

多地域都市流出解析用拡張RRL法プログラム

株式会社 東芝
同上

○小舘英寛(正会員)
石崎俊彦

1. はじめに

流出解析法は降雨量を流量に変換する解析法である。当初、河川の洪水対策に関連して用いられていたが、この場合には、最大流量や数日間にわたる比較的短期間の時間流量曲線を求めるものであった。河川上流に治水ダムや多目的ダムが建設されるようになると、利水の立場から、一年を通して流量を知る必要が生じ、蒸発による減量や融雪水による増量を考慮に入れて、日流量曲線を算出する。さらに、都市化現象が進み、舗装道路の普及や住宅の密集により、降雨が大地に浸透せずに直接流出して、浸水が多発することや多量の工場廃水と家庭汚水の排出に起因する環境汚染の弊害が顕在化したことから、不透透域を重視した雨水流量解析と環境汚染を評価する水質モデルを含む解析へと発展している。

この流出解析法はRational法、Unit Hydrograph法、Linsley-Crawford Model (Stanford Univ. Model)、タンクモデル、貯留係数法、RRL (Road Research Laboratory) 法、など、1960年代までに開発されたものは、人手によって計算されるが、1970年代以後の米国EPA (Environmental Protection Agency) 監修のSWMM⁽¹⁾ (Storm Water Management Model) 法やカナダDorsch Consult社のQSS⁽²⁾ (Quantity-Quality Simulation) 法は計算機プログラムとして開発されている。電子計算機は小形化が進み、安価となって、普及しており、また、演算速度が高速化されて来て、人手による1回の試算に要する時間と同一の時間に数十回、数百回以上も計算出来るので、人手で数回の計算によりモデルの係数を決定していたところを、計算機ではHeuristicなアルゴリズム⁽³⁾や最適化アルゴリズム⁽⁴⁾を作成して、係数を磨き上げることが可能であるから、手計算を前提とした計算法の計算機プログラム化が広く行なわれている。

下水道システムにおいて、雨水による浸水を防ぐ設備としては、雨水ポンプ所があるが、雨水ポンプ井への流入流量を把握するために、流出解析法を適用することが出来る。この場合、対象流域内にポンプ所が複数箇所に配置されていることもあるし、下水管路の合流地臭における流量を知りたいことも生じることがある。前者は複数地臭の流量曲線が得られるが、後者は最下流地臭のみしか算出出来ない。一方、最近の小形パーソナルコンピュータの普及に対応して、簡にして要を得たプログラムが望まれているので、プログラムのステップ数は短い方がよい。SWMM法は全体で2万ステップであり、流出解析部分のみを抽出して、Flow-SWMM⁽⁵⁾プログラムとしても、4千ステップである。RRL法プログラムは450ステップで、約10分の1である。そこで、RRL法を多地域用に拡張することにして、そのプログラムを完成したので、その内容について報告する。

2. 多地域算出用拡張RRL法

2.1. RRL法の概要

L.H. Watkinsが開発し、1962年に発表したRRL法⁽⁷⁾は5つの手順から構成されている⁽⁸⁾。

- 手順1. 対象流域の雨水排水地図を作成する。雨量計や流量計の設置場所と管路網とその諸元を記入する。
- 手順2. 管路内流速を計算し、最下流臭の流量計位置までの等到達時間曲線を作成して、時間面積関係を得る。
- 手順3. 入力の降雨量曲線に対し、時間面積関係から、仮想的流入流量曲線を作成する。
- 手順4. 流域特性としての貯留量流出流量関係を決める。
- 手順5. 仮想的流入流量曲線に対し、貯留量流出流量関係から、流出流量曲線を作成する。

現在、計算機プログラム化されている部分は手順3～5である⁽⁹⁾。手順1は地図情報データベースが完備される必要があるため、ここ数年待たなければならない。手順2は地図情報処理を主とするCADの一種に属し、作図アル

ゴリゴリの作成を要し、かなりのステップ数となるから、当面、手作業とする。

手順3の降雨量曲線に關し、浸透域の浸透損失を考慮して有効雨量計算を行なうことと手順4の貯留量流出流量曲線の係数決定の方法の2点を改良した修正RRL法が広く知られている⁽⁵⁾

