

小流出試験地(室蘭)の流出特性・流出解析
Runoff characteristic and runoff analysis in the
Muroran small experimental basin

苫小牧工業高等専門学校 正員 嵯峨 浩 H.Saga
室蘭工業大学 正員 藤間 聡 S.Tohma
" 学生員 中田 朋樹 T.Nakata

It is important to clarify the mechanism of runoff process. The authors placed a small experimental basin in the Muroran district and measured rainfall, discharge, ground-water level, capacity of infiltration and water quality. In this paper, we reported the runoff characteristics of small watershed, which were obtained from the hydrological terms.

keywords : a small experimental basin, separation of run-off, mechanism of run-off process, water quality

1. はじめに

降雨流出系の物理機構を解明することは重要であり、小流出試験地によりそのメカニズムはかなりの程度で明らかにされている。しかし、小流域の流出は、局所的な環境要因に支配され、その複雑さのために一般的な特性を述べることは非常に困難である。大流域のマクロな流出現象がサブシステムの集合であることを考慮すれば、小流域の流出特性を知ることは重要である。著者らは、室蘭地方を対象として小試験地を設置し、雨量・流出量・地下水位・浸透能・水質等の観測を行った。本格的に観測を始めたのは、今年度からであり十分なデータの蓄積はまだないが、流域の流出特性と小流域ゆえに発生すると思われる特異な流出現象の観測結果、及びその原因について調査・考察を行ったのでここに報告する。

2. 流域の概要

小試験地は室蘭工業大学(室蘭市水元町)の北西の方向、約500mに位置し東向き山腹斜面である。その地形概要を図-1に示す。流域面積 0.029km^2 、河道長55m、河道の平均勾配8度程度である。森林部は流域の78%、ススキ4%、ササ85%を占め夏季においては流域を踏査することができないほど植物が繁茂している。水質は良好であり、河道は玉石大の岩石が点在している。図-1のA地点での河道横断面図を図-2に示す。左岸側は源流部から堰地点まで 30° から 40° の急斜面が連続しており、右岸側は比較的なだらかなのである。

3. 測定項目と観測システム

流量は標高88m地点に頂角60度の三角堰を設置し、差圧式水位計とフィールドメモリーを取り付けて自動観測を行った。雨量は室蘭工大キャンパス内と堰地点に、転倒樹型雨量計(1転倒雨量0.5mm)を設置して測定を行った。なお、

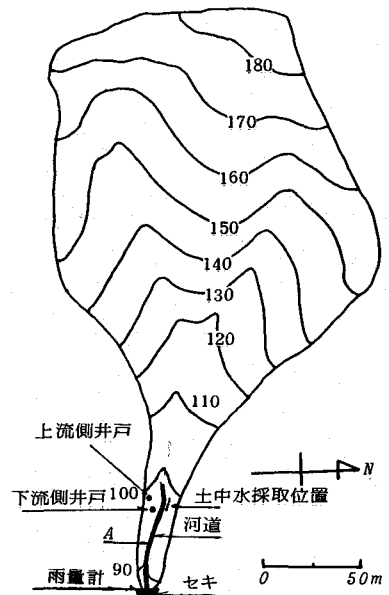


図-1 試験地地形概要

水位計は落葉などが流れて付着すると異常な値を測定することがあるので、堰手前に金網及び沈砂池を設け、朝夕二回または昼一回必ず現地に足を運び、精度上問題が生じないように努めた。三角堰の流量係数は現地においてメスシリンドーにより流量測定を行い決定した。地下水位は図-1の2箇所において井戸を掘り、直径10cmの塩ビ管を埋設して埋め戻し、降雨時に一定時間毎に人の手により測定を行った。水質はフミン質をトレーサとし、採水は図-1のように河道左岸において減圧方式により、深さ15,30,45,60,75cmで行った。



