

雨水時の汚水流出負荷モデルに関する考察

東京大学工学部

正員 市川 新

日本火災

藤田 祐治

北陸電力

野口 猛雄

1. 研究の目的

土木事業のみならず、1つの事業はある目的をもって行なわれるが、同時に他に影響を与える。新規取水の場合は、他の水利利用者に影響を与えるため、水利権者の合意がなければ、新規事業は行えない事になっている。しかし、影響の与える対象が、環境・自然・生態系という、一般的な形で、直接利害者が特定出来ない場合には、その合意を確認される事になる。事業が進められる場合が多い。その欠点と補う手段の1つが、環境アセスメント・環境影響評価といわれるもので、その手法の確立・法制化に努力がはらわれている。

環境の利害者が特定しにくく、という理由の他に、影響の与える範囲が広く、かつその影響を正しく予測する事が困難な事も、従来環境影響評価が十分に行なわれなかった理由の1つである。本研究では下水道事業と例にとり上げて、その影響を正しく予測するための考え方を提案したい。

下水道事業の目的は、大別すると、生活環境の改善、排水状況の改善、水質保全であるが、それらの目的になるものであるならば、事業は是とみなされてもよい。しかし下水道普及が、広範囲に及ぶと、下水道整備地区の環境が改善されても、下水道放流先の下流部に重大な影響を与えるケースが、出はじめている。具体的に言えば、下水計画では、降雨強度 50 mm/h の降雨を対象にして、下水管を設計するが、排出先の河川にそれと、呑み込むだけの容量がない場合がある。下水道整備地域の面積が小さければ、このような影響は少なく、それほど問題とはならないが、上流部のほとんどの地域で下水道が整備されると、下流の治水に重大な影響を与えるようになる。これに対する対策としては、下流部の河川容量を大きくするか、下水道サイドで、最大流出量を抑えるか、現存総合治水事業といわれている各種の事業——雨水貯水地、各戸貯留等——を行うか、下水道整備をよくらせるかの方法を、単独ないし組み合わせで行なっていくかなければならない。その組合せなり事業を決定するためには、下水道整備後の雨水流出量の予測、その対策を行なった場合の雨水流出量の予測を正しく行なわなければならない。

2. 雨水流出量の予測法の現状

雨水流出量の予測法は、河川、下水道サイドで研究が行なわれてきたが、その主要な目的の1つとして、最大流出量の推定があげられていた。しかし上記に示したような、目的に合致させるためには、最大流出量のみでなく、ハイドログラフをあらわにする必要がある。ハイドログラフの決定法と大別すると、(1) 伝達関数を用いるもの、(2) 雨水追跡を行う方法、(3) 統計的手法となろう。以下に、各法を概略する。

(1) 伝達関数法。この方法と数学的に表現すると、

$$y(x) = \int_0^{\infty} r(\tau) \cdot k(x-\tau) d\tau$$

ここに y : 流出量 r : 降雨(有効降雨)で、 x は時間と示す。この $k(\tau)$ が伝達関数といわれるものである。この式は、一般的には、積分方程式といわれ、数学的(解析的)に解くことが可能であるが、その解がえられる場合は、きわめてまれである。まして (y, r) という関数が、雨水を取り扱うときに、数学的に解く事は、事実上不可能である。そこで、実際の降雨から伝達関数を求める方法が開発されている。1つが、ユニットハイドログラフで、1つが情報理論の応用である。前者は、回式法ともいえるものである。

いずれの方法にせよ、降雨(有効降雨)と流出量の関係と求めるものであるが、現象が1対1に対応するものでないため、この方法は、理論的に成り立っていても、実用上はきわめて限定されたものとならざるをえない。そこ

で、流域を全体でとらえていくか、又は、1つの降雨に対する伝達関数ととめて、その降雨のシミュレーションを行う場合に各々ah, Shermann が提案したように、すべての降雨(有効降雨)に適用出来るような、
「能率的な伝達関数(ユニットハイドログラフ)」は求めらぬ。

もう1つのアプローチは、タンクモデルである。(17)の関数形を「タンク」とし、穴の大きさを変数としたり(タンクを積み重ねる事により、現象に含める方法である。伝達関数は、理論的には任意の形ととりうるが、モデルを簡単にし、かつ、その組合せ方により、(17)式の積分方程式の一般解の1つと、含める事が出来るモデルと作製した所に、この手法の独創性がある。

