

メッシュ法の都市河川流域への適用-その手法と実際

The application of Grid Analysis to urban
river basin-its method and case study

東京大学工学部 学生員 榊 原 隆
東京大学工学部 正 員 市 川 新
東京大学工学部 大 口 豊

1. 研究の目的

筆者らは、都市域における新しい流出解析法として、流域に10mメッシュをかけ、雨水をメッシュ毎に追跡する「メッシュ法」を提案し、その成果を発表してきたが、これまでに手がけた流域は数十haという小さなものであった。このメッシュ法(旧モデルと呼ぶ)を河川流域に適用できるように改良した(これを新モデルと呼ぶ)。本研究では新モデルの考え方を紹介し、これを用いて対象河川である石神井川流域(下流の一部を除く約50km²)に属する下石神井試験地(東京都練馬区、20ha)と、桜台試験地(同、30ha)における流量シミュレーションと実測値との比較を行い、新モデルの全流域への適用に際する問題点を考えることを目的とする。

2. モデルの基本概念

新しいモデルの基本的考え方および仮定は次の通りである。

- (1) 対象は都市域とする。
- (2) 雨水は地表面の性状に応じて、一部浸透するが浸透した雨水は解析期間後に河川に流出する。すなわち、浸透した雨水は「損失」と考える。
- (3) 浸透しきれない雨水は地表面を流れ、下水管を通り、吐口より河川に流入する。
- (4) 地表面での雨水の動きを、出来るだけ忠実に追跡する。
- (5) 下水管の中の雨水の動きは「線型結合」で表現されるものとする。
- (6) 各吐口から流出する雨水は、河道において不定流計算を行ない、各断面における流量を求める。

今、流域を50km²とすると、あつかうメッシュ数は、各メッシュに5種類のデータが必要なので、総計250万個となり、人力のみで処理をするのは不可能である。よってデジタイザー、大容量の計算機を駆使し、煩雑な作業や計算は機械力に頼る方針をとっている。

3. 基本的概念を採用した根拠と河川流域への適用-モデルの記述

(1) 都市部における流出解析の意義と目的

東京においては、昭和33年狩野川台風により都内中小河川が氾濫したのが、都市型水害のはしりと言われているが、それまでの大河川で発生していた水害と様相が異なり、「浸水(Inundation)」と呼ばれている。洪水と浸水の明確な区分はむづかしいが、一般的には、継続時間が短かく、かつ浸水高が小さい水害を浸水と定義する。この浸水が発生する理由として、都市域における地表面の舗装化・建物の建設による屋根面積の増加が、雨水流出の集中をもたらし、ピーク流量の増加をひき起こしている事が挙げられている。雨水排除をその主要な対象としている下水道も、その建設の目標が「如何に早く雨水を排除するか」であり、このことが上記の雨水集中により拍車をかけることとなっている。

このような状態を解決するために、河川サイドでは総合治水事業を、下水道サイドでは雨水流出抑制型下水道が、それぞれ提案され、現在実験の段階をへて大幅に採用されつつある。この新しい治水事業で採用されているユニットプロセス(透水性舗装・トレンチ・浸透性雨水マス)は、雨水流出量そのものを減少させ

かつ雨水流出を遅らせる効果をもつが、その効果を定量的に記述する方法は、今のところ確立されていない。特に流域全体にこれらユニットプロセスを組込んだとき、それを評価するモデルは開発されていない。

このような状況下で、都市域の流出を解析するモデルでは、雨水流出抑制施設の評価が可能でなければならない。本研究で提案するモデル「メッシュ法」はこの目的を達成できるように設計されている。

