

新しい雨水流出モデル——メッシュ法——の提案

市 川 新

PROPOSAL OF THE NEW SIMULATION MODEL ON URBAN STORM RUNOFF—GRID ANALYSIS—

By *Arata* ICHIKAWA

Synopsis

In order to estimate the hydrograph of the Urban Storm Drainage, this paper has proposed the new simulation model, the name of which is 'Grid Analysis'. This model consists of 3 parts : 1) Estimation of the hydrograph at the manhole mesh, 2) at the outfall of the sewer pipe into the river, 3) at the point of river section.

The characteristics of the model is the precise division of the land surface with 10 m meshes, and the information of each grid, flow direction, and land use patterns, are provided by the computer-aided systems. According to 10 meter grids, rainwater is followed by each time step by the huge-computer. This paper has also verified this new model with actual rainfall and runoff data with good agreement, at the Nogawa River of 70 sqkm watershed, Tokyo Japan.

1. 研究 目 的

雨水流出量予測については古くから研究が行われているが、都市域という比較的小流域でかつ、下水道が整備されている場に適用出来るモデルは極めて少ない。しかし、都市化に伴ない流出係数が大きくなった事、下水道等の排水施設が整備されて流出形態が大きく変化した事、それらの結果として在来の治水施設では制御出来なくなり、何らかの対策が必要となり、そのために雨水流出量の正確な推定が要求されるようになってきた。さらに、近年総合治水事業や雨水流出抑制システムの開発等が実施されたので、その効果を評価出来る流出解析法の開発が緊急課題となっている。

東京都の中小河川では 50 mm/hr の計画降雨に対応すべく河川改修を行っているが、用地難や工事に伴う種々の反対運動等により、計画が遅れている。一方下水道は、50 mm/hr の計画降雨に対応すべき管渠整備を行っているので、河川改修前に下水道整備が行うと、河川への放流により下流部で溢水する可能性がある。そのため河川サイドとしては、下火道部局に対して、河川改修が出来ない迄、下水道整備を延期するよう要請している程である。しかし住民の下水道（水洗化）への要望は強く、河川改修迄下水道整備を待つことは出来ない。そこで雨水流出抑制を行ないながら下水道を整備するという「実験的下水道 Experimental Sewer System, 略称 (E.S.S.)」がはじまった。

この下水道の洪水制御に対する効果を評価する方法も要求されているのである。本研究は、それ等を可能とするような流出解析モデルを提案^{1,2)}しようとするものである。

2. 在 来 の 研 究

2.1 モデルの目的

流出解析は河川、下水道の両面で行なわれてきた。いずれも洪水予測を目的としているとはいえ、流域の規模、対象降雨の大きさ等から、考え方・取り扱い方が異なっている。河川の場合は、合理式・タンクモデ

ル・貯留関数法・雨水流法・ユニットハイドログラフ法が多く用いられているが、流域が大きいため流域内での貯留が大きいため、表面流だけでなく中間流をも加味せねばならないことから、それぞれのモデルに工夫をこらして、実用化をはかっている。実際には、1つのモデルを採用し、それにより既往洪水のシミュレーションを行ない、パラメーターを決定し、計画降雨の際の最大流出量を求めるという方法がとられている。

下水道の場合は、計画降雨が50 mm/hr, 75 mm/hr という比較的小さな降雨（確率年で表示すると5年から10年に相当する）を対象としており、表面流が主体なので線型近似が主体であり、それに下水管内の貯留を考えるとというモデルが使用されている。具体的には合理式・修正 TRRL 法が中心である。

いずれの場合も洪水予測であり、それに基づき河川計画、下水計画という「施設設計」の根拠を考えるものである。

2.2 パラメーターとその同定

いずれのモデルを使用するにも、パラメーターが必要である。合理式でいえば、流出係数、降雨継続時間（流達時間）、雨水流法でいえば貯留量を示す k, P （流量にかかる係数とベキ数）等である。モデルが物理的特性に基づき決定されると、それに対応してパラメーターも物理的なディメンジョンや意味をもち、それぞれの因子から推定する事も可能であるが、実際には降雨と流出量の実測値から求める方法が多くとられている。このことは、別の言い方をすると、パラメーターが1つのフィルターの役割をはたし、それにより「モデル」を実際の現象に整合させる事になり、そのような場合が多い。その問題点としては決定されたパラメーターはその降雨だけのもので他の降雨には適用出来ないことがあげられている。