(2) 雨水追跡法: 伝達関数法は、流域全体を7口に1つの系として考える場合の方が、適用性がよいといわれており、下水道計画の対象となるような(ハクテール単位)流域では、流域の特殊性が出て(ま)、実際には利用しにくい。そこで、下水道計画にあつた手法として、雨水追跡法が考えられ、広く用いられている。この手法は、降水(有効降雨)を追跡していく事により、流域全体の流出量を求めるものであり、原理的には、簡単なつみ重ねの原理のみから出来ている。この方法の中には、合理式も含まれる。合理式は、最大流出量を求めるもので、雨水追跡法の原理と利用し、降雨継続時間を、降雨到達時間に等しくし、かつその間一様に降るものとして、その時に最大流出量になるという仮説を用いている。この仮説が正しいか、又、実際そのような仮説が実現するかの議論はあるが、流域からの「最大流出量の可能性」としてこの値と設計値に採用する場合には、このモデルは、簡単でかつ便利なものである。そのため、この手法は、河川においても利用されている。

雨水追跡法を用いて、ハイドログラフをかくものとして、RRL法がある。これは、英国の道路研究所が、提案したものである。その手法は、(A)有効降雨量と推定、(B)等到達時間とをえかく、(C)AとBを用いて、流入ハイドログラフとを定める。(D)下水管内の貯留を考慮して、流出ハイドログラフを求める。(E)では、通常地表面から、下水管へ入る「流入時間」は無視し、下水管内の流下時間のみを考え、5分間隔で、画かれている。これは多くの降雨データが5分単位で示されているためと考えられる。

(A)の有効降雨と推定するというのは、雨水流出推定法すべてにとって、ブラックボックスとなっている。水文学の研究の多くが、この点に集中しているが、降雨毎、地域毎に異なっており、決定的なものはない。モデルはなるべく簡単で、物理的にも説明(やすい)もので、RRL法では、有効降雨と次式で示している。

$$\text{有効降雨} = \text{降水量} \times \text{不滲透面積率} \quad (1)$$

すなわち、地表面の不滲透地域に降った降雨が、滲透し、地下水となるが、舗装面等の滲透しない地表面に降った降雨が、流出してくるものと考えている。そのため、不滲透面積率は、舗装率でかきあらわすことがある。一般に用いられているRRL法においては、不滲透面積を、流域全体として考えているが、流入ハイドログラフを考える場合には、等到達時間毎に、考える必要があると思われる。

(C)の流入ハイドログラフとは、末端において、有効降雨が、流下時間のおくれを考慮して、一次結合で示されるものといっている。式でかくと、

$$\text{流入ハイドログラフ}(x) = \sum_{i=1}^x A(x+1-i) \cdot r(L) \quad (2)$$

$A(x+1-i)$ は、等到達時間毎の面積、 $r(x)$ は有効降雨である。

(D)の貯留は、ここで求めた、流入ハイドログラフが、実際の流出ハイドログラフと一致しない、滞りから導入されたものである。実際にも、河道貯留、管内貯留という現象があり、これと計算プロセスに入らなければならぬ。しかし、向上させたRRL法のプロセスとみると、物理的な貯留現象だけでなく、仮説から生ずる貯留を、すべて、まとめて「貯留」として、記述しているように思われる。図-1に、雨水のフローを示すが、RRL法では

図-1 雨水のフロー

雨水 → 有効降雨 → マンホール等からの流入 → (下水管) → 末端
(不滲透) (地表面流出) (管内貯留)

