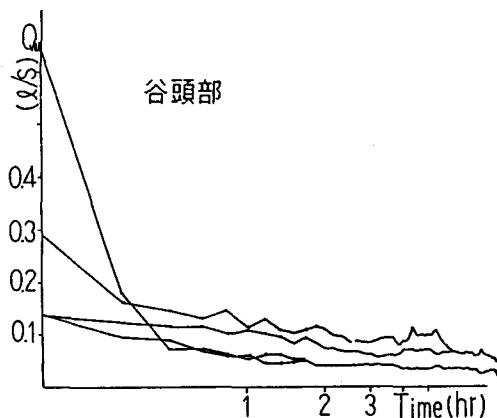
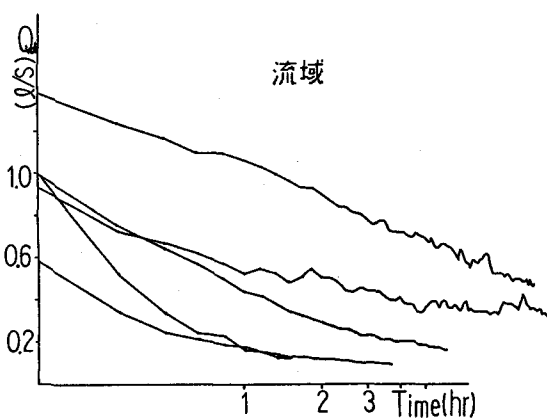


図-6 流出量と降雨量の関係(II)



(a)



(b)

図-7 流出通減部の片対数表示

5) 貯留特性: 貯留高 S (mm) と流量 Q (mm/hr) においては指数関数 (3) 式が成立するとし増水と減水に分けて次のように検討した。図-8(a)は総雨量 140mm、12時間連続降雨のケースであるが減水部は欠測である。図-8(b)は総雨量 25mm、連続降雨のケースである。

a) 小降雨時においては増水部における谷頭部及び流域の指数 j の値はそれぞれ 0.66 と 0.73

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

であり、大降雨時は 0.5 と 0.54 になる。いずれも谷頭部のほうが小さい、しかし最終貯留高は流域より谷頭部のほうが高い。また小降雨の時、一般に言われる自然流域の値 0.5 よりかなり大きい。b) 増水部と減水部に対し貯留高-流量の指数関数 (3) 式は 2 価関数であるが小降雨時において谷頭部と流域の減水方向が違ふ。減水時の谷頭部と流域の定数 j は 3.18 と 0.52 になる。すなわち流量に対し谷頭部の貯留高が流域よりはるかに早く減少する。c) 流れの運動式を (4) 式で表す場合、 m は j の逆数である。従って谷頭部及び全流域における定数 m の値は小降雨時 1.52 と 1.37、大降雨時 2 と

$$q = a h^m \quad (4)$$

1.85 になる。これを Manning 経験式の指数 m (5/3) と比較すると小降雨時はより小さい、大降雨時は大きい。

6) 横流入の検討: a) 横流入の求め方はまず各降雨ケースごとに分けて (3) 式の貯留量と流量の指数関数関係より j を求め、(2) 式の定数 m の逆数であることを使えば m が得られさらに (2) 式を最小 2 乗法で (5) 式のように 2 本の直線で近似する。観測された谷頭部・

$$\begin{aligned} Q &= a h & h < H_0 \\ Q &= b h + c & h > H_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial x} = Q_s \quad (6)$$

$$x = l \quad \text{で} \quad q = Q_d, \quad x = 0 \quad \text{で} \quad q = Q_u$$

流域下流の流出データを境界条件として流れの連続式 (6) 式と運動式 (4) 式より特性曲線法で横流入を求めた (図-9(a)(b))。近似した運動式から到達時間 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 分以上与えれば求められた横流入のピークが流域流

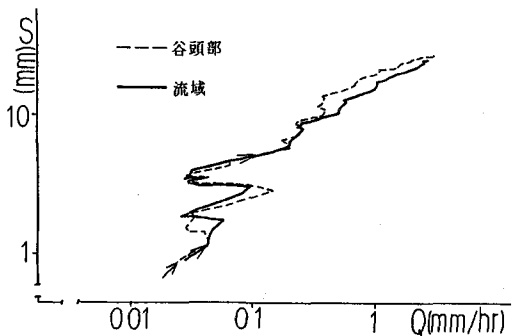


図-8(a) 大降雨時の貯留

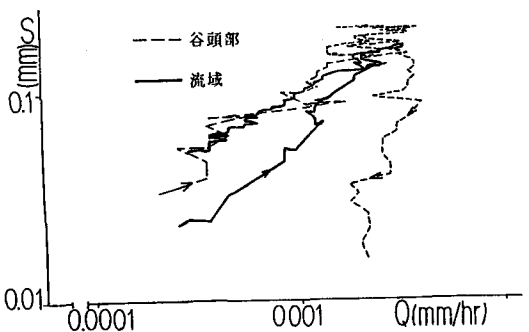


図-8(b) 小降雨時の貯留

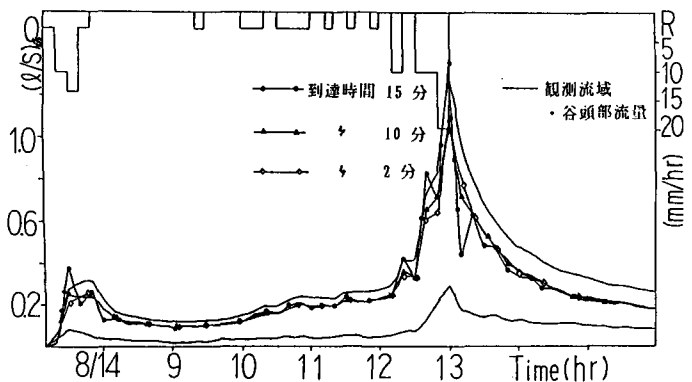


図-9(a) 小降雨時の横流入

出のピークより大きくなり、或は激しく振動する結果が得られる。b) 到達時間が大きくなればなるほど谷頭部の流出の大部分は流域流出の減水部に占めるので横流入が早く流出するようになり、またそのピークも大きくなる。c) 大降雨時において流域より谷頭部の流出ピークは30分程の遅れがあるにもかかわらず求められた横流入のピーク発生時間は流域の流出とほぼ

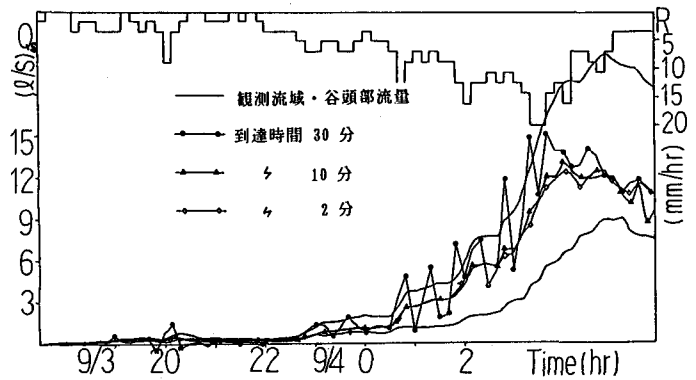


図-9(b) 大降雨時の横流入

一致する。このことは分布する横流入は流域の流出特性を左右すると言えよう。

4. まとめ

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である。 1) 中・小降雨において谷頭部と流域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わか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。

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。