(2) 地表面における雨水損失

地表面に降った雨水は、地表面の構造に応じて一部浸透し、残余が表面流として下方に流れる。斜面においては、浸透した雨水が再び地表面に出る事もあるが、都市域においては、地表面の勾配が小さい事と、地表流による雨水流出の時間が短いため、一度浸透した雨水が地表流となり流出に寄与したとしてもピーク流量にはあまり影響しないと仮定した。そこで浸透した雨水は損失したものとする。また、流出率を次のように定義する。

$$\text{流出率} = (\text{全降雨量} - \text{損失量}) / \text{全降雨量}$$

地表面の構造は多様であるが、ここでは地表面を浸透面と不浸透面に二分する。それぞれの構成要素は次の通りである。

「— 浸透面・・・土・砂利・草地・林
地表面 ———— 不浸透面・・・舗装道路・駐車場・屋根
 グラウンド

浸透面に降った雨水は、すべて浸透するものと仮定する。一方、不浸透面に降った雨水はすべて地表流として流出するものとする。

この仮説を実際の流域に適用するために、地表面を上記のカテゴリーに分類する。現在市販されている、縮尺1500から2000分の1の住宅地図を使えば、上記の構成要素への分類が可能であり、それを基に浸透、不浸透の面積の比を求める事が可能である。すなわち、1つのブロックの中の不浸透面積の比率を求めることができる。これが上で定義した流出率となる。

対象とする流域が比較的小さい場合（例えば50～100ha以下）には、上述の手法を用いる事も可能であるが、1平方キロ以上の河川流域を対象とする場合には、データの作成に多大の労力を要し、実務的に不可能となることが多い。しかし、最近国土地理院が東京を中心として、10メートルメッシュを単位とした「土地利用細密情報」を磁気テープの形で公表し、行政官庁や教育機関に貸与するシステムを完成させたので、これを地表面の構造決定のための資料として用いる事が可能となった。この資料では、土地利用を表-1に示すように16に分類している。各メッシュを1つの土地利用形態で表現しているところが旧モデルのデータと異なるが、各土地利用に応じて流出率を与えてやる事により、実際の流出過程に近いモデルを作ることが可能である。そのためには、各々の土地利用に対して、浸透能を測定しなければならないが、ここでは、第一近似として表-1の中に示したような流出率を仮定した。

(3) 地表流の流れ方向

あるブロックに降った雨水のうち、浸透しきれなかった雨水は地表面を流れて、雨水マスから下水管に流入する。それ故雨水の地表面の動きを、規定してやらねばならない。一般的に、下水道計画では、亀甲図と言って下水の流入する範囲を示す「小流域図」が作成される。旧モデルでは1つの亀甲図に対し雨水の流入する雨水マス（マンホール）を割りあて、そのマンホールに最短距離を通して雨水が流入するものと考えた。はじめに亀甲図をメッシュに置換え、次に各メッシュに流れ方向を与える。その与えかたは、将棋の王将と同様、中心から八方に移動可能とし、最短距離でマンホールの存在するメッシュ（マンホールメッシュ）に流入させる。しかしこの手法は、対象区域が小さい場合のみ可能であり、大流域では手作業では不可能である。そこで新モデルでは、これに代わる方法として、マンホール位置を与え、そこから流れ方向を自動発生させるシステムをとっている。以下にそのプロセスを示す。

マンホールの番号を下流側から順に1, 2, 3, . . . とつける。各マンホールを通る対角線上のメッシュの流れ方向はその線上と一致させる。一方対角線に挟まれたメッシュについては、マンホールに向って、上下または横方向とする。第1順目として、1番のマンホールの周辺の8メッシュについて方向を定め、次に2番のマンホールの周辺の方向を定める。全てのマンホールについて方向が定めれば、第2順として、再び1番のマンホールから初めて、今定めたメッシュの1つ外側の周りのメッシュ群の流れ方向を定める。これを、第3順、第4順. . . と繰返し行っていく。そして、一度流れ方向が定めれば、それを優先させる事とする。すなわち下流の支配を優先させている事となる。

(4) 地表面における雨水の動き

1つのメッシュの上に降った雨水は、大きなバケツに貯えられ、(3)で示した方向に位置するメッシュに移動する。上流から移動してきたバケツの中の雨水は、移動先のメッシュ上に降った雨水と合わさり、次のメッシュに移動して行く。そしてマンホールの存在するメッシュ(マンホールメッシュと名付ける)から、下水管に流入するものとする。雨水の移動速度は、「メッシュ間移動速度」と呼び、このモデルにおける重要なパラメーターの1つである。

