

# 都市中小河川の洪水流出特性

谷岡 康<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・谷口将俊<sup>3</sup>・小山幸也<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) 水工部 (〒163-07 新宿区西新宿2-7-1)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第四類 建設系 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 京都府 宇治土木事務所 道路計画課

<sup>4</sup>正会員 東京都 建設局 河川部 計画課長

都市中小河川の洪水流出実態とその特性を近年の時空間的に密に得られた雨量と水位のデータから解明する。市街化や下水道施設の整備の進んだ都市中小河川においては、降雨と流出の関係が極めて線形的であり、下流に降雨が集中する程立上がり急でピークの大きい尖鋭な流出波形を示すことが明らかとなった。さらに降雨の地域分布や時間的変動を詳細に反映出来るように小流域分割を行う洪水流出解析モデルを構築し、都市中小河川の流出現象を良好に再現出来ることを示し、このモデルにより様々な降雨特性に対応する流出特性を明らかにした。さらに、都市中小河川の合理式の適用範囲について考察した。

*Key Words : flood characteristics, small urban rivers, runoff simulation, rational formula*

## 1. 序 論

都市中小河川では、流域の市街化により、その洪水流出は速くピーク流量も大きくなってきており、毎年のように浸水被害を被っている。このような都市河川においては、河川沿いの土地の高度利用もあいまって、通常の河川の拡幅による改修事業が困難で他事業と複合した地下調節池や、公共用地（道路、河川等）の大深度地下空間を利用した地下放水路等が計画、実施に移されてきている。これらの治水施設の管理、洪水調節施設や排水施設の効率的な制御を行う場合や、迅速・適正な水防活動を行うに当たっては、まずその都市中小河川における洪水流出特性を明らかにする必要がある。

都市中小河川の流出に関する研究は、その市街化による影響を予測することを目的に古くから行われてきた。しかし、多くの研究は、雨量や水位の記録が時空間的に密に得られず、降雨の地域分布による流出形態の差異等の洪水流出特性について触れている研究は少ない。

水越ら<sup>1), 2)</sup>は、東京の神田川、石神井川で昭和33年狩野川台風や昭和40年の洪水の貯留関数法を用いた解析を通して、浸透域がなくなった場合には、流出ピークは、当時より2倍以上となることを示して

いる。木下ら<sup>3)</sup>は、都市化による流出の変化の諸要因として河道沿いの氾濫原の遊水効果や側溝敷設の影響等を推算し、その大きさを指摘している。

洪水流出の特性を示す指標として合理式で用いられる洪水到達時間や流出係数があげられる。吉野ら<sup>4), 5)</sup>は、流域面積 $200\text{km}^2 \sim 0.25\text{km}^2$ の中小河川に対して合理式での洪水到達時間や流出係数を調査しているが、都市流域と自然流域の差は明確であるものの、それらの値は、バラツキが大きく、洪水毎の変動も大きいとして、安全側を包括する到達時間の推定式や流出係数を提案している。角屋ら<sup>6)</sup>は、中小河川、特に丘陵山地河川を中心に、到達時間を調査し、実用推定式を提案しているが、市街化流域については、流域の状態の変化を想定した係数を設定している。

一般に、都市化された流域は、様々な下水道施設の整備、不浸透域・浸透域の混在、等から複雑な排水システムを形成しており、この流出を再現するモデルとして、山口ら<sup>7) ~ 9)</sup>の修正RRL法、橋本ら<sup>10)</sup>の準線形貯留型モデル、和泉ら<sup>11)</sup>の修正RRL法と貯留関数法を組合せる方法等、様々な非線形的手法が検討され、これらを用いて市街化の影響量が検討されているが、決定的方法は得られていない。また、現在の極度に市街化の進んだ流域に対しての検証を