地表面流出とはほとんど無視している。地表面流出は下水道計画では流入時間といつ、5~10分とと

たり。カーベイ式を用いて算定している場合がある。そのため、RRL法では地表面流出E、下水管のみ、きめて早いものと仮定しており、その仮定の補償のような形で貯留を考えているともいえる。そうみると、この貯留というのは、流入ハイドログラフを、流出ハイドログラフに合わせるための一つのブラックボックスともいえる。このような考えに対し、Priceは、有効降雨と流入ハイドログラフの間に貯留効果と考へ、各マンホール毎の流入ハイドログラフの時間のずれを考慮した合計値と流出ハイドログラフとしている。数式でかくと、

$$I_j(t) = \sum I_j(t - L(j)) \quad (3)$$

$I_j(t)$ は、j番目のマンホールの流入ハイドログラフで、 $L(j)$ は、jマンホールから末端迄の流下時間と示す。

(3) 統計法：雨水から流出量と求めるのに多くのブラックボックスがあり、かつそのブラックボックスが同じ形をしていないので、降雨毎に、さらに降雨継続中にも変化している半が指摘されている。そのため、このメカニズムと物理モデルで記述する事は困難であるので、統計モデルで示そうという研究が行なわれている。その手法は数多くあるが、市川、池田によるGMDFH法を紹介しておく。

雨水流出量と決定する因子を適当にえらび、その中からあらかじめ指定した因子数(N)の組合せによる関数形で雨水流出量と記述しようとするものである。例えば因子として、当日の雨量、前日の雨量、流量、前々日の雨量、流量……という形でnコ考えたと($n > N$)とすると、 nCN コの組合せが出来る。Nコの因子で、任意の関数形(例えば $y = \sum a_{ij} x_i x_j$, $y = \sum a_{ij} x_i x_j$)をとるものとすると、最低限、N組のデータ群があると、これらの関数形の係数と決定する事が出来る。その中の1つが、任意関数(1次式)ともいえる。実際には、Nコのデータよりも、 m ($m > N$)群のデータから、最小2乗法により、係数群と決定してもよい。もしこの係数群と一定とするなら、これは、物理モデルといえなくもないが、対象とする降雨データの前のm群のデータでモデルと構築し、予測と行なう。その予測値も含めた、新しいm群のデータで、次の流出量と予測していくという、乗構造のモデルととるのが、GMDFH法である。すなわち、常に対象とする降雨の前の、m群のデータによりモデルを作るため、雨水流出のメカニズムの時間的変化を追跡する事が出来る所にその特徴がある。

3. 新しいモデル—メッシュ法—の提案

在来法においても、基本的な考え方は、物理現象と正しく反映しているとしても、実際の数値化に対しては、多くの仮説ともうけねばならず、その仮説の検証は十分に行なわれていないのが、実態ではなみうろか。その仮説そのものが一つのブラックボックスとなっている。その理由としては、降雨量と流量の観測値が少なく、又観測されても、物理現象をいし仮説を解析するのに必要な精度で観測網がくみ込まれていない事による。

本研究では、東京都下水道局、建設省土木研究所が、雨水流出の解析のために観測したデータを用いて、新しいモデルを提案したい。計算法に基づき、これをメッシュ法と名づける。

メッシュ法は、雨水追跡型であり、流域にメッシュをかける。メッシュの大きさは、適当であるが、本研究では、 $10m \times 10m$ のメッシュとした。その理由は、基本的な単位である事、東京周辺では、家一軒分の面積の単位に近い事、航空写真や詳細地図(1600~2500分1)に対して、解読可能である事による。在来このように流域を分割と小さく出来るから、理由の1つが、計算の手間が大変だった事があづかると思うが、最近大型計算機の発達により、流域細分化と行っても、雨水の追跡が可能となっている。メッシュ法におけるいくつかの仮説と次に示す。

(i) 流域の区分: $10m \times 10m$ のメッシュに分割する

(ii) 有効降雨: 現在の所、降水量に不浸透率をかけたものを有効降雨とする。今後詳細に検討する必要がある。

(iii) 不浸透率: メッシュ毎に屋根、道路、舗装面等と、航空写真、住宅地図、現地視察を行ない、決定する。本研究では、単純化のために、20%をさみで不浸透率と求めた。そのため、住宅地図(航空写真と解読したも

の)で、十分間に含めざる事がある。

iii)メッシュ間の雨水の移動: メッシュ内に降った雨は、透透部を除いて、表面流出と行うものとする。有効降雨は、メッシュのまわりのメッシュ8個のうち、どれか1つに流出するものとする。図で示すように、将棋の王の動きと同じようにする。移動方向と定めるのには、下水道計画策定の際に与えられる、管甲図とメッシュにおおきえ、各マンホールに流入するものとする。