例えば、雨水流法は、流域と1つの斜面を考え、そこでの水流の深さを基に方程式をたてている。この考え方は道路とか屋根というような斜面では物理的に正しいが、流域全体を1つの斜面に置きかえる所に問題点が生ずる。そのため勾配・粗度等について「仮想面」での値、例えば等価粗度を用いざるをえずその決定法が問題となる。

3. メッシュ法の提案

以上述べた問題点をどのように解決していくかを考えた。その方法として雨水流法で代表されるように「水理学的に厳密なモデルを追求」していく方法と、「流域の情報をより正確に求めてそれをモデルに組み込む」方法の2つが考えられると思う。在来のモデルは前者が中心であり、後者については流域全体を考え、等価粗度とか、総括流出係数といった値を導入しており、流域全体については詳細な情報を利用しているとはいいがたい。しかし最近の大型計算機の進歩はこの流域情報を容易に取り扱えるようにし、かつそのデータを計算することが可能となったと考える。そしてこの計算機時代を前提とした計算モデルがメッシュ法である。

その際地域情報の細密化と、水理学的条件の厳密化のバランスを考えなければならない。後で詳述するように日本全体が10 m のメッシュで区切られ、個々のメッシュ毎に情報が与えられようとしているので、現在「技術的に取扱える最小単位は100 m² のメッシュ」という事になる。理論的にはこれより小さくする事は可能だが、細区分した単位毎に情報を与えるには多大の労力を要し現実的に出来ないからである。一方水理条件で一番問題となるのは線型性が成立つかどうかという点である。流域を1つにして考えるとき、ハイドログラフ法のような線型性は成り立たない（成り立ちにくい）事が多くの研究・調査から言われているが、都市域では表面流が多い事と、メッシュ法では、小流域単位での流れを考えるので線型性が成り立ちやすい、ないしは線型であると考えてもそれ程大きな差が生じないと考えられる。

これは曲線を折れ線グラフに近似する事に対応していると考えられる。曲線を接線群で置換すれば、特殊な曲線や条件を除いてほぼ近似出来るといわれている。すなわち区間間隔を無限小にすることにより、直線近似が出来た事を意味している。雨水流出解析で求められる精度に対応する「無限小」はどの程度なのか、現在の所確認されていない。本論文では、情報源のもつディメンジョンから10 m メッシュ（100 m² 単位）

を無限小として考えることにする。これは在来の区分法（ティーン分割、TRRL法の等流速時間帯図）にくらべれば、十分「無限小」に近いといえるので、このモデルを構築したものである。

問題はこの10m区間を流れる水理モデルに何を採用すべきかという事である。10mにすれば流れる水の絶対値は少なく、かつその間を流下する時間が短かいので、計算の時間ステップもそれだけ小さくせざるをえない、そのようなマイクロに近い場の水理学は必ずしも確立されているとはいえない。そこでメッシュ法では1メッシュに1つのバケツを対応させて、バケツの水をリレー式に移しかえるというモデルをとる事にした。そのときも、バケツを次のメッシュに移しかえる速度（流速）を如何にするかという問題点が発生する。

第2の問題点は、メッシュ単位程度で発生する貯留をどのように評価するかである。具体的には、マンホールの中や、下水管内、さらに地表面での湛水（surcharge）があり、それらの情報をどのようにモデルに組み込み、評価していくかが問題点となる。本論文ではこの問題については、十分に答えられていない。

4. メッシュ法の基礎概念

4.1 有効雨量

1つのメッシュに降った雨の中、表面流となったもののみが都市水害に寄与するものとする。メッシュ等から地中に浸透した雨水は、いつかは中間流・地下水となって河川に還元されるが、その時は洪水（浸水）の危険性が去った後なので特に評価する必要がないという立場をとる事とする。

雨水のうちどの程度表面流となるかを、損失率という概念で説明する。すべての地表に対し降雨初期の2mmは地表面の湿潤化に使用され、損失するものとし、その後の降雨に対しては、地表面の性質に応じて決定される損失率（LOSSと記号化している：無次元）を差し引いたものだけが表面流となるものとしている（Fig. 1）。地表面の性質としては、現地踏査により決定すべきであるが、このモデルでは「国土地理院の土地利用細密情報（49年、54年版がある）」を利用するので、そこで区分されている16分類を用いる（実際にはもう少し多いが海域等対象流域内に含まれないものを除いている）。この分類に対応する損失率の実証的検討は行っていないので、今の所経験的な値を使用している。その値を、Table 1にあわせて示してある。

Table 1 Land use pattern and its rate of loss.

