

メッシュ法による都市域の雨水流出機構の解析

Analysis on the Urban Storm Runoff

by using grid Analysis

東京大学工学部 正 員 市 川 新

東京大学工学部 榊 原 隆

1. はじめに

雨水流出量の推定に関する研究は古くてかつ新しいテーマである。従来の解析法は、対象を河川流域全体とするものや、最大流出量を推定するものが多かったが、ここ20年間の間には、都市域のような小流域を対象としたり、流出ハイドログラフの推定を行うものが提案され、それらのいくつかは、工学的に利用されている。都市域とくに下水道整備区域にかぎって考えると、降雨時のマンホールからの吹き上げ、下水道計画と河川疎通能力の調整、下水道サイドから行いうる雨水流出抑制対策の効果の推定等の問題がありそれらの水文現象を、正しく記述し、かつそれに基づき工学的な判断が行えるような「ミクロ的」な雨水流出解析法が必要となってきた。このようなレベルでの雨水流出解析を行うためには、現在までに行なわれている解析法は、マクロすぎて、必ずしもその要求に応えられるようになっていない場合が多い。

本研究では、都市域において、雨水流出抑制対策を評価出来るような、あるいは流出の解析法の中で、それぞれの対策を組みこめるようなモデルとして、新しい解析法「メッシュ法」を提案するものである。本法は、開発途上にあり、問題点も多いが、その考え方と、その応用例をここに紹介する。

2. メッシュ法の概要

2-1 雨水の流れ 本法は雨水の流出状態を出来るだけ正確に記述する事を心がけている。そのため、まず、我々のイメージする雨水の動きを最初に述べる事とする。図-1は、その概念図である。

降雨の落下地点を、浸透面と不浸透面に大別する。浸透面とは、グラウンド・畑・家の周辺の土の部分・庭等であり、不浸透面としては、屋根・道路・コンクリート敷きの駐車場・校庭等である。屋根に降った雨は、樋を通して排水管に入り、直接水路・下水管に入る場合が多い。道路の場合は、道路面を流れ、道路わきのU字側溝や、20～50mおきに設置されている雨水マスから、下水管に入るものと考えられる。一方、浸透面に降った雨水は、基本的には、地下に浸透

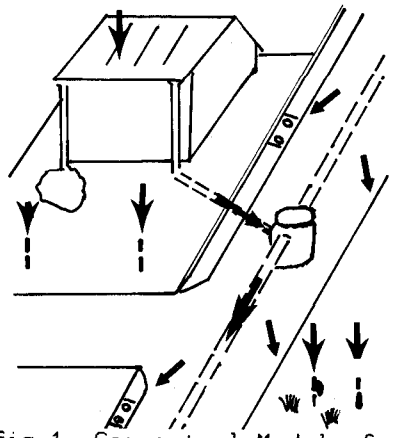


fig-1 Conceptual Model of Rainfall and Runoff

(厳密に言えば、土壌中の空隙に貯留されるものが多いが)するが、浸透量が大きくなると(土壌中の貯留量が増加すると)浸透面からも流出がおき、排水管や下水管に流入するものと思われる。下水管に入った水は、水および施設のもつ水理条件(流量、勾配、管径、粗度係数)に応じて流下し、下水処理場に流れるが、一部は途中で河川に放流される。

この研究では、降雨から、下水管の流末迄の雨水の流出を追跡を行うものとする。

2-2 メッシュ法の概念 前節で述べた雨水の流れを出来るだけ忠実にフォローするようにしたのが、メッシュ法の考え方である。具体的に言えば、流域を出来るだけ細かに区分し、分区(メッシュ)上に降った雨を、分区の地表面の状況に応じながら、いくつかに分けて、流れ方向に従いながら隣の分区に移動させていくというものである。すなわち、メッシュ内に地表面に応じていくつかのバケツをおき、そこに降下した雨水をバケツにため、バケツ毎、隣のメッシュに移動させ、それぞれの種類のバケツに移しかえていくというモデルであり、最末端のメッシュでのバケツの容量が、流出ハイドログラフとなる。