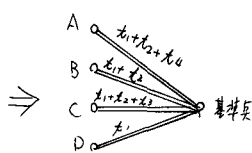
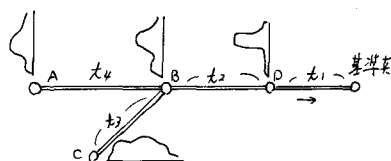


iv)メッシュ間の移動速度: 地表面の移動速度は、カーベイ式を用いるものとする。基本的には $t = 4.22 (\pi/\delta)^{0.467}$ (ただし、メッシュ間10mを移動するのに必要な時間分); π : シュの移動地表面の粗度, δ : 平均勾配) である。ここでは、流域全体で、1つの移動時間として計算を行っている。

v)マンホールの位置: 基本的には、下水道配置図で示されているマンホールの所在するメッシュはマンホール位置とし、ここから下水管に流入するものとした。但し、場合によっては、途中でマンホール(具体的には雨水マスとなる)を設けたこともある。

vi)マンホール流入ハイドログラフの決定: 各マンホール毎に流入ハイドログラフを作成する。降雨データを、メッシュの移動時間単位の降水量に換算する。図2の例で、OのメッシュはAに流れるものとする。Oに(T, T+t) 時間に降った雨が、Aに流れ込み、(T+t, T+2t)時間に降った雨と重ね合わせ、次のメッシュに流れるものとする。このようにして追跡された雨水は、いづれかのマンホールに流入する事になる。

vii)下水管内の流れ: 下水管においては、その管径・勾配により満管時の平均流速が与えられている。この満管時の流速を用いて、「基本的」な各マンホールから、末端の調査地点迄の流下時間と求める。これは、下水管



毎に行う。図3に示すように、実際の下水管配置図は左図であるが、右図のように置きかえて、計算と行う。すなわち、各マンホールからの流下時間のけおくれた所で、マンホール毎の流入ハイドログラフが位置せざる事とする。この時、計算された流量と満管時の流量の比から、水理特性曲線と用いて、真の流下時間と計算して、ハイドログラフの合成を行う。

図3. 下水管内の流れの模式図 (ただし、正相流下時間)

viii)流出ハイドログラフの決定: マンホール毎の流入ハイドログラフと $I_i(x)$, マンホールから基準地点の流下時間と T_i (図の場合 $T_A = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$) とすると、基準点(末端)での流出ハイドログラフ $Y(x)$ は次式で与えられる。

$$Y(x) = \sum I_i(x - T_i); \quad \text{但し } I_i(x) = 0 \quad x < 0 \quad \text{とす。}$$

すなわち、本法では、下水管内の貯留と考慮していない。

4. メッシュ法の従来法との比較

メッシュ法の特徴と示すために、表1に従来法との比較を行った。Price法というのは、英国で最近開発されたものである。この方法も、マンホール毎の流入ハイドログラフの作成に重点をおいているが、マンホール支配面積と一つのブロックとして考えている所が、メッシュ法との差である。もし、マンホール毎の流入ハイドログラフを正しく与えられれば、それと重ね合わせることにより、流出ハイドログラフを描けるものと考えられている。

	有効降雨	表面流出	下水管内
R. R. L 法	不考慮	直ちに下水管に流入する	貯留関数による追跡
Price 法	溜り度係数	貯留関数による追跡	重ね合わせ法
メッシュ法	不考慮	メッシュ間とカーベイ式で追跡	重ね合わせ法

表1. メッシュ法と従来法の比較

る。

表2 メッシュ法検証、流域の概況

	流域面積	舗装率	平均勾配	用地地味
石神井川	20.0 ^{ha}	0.39	4%	住宅
神戸花隈	13.0	0.83	45	商業住宅
石神井川	109.0	0.40	3.4	住宅