Land use Pattern	rate of Loss
forest	0.2
paddy field	0.4
vegetable field	0.1
recreation area	0.3
vacant	0.3
industry	0.8
low house	0.4
high densed housing	0.7
high story hovsing	0.4
business cevter	0.8
road	0.9
park, green	0.1
public	0.7
river	1.0
miscellaneous	0.5

4.2 表面流の動き

有効降雨は1メッシュ全体で1つのバケツに集められたものとして、次の時刻迄に隣接のメッシュに移されるものとしている。メッシュからの移動はFig. 2に示すように将棋の王様と同じく縦横斜め各1コマ移動するものとしている。斜めに動く場合、移動距離が大きいので速度が一定

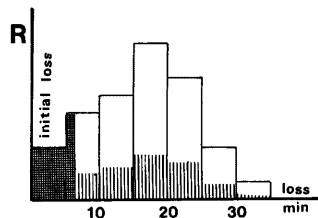


Fig. 1 Concept on effective rainfall.

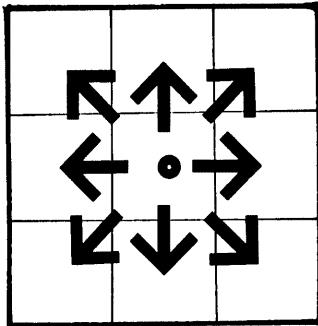


Fig. 2 Movement of rainwater from a grid to the adjacent grid.

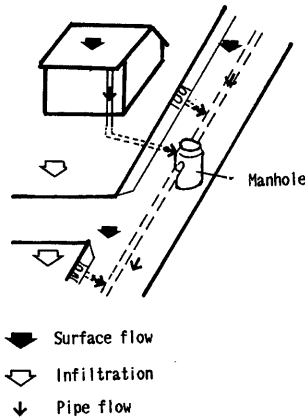


Fig. 3 Surface flow and pipe flow.

なら移動時間が、縦横に動くのより長くかかる事になるが、ここでは時間一定としている。実際の下水道その他の水の動きをみると縦横（実際には東西南北）に動く場合だけでなくあらゆる方向に動いているので、ここでは動く方向を重視したモデルにしている。

4.3 下水管流

実際の都市では Fig. 3 に示すように側溝、雨樋、排水管、下水管等が整備され、比較的短時間で下水管流になると考えられる。ここでは一元流モデル、二元流の2つを考え、場所・地域に応じて適用している。一元流モデルは、各メッシュではすべて表面流だけで、特定のメッシュ（マンホールメッシュと名付けている）から下水管に入るという考え方である。マンホールメッシュはそこにマンホールがあるというより、下水管の流入地点といった意味で考えている。一方二元流の場合は、屋根に降った雨水は地表流とならずに直接下水管に流入している実態をモデルに組みこんだもので、有効降雨のうち一定比率（屋根率に対応させている）が直接管流となり、残りが表面流となって流れ、一元流と同じようにマンホールメッシュから下水管に流入するものとしている。二元流の場合、両者の流れ速度が異なる事から、別々の流速（すなわちタイムステップ）で計算し、末端で両者を加え合せている。

下水管流はすべて線型で Fig. 4 のように加算されるものと仮定して計算している。これは下水道の場合

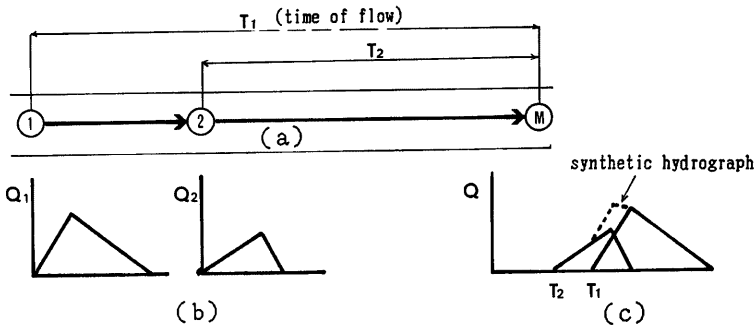


Fig. 4 Synthesis of hydrograph in the sewer pipe.

