

水文資料が乏しい地域における流出解析法

A Study on the Determination of Runoff without Referring to the Sufficient Hydrologic Data

長崎大学工学部 ○ 野口正人

長崎大学大学院 米倉広幸

日本道路公団 菅 浩一

1. はじめに

長崎市では、昭和57年7月豪雨による被害を蒙ったが、いまでは市内河川の改修もかなり進んでいる。われわれは、長崎災害以後2年間余、水防災システムに関する研究を続けてきたが、これも長崎が豪雨災害に対して強い都市になることを願っているからにほかならない。一般に、水防災システムを完備していくにあたって、流出解析がその嚆矢として重要なことは言を俟たない。そのため、これまでも多数の流出解析法が提案され、大河川等においては、かなりの精度で洪水時の流出量を予測することが可能となった。しかし、流出解析モデルを適用する場合、往々にして、集中定数型モデルのパラメーター選定、ないしは、分布定数型モデルにおける流出機構の普遍化に困難を伴うことはよく知られている。とりわけ、中小河川においては水文観測も十分に行われておらず、問題を一層複雑にしている。

以上のことから、本論では、水文観測資料が乏しい流域を対象とした流出解析法を示し、その適用例について報告する。

2. 流出解析モデル

2.1 変形雨水流法

前述されたように、水文資料が乏しい地域でさえ、しばしば流出解析をせねばならない。とくに、流出解析結果の精度を高めようとするれば、分布定数型モデルが適しているが、流域システムをあまりに細分化することは、実用上好ましくない。したがって、以下に示すモデルでは、表面流を雨水流法で表現するとともに、土中への浸透量を考慮し、洪水流量に關与するその他の成分をタンクモデルで表した(図-1、参照)。すなわち、急傾斜地流域における表面流出成分は、つぎの基礎方程式で表現される。

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q}{\delta x} = r - i \quad (1)$$

$$h = kq^p \quad (2)$$

ここに、 h : 表面流の水深、 q : 単位幅流量、 r : 有効降雨強度、 i : 浸透量である。通常、上式中の浸透量は、Horton ないしは Philip の浸透能式で評価される。しかし、初期浸透能や最終浸透能が、流域の湿润状態あるいは地形・地質・植性等の流域特性量により変化するため、それらと

の関連で定量化し、基礎式に組み込むことが難しい。そのため、ここでは浸透量を簡単に次式で表す。

$$i = ch \quad (3)$$

もちろん、浸透量を上式のように表現し得るか否かは問題があるが、係数 c を変数と見做して、流域諸量より評価することとする。

つぎに、洪水流出に直接關与する中間流出成分を求めるため、前述の浸透量をタンクへの入力として取り扱う。一般に、洪水流出量をタンクモデルで求める場合、3~4段のタンクが用いられるが、水文資料が整っていない段階では、流出孔ならびに浸透孔の乗数を決めることができない。もっとも、ここで示されたモデルで

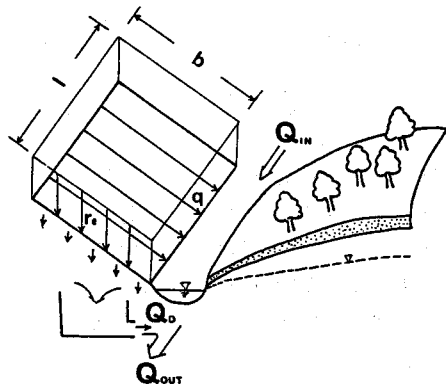


図-1 流出モデルの概念図

は、表面流出成分は別に扱われているので、第1次近似として1段タンクを用いることも、さほど無理ではないものと思われる¹⁾。タンクの底に1個の流出孔だけを有する線形タンクでは、流出孔乗数を ν として、応答関数は次式で表される。

$$K(t) = \nu e^{-\nu t} \quad (4)$$

ここに、乗数 ν は流量減衰曲線より求められる。

2.2 計算手法

計算は、斜面流ならびに河道流のそれぞれについて行い、土中への浸透は山腹斜面のみで考慮することとした。このとき、河道流は雨水流で計算することができ、斜面流についても、基礎方程式を特性曲線法により解くことができる。すなわち、(1)式を書き改めれば、つぎようになる。