図-2 河道横断面図

4. 損失雨量からみた流出特性

表-1

損失雨量は水文学における基本的かつ重要な問題である。ここでは流出試験地で得られた7つの出水例について検討した。

採用した降雨を表-1に示す。なお、直接流出量は後述の方法で行い、損失雨量 S_n は、 $S_n = (1-f)\Sigma r$ により算出した。図-3は損失雨量 S_n と総雨量 Σr をプロットしたものである。

No	流出率 f	初期流量 q_0 l/sec	総雨量 Σr mm	平均雨量 r_{mean} mm/hr	損失雨量 mm	月日
1	0.118	0.43	79.0	2.6	39.7	5/12
2	0.342	0.21	172.0	6.4	113.2	6/9
3	0.036	0.02	144.5	4.8	139.3	7/8
4	0.171	0.85	37.0	2.2	30.7	7/10
5	0.195	0.66	66.0	1.9	53.1	7/15
6	0.322	0.39	79.5	7.8	53.9	9/11
7	0.050	0.06	80.0	5.7	76.0	10/6

45度の直線は、降雨が全て損失雨量となる場合である。損失雨量が降雨開始時の流域の土壤水分状態に影響を受けることは疑いの無いことであろう。日野・長谷部ら¹⁾

は、流域の湿潤指標として洪水直前流量を採用し、流出率との関係を求めている。図-3においてもNo.3やNo.7は、出水直前の流量（初期流量 q_0 ）が非常に小さいものとなっている。

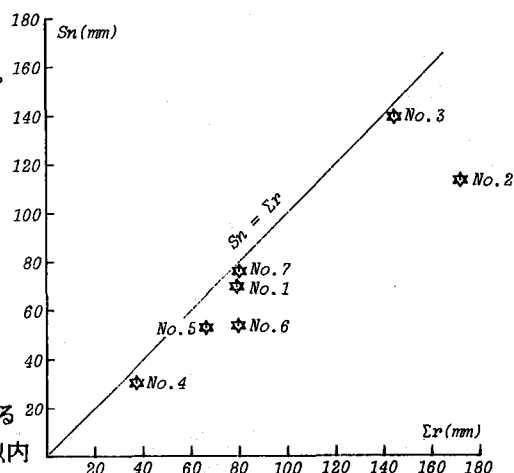


図-3 損失雨量と総雨量

5. 流出特性と地下水流動

本流出試験地の本格的な観測は昭和63年度からであるが、観測された数少ない流出例の中で、総雨量70-80mm以内の場合、ハイドログラフの形状は、最初の小さなピークに続いて主要なピークが現れる。その典型的なハイレート・ハ

イドログラフが図-4であり、この時の総雨量は79.5mmである。降雨の内、早い流出に含まれるものは小部分であり、流出の大部分は降雨が終了した相当後まで遅れている。このことは、降雨流出系が単純に地表流によって引き起こされているのではないことを示している。また、この最初の小さなピークの原因を追求することは、降雨流出系の物理機構の解明にも役立つものと考え、地下水位観測を行った。井戸の平面的位置を図-5に示す。場所の選定は掘削可能な場所を、試行錯誤的に地表面の傾斜から水脈の通じていそうな場所を基準にして決定した。上流側井戸と下流側井戸の土質柱状図を図-6に示す。A₀層はいわゆる黒ボクであり、その厚さは下流側井戸の場合80cm、上流側井戸では45cmであった。A₁層はシルト混じりの赤粘土状で、地下水面が出現した深さはいずれも、手のにぎりこぶし大の礫が出現してからであった。手で触れた感じでは非常にポーラスな状態であると思われる。図-7は降雨開始後2時間毎に地下水位を観測した結果である。図では上流側井戸の最初の方の水位が描かれていないが、

