

メッシュ法の都市河川流域への適用——雨水流出抑制施設の評価——第3報
Application of Grid Analysis to the River Basin in the Urban Districts

東京大学工学部都市工学科 市川 新
ベオグラード大学土木工学科 Dejan Pavic

1. 本論文の目的

既にメッシュ法の考え方・概念については報告したが、本論文では、その概念の問題点の1つである、「メッシュ間移動速度」について検討を行なうことと、その成果を利用して東京における既往最大の降雨といわれている昭和33年の狩野川台風を対象としたシミュレーション結果を紹介する。

2. メッシュ法の構成（再掲）

メッシュ法の構成については、詳細に述べているので、箇条書でその手順を簡単に示す。

- 1) 流域および排水口毎に流域界を設定しそれを n -多角形に置き換え、各頂点の座標をディジタイザーで入力する。
- 2) 下水道局にある下水管の計画図または施設現況図により、下水幹線とマンホール位置を決定し同じくディジタイザーによりマンホール位置とそれが流下していく先のマンホール番号を入力していく。
- 3) 上の2つのデータより計算機上で、10 m 単位のメッシュでの流域界と流れ方向を自動機に発生させる（ソフト-1）。
- 4) 建設省国土地理院より土地細密情報を借用し、これを上のメッシュに合わせる（ソフト-2）。
- 5) 土地細密情報で分類されている18種の地表面に対し「損失率」（有効降雨を算定するために使用するもので、降雨中の表面流にならない比率と定義している）を与える。
- 6) メッシュ間の移動速度を仮定しその時間単位での降雨ハイドログラフを作製する。（ソフト-3）
- 7) 全マンホールについてそこに流入してくる雨水のハイドログラフを計算する。これをインフローハイドログラフと名付けている。その計算法は線形とみなしメッシュからメッシュへ流れ方向の指示に従いがい加え合わせていく（ソフト-4）。
- 8) 各マンホールでのハイドログラフを合成して吐口での「吐口ハイドログラフ（アウトフローハイドログラフともいう）」を計算する。この計算法は、各マンホールから吐口までの距離と下水管内の流速から仮想的な流下時間を求め、その時間分だけインフローハイドログラフをずらして加え合わせる（ソフト-5）。ここでの計算では下水管内での貯留は考慮していない。
- 9) 各吐口から河川に流入する雨水は横流入と考え、不定流計算（実際は kinematic wave 法）を行ない河川各断面でのハイドログラフを求める（ソフト-6）。
- 10) 流域内に雨水浸透施設がある場合には、施設毎にその位置をメッシュ上に落とし（新しい流域マトリックスを作ることである）、夫々の施設に応じ損失状態を仮定して計算を行なう（ソフト-7）。例えば透水性舗装の場合には損失率を大きくしたり、浸透雨水マスや浸透雨水管（トレンチ）の場合には各メッシュ単位で浸透量を計算するようなシステムにしている。
- 11) 貯留池・防災調整池等がある場合には夫々の施設に応じ水理計算を行なうこととしている。
- 12) 以上の計算は東京大学大型計算センターのM-680Hで行なっている。11月からB-JOB（CPU 時間で5分）でも64 MB が利用出来るようになっており、流域面積約2,000 ha を持つ1つの吐口に対して降雨継続時間4,000 分でも計算可能である。

3. メッシュ法の課題

2. でメッシュ法の手段を述べたが、そこには多くの仮説やパラメーター等の仮定がありそれが水理現象の実態と一致しているかについて、まだ十分には検討を重ねているわけではない。今後研究を重ねていく予定であるが、以下に問題点を記す。

1) 線形性：水文学の分野で最も議論のある点が線形性がどこまで成立するかある。雨水流出量の推定モデルの発展の過程を見るとその点が明らかである。合理式とユニットハイドログラフは線形でありTRRL法は基本的には線形であるが、最終のハイドログラフを作製するためには貯留の効果を入れるため非線形の系をそれに加えている。タンクモデルや雨水流法は非線系である。

一般的にいえば、 Δx が小さな範囲においては曲線を直線に近似しても誤差は小である。勿論曲線の性質により例えば Δx を小さくしても発散したり、誤差の発生を避けられない場合もある。雨水流出現象の場合そのいずれであるかを断定することは困難であるが、ここでは本質的には線形近似出来る現象と考えている。従来のモデルにおいて線形性の成立に疑問点が投げられたのは、現象そのものに対するものでなく Δx の取り方に原因があると考えている。即ち合理式でいえば Δx に相当するものとしては、流域全体が考えられており、TRRL法では「等流達時間帯」であり実際には5分間隔で区切られた流域面積に相当するものが Δx としてとられている。このような大きさの Δx を用いた雨水流出計算においては、この Δx では線形近似に伴う誤差が大きくなっているものとする。それに対し本論文で提案しているメッシュ法では Δx として10 mをとっている。その結果、従来問題とされていた多くの点が解決されたものと考えている。10 mが Δx として十分であるかは次の議論となるが、本計算を行ってきた経験からいうとその範囲内なら線形性は十分保証されているものと考えても問題がないものと結論づけている。