$$dx = \frac{dt}{dh/dq} = \frac{dq}{r - i} \quad (5)$$

(2)、(3) 式を考慮すれば、結局、次式を得る。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{pkq^{p-1}} \quad (6)$$

$$(r - ckq^p)dt = pkq^{p-1}dq \quad (7)$$

したがって、特性曲線の位置ならびにその上での流量は、以下のように差分表示される。

イ) $r_j - ckq_{j-1}^p \neq 0$ のとき

$$q_j = \left[\frac{r_j - (r_j - ckq_{j-1}^p)e^{-c\Delta t}}{ck} \right]^{\frac{1}{p}} \\ \approx \left[q_{j-1}^p + \frac{r_j - ckq_{j-1}^p}{k} \Delta t \right]^{\frac{1}{p}} \quad (8)$$

$$\Delta x_j = \frac{q_j - q_{j-1}}{r_j - ckq_{j-1}^p} \quad (9)$$

ロ) $r_j - ckq_{j-1}^p = 0$ のとき

$$q_j = q_{j-1} \quad (10)$$

$$\Delta x_j = \frac{1}{pkq_{j-1}^{p-1}} \Delta t \quad (11)$$

ただし、上式中の Δt は計算時間間隔であり、添字の j は、初期時刻より $j\Delta t$ 時間後の値であることを示している。以上の諸式により演算を進める場合、流れが下流端に到達する端数時間の計算や、特性曲線が他の特性曲線を追い抜く際の処理等が必要であるが、これらは雨水流法の場合と同様にして取り扱える²⁾。

つぎに、斜面流の浸透成分はタンクモデルを使って計算されるが、タンクは1段線形のものであるため、遅れ時間が考慮されない。そのため、対象小流域の流路長ならびに中間流の流速より遅れ時間を求めることとした。なお、タンクモデルからの流出量を取り扱う方法としては、流出量を斜面流の途中で考慮する方法と、河道への横流入量として考慮する方法の2種類が考えられる。前者の方法で合理的に計算を行うためには、対象流域の水みちを詳細に調査することが必要であり、実用的流出解析法としては適当でない。そのため、ここでは、タンクモデルからの流出量を、対象小流域に接する河道への横流入量とした。

上述されたように、流出計算は、基準地点での流域を小流域に分割して行われるが、ダムが存在する場合には、貯水量を次式で計算する。

$$\frac{dV}{dt} = Q_u + (q_l + q_r)l + rA - Q_d \quad (12)$$

ここに、 V ：貯水池水量、 A ：貯水池水平面面積、 l ：貯水池長さ、 r ：降雨強度、 Q_u 、 Q_d ：それぞれ、上・

下流端の流量、 q_L 、 q_R ：それぞれ、左右岸から貯水池への単位幅流入量である。なお、上式中の Q_d は、放流工の形状がわかれば、越流水深を使って求められる。

3. 浦上川の流出解析

前節で示された変形雨水流法を用いて、水文資料が乏しい地域での流出解析を行うため、以下では、長崎市内河川の浦上川を取り挙げて検討する。

3.1 浦上川の概要

浦上川は、図-2に示されたように、多良見町に近い畦別当付近より発し、長崎港に注いでおり、全流域面積：38.1km²、流路延長：13.3kmの2級河川である。この川は、長崎市ならびに周辺町村の河川の中にあつて、流域面積、流路延長ともに最も大きく、長崎市にとって重要な都市河川である。長崎豪雨の際には、中島川と同じく溢水・氾濫³⁾、大きな社会問題となった。そのため、浦上川の高水計画に関しても見直しを迫られたが、十分な水文観測資料が無いため、容易には洪水流量を評価できないのが実状であった。なお、浦上川の支川である大井手川が本川と合流する地点には、長崎市民の水がめの一つである浦上貯水池があるが、この貯水池についても、利水専用から一部治水用に振り替えることが計画されている。