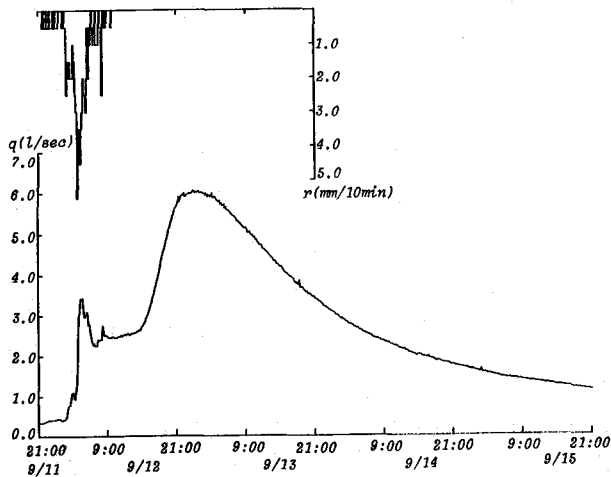


図-4 ハイエトハイドログラフ

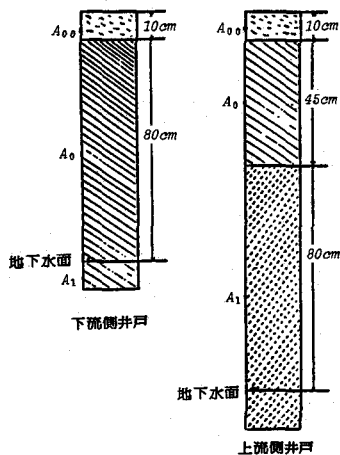


図-6 土質柱状図

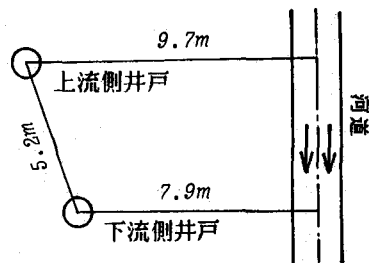


図-5 井戸の平面的位置

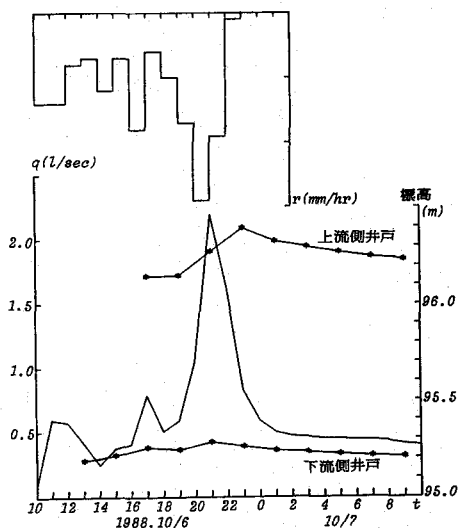


図-7 地下水位変動

これは井戸が枯れていたためである。図-7の中央のハイドログラフピークが先に記した最初の小さなピークに対応しており、図では示していないがその後主要なハイドログラフピークが出現している。なお、この時の総雨量は80mmである。図によると下流側井戸の地下水位ピークとハイドログラフピークは時間的に一致しているが、上流側井戸の地下水位ピークは遅れて出現している。このことは河道のごく近辺に降った降雨だけが速やかに流れ、しかも地表流だけでなく、一度降雨が地中に浸透していることを示している。この流域に関していえば地表流の発生は非常に少ないと思われる。結果として、ハイドログラフの最初の小さなピークは、ポーラスな流域土壌と河道近辺の土壌構成により出現することがわかった。なお、この後に出現する主要なハイドログラフピークに合わせて地下水位が上昇していることを付記する。

6. 浸透能特性

降雨流出のメカニズムを知ろうとすると、変換の場である流域の浸透能特性を知ることが不可欠であると考え、浸透能測定を行った。場所は河道の右岸側の流域であり、草地である。実験装置を図-8に示す。目盛り付き円管は長さ90cm、容量460(mm/hr)である。測定は、径200mmの塩ビ管を打ち込み、付