この考え方は、原理的なものであるが、実際の雨水の流れを考えると、例えば屋根に降った雨水は、樋を通して宅地内の排水管に入り、雨水マスを通して下水管に流入する。そこで修正モデルとして、不浸透面を屋根と道路の2つに分け、前者の屋根に降った雨水は「排水管流」となって、下水管に流入するものとする。排水管流の流れ方向は地表流のそれと同じとし、メッシュ間移動時間を地表流のそれと異なる値とする。そして後者の道路に降った雨水が地表流となって、上に述べたモデルで下水管に流入するものとする。このような修正モデルを、二元流と定義する。

このような二元流を導入する利点としては、家庭の庭先など、雨水がマンホールメッシュに流入するまでの経路に、浸透性雨水マスやトレンチが設置されている場合に、それらによる雨水の浸透や貯留をモデルに容易に組込めるところにある。新モデルでは、土地利用毎に、屋根と道路の割合を定めてやれば、二元流の導入ができる。

(5) 下水管内の雨水の動き

雨水は、マンホールメッシュから下水管に入るが、そのハイドログラフを「インフローハイドログラフ」と名づける。すなわち、インフローハイドログラフはマンホールメッシュの数だけ出来る。二元流の場合は表面流と排水管流を加え合せたものがインフローハイドログラフとなる。このインフローハイドログラフから、河川に流入する吐口地点のハイドログラフを推定するために、新旧両モデルとも、「インフローハイドログラフを線型結合」することとしている。すなわち、各マンホールメッシュから吐口までの流下時間を予め求めておき、その時間だけずらせて加え合わせる。

下水管の設計流速は、下流に行くに従い大きくなるが、その変動幅は小さい。また、下流部で流量が増加するがその変動に対しては、断面を大きくすることによって対応する事となっているので、下水管内流速は一定と仮定して、流下時間を求めた。さらに吐口毎の流域面積が小さく、流入マンホールから吐口までの距離が小さいので、下水管内の貯留効果は無視した。

4. 資料と作業

(1) 雨水吐口図

石神井川流域の大谷口地点より上流の下水管吐口(合計118)について、それぞれの流域図を作成する。これは2500分の1の地形図を、できるだけ流域単位にまとまるように貼り合わせたもので、A0版で全26枚となった。区部については、東京都下水道局作成のものを利用した。市部については、各市の下水道課所有の排水管図を写しとり、それを基に独自に作成した。次にこの流域図に、下水管とマンホール位置を記入し、マンホール番号を下流側からつけていった。一方この地図で基準点(学校、役所等の、輪郭のは

っきりした恒久的建物の角)を3~6点とり、その地球上の座標(平面直角座標IX系, X_0 , Y_0)を、求めた。

(2) 座標点の入力

デジタイザー(MUTOH ID SEREIS)とそれを利用するソフト(浅見泰司氏(東大都市工大学院)作成)を用いる。タブレットに地図を貼り、任意の点にカーソルを合わせ、ボタンを押せば、その点のタブレット上の座標位置(X_M , Y_M)が、0.1mmの精度で入力され、同時に東大大型計算機センターのファイルに記録される。

はじめに、(1)で同定した基準点を入力する。これは、以下に入力する座標値を、後に、地球上の座標(X_E , Y_E)に変換するのに必要である。次に、 n 多角形に近似した流域界の頂点の位置を入力する。最後に、マンホール位置と、そのマンホール番号、そしてそのマンホールのすぐ下流側のマンホールの番号を入力する。

(3) 座標変換と図形出力

以下の操作は全て大型計算機に実行させる。

(2)で入力した座標値(X_M , Y_M)を、地球上の座標(X_E , Y_E)に変換する。変換式を、式-1、式-2に示す。

$$X_E = X + ((X_M - X_0) * \cos(H) - (Y_M - Y_0) * \sin(H)) * \alpha \quad \text{---- (1)}$$

$$Y_E = Y + ((X_M - X_0) * \sin(H) + (Y_M - Y_0) * \cos(H)) * \alpha \quad \text{---- (2)}$$