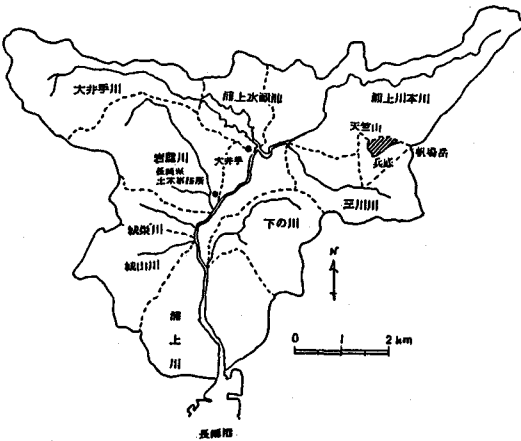


図-2 浦上川流域の概念図

表-1 流域諸量

		面積 (km ²)	流路長 (km)	平均勾配	市面化率
浦上川上流	右流域	3.13		0.472	12.0
	左流域	4.85		0.377	5.7
	河道	7.80		0.032	
三川川	右流域	2.13		0.426	15.3
	左流域	1.11		0.557	40.4
	河道	3.47		0.071	
大井手川	右流域	3.28		0.378	48.2
	左流域	1.72		0.289	65.7
	河道	4.55		0.027	
浦上水源池	右流域	0.28		0.378	48.2
	左流域	2.11		0.289	65.7
	野水池	1.43		0.047	

3.2 計算結果と考察

ここでは、変形雨水流法により大井手地点での流出量を求め、結果の妥当性について検討する。一般に、流出計算をする場合、対象流域をどの程度まで小さく分割するかを決めなければならない。これは、その地域の降雨が降雨観測点のもので代表される場の尺度や、流域地形によって変わってくるものと思われる。ただ、われわれが他の河川で流出解析を行ったときの経験から言えば、後者については、さほど局所的な地形の違いを考慮しなくても良いようである。以上のことから、支川流域ごとに流出計算を行うこととし、流域を浦上川上流、三川川、大井手川、ならびに浦上水源池の各ブロックに分割した。計算は、各ブロックの右流域、左流域、河道、もしくは貯水池に対して行うものとする。各要素の諸元は、表-1にまとめられている。

つぎに、変形雨水流法で計算を行うためには、各種のパラメーターを決定しなければならない。表面流については、流れの抵抗則を Manning型で表現することにすれば、 $p = 0.6$ 、 $k = (N/\sqrt{I})^p$ となる。ただし、 N ：等価粗度係数、 I ：斜面こう配、である。一方、タンクの乗数について調べるため、昭和58年梅雨期の観測資料を用いて、流量減衰曲線を片対数紙上に表せば、図-3のようである。これより、減衰係数 γ は、0.005 ~ 0.03 min⁻¹となり、若干の幅がある。これは、7月5日の降雨に対する流出は、それ以前に暫く雨が降っていないことによる影響を受けたのに対し、7月16、17日のものは、そうでないことによっている。そのように考えれば、詳細な流出解析に対しては、1段タンクは適当でないようにも思える。参考までに、本明川・裏山地点における同種の図を、図-4として示した。この図では、浦上川の場合とは反対に、減衰係数がほぼ一定になっているが、その理由は上述されたことから明らかである。したがって、2.1にも述べられたように、第1次近似として、1段タンクを用いることは妥当であろう。

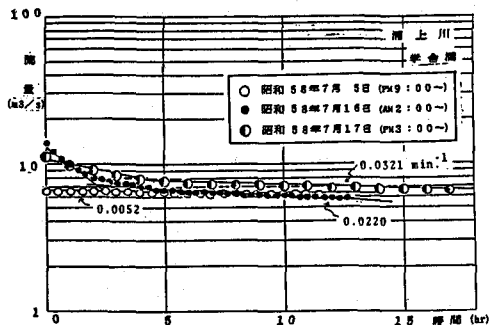


図-3 流量減水曲線(浦上川,学舎橋)