このモデルを実用化するためには、メッシュの大きさ・バケツの種類・バケツの移動速度・移動の際のお

くれ（貯留効果）をどのようにすべきかが問題となる。

メッシュの大きさとしては、RRL法では、等到達時間として5分おきにとっているものもあるが、ここでは、 $10\text{ m} \times 10\text{ m} = 100\text{ m}^2$ のメッシュを考えた。この大きさの根拠は、区切りがよい事と、東京等の大都市では家一軒分の大きさに相当するためである。メッシュを小さくすれば、流れを追跡する計算の手間は、増加するが、大型計算機の発達により、100 ha 程度の流域なら10m メッシュで流域を区分しても計算は容易に行なえる。

バケツの種類としては、以下にのべるようにいろいろな考え方がある。最初は、メッシュを1つと考えたが、考え方に無理があったので、地表面流と下水管流の2元流モデル、2元流モデルにおくれを加味したモデル等を考え、それぞれについて検討を行なった。

バケツの移動速度は、バケツの種類毎にかえる必要がある。

貯留効果は議論の多い所であるが、末端の流出ハイドログラフと、実測雨水流出量がかなり一致しているため、「検証結果」から判断するがぎり、考慮しなくてもよいものと考えている。このモデルにおいては、雨水が地表面を流れる（メッシュ間を移動）する速さに、「おくれ」が入っているため、「下水管内における貯留」のみを特別に取り上げる必要がないためと考えられる。

2-3 メッシュからの流出量 図-2のようなメッシュを考える。不浸透面に降った雨水は、すべて流出するものと仮定する。一方、浸透面に降った雨は、降雨強度が小さい場合には、全量浸透し、流出に寄与しないものとするが、降雨強度が一定値をこえるときには、降水の一部が表面流となって流出するものと考えている。水文学でいわれる有効雨量という概念で整理すると、次式で示される。

$$\text{有効雨量} = \begin{cases} \text{降雨量} \times \text{不浸透面積率} & \dots \text{降雨強度 小} \\ \text{降雨量} \times (\text{不浸透面積率} + \text{浸透面積率} \times \alpha) & \dots \text{大} \end{cases}$$

浸透域から表面流が発生する限界降雨強度およびその流出量を決めるには、シミュレーションを重ねて、経験的に求めるしか方法がない。

図-3は、二元流としたときの流出モデルを図化したものである。

$$Q_1 = R \times (\text{PRO} + \text{ROAD} \times \beta)$$

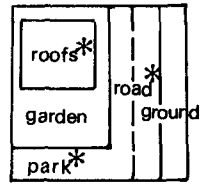
下水管流 降雨量 屋根率 道路から直接下水管に入る

$$Q_2 = R \times (\text{ROAD} \times (1-\beta) + [(1-\text{PIMP}) \times \alpha])$$

表面流 降雨量 道路からの表面流 降雨強度大のときの浸透面からの流出 α , β は定数, $[\]$ は、降雨強度大のときのみ作用する演算子である。

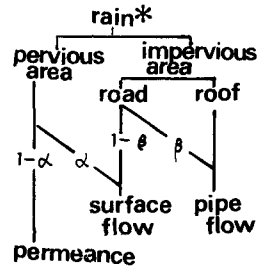
2-4 メッシュの移動方向 下水道計画では、下水の動きを把握するために亀甲図とよばれる流域区分を行う。これは、下水管に流入する地点を末端とする流域区分図で、対象区域全域が亀甲図でおおわれる。メッシュ法では、図-4のように亀甲図をメッシュにおきかえ、亀甲図の末端に相当するメッシュには、マンホールをおく。各メッシュから発生する表面流は、各メッシュから、末端メッシュ迄将棋の王将の動きをしながら最短距離で移動するものとし、末端メッシュのマンホールから下水管に流入するものとする。マンホール迄のメッシュ毎の下水管流は、「表面流と同じ方向に布設された排水管」を通して流れるものとする。

2-5 メッシュ間の移動時間 表面流の流下時間は、カーベイ式 $[t = 1.44 (n \ell / \sqrt{s})^{0.467}]$ t : 流下時間(分) ℓ : 移動距離(m), s : 地表勾配, n : 表面粗度] で与えられる



non permeable area — *

fig-2 Conceptual Model of Land Use



Permeance

*-surface storage is already subtracted

fig-3 two kind of flow

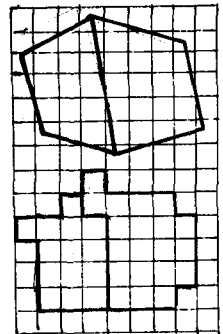


fig-4 modeling of grid

ものとする。表-1はメッシュ間(10m)を流れる時間を、工種毎に求めたものである。この表から、表面流のメッシュ移動時間は3~5分をとればよい事がわかる。下水管流は、1分としている。