河川や大幹線に至る迄の距離が小さい事からこの仮定をとっているが、降雨強度の大きな降雨の場合にはマンホール等で貯留・湛水がおき、このような単純なモデル化では説明出来ないような現象がおきている。これをどのようにモデル内に組みこんでいくかが次の課題である。

4.4 雨水の流れ図の作製

下水道計画においては、Fig. 5のような亀甲図と呼ばれるマンホール毎の流域界図が作製され、それに従い雨水流量を算定している。初期段階では、この亀甲図をメッシュに落して流域界をつくり、それを計算機に入力として入れる方法をとっていた。この方法は労力がかかり大流域に適用出来ないで、計算機で自動発生されるシステムを開発した。以下にその方法を示す。

前述の通りマンホールメッシュの設定を行うため、下水道幹線図上に、合流点、方向変更点、口径変更点等の実際のマンホール所在地を同定し、そこでマンホールメッシュ位置とする。この地図をマウス（地図上の点を指定し、ボタンを押すとその座標が自動的に入力される装置）を利用し、計算機に入力する。この点をメッシュ化し、Fig. 6に示すようにメッシュの周辺8メッシュの流入方向を決定する。同様にすべての点にこの作業を行ない終了したら、最初の点の2周目の16メッシュの流入方向をきめる。この際次のルールを守るものとする。① マンホールメッシュは下流から行う。② 1度方向が決定されたメッシュの方向は決して変更しない。③ 各メッシュの流れ方向は、そのメッシュがマンホ

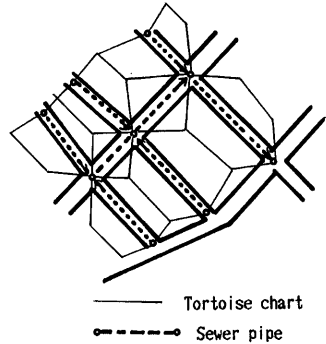


Fig. 5 Example of tortoise chart on the sewer planning.

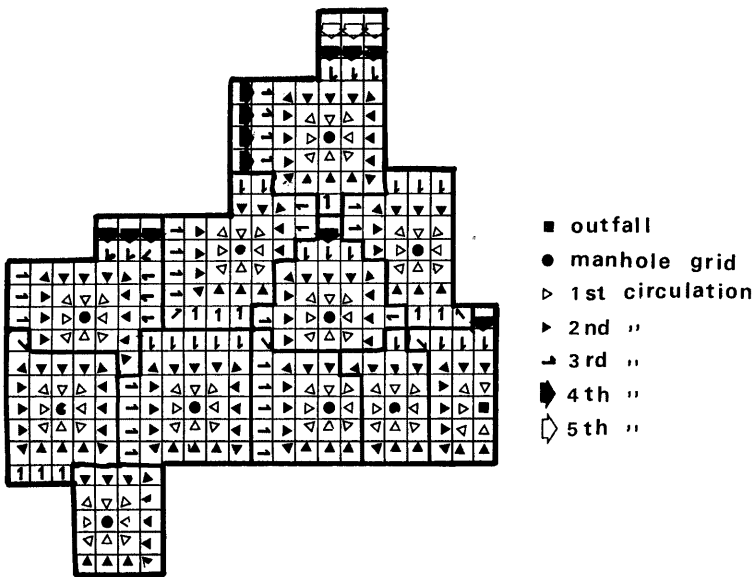


Fig. 6 Methodology on the determination of the flow direction of each grid.

ールメッシュを通る対角線上にないかぎり辺に垂直に流れるものとする。以上の操作をくりかえしていくことにより、全メッシュの流れ方向が定まる。

このマンホールメッシュの位置の同定の際に下流からつけた番号とそのマンホールから流れ行く先のマンホール番号を同時に入力させている。この操作によりマンホール間の距離（流速を与える事により流下時間が求まる）が決定される。

4.5 流域界の決定

雨水流出量の決定を行うのに雨水が流入する流域界を決定しなければならない。下水道の亀甲図の包絡線が流域界になるが、それを計算機内のメッシュに与えてやらねばならない。流域界を n 多角形（鈍角多角形でもよい）に近似させ、前述のマウスを用いて、その頂点を入力する。そして全メッシュが多角形の内部点であるかどうかを点検して流域を決定している。そのアルゴリズムについては既に報告¹⁾している。

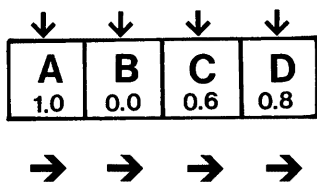


Fig. 7 Schematic model of the small watershed.