5. メッシュ法 検証とその考察

メッシュ法が有効であるか、どうかは、実測流量とどの程度再現出来るかによる。本研究では表2に示

した流域において、実測流量とシミュレーション結果の検討を行った。その結果を図4～6に示す。この図とどの様に解釈するかは、議論のある所であるが、ここでは一般的な傾向とをべておくことにする。

i) 全体としては、実測流量とうまく再現出来ているといえる。

ii) ピーク流量は、10～15%の範囲内にあるといえる。実測流量といつても、その測定精度はむづかしいので、この程度ピーク流量が合致すれば、モデルとしては、十分実態とあらわしているといえよう。

iii) ピーク発生時間、全体的に10～15分程度シミュレーション結果がおくれている事がある。既に述べているように、下水管内に貯留と考えているので、もし管内貯留と考慮するとその分だけピークがおくかき事になると思われれるが、貯留と考慮せずに、このようなおくかが生じている事は、マンホール毎の流入ハイドログラフが、正しく求められれば、下水管内に種々合算のみで十分現象を説明出来る事と示すものと考えられる。

iv) ピーク流量のずれ、iii)で、ピーク流量はおおむね実測値に近い事と述べたが、よくみると、大きな差が生じている降雨例がある。それは、先行降雨がある場合とか、降雨継続時間が長く、初期の降雨強度が小さく、数時間後に大きなピークが発生している場合には、実測流量が、シミュレーション値と40～80%上回っている。とくに、石神井川の48年6月24日の場合の実測流量は、合致式でいうと、流出係数1に相当するもので、他の例からみると非常に大きな値である。この日の前に降雨があり、降水全部が流出したといふ考えられぬ。石神井でも、降雨の日に有初降雨が変化して考えざるをえないケースもあった。

以上の考察とふまえて今後検討すべき課題と記しておく。

①有初降雨の定量化：これを行うためには、マンホール毎の流出量を求めなければならない。英国ではガリーメ-7-7-1といって、マンホール流入量の測定を行っているが、そのような測定とつらぬかき事により、降雨継続時間内の流出量の変化もあらわにする必要がある。

②管内貯留の定量化：管内貯留現象はたしかに存在するので、これとメッシュ法内に組みこまねばならない。

③本法の規模化とその可能性：メッシュ法を行なう場合、労力のつくのは、メッシュの流路方向と舗装率を定める事である。これを軽減するためには、マンホール毎の流入ハイドログラフと、支配面積とその形状、舗装率等で、規格化することであろう。規格化の可能性を検討する必要がある。

6. メッシュ法の応用

メッシュ法の有効性の検証は、今後多くの事例とふまえていなければならないが、本法を用いて、流域が変化した場合の流出量の変化を示してみようとする。流域の改変と次のケースで取り上げてみた。

i) 舗装率の低下：舗装率を下げるためには、~~無舗装~~雨水、山溝等から流産と容易にするような工事を行なわせる事により可能となる。メッシュ法の説明により、これを小さくすれば有初降雨がそれだけ小さくなるので、流量低下の対策としては有効である。実際には、流量低下に伴って、流速も低下するので、有初降雨以上の削減効果がある。

ii) 流下時間を大きくする：対策としては、下水管径を大、勾配を小さくする方法、下水管と下流に比べて最近距離で埋設するのでなく、迂回させて、出来るだけ流下時間とおくする方法が考えられる。現在、下水管の流下時間と約2倍にすると、15%ピーク量と削減出来る結果がえられている。

iii) 雨天時汚染物の流出量の増大：ここでは示さなかったが、下水管、地表面の堆積状況とちえてやれば、雨天

時の汚濁物の流出ボリュームグラフの作成が可能となる。しかし今の所、堆積量に関するデータが少ないので、メッシュ法による予測法の効果と推論するには至っていない。

表3に 各種対策のピーク流量の変化を示しておく

- ・参考文献
- ・土木研究所下水道研究室 資料 1487. (1979)
- ・東京都下水道局: 谷端川・尾久・林園川 関連水文資料 (1979)
- ・市川新・池田三郎 土木学会論文報告集 no. 246 (1976)
- ・Price: 2nd Inter. Conf. on Urban Storm Drainage (1981)