2-6 流末ハイドログラフの作製 マンホールのおかれたメッシュに入った雨水は、下水本管に流入し、末端に集まる。このモデルでは、各マンホールから、末端迄の流下時間、 T_i を、下水本管の設計流速から求め、マンホールハイドログラフが、 T_i 時間だけずれた形で、末端に到達するものとしている。そして各マンホールからは、独立に流れこみ、それらを線型結合により末端流量が求められるものとしている。

$$Q(t) = \sum M(I, t - T_i)$$

Q : 末端流量 I : マンホール番号 M : マンホール毎のハイドログラフ t : 時間 T_i : I マンホールから末端迄の流下時間

は、 $t - T_i < 0$ のとき、 $M = 0$ とおく演算子

2-7 メッシュ法適用の準備作業 上記の方法を実際に行う

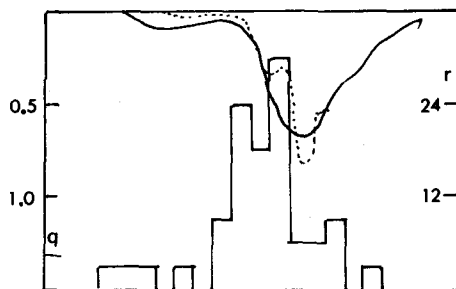
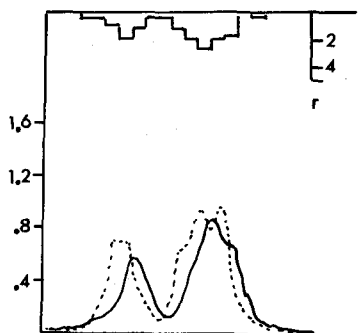
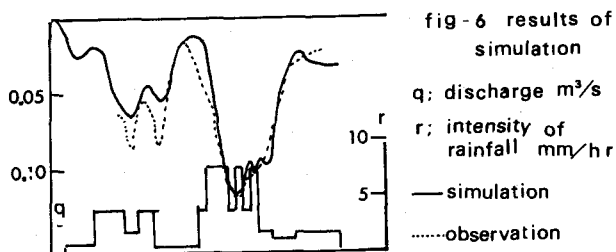
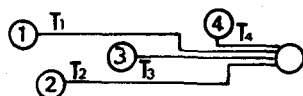
ための作業手順を図5(最終項)に示す。この作業は、50~100haの流域の場合には、30~50時間/人で行なう事が出来る。

3. メッシュ法の適用

3-1 一元流モデル 図6に、一元流モデルのシミュレーション結果を示す。対象とした流域の、諸元および、モデル適用に必要な定表を表-2に示す。

tab-1 passing time of grid by kervey's equation

表土 % A/B/C	不透水面 $\pi=0.02$	よく締った裸地 道 家の周囲 $\pi=0.1$	畑 $\pi=0.2$
2	2.9	6.2	8.5
1.5	3.1	6.6	9.1
1	3.4	7.2	10.0
0.5	4.0	8.5	11.8



Tab-2 Hydraulic Conditions of Experimental Fields

place	drainage area(ha)	travelling time(min)	rate of pavement	number of Mesh	number of manholes
Shakujii	20.4	10	0.39	77x51	155
Sakuradai	29.7	12	0.50	90x68	334
Ooizumi	44.9	16	0.45	89x73	167
Kobe	13.0	8	0.70	94x35	94

3-2 二元流モデル 一元流モデルの改良型であり、二元流モデルと同じ流域に適用してみた。二元流モデルの場合には「仮定しなければならない定数」が増加し、その仮定のとり方により「実測値とシミュレーション」との関係が左右されてしまい「モデルが妥当」なのか「係数修正により数値合わせ」となっているのか、これだけの例では、判断が出来ない。実例をふやしていく事によりはじめてモデルの妥当性が、検証されるものと考えている。