2.2. 多地算出のための追加内容

図1のような対象流域内に複数のポンプ所と複数の接合地からなる下水道システムを考える。接合地における流量曲線は、図2に示すごとく、その位置により3種に分かれる。最下流地みの従来法による場合は流出解析の結果としての流量曲線①であり、流出解析の後に管路を流れた場合は、管渠送流モデルの出力としての流量曲線②となり、通常、移送時間だけ遅れ時間を伴うことになる。また、ポンプ吐出側の流量曲線は③の曲線であり、ポンプの運転法の影響を直接受けるものである。たとえば、図1の地先J₁では、①の流量曲線であり、地先J₂では、①と②の流量曲線が加算されている。また、ポンプ所P₁の流入流量曲線は②の流量曲線に該当する。ポンプ運転アルゴリズムの検討は今回の内容から除外しているので、③の流量曲線は取扱わない。したがって、多地算出のために追加すべき内容は管渠送流モデルに關する事項、すなわち、下水管路網における移送時間計算と管路網の取扱い方法の確立である。

2.3. 移送時間計算と管路網の取扱い方法

下水管路網は節点(Node)と有向枝(Directed arc)からなるネットワークを構成するが、さらに流出解析を含めて表現すれば、図3のようになる。節点の入力と出力は、図3に示されているごとく、複数本ある場合もあり、どちらかを欠くこともあることがわかる。節点iの時刻tにおける連続の式は次式のようになる。

$$\sum_m d_{mi} \cdot J_m(t - K_{mi}) + d_{ji} \cdot R_i(t) = (\sum_n d_{in}) \cdot J_i(t)$$

ここで、始点m、終点n、分配係数d_{mi}、流出解析分配係数d_{ji}、遅れ時間K_{mi}、流量J_i、流出解析流量R_i。また、 $\sum_n d_{in} = 1$ 。

この下水管路網における移送時間を計算機プログラムで計算するときには、次の3点を明確にしなければならない。

- 移送時間の計算をいかにすべきか、
- 節点と有向枝からなる網状構成をいかに表現して入力データを作成すべきか、
- 節点間の先行関係を保持した演算順序をいかにして決定すべきか。

(a)は管路内流体の解析を一樣流、不等流、不定流のどれを選択すべきかという問題である。この計算は雨水ポンプ運転のために行なうものであるから、この関係を考慮しなければならない。雨水ポンプは同一仕様の複数台で構成され、台数制御により吐出量を調整することが多く、汚水ポンプに比し単機容量が大きい。したがって、始動時間も数十秒におよぶ。また、ポンプ単容量はポンプ単機容量の5~10倍の場合が多いから、動的に、確率

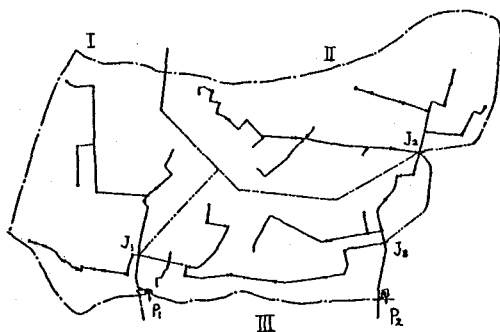


図1. 対象流域

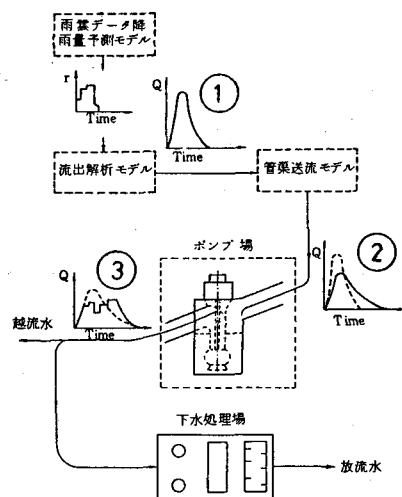


図2. 流量曲線3種

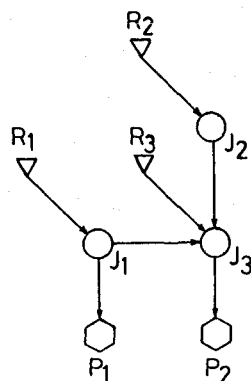


図3. 流出解析モデル

的に変化する雨水流量に対し、ポンプ吐出量の変更を行うべきかを判定する時間周期は数分、たとえば5分や10分となる。したがって、移送時間の計算も秒ではなく、分程度で行えば良いことになる。管長が数kmという長い場合には、不等流計算が望ましいが、それ以外では一様流で十分と考え、Manningの式を用いることにした。