2) 雨水追跡モデル：雨水流法に代表されるように雨水の流れを、水理学的に解くのも1つの方法であり、出来ることなら本モデルにもこのような厳密な水理モデルを導入していきたいと考えている。然し水理学的に厳密にしてもそれを利用するために必要なパラメーターが理論と同じオーダーの精度で与えられないと理論のもつ厳密性を活かすことは出来ない。具体的にいうと、雨水流法で用いられる粗度係数なり、考えている斜面を流域全体に拡大する際の手法が確立されていなければならない。実際には、「総括ないし等価粗度」が用いられているがその算出法について物理的意味は十分に明らかにされたものではない。このことは、モデルに必要な地表面の情報が十分提供されていないことを意味している。

本モデルはメッシュに降った雨水を1つの固りと考え、1つの大きなバケツに入っているものとし、それを隣接のメッシュに移動させそこに置かれたバケツに移し変えていくというモデルを使用している。これは単純でかつ線形なモデルである。このモデルが対象とする流域の大きさや雨水の集中度により、どの規模まで成立ちうるかは、今後検討していかなければならない点である。ここでは、吐口まではこの線形性が成立つものと仮定している。

3) 地表面の情報：降雨は地表面の構造により浸透するものと表面流となるものに大別される。この比率は、地表面の不浸透面（舗装面や屋根面積の合計値と考えられる）の比率で与えられるものと考えられている。然し、地表面に関する情報は少なく、下水道計画等では、流域の土地利用状況から流域全体について4種の「総括流出係数」を与えることにしている。1部研究者は航空写真を利用して不浸透面積を算定することも試みられているが、手間の割には有用な情報となっていない。本モデルの初期段階では、実地踏査や住宅地図等により、この比率を求えていたが、作業性を考えるとその方法では限界があり、それによりモデルの適用範囲が限られてしまう。作業の行なえる限度が約100 haであり、吐口単位に相当する所までは可能であるが、河川全体を対象とすることは無理である。

然し最近の計算機とその周辺機器の進歩に伴ない、この種の情報量が急激に増大してきている。首都圏については、建設省国土地理院が10 mのメッシュをかけ、各メッシュに対して地価・用途区分が入力されており、それらが全て磁気テープに格納され、必要部分を借りることが出来る。このデータを上手に利用する

ことが出来れば、地表面に関する情報量は大幅に増加しかつ取り扱いが容易となる。

このデータは本来流出解析用に開発されたものでないため、いくつかの問題点が残っている。用途区分のうち森林・水田・畑・工場等の多くは規模が大きいため実態を表現しているが、道路・住宅等では単位が小さいため必ずしも実態を表わしていないことがある。道路の場合、都心では4 m 程度のものが多いため10 m のメッシュで拾いきれないことがあり、全体して小さ目の値となっている。また、公共用地は比較的面積が大きい、その内容が千差万別であり、それを1つのジャンルに纏められていることにより、流出解析に必要な情報の入手が困難となっている。例えば、東京の小学校の校庭は殆んど全て舗装されているが、代々木公園のような緑地・公園も公共用地となっており、地表面の条件は全然異なっている。

4) 損失率の推定：損失率は降雨から有効降雨を推定するためのパラメーターである。このモデルでは、初期損失（凹地貯留等）として2 mm を考えているが、それ以後の降雨に対し一定率が損失するものとしている。この損失は在来の研究で用いられているように不浸透面の比率と考えられるので、各用途区分毎に推定して与えることが出来る。然し、この比率に関する実証的研究が少ないことから、現在用いている損失率は第1近似程度でしかない。今後実測を重ねて解明していくべき問題の1つである。

5) メッシュ間移動速度：1つのメッシュから隣りのメッシュまでの移動時間が本モデルにおける最重要なファクターである。当然のことながら、これが小なら、流出はより集中することになり、ピーク流出量は大きくなる。また、この時間単位は全流域で一定としなければならず、流域全体の代表値をどのように選ぶかが大切な問題である。次節に検討を行なう。