X , Y は、本研究で指定した地球上の特定地点の座標、 α は縮尺、 H は回転角度である。

(4) 土地利用データ

石神井川流域を包括する区域するのデータを複写し、東大大型計算機センターで、流域を含む、東西24km、南北9kmの1枚の地図に相当するファイルに編集した。これにより、各メッシュの地球上の点の座標値と土地利用の対応が可能である。このデータを基に、図-1(c)のような土地利用図を作成する。これを実際の地形図と照合し、計算が正しいかどうかを確認する。

このように入力したデータから、流域界決定のサブモデル(詳細は省略)により、10mメッシュの流域界やマンホール位置と流下方向の記された図、そして3の(3)で述べた手法により、メッシュ間の流れ方向図を作成する(図-1(a), (b))。これらのデータは新たなデータファイルとして計算機に記憶され、以下のシミュレーションに用いられる

5. シミュレーション結果と考察

対象流域は、下石神井試験地と、桜台試験地で、吐口までの下水管に、水位計を設け、流量測定を行っている。土地利用状況を表-1に示す。シミュレーションに際するパラメータは、初期損失量 2mm、メッシュ間移動速度 3分/10m、流下時間=流下距離/流下速度(2.5m/s)である。

新モデルの評価のため、実測流量、旧モデルとの比較を行う。図-2は、下石神井試験地におけるシミュレーションの結果である。波形をみると、新モデルは旧モデルとよく一致しているが、ピーク流量は大きく異なっている。その理由として流出率の与え方が挙げられる。各土地利用の割合にそれぞれの流出率を掛けた総括流出率と、ピーク流量について、新旧両法の比をとってみると、表-2のように下石神井試験地では、かなり差があるが、桜台試験地では、だいたい一致している。また、例えば双方の試験地で大きな割合を占める低層住宅のみ、流出率を表-3のように変化させると、ピーク流量が大きく変化することがわかる。一方、メッシュ間移動速度も、ピーク流量に影響を与える(表-4)ので、これらの値は、感度解析や実測をかさね、地域性を考慮しながら決定するのが望ましい。

表-1 土地利用別流出率とメッシュ数

表-1 土地利用別流出率とメッシュ数

土地利用とマーク		流出率	下石神井試験地	桜台試験地
1. 山林、荒地	+	0.2	9メッシュ	44
2. 田	▽	0.4	0	0
3. 畑	△	0.1	327	88
4. 造成地	△	0.3	0	0
5. 空地	-	0.3	126	77
6. 工業用地	□	0.8	0	0
7. 低層住宅	◇	0.4	830	2260
8. 密集低層住宅	□	0.7	76	19
9. 中、高層住宅	※	0.4	32	0
10. 商業、業務	井	0.8	122	76
11. 道路	*	0.9	290	335
12. 公園、緑地	=	0.1	17	0
13. 公共施設用地	¥	0.7	214	148
14. 河川、湖沼	〜	1.0	0	1
15. その他	×	0.5	0	0
計			2043	3048

表-2 総括流出率とピーク流量

	総括流出率		ピーク流量 (m ³ / s)	
	下石神井	桜台	下石神井	桜台
新モデル	0.48	0.47	1.01	0.88
旧モデル	0.39	0.49	0.63	0.97

表-3 流出率とピーク流量

低層住宅の流出率	ピーク流量 (m ³ / s)
0.4	1.01
0.7	1.26

表-4 メッシュ間移動時間とピーク流量

メッシュ間移動速度	ピーク流量 (m ³ / s)
1 (分/10m)	1.25
3 (分/10m)	1.01

6. 結論と今後の課題

都市河川流域における下水道流量の算定法として、メッシュ法を提案し、それを河川流域へ適用する手法を開発し、実務的に可能であることを明らかにした。しかし新モデルでも多くのパラメータを必要とし、かつ河道における貯留効果を評価するため不定流計算モデルの作成等、今後開発せねばならぬ問題点が残されている。雨水抑制施設については、各ユニットプロセスの単位当りの効果が求められれば、それをメッシュ法に適用することが可能である。