(b)では節々の接続関係の有無を表わす方法をいかにすべきかが問題となるが、接続行列を用いるのが一般的である。しかし、下水管路網の構成は網目状ではなく、樹枝状を特徴とするから、接続行列では接続無の成分が多く、いわゆるSparseとなる。そこで、接続有の成分のみをSequentialに並べて、必要最小限の成分で入力データを構成することが望ましい。そのための作業は以下に示す順序で行えば、極めて容易となる。

- 順序1. 対象流域の下水管路網(図1)から得られるネットワークに流出解析部を加える。
- 順序2. 節々に着目し、その入力と出力の有無から、節々を、入力と出力を共に有する入出力節々(図3で○印)、出力のみ有る出力節々(▽印)、入力のみ有る入力節々(□印)の3種に分類し、それぞれ、1から順に番号を付す。ただし、このときには先行関係を考える必要はない。この結果、図3を得る。
- 順序3. 表の左端に出力節々、上端に入力節々を配し、それぞれ、入出力節々を上端から、左端から並べる。
- 順序4. 出力節々の行先に該当する入力節々番号の枠に1を記入していき、表1を得る。
- 順序5. 表1の節々接続関係表ご枠に1が記入されているところだけを拾い出し、横列は左から右へ、上列から下列の順に、入力データ番号を付していく。

表1について言えば、入力データ番号1は始末節々J₁と終末節々J₃の枝で、入力データ番号7で終る。

(c)は上記順序2で各種節々の番号を先行関係を考えないで付したことを補うものであるが、(b)の作業により構成された入力データを用い、容易に処理出来る。演算は入力節々についてのみ行うので、入力節々を終末とする出力節々と探索し、その節々の流量曲線が得られていることを確認すれば良い。関与する出力節々が全て計算済となっていて始めて、この入力節々の演算が許可される。表1では、入力節々は上欄の左から右に並んでいるが、入力節々J₁についての縦欄内では、出力節々R₁のみが接続関係を有していることがわかる。これは部分流域Iの流出解析が完了していれば良いことを示している。入力節々J₃を考えると、出力節々J₁、J₂、R₃の3節々が関与しているから、流出解析R₁、R₂を完了し、それぞれ、2節々J₁、J₃間とJ₂、J₃間の移送時間と計算して、流出解析R₃の結果を加算することで、流量計算が完了する。結局、表1の場合には、演算順序は入力節々J₁、J₂、…、R₂と表の左から右への配列順が一つの許可順序である。

3. シミュレーションプログラマ

3.1. プログラムの全体流れ図

多地区算出拡張RRL法プログラムの全体流れ図が図4である。データ入力が(1)(4)(6)の3ヶ所にあり、算出地数、日付、計算周期などのシミュレーション条件と降雨量曲線、(4)は部分流域毎の貯留量流出流量曲線の係数、損失雨量係数、(6)はアラ