4.6 土地利用図の作製

国土地理院は首都圏につき 10 m メッシュに分割した土地利用図を作製し、磁気テープ化され、公共機関、研究用等に貸し出しを行っている。これは南北 3 km, 東西 4 km の大きさに区分されて 1 枚のメッシュに入れられている。

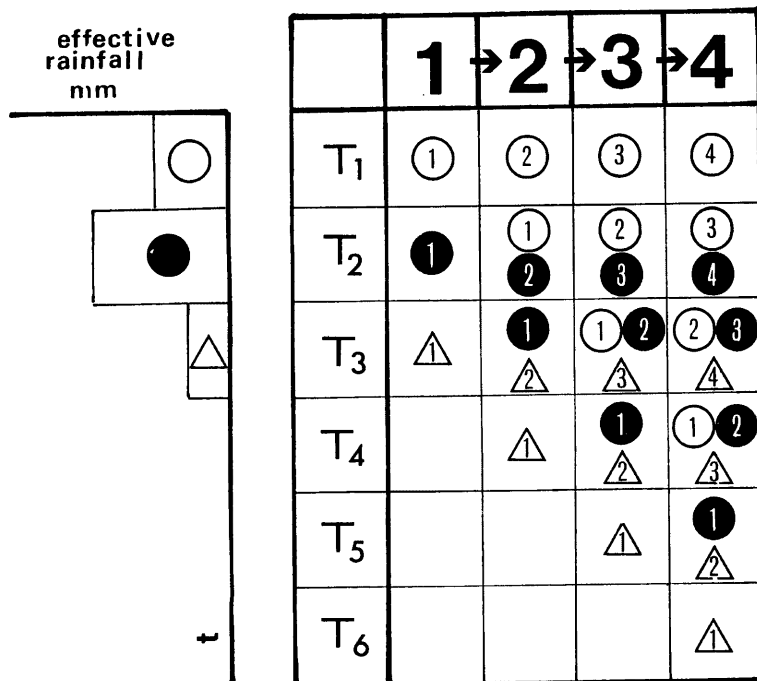


Fig. 8 Explanation on the calculation method of grid analysis.

解析に必要なこの地図を数枚並べて大きなマトリックスをつくり、その上に前述の流域を書き込めるソフトを開発している。確認のため計算機上での位置と正しい位置の同定のために土地利用図と白地図を常に対応させるようにしている。

4.7 雨水の流れ

以上の準備が出来た所で雨水追跡を行う。その概念を示すために Fig. 7, 8 使って説明する¹⁾。簡単なために4つの短冊型の流域を考え、上流から1 2 3 4と番号をつけてある。Fig 8の縦軸は時間をとり、その時刻の有効降雨をあわせて示してある。この図のように、メッシュ間の移動に要するタイムステップでハイエトグラフを求め、それが順次線型で加え合せるようにしている。このタイムステップをどう決定するかが、本モデルの適合性を決定する要因のポイントである。地表面の流れについては次の Kerby 式が広く使用されている。

$$t = \left\{ \frac{2}{3} \times 3.28(n/\sqrt{S}) \right\}^{0.467} = 1.44(n/\sqrt{S})^{0.467} \dots\dots\dots(1)$$

ここに t : $t(m)$ 流下するのに要する時間(分), n : 粗度係数に相当するもので、不浸透面0.02, 土の道路0.1, 路面0.1, 畑0.2といわれている。 S は地表面勾配で無次元である。この式によると舗装面で1%の勾配をもつ地表面を10m 移動するに要する時間は3.4分と計算される。この計算値をもととして多くの市街地では3分をとっている。下水管流の場合は管内流速 0.3 m/s と考えて10 m を流れるのに約33秒かかるので、1分を移動速度と考えると計算を行っている。

マンホールから下水吐口ないし幹線までは、1~1.5 m/s の流速で流れるものとして、先に求めたマンホール間の距離から各マンホールから吐口迄の流下時間 τ (分) を求め、吐口でそれだけ時間おくれがあるものとして計算を行っている。

4.8 河道ないし幹線の追跡²⁾

以上のプロセスにより吐口ないし幹線流入点における「流入ハイドログラフ」が計算される。この流入ハイドログラフ群から河道(幹線)における流量を計算するに当り次式を用いた不定流計算を行っている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots\dots\dots(2)$$

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで Q : 河川流量 (m³/s), q : 区間流入量 (m²/s) でメッシュ法で求めた吐口毎のハイドログラフ, A : 流下断面積 (m²), R : 径深 (m) である。この微分方程式を差分形式におきかえて計算を行っている。計算に用いた時間ステップは20秒, 区間ステップは 100 m であり、洪水伝播速度は 5 m/s と考えている。