3-3 雨水流出抑制型下水道への適用(1) 雨水流出抑制型下水道とは、東京都下水道局や、住宅都市整備公団で行っている実験的下水道であり、下水道施設として透水性舗装・浸透雨水マス・浸透管(トレンチ)、浸透井、管内貯留、速まわし下水管(在来の下水道は最短距離で下水が流れるように設計されるが、迂回して流れるように設計した下水道)等のユニットプロセスを建設時に総合的に計画したものである。以下に、これらの施設をメッシュ法でどのように記述し、組みこんでいくかを示す。

④透水性舗装： 各メッシュに透水性舗装があるかないかを示す。

(0, 1)の値を入れた新しい行列 NTOSU Iをつくり、透水性舗装がある場合に道路からの流出を、 r %削減させる。

$$Q_3 = R \times \text{ROAD} \times r \times \text{NTOSU I}(I, J)$$

⑤浸透雨水マス： ある時間にメッシュに集まった雨水(隣接したメッシュから流入した雨水に、そのメッシュに直接降った雨の合計量)が、浸透性雨水マスがあれば、その(1- ϵ)%浸透し削減すると考えた。そのために浸透雨水マスがあるかないかを示す(0, 1)行列(MASU)をつくり次式で示した。マスを通った雨水量 Q_4 は、

$$Q_4 = Q_1 \times \epsilon \times \text{MASU}(I, J) \quad \text{で与えられる。}$$

⑥浸透管： 図8に浸透管の構造を示す。浸透管の浸透能は、 $q_0 \text{ m}^2/\text{s}$ とするが、浸透した雨水は、浸透管のまわりの礫層の中の空隙に入り、空隙が水でおきかえられた場合には、それ以上の浸透がないものとする。浸透管を通った雨水量 Q_5 は、

$$Q_5 = \begin{cases} 0 & Q_2 \leq q_0 \\ Q_2 - q_0 & Q_2 > q_0 \text{ 但し } \Sigma(Q_2 - q_0) < V \\ Q_2 & Q_2 > q_0 \text{ かつ } \Sigma(Q_2 - q_0) > V \end{cases}$$

⑦速まわし管： 流下時間を、速まわし管にした場合について求める。

以上の仮定を行って、シミュレーションを行った結果を図-9

に示す。対象流域は、練馬区石神井7丁目であり、実験下水道の施工図と図-10に示しておいた。この実験下水道は1982年10月に竣工したばかりであり、実測流出量の測定は行なわれていないため、実験下水道の雨水流出抑制効果は推定の域を出ていない。

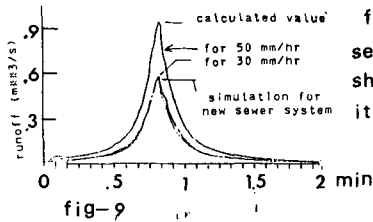


fig-9 experimental sewer system at shakujii and its effects

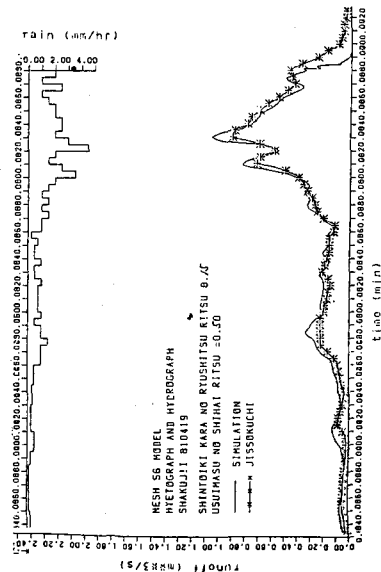


fig-7 case of two kind of flow

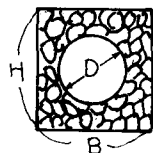


fig-8 trench

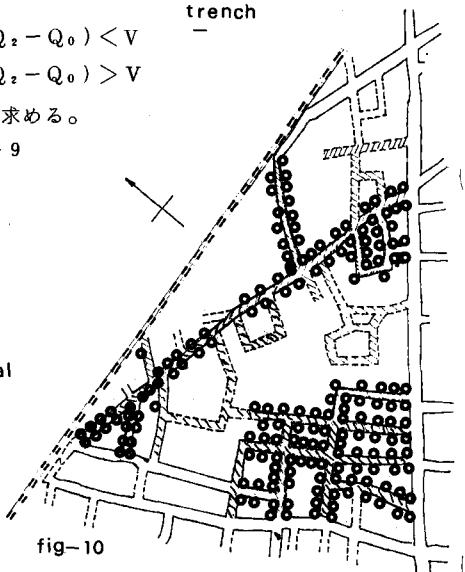


fig-10

3-4 雨水流出抑制下水道(2) 住宅都市整備公団つつじ丘団地(昭島)の実験施設の例を示してみる。

図-11は、その概要図であるが、石神井地区と異なるのは、流域全体が、実験施設となっている。すなわち建物周辺の雨水は、浸透U字管に流入する形となっており、今まで述べてきたような「マス」「マンホール」から下水管への流入がない。そこで、ここでは、モデルを次のように修正して流出量を求めた。