表1. 節々接続関係

	J ₁	J ₂	J ₃	P ₁	P ₂
J ₁			1	1	
J ₂			1		
J ₃					1
R ₁	1				
R ₂		1			
R ₃			1		

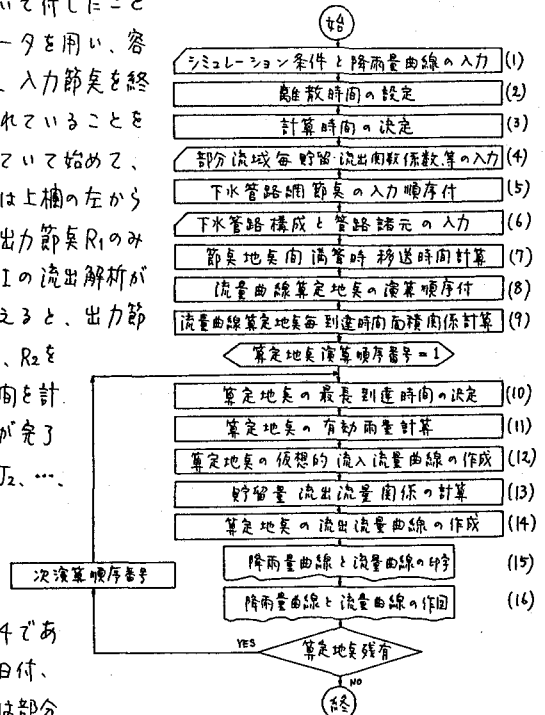


図4. 多地区算出拡張RRL法の全体流れ図

ニメータ値と管路網データである。それぞれ、データファイルの名称をRNH101、RNS101、RNP101としている。(2)は演算時間間隔の指定に従って設定され、降雨量に比例させて延長時間を求め、計算時間(3)が決定される。(5)では入力データ数を必要最小限として、その順序を決定するが、これはサブルーチンNUMINPの演算内容である。(7)は移送時間計算のためのサブルーチンDELTIMである。(8)では流量曲線算定地毎に付した番号が先行関係を考えないものとなっていることを補うもので、サブルーチンNUMCALが演算順序を決定する。(9)はサブルーチンTIMSBAであり、地毎の演算に入るための準備をする。(10)は(9)の結果から、地域毎に決定され、(11)では、修正RRL法が損失雨量を、不透透域と浸透域において浸透能の有無と凹地貯留の有無を考慮して計算することになっているから、全く損失のない場合、凹地貯留分のみの損失雨量の場合、浸透能損失のある場合、浸透能も凹地貯留分も共にある場合の4つに分かれている。後3者の演算は、それぞれ、サブルーチンRAINIM1、RAINPE、RAINPE1で行なう。(14)から(16)は従来のRRL法の手順3～5に対応していて、全てサブルーチンSUBRRLに含まれている。結果の出力は(15)と(16)であるが、(15)はサブルーチンSUBRRLの随所に適宜、印字がなされ、(16)は最後に、サブルーチンFLPLQTを呼出して、作図出力される。

3.2. プログラム構成および特徴

図5は主プログラムとサブルーチンプログラム9個およびデータファイル3個の構成を示している。最下流のみを算出するためには、サブルーチンSUBRRLと出力作画サブルーチンFLPLQTに入力データファイルRNH101がMAINで結びつけた形で充分である。多地域用に拡張したことで必要となったサブルーチンTIMSBAが追加され、主に管路内移送時間を計算する。もちろん、図5の構成で、地数数を1とすれば、従来の最下流のみの計算を行なうことが出来る。

本プログラムの特徴をまとめると、次のようになる。

- (イ) 複数地毎の流量曲線が算出可能である。
- (ロ) 入力降雨量曲線は時間間隔5分、10分、60分の3種を選択することが出来る。
- (ハ) 出力の流量曲線は時間間隔5分、10分の2種を選択可能。
- (ニ) 部分流域特性を表わす9係数を変数として取扱ひ、部分流域毎に異なる値の組合せとすることが出来る。
- (ホ) 多地域用に拡張したために必要となった管路網の入力データは順序1から5により、容易に作成出来る。
- (ヘ) 少ない入力データで、かつ、ステップ数750と短かいので、パーソナルコンピュータで、手軽に実行出来る。

図5. プログラム構成

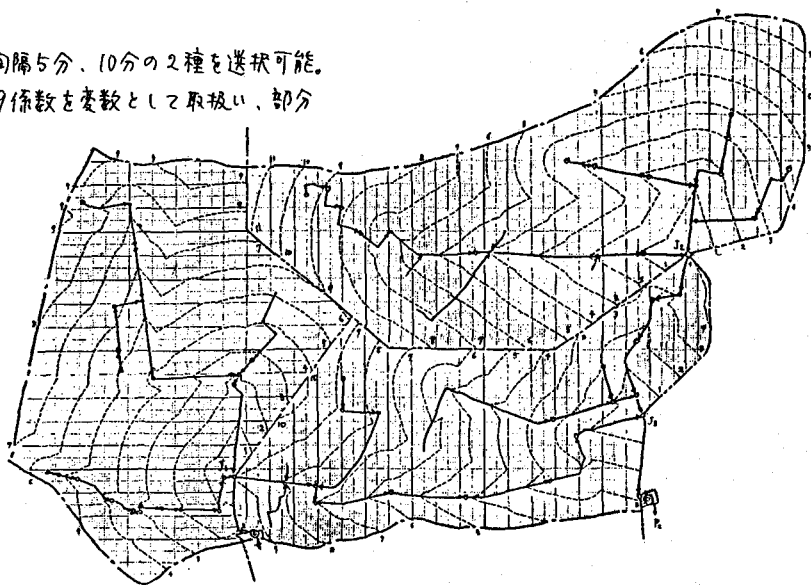
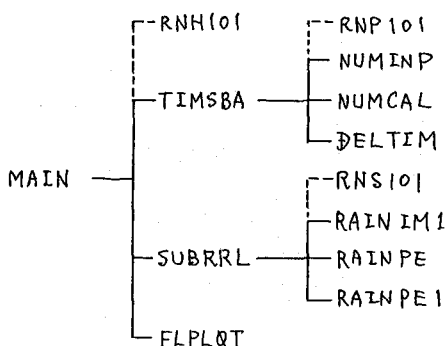