近一面に水を散布し、十分な時間経過の後行った。これは塩ビ管打ち込みによる土の乱れを防ぐためである。測定方法は、塩ビ管内の水位が一定になるように供給水量を測定した。測定時間は測定開始後10分までは1分間隔、20分までは2分間隔、20分以降は5分間隔とした。測定結果を図-9に示す。図中の実線はHortonの浸透能曲線であり、次式で示される。

$$f = f_0 + (f_\infty - f_0) \exp\{-kx\} \quad (1)$$

ただし、 f ：時間 t 経過後の浸透能、 f_∞ ：最終浸透能、 f_0 ：初期浸透能、 k ：定数である。ここで、 $f_0 = 130$ (mm/hr)、 $f_\infty = 9.3$ (mm/hr)、 $k = 0.18$ であった。

既往の浸透能表示式は多数あるが、本試験地においては、Hortonの浸透能曲線で良好な適合度が得られた。

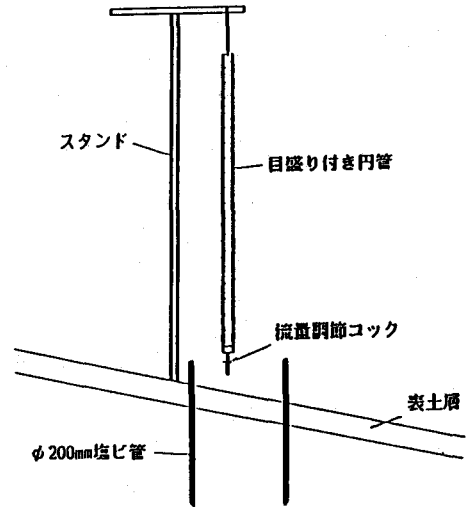


図-8 実験装置

7. 水質による流出成分の分離

水質濃度の変化を利用して降水に対する流域の流出応答特性を知ることができる。そのトレーサーとして、表層腐植層に豊富に、しかも安定に存在するフミン質と表層腐植層よりは深層において存在量が多いと考えられる無機イオン成分の有効性が既に実証されている²⁾。フミン質の指標として、紫外外部260nmにおける吸光度(E260)、無機イオン成分の指標として電気伝導度(EC)を採用し測定を行った。採水位置を図-1に示す。図-10は深さ毎に測定した濃度であり、採水した水の水質濃度を測定することにより浸透してきた土層の深さを推定できる。図-11の中央の図は、流出時の河川水のE260であり、流量と共に変動している。図-11の下図は、河道流出が土層表面から20cmまでの層と20-30cmの層からの流出によって構成されているとして流出成分の分離を行ったものである。破線より上の部分が表層、下の部分が深層からの流出となる。計算方法は、流量及び質量の保存則から(2)、(3)式が成立する。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2)$$

$$QC = Q_1 C_1 + Q_2 C_2 \quad (3)$$

ここに、 Q ：流量、 C ：E260またはECであり、添字 1, 2はそれぞれ表層、深層を表す。 Q , C , C_1 , C_2 は既知であるので未知数は Q_1 と Q_2 の2つになる。ハイドログラフピークにおいて、表層から流出しているが、深層からも敏感に反応して流出している。地下水位観測の結果とも一致していることがわかる。