5. 野川流域での適用例

多摩川水系の野川においてこのメッシュ法の適用を行ないモデルの問題点を求め、今後の研究課題を検討した。

野川は国分寺市の湧水を源頭とする自然河川であるが下水道の整備にともない流域が大幅にかえられている。Fig. 9, 10 は下水道部局のデータを基にして流域界を決定したものである。とくに下水道の北多摩1号幹線が建設され、それより上流部からの雨水はそれを通して多摩川に排除されている。それ故、この地点が野川の源頭ともいえる。一方、流域の北側も下水道により、野川に放流される関係となっているので、流域が北に広がっている。

この流域を下水道の雨水吐口毎に Fig. 11, 12 に示すように小流域に分けて上述の土地利用図, 下水管流図および各マンホール単位の小流域に分割した。土地利用状況は Table 2 に示してある。

Table 2 The areas of the land use pattern at the each sub-watershed. (unit; 100m²)

sub-basin	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
forest	31	300	91	13	182	50	1	184	0	0
paddy	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0
vegetable	74	533	112	118	844	1	0	645	0	0
recreation	0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
vacant	25	324	26	59	180	2	0	361	0	4
industry	28	13	25	28	2	0	0	0	0	0
low house	237	1714	362	370	1461	0	0	634	0	2
high dense	164	327	34	1	175	0	0	227	0	0
high story	40	13	0	0	7	0	0	0	0	0
business	297	912	528	465	371	0	0	101	0	0
road	281	1198	143	116	496	251	17	297	0	0
park, green	1	574	3	0	418	2471	761	122	3941	1407
public	1	720	5	5	242	503	158	306	0	885
river	16	69	27	0	5	2	4	0	0	0
miscellaneous	0	0	0	0	48	0	0	13	0	0
Total	1195	6733	1357	1179	4433	3280	941	2891	3941	2298
sub-basin	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
forest	32	556	114	111	1878	882	25	856	1131	210
paddy	0	0	0	0	0	1	0	52	20	2
vegetable	58	559	31	253	2269	1657	360	2828	4108	863
recreation	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0
vacant	63	243	8	83	239	116	40	369	647	401
industry	0	20	0	0	5	3	0	267	310	111
low house	716	1798	576	407	1566	1343	650	2069	4034	2403
high dense	20	133	55	6	184	189	81	92	1028	407
high story	0	0	0	0	0	1	0	87	203	2
business	3	330	40	70	849	674	65	913	1239	444
road	38	799	137	88	916	622	198	985	1025	615
park, green	23	2325	4	0	4421	55	3	122	519	63
public	84	366	0	72	847	162	24	3356	774	149
river	12	0	22	0	19	0	0	6	0	0
miscellaneous	0	5	6	0	0	0	0	0	0	0
Total	1050	7136	994	1041	13194	5707	1446	12005	15038	5671

これによる雨水流出の計算結果を Fig. 13 に示した。

この図からモデルの妥当性を判断することはむづかしいが、今後対象降雨をふやし、かつ降雨時の流出量の計測も合わせて行ないモデルの充実を行ってきたい。

謝 辞

本研究を行うにあたり関係都市町村の担当者（東京都土木技術研究所、小金井市、調布市、府中市、三鷹市、国分寺市の下水道部局）の御協力をえた。厚く感謝の意を表する次第である。当然の事ながら、本研究の主要部をなす土地利用状況は、国土地理院の細密土地利用情報（TDS 111, 54年版）を利用している。

sub-basin	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
forest	161	394	126	347	715	432	123	212	270	0
paddy	1	0	8	0	0	2	0	0	3	0
vegetable	719	879	579	1947	1875	1254	371	1484	310	0
recreation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
vacant	462	317	263	242	791	592	93	106	58	0
industry	33	26	237	6	338	18	3	0	1633	0
low house	3404	2777	2169	2722	6308	3289	671	2080	595	0
high dense	624	232	108	97	515	131	148	185	41	0
high story	196	59	709	10	504	785	0	1	0	0
business	1186	841	371	279	651	772	71	373	123	0
road	1152	1336	1315	1176	3031	2923	154	567	516	19
park, green	136	134	96	252	125	307	28	61	416	399
public	1580	888	1307	1281	1321	1178	659	772	6185	375
river	7	20	69	36	116	136	0	0	4	14
miscellaneous	0	3	0	1	5	7	0	0	0	0
Total	9662	7903	7361	8397	16183	11832	2319	5841	10019	807