6) 流域内の貯留効果：雨水が流出するまでには、地表面・マンホール・下水管等様々な場所で貯留が起ることが経験的に判っている。然しその現象をモデルの中に組込むことは殆んど不可能である。今迄の計算の経験からすると、ハイドログラフのパターンはほぼ正確に追跡することが出来るが、最大流出のおきる時刻の周辺でピーク値が大きくなりすぎている。この時の最大値と実測値を比較すると、シミュレーション値が約20%程大きな値となっているが、その期間の超過流量の合計値は、数百 cum のオーダーであり、それを完全に再現することは出来ていない。この程度の浸水や、貯留の発生場所の予測とその定量化は不可能に近い。

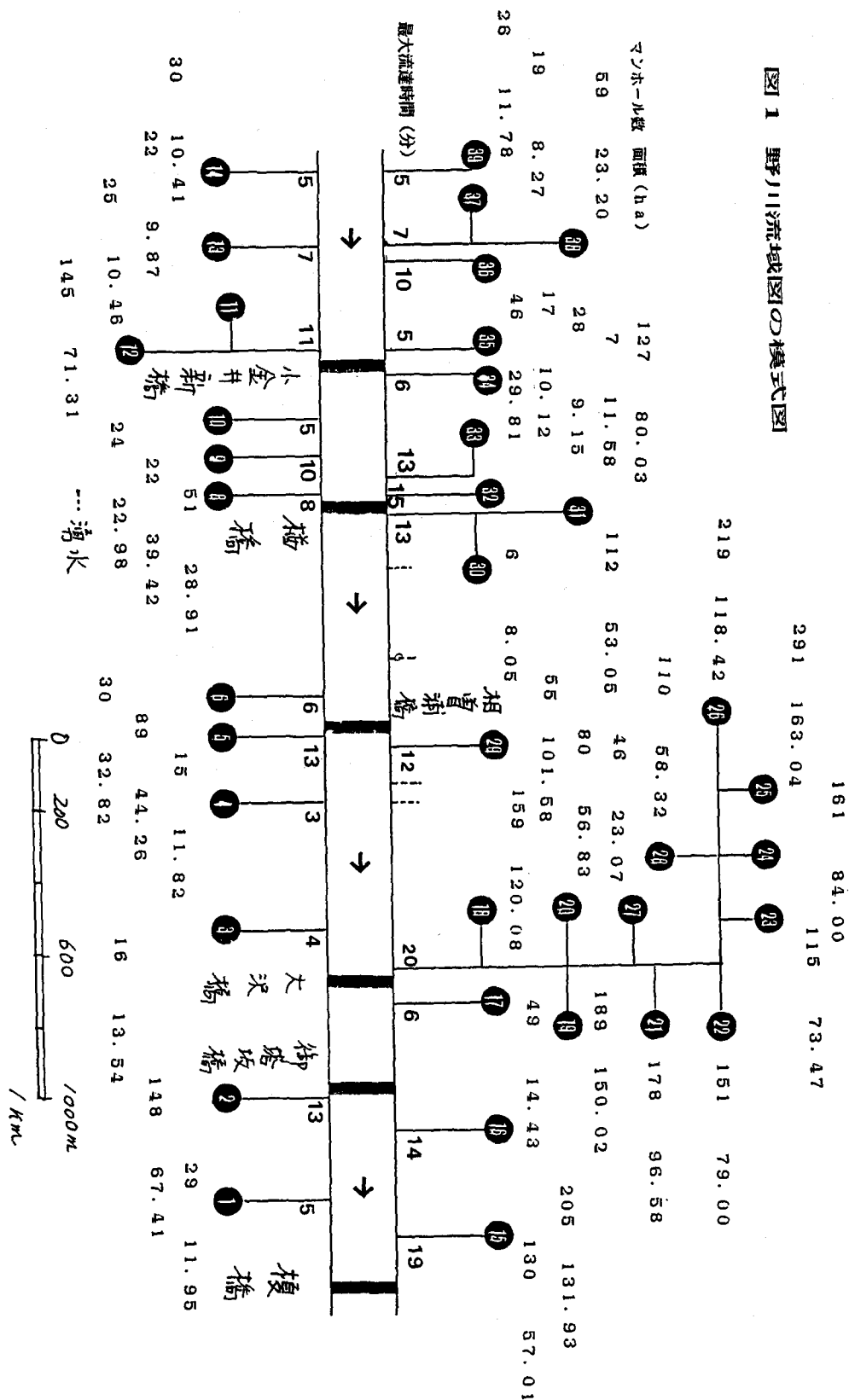
4. メッシュ間移動時間および流達時間の推定

これを検討するために、多摩川の支流の1つである野川をフィールドとして考察を行なう。野川は国分寺市を源頭として、多摩川に流入する全長20 km 流域面積70 sqkmの都市河川であるが、下水道整備の進行と洪水対策のため、上流域から、直接多摩川に排除するバイパスが完成し、実際の流域面積は自然流域と大きく変わり、調査対象地点の榎橋地点を基準にして考えてみると、全長6.3 km、流域面積19.6 sqkm となっている。その概略を図1に示す。図1に示すように、野川には39流域、25吐口に分割出来る。