以上のようにして求められた、昭和57年 7月 23～24日ならびに昭和58年 7月15～17日のハイドログラフが、図-5、図-6に示されている。計算にあたって係数 c は 0.25hr^{-1} としたが、これについては後述する。等価傾度係数 N は、山地等で 1.0 、市街地で $0.04\text{sec}/\text{m}^2$ とし²⁾、対象流域の市街化率より平均値を求めた。図-5から明らかなように、長崎豪雨時の流量ハイドログラフの立ち上がりは極めて急峻であり、長崎の如き急傾斜斜面都市における水防災対策の困難さを窺わせる。図中には、中安の総合単位図法⁴⁾により求められた計算結果も示されている。両手法による計算結果を比較するには実測資料が乏しいが、われわれが災害直後に浦上橋で実測した値、ならびに、浦上貯水池の水位から流量を求め流域面積率により学舎橋のものに変換した値を参照すれば、本手法の有効性が知れる。

一方、図-6において、 $c = 0.25\text{hr}^{-1}$ とした変形雨水流法の結果を実測値と比較すれば、減水期における流出現象がよく表現されていることがわかる。ところが、ピーク付近で計算値は実測値をかなり下まわっている。これは、一つには、実測流量と称するものが、水位-流量曲線を使って実測水位より求められた流量であること、さらには、 c の値を一定にしたためであると思われる。一方、単位図法による結果は、上述のものと反対の傾向にあり、変形雨水流法で c を小さくした結果とよく似ている。これは、単位図法では、雨水が土中へ浸透する影響を無視しているためである。

以上述べられたことから明かなように、変

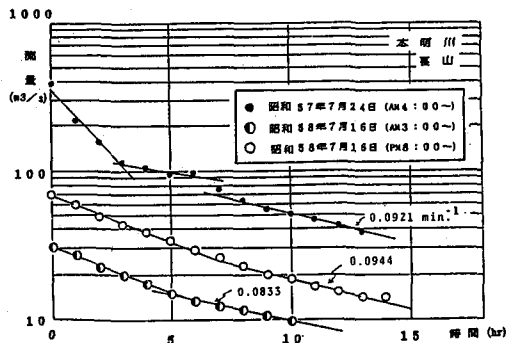


図-4 流量減水曲線(本明川,裏山)

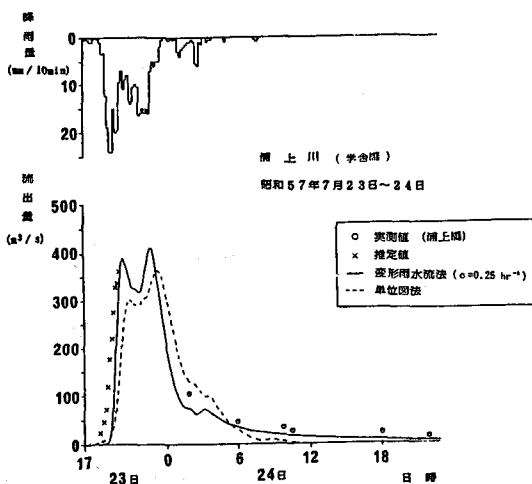


図-5 流量ハイドログラフ(昭和57年7月23～24日)

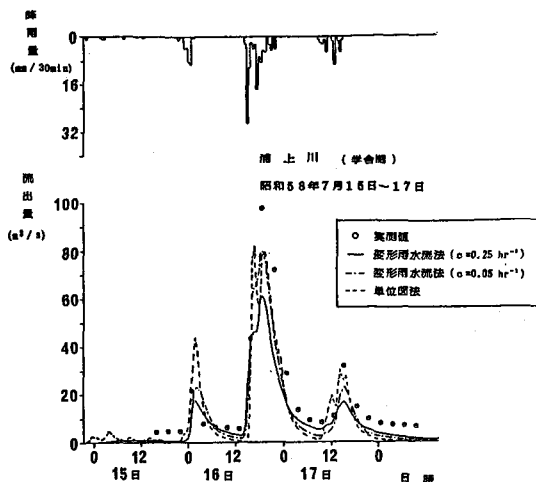


図-6 流量ハイドログラフ(昭和58年7月15～17日)