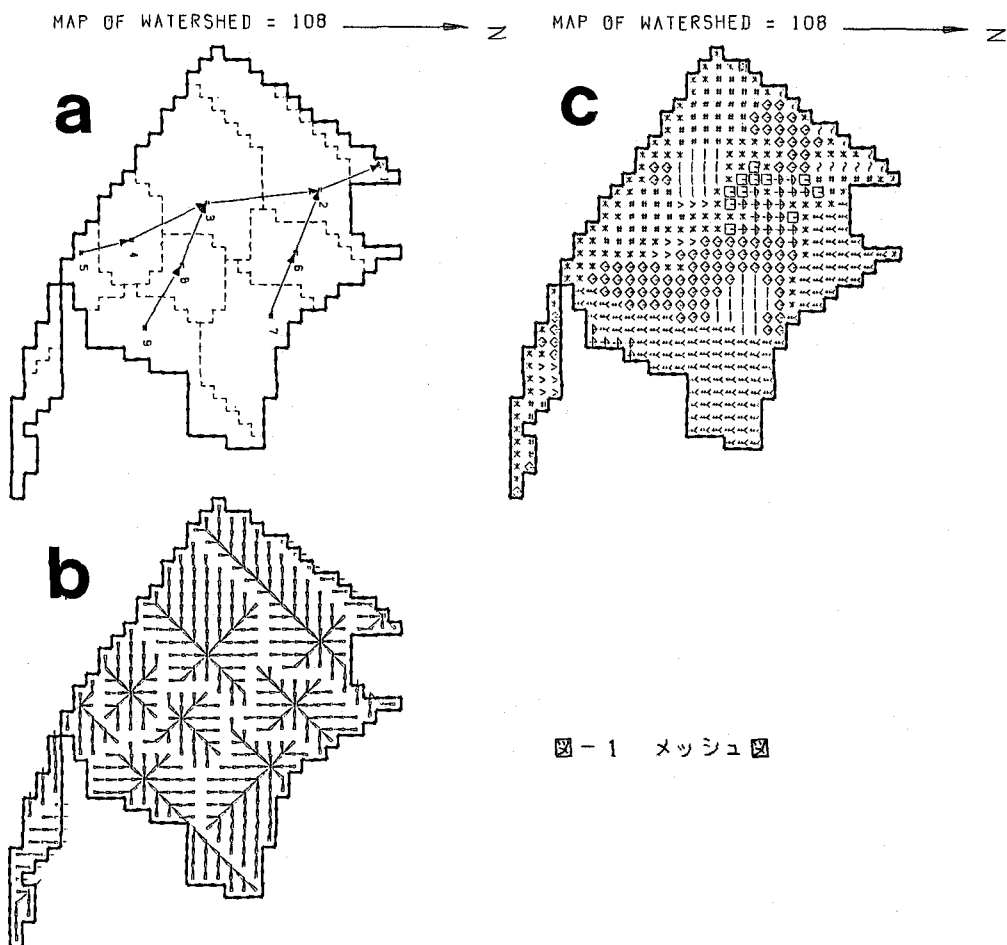


図-1 メッシュ図

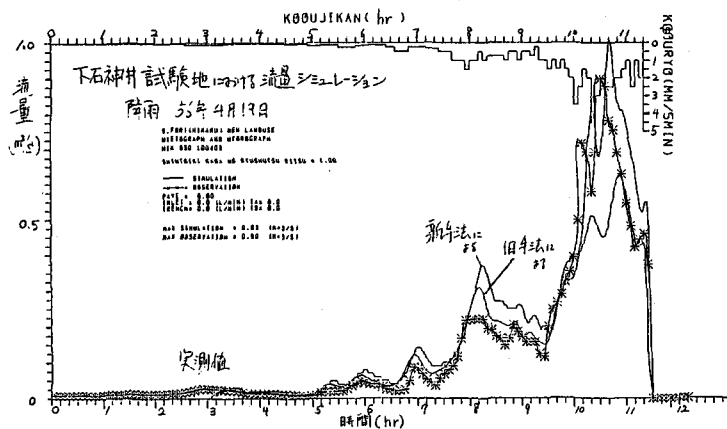


図-2 流量シミュレーション図