1) マンホール数とメッシュ数：図2に1マンホール当りのメッシュ数を示した。これによると、流域全体の平均は約60.3メッシュとなるが、最小29.4（流域単位であり、実際のマンホールでは6）最大184.7（実際には528）となっている。この流域には、調布飛行場・多摩霊園等大規模な緑地ないしオープンスペースがあり、排水管网が市街地に比して少ないため、このようなマンホール当りのメッシュ数が大きくなっている。

2) マンホールへの流入時間：今1つのマンホールの支配面積を流域平均値の60.3をとりその配置を図3のように6×10(m)の矩形と考える。すると、各メッシュのマンホール迄の移動時間（厳密にいうと通過メッシュ数）は1(8), 2(16), 3(17), 4(12), 5(6) で平均流入時間は2.82となり、メッシュ間移動時間を1分とすると2.82分、同2分とすると5.64分となる。1)で述べたように1つのマンホールの支配面積の最大が528あるケースもあるが、流域全体で考えるとその影響力はあまり大きくないことがわかる。

図 1 野川流域図の模式図



3) マンホールから吐口までの流下時間：計算機の中に各マンホールの座標が入っているので、それを利用して流下時間を求めることが出来る。その時間も図に記入してある。これによると最大で 19.5 分であり、平均 9.0 分である。この計算に用いた下水管内の流速は 2.5 m/s である。

4) 全流達時間：以上求めた計算によると流域から野川に流入する時間は極めて短く降雨が直ちに河川に出てくることがわかる。即ち降雨の集中がおきていることを示すものであり、それはいくつかの降雨強度の高い降雨に対して観測されているものと一致している。

5) メッシュ間移動時間の差によるハイドログラフの変化：図4は野川流域の1つのサブ流域でのハイドログラフを示したものである。このサブ流域は 25 番流域であり、吐口の支配面積は 163 ha である。流域は市街地であり、住宅地が約半分を占めているが、15 %程が畑・森林として残っている地域である。下水道はほぼ整備されており、各マンホールの支配面積は 56 メッシュで全体に均一である。この地域の平均損失率は丁度 0.50 となっている。図4に示すようにハイドログラフは、メッシュ間移動時間が1分の時が最大で、それが長くなるにつれて、ピークが小さくなっている。3本のハイドログラフの総流量は変わらない。この3本のハイドログラフの差が流域内の貯留とも考えられる。

6) 榎橋地点でのハイドログラフ：図5は、榎橋地点でのメッシュ間移動時間を変えた場合のハイドログラフの差を示したものである。この図に東京都が測定した実測値もプロットしてあるが、ピーク値は実測値がかなり下廻っている。その原因については、未だ十分な検討を行っていない。メッシュ間移動時間が1分の場合ピークが2つ出ているが、それは、大沢橋の上流部分とそこに流入する下水道吐口からの流入ハイドログラフに時間差が生じるためである。最初のピークは、上流部分からの影響であり、2番目のピークは下水道吐口からの影響によるものである。

5. 石神井川流域における雨水流出抑制施設導入に伴うハイドログラフの検討

以上の考察を基にして石神井川流域での検証を行ってみた。対象は狩野川台風(昭和33年9月)で対象地点は東京都の市区境の弁天橋地点である。即ち、弁天橋より上流は市部であり、下水道整備の進んでいない地域であり、将来の下水道整備の際に雨水流出抑制型下水道を導入する可能性が高い地域である。然しその雨水流出抑制型下水道の普及の程度の予測がつかないため、ここでは試算をしただけとなっているが、その評価法の1つとしてメッシュ法が利用出来る可能性だけは読みとることが出来る。

謝辞：本研究は東京大学工学部都市工学科において総合的に行なっている研究であり、参加者は多く、各々各面で貢献しており、その研究成果をより発展させているものである。特に榎原隆氏(現建設省土木研究所)に負う所大である。関係者に深く感謝するものである。また、資料の提供に便宜賜った東京都下水道局第2建設事務所、同土木技術研究所に厚く御礼申し上げる次第である。本研究は文部省科学研究補助金一般研究B(課題番号 58460173: 研究代表者市川 新)により行ったものである。