形雨水流法は、短期・長期の別なく流出解析に供せられる。もちろん、長期流出解析を行う場合には、最低2段のタンクを用意するとともに、蒸発量についても考慮せねばならないことは当然である。また、本手法により流出量を精度良く求めるためには、土中浸透量や中間流の速度を正しく評価せねばならぬことは言うまでもない。

4. 浦上川試験流域での水文観測

4.1 水文観測の概要

長崎豪雨災害時の苦い経験から、早急な水防災システムの整備が望まれるが、そのためにも、水文観測は欠かせない。このようなことから、昭和58年6月に大井手地点の学舎橋に水位計を設置し観測を続けている。また、昭和59年9～10月には、図-7の斜線部分で示された兵底地域で、雨量・河川水位・土壤水分等の水文観測を行った。

この観測は、昭和60年度以降も梅雨期に実施される予定であるが、4.2では、変形雨水流法における係数 c の評価と関連して土中浸透量について簡単に触れる。

水文観測を行った兵底地域は、浦上川支川の三川川の上流に位置している(図-7)。本地域の表層地質は、主に閃緑岩・変朽安山岩から成っている⁵⁾。この付近は、三川川沿いの三川町と異なり、全く市街化されておらず、民家は十戸を数える程度である。長崎豪雨の際には、天竺山西側斜面で川平の土石流が発生しているが、この地域では、

小規模な土砂崩壊を除き、大きな被害を受けていない。なお、この近くに国鉄長崎本線の長崎トンネルがあるため、以前には常時流れていた川も、現在では、降水時にしか水を湛えなくなった。観測は、主として、雨量(転倒ます型雨量計)、土壤水分、河川水位(フロート式自記水位計)について行われた。土壤水分は自記テンシオメーター、ならびに、直読型の寺田式テンシオメーターを用いて観測された。以前、図-7のSt.2付近は水田であったが、現在は使用されておらず、荒地である。ここでは、とくに、3深度(12, 22, 30 cm)で土壤水分を測定した。観測は前述の期間に行われたが、昭和59年は例年になく台風の少ない年で、この期間中、さほど大きな降雨は無かった。したがって、土中における水の挙動について考察するには資料不足であり、次小節では土中浸透量のみを取り挙げた。

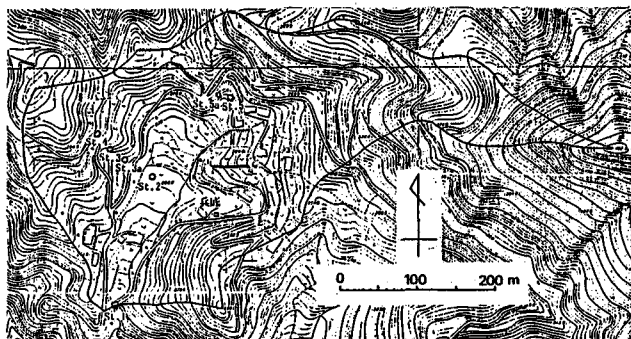


図-7 水文観測対象流域(兵底)

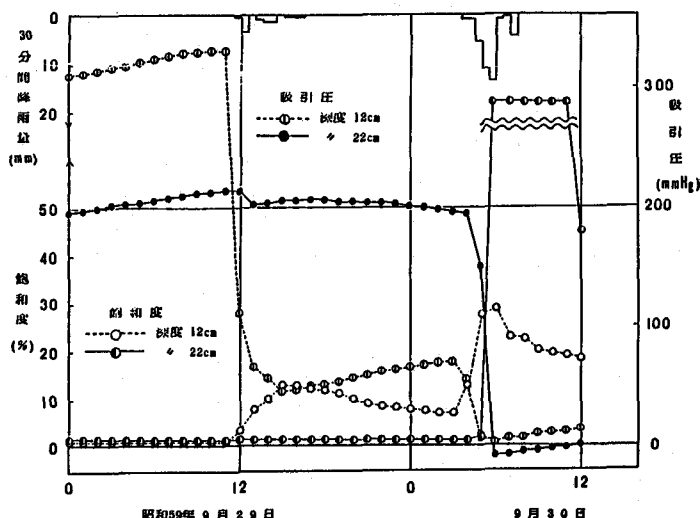


図-8 吸引圧と飽和度の時間的変化

4.2 観測結果の考察

9～10月の観測期間中、まとまって降雨があったのは9月30日のみであり、日雨量は39.5mmであった。ここでは、このときの資料をもとに雨水の土中浸透量を求め、 c の大きさに関して述べる。