まず流域を右の4つに区分する。次に浸透U字管、雨水マスの有無により流出を3通りに考える。その際、地表流 Q_2 はすべて Δt だけの時間遅れを考える。

○双方ともないとき—地表流は考えない。

$$Q_0 = \text{PRO} + \text{ROAD} + \text{SHIN}(1-r)$$

○ふつうの雨水マスのみあるとき—地表流は下水管流に組入られる。

$$Q_1 = \text{PRO} + \text{ROAD} \times \beta + Q_2$$

$$Q_2 = \text{ROAD}(1-\beta) + \text{SHIN}(1-r)$$

○浸透U字管、浸透性雨水マスのどちらかがあるとき—上記の Q_1 を用いて

$$Q_T = Q_1 \times \epsilon$$

結果を図-12に示した。

{ 屋根 (PRO)
 屋根以外の不透水面 (ROAD)
 人工浸透面 (SHIN)
 自然浸透面 (1 - PIMP)

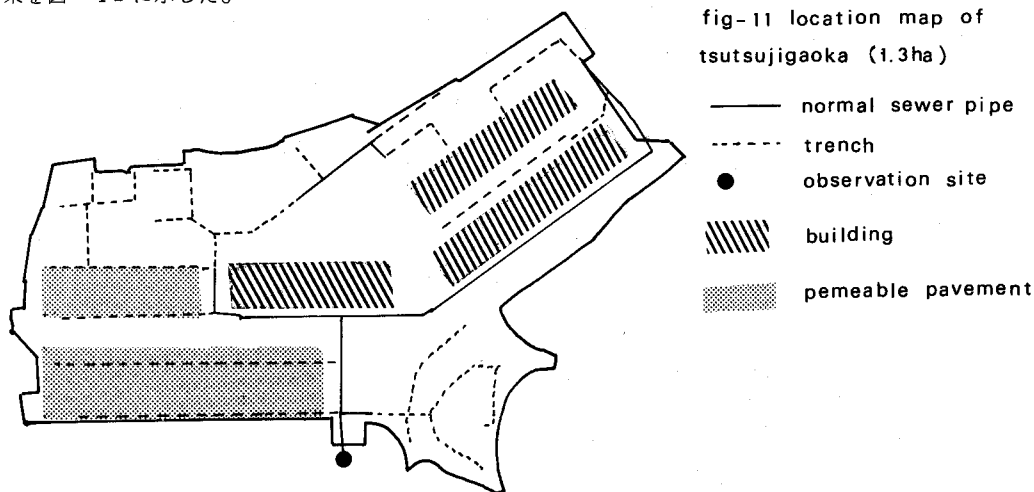


fig-11 location map of tsutsujigaoka (1.3ha)