参考文献

- 1) Ichikawa, A., et al: A Proposal of a New Simulation Model GRID ANALYSIS for Urban Storm Runoff, 3rd Inter., Conf. on Urban Storm Drainage, pp 245-254, (1984)
- 2) 市川新・榎原隆：メッシュ法の都市河川流域への適用—その手法と実際、水講29回 pp 55-60, (1985)
- 3) 市川新他：都市域における新しい雨水流出シミュレーションモデルの提案—メッシュ法、水利科学 vol 28-1, pp 23-49, (1985)
- 4) 市川新他：メッシュ法の都市河川への適用—その手法と実際—、水利科学 vol 26-6, p 74-97, (1985)
- 5) 市川新・榎原隆：メッシュ法の都市河川への適用—その手法と実際、水講30回, pp 145-150, (1986)
- 6) 市川新：新しい雨水流出モデル—メッシュ法—の提案、京大防災研年報 vol 29-B-2, pp 233-244, (1986)

4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5
4	3	2	2	2	2	2	2	3	4	5	
4	3	2	1	1	1	2	3	4	5		
4	3	2	1	1	1	2	3	4	5		
4	3	2	1	1	1	2	3	4	5		
4	3	2	2	2	2	2	3	4	5		

図13 モデル的な流域におけるメッセンジ
m:マンホールメッシュ
数字はメッシュ移動回数

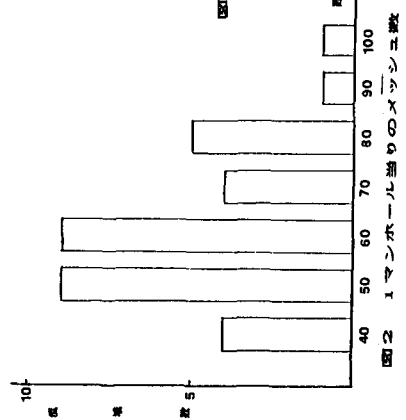
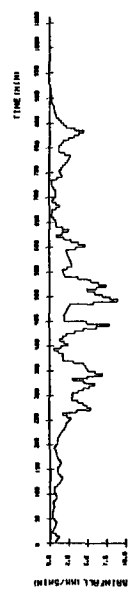


図12 マンホールありのメッシュ数



1mm = 0.0 mm/5min
1mm = 0.01 mm
0.1mm = 0.01 mm
0.01mm = 0.001 mm



○ 雨水流出抑制型下水道あり
■ 雨水流出抑制型下水道なし

図14 石神井川における雨水流出抑制型下水道の効果予測

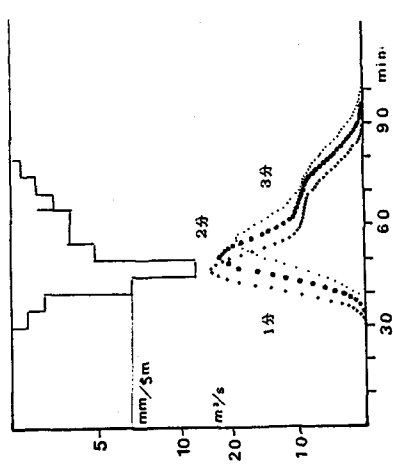


図4 社口におけるメッシュ移動時間の差によるハイドログラフの変化

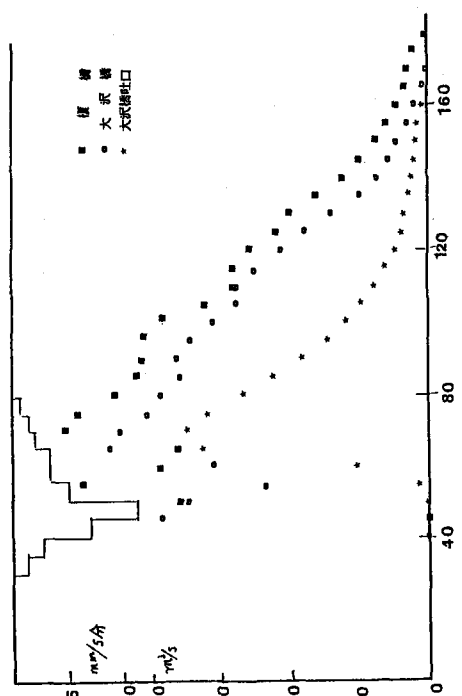


図5 野川大沢橋・榎橋地点のハイドログラフ