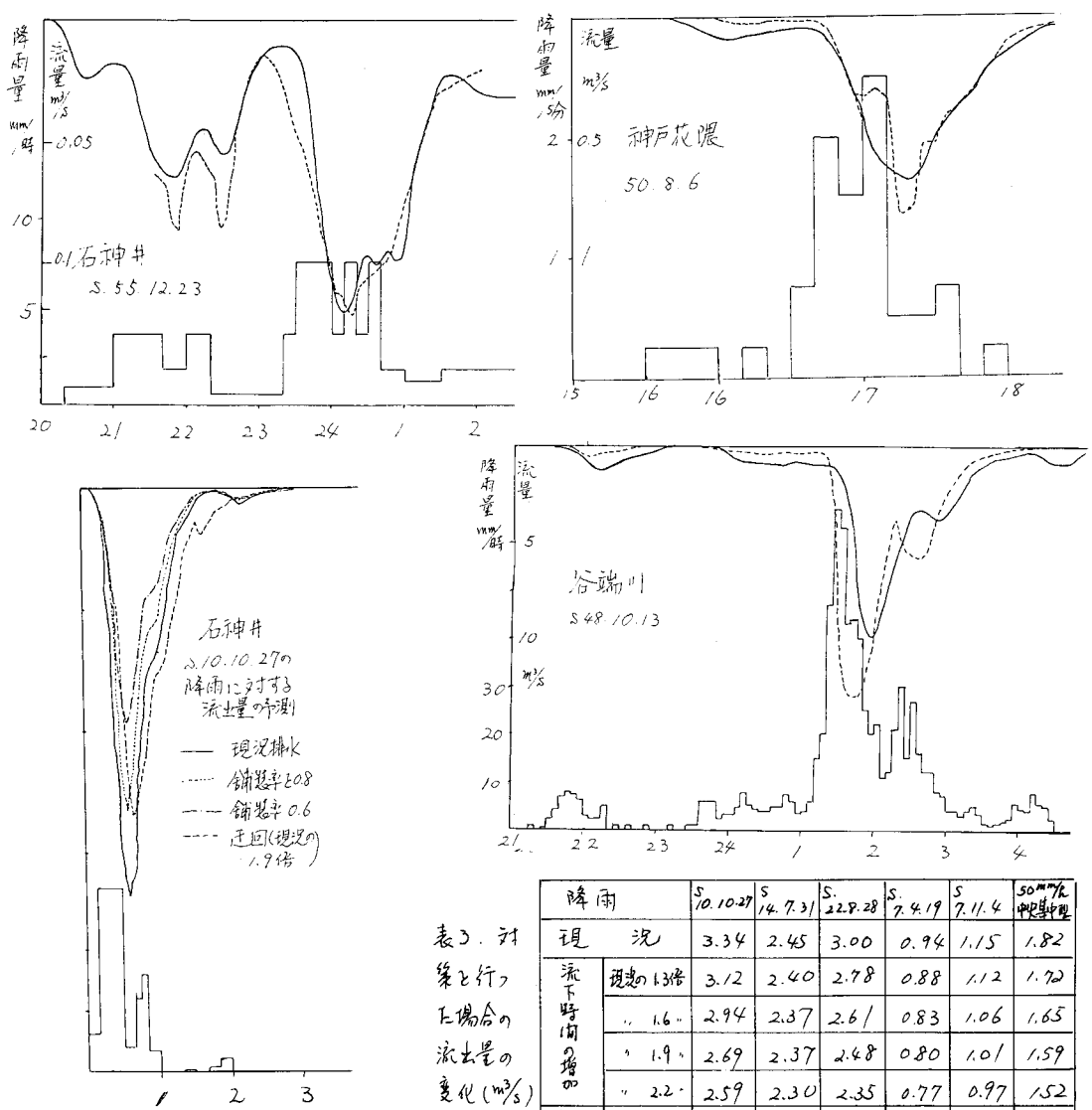


表3. 対策と行った場合の流出量の変化 (m³/s)

降雨	S.10.10.27	S.14.7.31	S.22.8.28	S.7.4.19	S.7.11.4	50mm/h 中央処理
現況	3.34	2.45	3.00	0.94	1.15	1.82
流下時間の増	現況の1.3倍	3.12	2.40	2.78	0.88	1.12
	" 1.6 "	2.94	2.37	2.61	0.83	1.06
	" 1.9 "	2.69	2.37	2.48	0.80	1.01
	" 2.2 "	2.59	2.30	2.35	0.77	0.97
鋪設率の変化	現況の0.8倍	2.67	1.95	2.37	0.75	0.92
	0.6倍	1.97	1.46	1.75	0.56	0.68