まず、9月29～30日について、降雨量ならびにSt.2の吸引圧を示せば、図-8のようである。この図より明らかなように、29日の10mm程度の雨では、その影響はごく表層付近に限られているが、30日の前述の降雨では、雨水が土中深くに浸透していることがわかる。参考までに、深度30cmの吸引圧はほぼ零であった。いずれの雨でも、降雨開始とともに、深度12cmの土壌水分は即座に変化している。したがって、深度12cmと22cmの土壌水分を使って雨水の降下速度を計算すれば、 $5 \sim 8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。ところで、土中浸透量を求めるためには、吸引圧と飽和度の関係を知らねばならない。そのため、観測点の土塊を原形のまゝ採取し、表面を飽和させた室内実験を行った。図-9には、このときの土表面での水分フラックスが示されており、初期浸透能は $3.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。

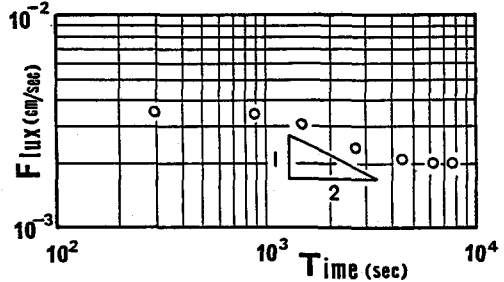


図-9 土表面の水分フラックス

土表面の水は、平面的に一様に降下せず、時間が経過してからも間隙を満たす補償流があり、フラックスは理論通り $-1/2$ のこう配で減少しない。これは水分浸透の容易さの違いから生ずるものである。実験結果から土壌水分の拡散係数を計算すれば、概略 $5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ であった。図-8には、実験で求められた吸引圧と飽和度の関係を用いて換算した飽和度の値も示されている。St.2の詳細な土壌水分鉛直分布が観測されていないため、30日の雨に対する土中浸透量を求めることができないが、以上の諸量から判断して、実験室で得られた浸透能に近い値であることが推定できる。

上述されたことから、三川川の右流域で求めた c の値は $0.1 \sim 1 \text{ hr}^{-1}$ のオーダーである。実際の水文現象と対比させた場合、(3)式のように置くことは非常に問題があるが、実用的モデルとして流出量を計算する際に土中浸透の影響を考慮し易いことは、2.でも述べられた通りである。

5. まとめ

本論文では、水文資料が乏しい地域を対象とした流出解析法として変形雨水流法を提案し、その適用上の妥当性について検討した。今後、さらに、降雨時の土中浸透量について検討せねばならないが、対象流域で十分な水文観測資料がないときにも、地形・地質・植性等の違いを考慮した流出計算をし得るものと思われる。(謝辞)本研究では、昭和59年度文部省自然災害特別研究(代表：伊勢田哲也長崎大学教授)の補助を受けたことを記し、謝意を表します。また、水文観測の実施にあたっては、長崎大学工学部土木工学科の平山康志技官、学部学生の森尾宣紀君らの協力を得た。併せて感謝致します。

※ 参考文献

- 1) 野口正人・小林高昌・山本隆洋；流出タンクモデルの同定に関する研究，長崎大学工学部研究報告，第17号，昭和56年
- 2) 角屋睦；講座 流出解析法，農業土木学会誌，第47巻10号～第49巻6号，昭和54～56年
- 3) 野口正人・中村武弘・平山康志・武田篤；長崎市街地の河川氾濫，昭和57年 7月豪雨による災害の調査報告書，長崎大学学術調査団，昭和57年
- 4) 建設省河川局，日本河川協会；建設省河川砂防技術基準(案)，調査編，山海堂，昭和51年
- 5) 長崎県；土地分類基本調査—長崎—，昭和48年