sub-basin	31	32	33	34	35	36	37	38	39	TOTAL
forest	100	444	709	183	20	95	9	448	29	11464
paddy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94
vegetable	844	608	115	8	178	84	8	104	124	26804
recreation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39
vacant	384	298	18	25	75	190	26	66	53	7199
industry	2	586	0	35	21	64	5	0	0	3819
low house	2146	2978	103	51	447	925	528	1216	493	53244
high dense	119	175	4	0	33	172	0	31	131	5869
high story	33	81	0	0	0	19	0	41	0	2791
business	408	313	53	13	24	466	55	115	52	13467
road	610	580	69	82	48	430	53	238	97	22618
park, green	4	13	0	0	64	0	14	37	18	19337
public	637	1928	10	59	97	511	129	25	175	27776
river	0	0	81	0	7	0	4	0	2	678
miscellaneous	0	5	0	0	3	16	0	2	4	115
Total	5288	8010	1162	916	1017	2983	831	2324	1178	195563

メッシュ法の開発は、ここ数年間にわたり行っており、その積み重ねである。各段階で多くの方の協力をえている。とくに、野口猛雄（現北陸電力）、藤田祐治（現日本火災）、柳幸司（現住友商事）、榊原隆（現建設省土木研究所）、藤田社（現大成建設）、大口豊（現国有鉄道）、土方教久（現東京ガス）、小川爽（現三井物産）、横山道子（東京大学技官）各氏の協力によるものであり、本論文はそれぞれ研究の成果を集大成したものである。

本研究は文部省科学研究補助金（一般研究B 代表市川新）による研究成果の1部である。

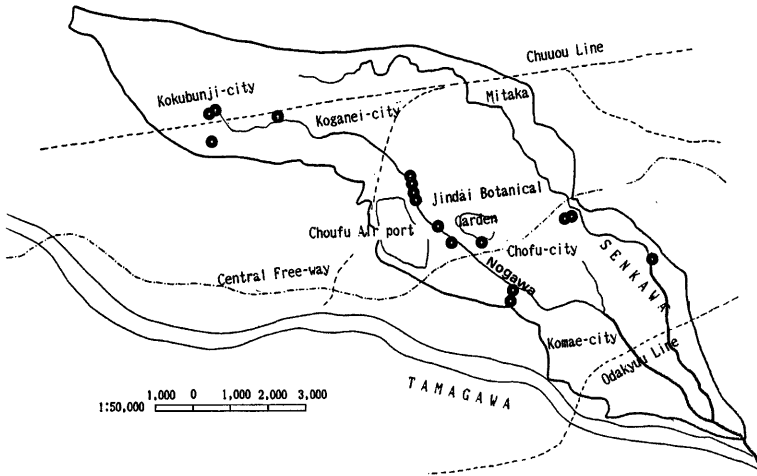


Fig. 9 Outline of the Nogawa river basin.

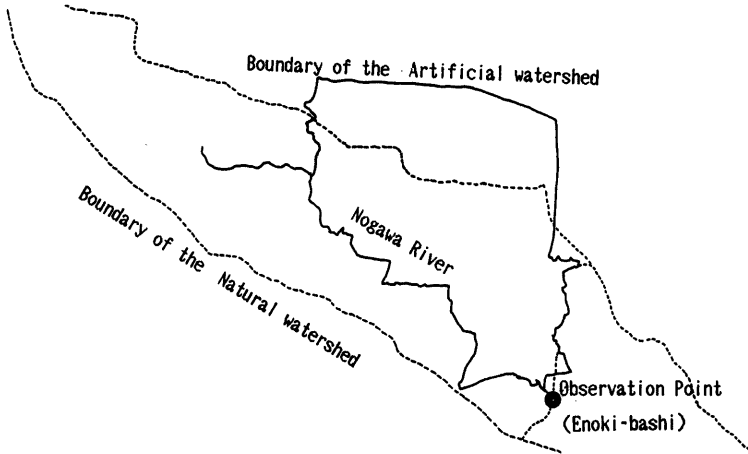


Fig. 10 Comparison on natural watershed and the artificial watershed at the Nogawa river.