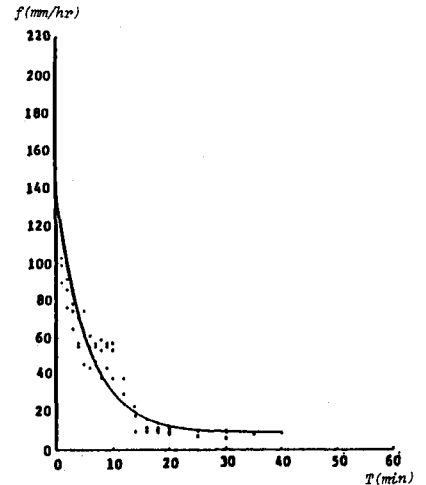


図-9 浸透能測定結果

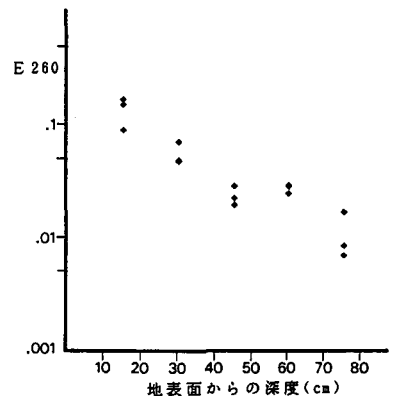


図-10 土中水濃度

8. 流出解析

減水曲線から流域固有のタンク時定数を求める方法はいくつか提案されているが、本研究では(4)式で示される直列2段タンクモデル(線形貯水池法)を採用した³⁾。(4)式の解は(5)式で表わされ減水特性から定数が決定される。

$$K_1 K_2 \frac{d^2 q}{dt^2} + (K_1 + K_2) \frac{dq}{dt} + q = 0 \quad (4)$$

$$q = C_1 \exp(-\lambda_1 t) - C_2 \exp(-\lambda_2 t) \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{r_0 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \{1 - \exp(-\lambda_1 t_r)\}$$

$$C_2 = \frac{r_0 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \{1 - \exp(-\lambda_2 t_r)\}$$

ただし、解析解を得るために降雨強度 r_0 、継続時間 t_r の矩形降雨とした。(5)式において λ_i は K_i の逆数であり、減水曲線の減水率を表わしている。図-12は片対数上に q をプロットしたもので C_i と λ_i ($i=1,2$) を求めたものである。ただし、時間軸はハイドログラフ・ピーク時を $t=0$ としてある。この出水は1988年6月9日の降雨によるもので、総雨量172mmであり、得られた観測値の内一番大きな出水である。なお、直接流出量はハイドログラフ立ち上がり時刻と減水部第二析曲点を直線で結ぶ分離法を採用し、有効降雨は、ハイドログラフ立ち上がり時刻以降の降雨に一率に流出率 f を乗じて求めた。ここで $f=0.338$ である。流出の再現計算を図-13に示す。線形計算では流出を再現できないようである。

次に、非線形効果を期待できる木村の貯留関数法により計算を行った。

$$S_1 = K Q_1^P \quad \frac{dS_1}{dt} = r - Q_1 \quad Q_1(t) = Q(t + T_1) \quad (6)$$

ここに、 S_1 は見かけの貯留量、 Q_1 は遅れ時間 T_1 を考慮した流量、 K 、 P は定数である。直接流出量は同様の方法で求め、有効降雨は平均流入係数法による方法を採用した。図-14は、 $S-Q$ カーブのループが解消されるように T_1 を決定したもので、 $P=0.316$ 、 $K=90$ 、 $T_1=5\text{hr}$ である。図-14により決定された貯留関数により流出を再現したものを図-15に示す。図-13に比較して観測値と計算値の合致精度が向上しているのがわかる。以上、2つのオーソドックスな線形流出解析手法と非線形流出解析手法により、この流域の流出特性を把握することができる。