図6. 等到達時間曲線図

(4) 入力の降雨量曲線を入替えることにより流量曲線を算出すれば、特定矢の時系列変化を把握出来るばかりでなく、対象流域内の主要な地矢の時間断面的流量分布をも知ることが出来るので、システム設計のToolとして活用することが出来る。

なお、部分流域特性の9係数の選定に関しては、種々の角度から検討を加えておく必要があるが、波形形状に大きな影響を与える流出係数や貯留量流出流量曲線の2係数について検討済である⁽⁷⁾。

3. 3. 入力データ項目

入力データは3つのファイルRNH101、RNS101、RNP101であるが、それぞれの項目は次の通りである。

RNH101...対象流域名称、流量曲線算定地矢数、降雨年月日、降雨開始時刻、降雨持続時間、降雨量曲線時間間隔、降雨量曲線、流量曲線時間間隔。

RNS101...流量曲線算出地矢名称、貯留量流出流量関数の比例係数とべき係数、流出係数、不浸透係数、不浸透域直接分係数、浸透域直接分係数、不浸透域凹地貯留量、浸透域凹地貯留量、浸透能。

RNP101...部分流域分割数、パラメータ値換算係数、部分流域毎到達時間別パラメータ値(面積)、管路節点接続関係、節点間の管路長、管径、管路勾配、出力節点配分係数。

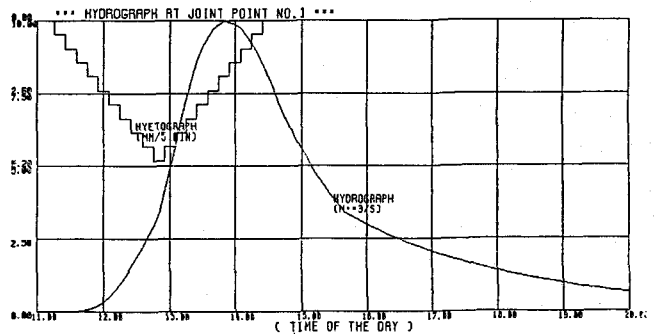


図7-1. 接合地矢J₁の流量曲線

4. シミュレーション結果

対象流域は図1で、その面積7.61km²である。ポンプ所2ヶ所と接合地矢3ヶ所の5ヶ所について流量曲線を算出することとなった。降雨量計は1ヶ所である。時間間隔は降雨量曲線も流量曲線も5分とし、降雨は11時15分から降り出し、3時間10分持続して、総降雨量100mmに達するものとした。降雨量波形は道富士山形である。