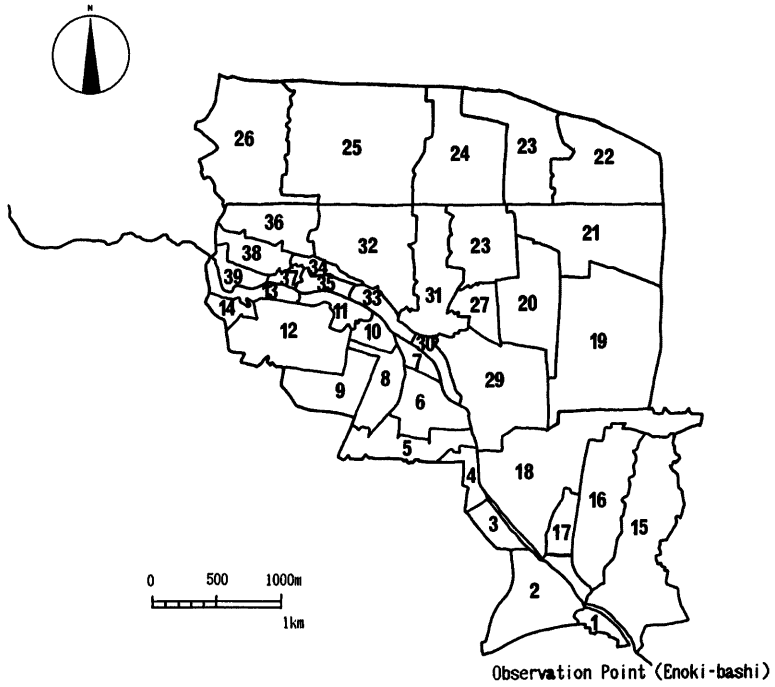


Fig. 11 The division of sub-watershed of the Nogawa river.

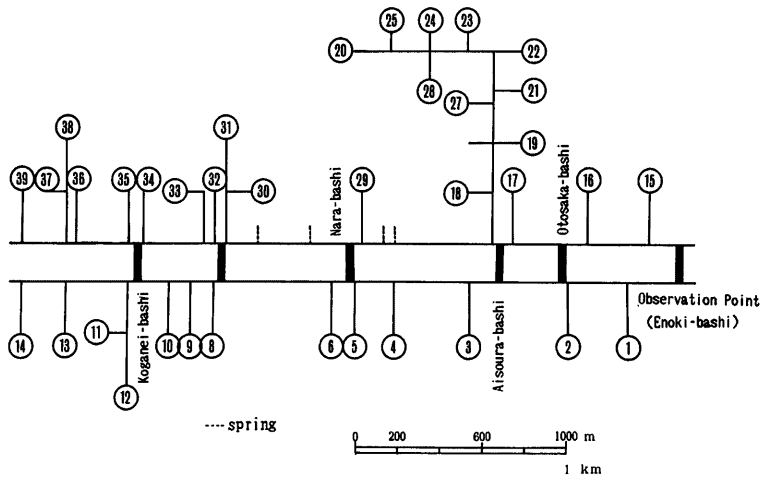


Fig. 12 Location of the outfall from the combined sewer.

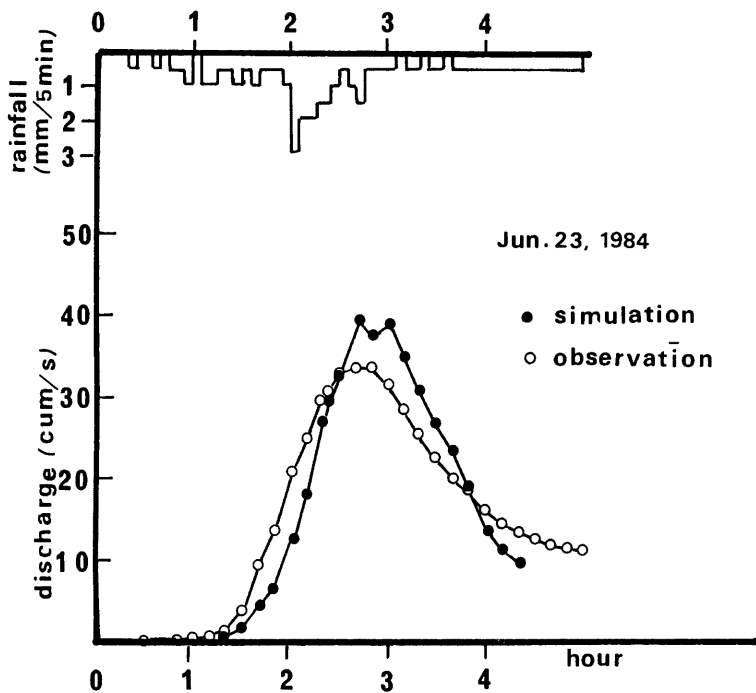


Fig. 13 Result of the simulation of grid analysis.

参 考 文 献

- 1) 市川 新, 他: 都市域における新しい雨水流シミュレーションモデルの提案, 水利科学, Vol. 28, No. 1, 1985.
- 2) 市川 新, 他: メッシュ法の都市河川流域への適用, 水利科学, Vol. 28, No. 6, pp. 74-99, 1985.