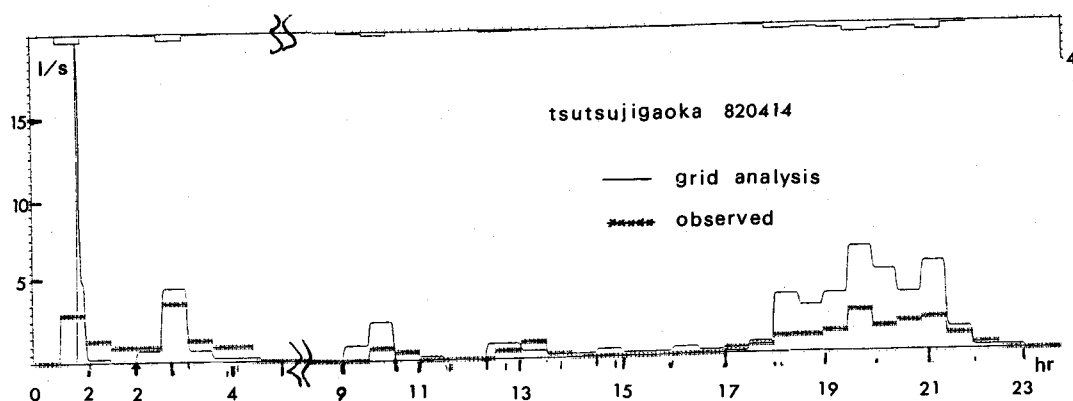


fig-12 comparison with observed and simulated values

4. 今後の課題

メッシュ法は、現象を出来るだけ忠実に記述するものであり「特定のパラメーター」の推定を行わずに、シミュレーションが行なえる利点がある。この事は、定数（二元流でいえば、降雨強度大のときの浸透面からの流出率だけである）を、実験的に求める事が出来れば、すべての流域に、そのままつかう事が出来る事を示すものである。在来の流出解析法の多くが、パラメーターが、流域毎、降雨毎に異なるのときわだった相違を示している。しかしこの手法が、どの程度の流域迄拡大出来るか、もし流域面積に制限があるなら、メッシュの大きさを大きくする事により、この欠点をカバー出来るかが未だあきらかになっていない。今後の課題である。しかし、小流域で様々な雨水流出抑制策の評価を行なう上できわめて有効なモデルと考える。なおここでは、貯留を考えていないが、シミュレーション結果からみるように、推定精度が高く、このモデルに貯留効果を加えなくても、十分実用的と考える。

謝辞 本研究の基礎的情報を提供して載いた東京都水道局・住宅都市整備公団に厚く御礼申し上げます。

なお本研究のプログラム、データベースの作製、本法のモデル構成については、野口猛雄・藤田祐次・柳幸司・三輪 晋君（いずれも東京大学 都市工学科 卒業生）の手によるものであり、本稿はそれらの成果をとりまとめたものである事を付記しておく。

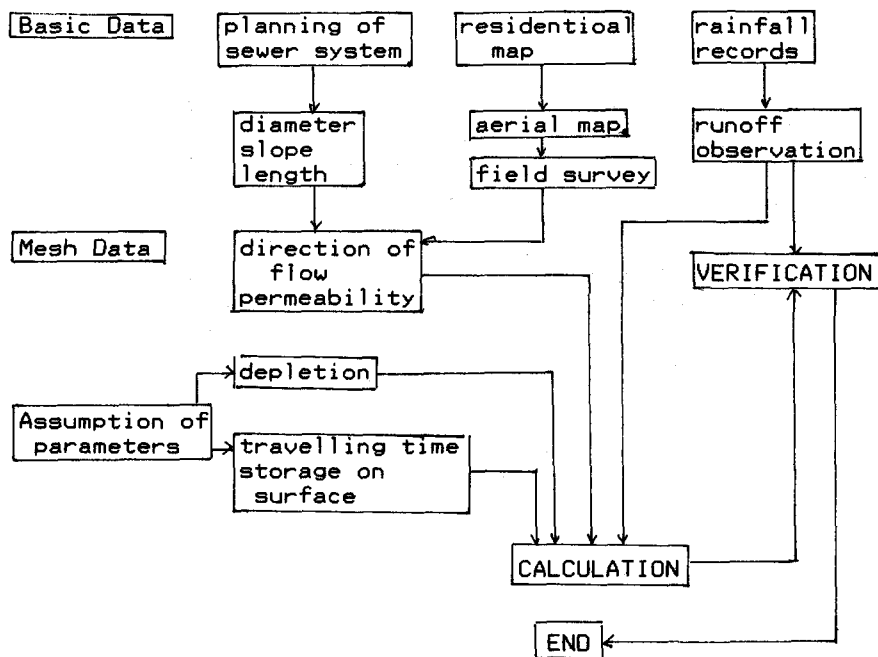


fig- 5 Working Procedures of Grid Analysis

参考文献

- 1) 市川他：雨水時の汚濁流出負荷モデルに関する考察，第9回環境問題シンポジウム講演論文集，1981
- 2) 東京都下水道局第二建設事務所他：雨水抑制型下水道とメッシュ法による雨水流出抑制効果の評価，1982
- 3) 市川他：雨水流出抑制とその評価のための流出解析法の提案，東京大学工学部総合試験所年報 第41巻，1982