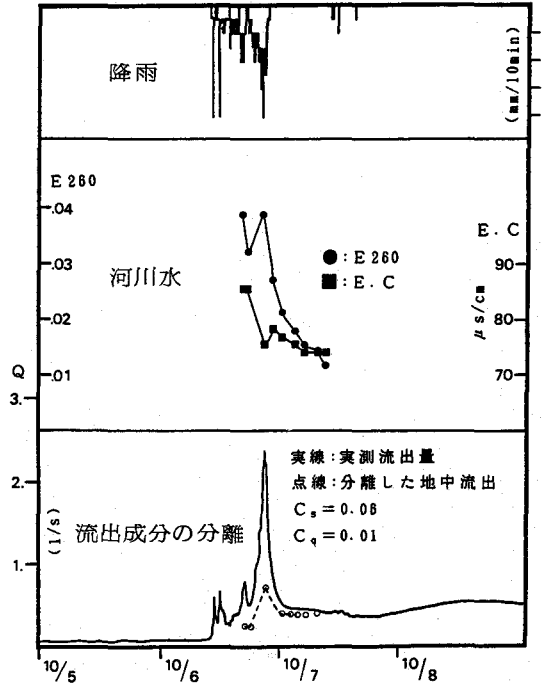


図-11 流出成分の分離

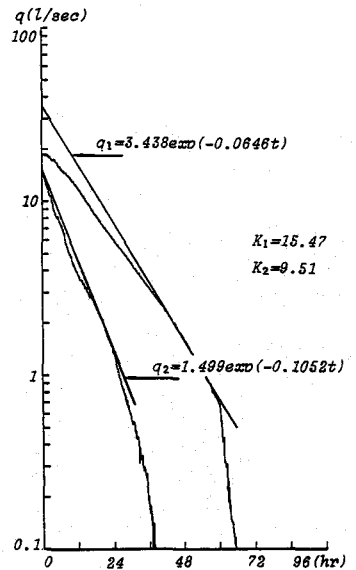


図-12 減水曲線

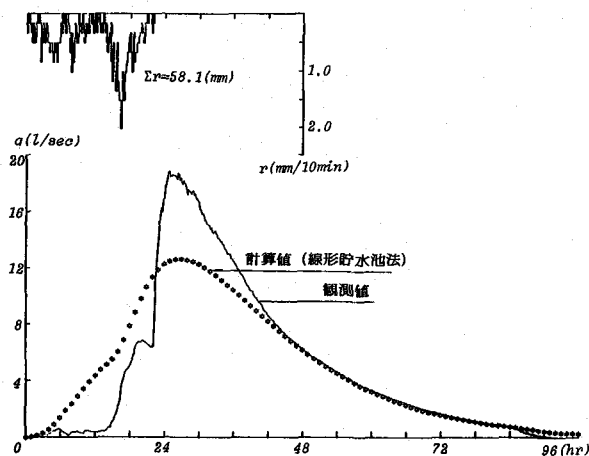


図-13 流出計算

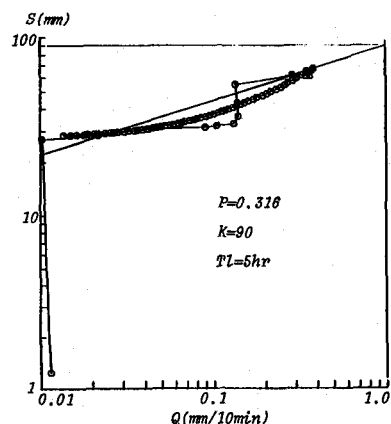


図-14 貯留関数の決定

9. あとがき

以上、得られた結論を要約すると次のようになる。

- 1) 本試験地のように流域面積が小さくても、保水性の高い流域では損失流量と総雨量の間に明確な関係があることが明らかになった。
- 2) 既存の手法による流出解析の結果、そのパラメータの同定値により小試験地は非常に貯留効果が高く、流出特性との関連が明らかになった。
- 3) 小流域で、流出初期に生じるパルス的なピークの現象は、河道周辺の地層構造によるものであることが地下水位の変動特性と水質情報を検討することで明らかになった。

本研究の遂行に当たり、水質分析は北海道大学・工学部・藤田睦博教授及び大学院博士課程・洪君の協力によるものであることを付記し、深謝します。なお、本研究は昭和63年度文部省科学研究費補助金奨励研究（嵯峨、No.63750539）の補助により行われたことを付記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日野・長谷部：流出率と湿潤指標としての洪水直前流量 土木学会論文集328/Ⅱ・1982
- 2) 洪・山田・亀井・長谷川：宮ノ森小試験地の流出特性-E260及びEC発現成分をトレーサーとした解析 水理講演会論文集第32回、1988
- 3) 嵯峨：周波数応答法による流出解析 土木学会論文集393/Ⅱ・1988
- 4) 嵯峨・藤間：室蘭流出試験地の流出特性について 北海道支部論文報告集44・1988