算出地矢における連続の式は以下の通り。

$$R_1(R) = (d_{13} + d_{1p1}) \cdot J_1(R)$$

$$R_2(R) = J_2(R)$$

$$d_{13} J_1(R - K_{13}) + J_2(R - K_{23}) + R_3(R) = J_3(R)$$

$$d_{1p1} J_1(R - K_{1p1}) = P_1(R)$$

$$J_3(R - K_{3p2}) = P_2(R)$$

ここで、 $d_{13} + d_{1p1} = 1$ である。

手順2により等到達時間曲線を作図した結果が図6である。演算時間が5分(または10分)であるから、2.5分間隔で作図している。

部分流域IIの27.5分の線が最も速いものである。

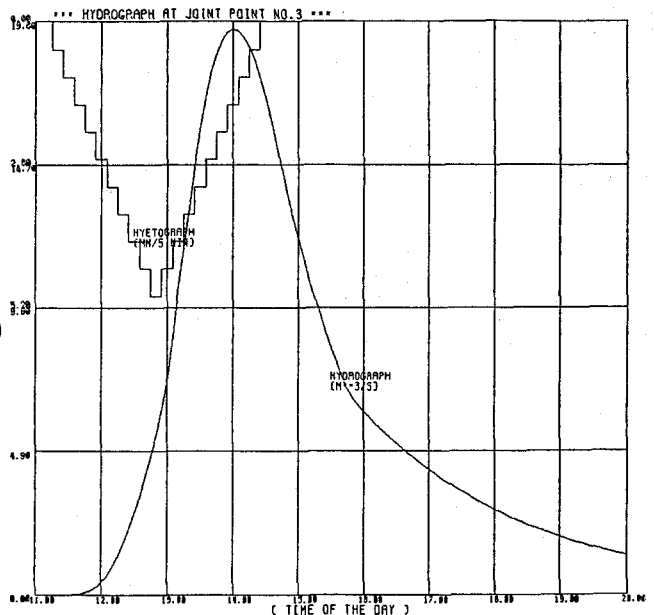


図7-2. 接合地矢J₃の流量曲線

計算結果として、接合地矢J₁とJ₃の2矢の流量曲線を示したものが、図7-1と図7-2である。最大流量9.94、19.34 m³/sで、その時刻は10分間の差がある。また、5ヶ所における、16:00の流量分布を調べると、地

矣 $J_1, J_2, \dots, P_2$ の順に、2.92、3.50、6.07、1.49、6.28 m^3/s となっている。

5. まとめ

本プログラムは修正RRL法を拡張して、対象流域における降雨時の流量曲線を複数の地点について算出出来るので、時系列的変化と時間断面的流量分布を把握することを可能にするものである。これは雨水排水システムとして、別途開発済の雨水ポンプ運転アルゴリズム評価プログラムと組合せて使用すれば、雨水ポンプの運転法の検討や機器定格の決定のための Tool として、大いに役立つものである。しかも、プログラムのステップ数が少ないので、パーソナルコンピュータにも適していて、手軽に使用出来るから、今後広く活用されるものと期待される。入力データである降雨量曲線をより正確に予測するために、雨滴レーダの活用も考えられており、この場合には、雨滴レーダの面的情報を入力とし、数時間にわたる、ある地点の短時間(数分)降雨量を予測して出力するサブルーチンを追加する必要がある。このようにすれば、雨滴レーダから雨水ポンプ運転までの自動化が実現し、浸水防止の一助となるものと思われる。

[参考文献]

- (1) W.C. Huber, J. P. Heaney, M. A. Medina, W. A. Peltz, H. Sheikh and G. F. Smith, "Storm Water Management Model — User's Manual (Version II)" Report No. PB 257-809, March 1975.
- (2) W. F. Geiger and H. R. Dorsch, "Quantity-Quality Simulation (QQS): A Detailed Continuous Planning Model for Urban Runoff Control (Vol. I ... Model Description, Testing and Applications)" Report No. PB 80-190507 (EPA 600/2-80-011), March 1980.
- (3) 菅原正巳「続・流出解析法」共立出版社、1979.
- (4) 小舘英實、荒川卓也「目標計画法による貯留関数法改良アルゴリズム」土木学会第4回電算機利用に関するシンポジウム、PP. 57~60、Nov. 1979.
- (5) 建設省都市局下水道部監修「合流式下水道越流水対策と暫定指針(1982年版)」日本下水道協会、1982.
- (6) 小舘英實、出口英昭「Flow-SWMMプログラム」第20回下水道研究発表会講演集、PP. 109~111、May 1983.
- (7) L. H. Watkins, "The Design of Urban Sewer Systems" Road Research Technical Paper No. 55, Dept of Scientific and Industrial Research, Her Majesty's Stationery Office, London, 1962.
- (8) M. L. Terstriep and J. B. Stall, "Urban Runoff by Road Research Laboratory Method", Jour. of Hydraulics Div. (Proc. of the ASCE), Vol. 95, No. HY-6, PP. 1809~1834, Nov. 1969.
- (9) 小舘英實、須佐泰治「修正RRL法の4係数と降雨波形の流量波形への影響」第22回下水道研究発表会講演集、PP. 96~98、June 1985.