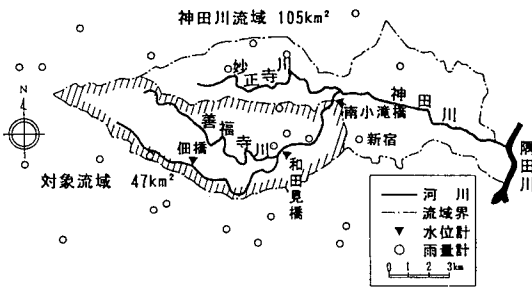


図-1 対象流域図

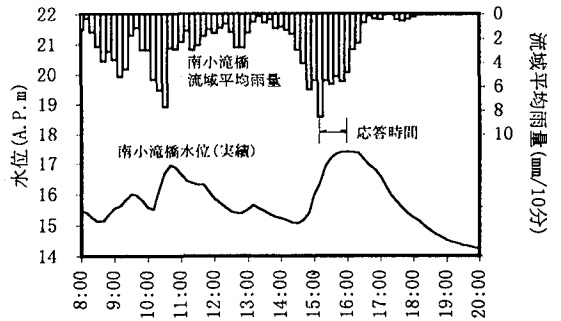


図-2 降雨と水位の対応

した例は少ない。本研究では、著者らが検討してきた都市中小河川流域規模での面積雨量精度<sup>12)</sup>や、降雨の時空間的な分布・変動の特性<sup>13)~15)</sup>、及び狭小域の降雨とその流出の線形的な関係<sup>16)~18)</sup>をもとにして、降雨の時空間的な分布や変動を細かに流出に反映できるように小流域毎の合理式による流出流量を重ね合わせる線形モデルを構築し、その再現性を示し、都市中小河川の流出の実態と特性を、特に降雨の地域分布との関係で明らかにする。

また、都市中小河川の計画に一般に用いられる合理式は流域面積100~200km<sup>2</sup>程度までの流域で用いられている<sup>19)</sup>様であるが、吉野<sup>5)</sup>は「流域面積が大きになると合理式の前提が崩れると思われる」、「合理式の適用はたとえば10km<sup>2</sup>以下の小流域に限ることが望ましい」としているが、都市中小河川での合理式の適用範囲に明確にふれた研究はみられない。

本研究では、都市中小河川流域規模での時々刻々の降雨の空間分布の不均一性が流出に与える影響を検討し、合理式の適用範囲について考察を加えている。

## 2. 研究の対象

### (1) 対象流域と河道

図-1に示す東京都の中心部を貫流する代表的な中小河川である神田川(流域面積105km<sup>2</sup>)<sup>20)</sup>を対象とし、その中流南小滝橋上流の約50km<sup>2</sup>の流域について検討した。当該区間の河道は下流側でおおよそ深さ5m、河幅20m程度のコンクリート水路である。平水時は水深30cm以下、0.3m<sup>3</sup>/s程度の流量しか流れない。河床勾配は、ほぼ1/500程度と急で、神田川の河口である隅田川の背水の影響はない。流域は約9割が市街化されている。また、下水道は、流域の殆どで(東京都区部の下水道面積普及率:平成7

年度末で98%<sup>22)</sup>)整備が進んでいる。対象区間には、図-1の▼で示す南小滝橋、左支川善福寺川合流直後に位置する和田見橋、神田川上流部の佃橋の水位記録が得られている。また、和田見橋から南小滝橋の間に桃園川、十二社幹線という大規模な下水道幹線が合流している。

### (2) 面積雨量の算定方法

当該流域には図-1に示す雨量観測所が配置されている。本研究では、対象流域に500m間隔の格子を設定し、降雨観測所の値から格子点の雨量を内挿し、それらの算術平均により各小流域の流域平均雨量を算定した。この方法により、現在の雨量観測所配置では精度良く算定出来ると考えられる<sup>12)</sup>。また、この流域平均雨量と河川水位の関係が極めて線形的であり、再現性が良好である<sup>16)</sup>ことから、現在の雨量観測所密度では良好な面積雨量精度が得られると考えられる。

### (3) 対象洪水

東京都のテレメータによる10分間隔の雨量・水位記録が得られている昭和54年(1979年)から平成6年(1994年)までの44洪水を対象としている。平均的に、1年当たり2~3洪水であり、台風、雷雨、その他の様々な降雨要因を含んでいる。

## 3. 洪水流出の実態

### (1) 降雨に対する水位の応答時間の検討

観測地点毎の流域平均ハイドログラフのピークの起時と水位のピークの起時の差を降雨に対する水位の応答時間と定義して、流出の速さについて検討を行った。

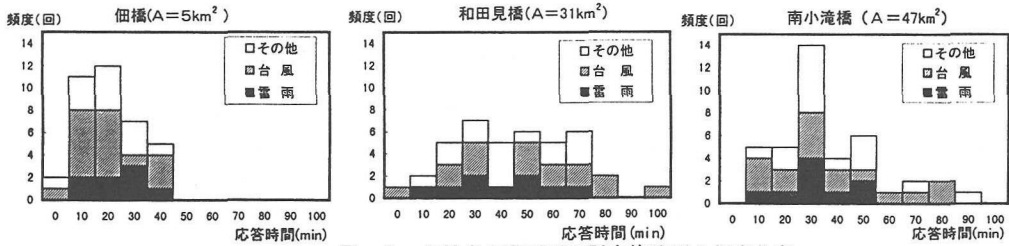


図-3 各地点の降雨要因別応答時間の頻度分布

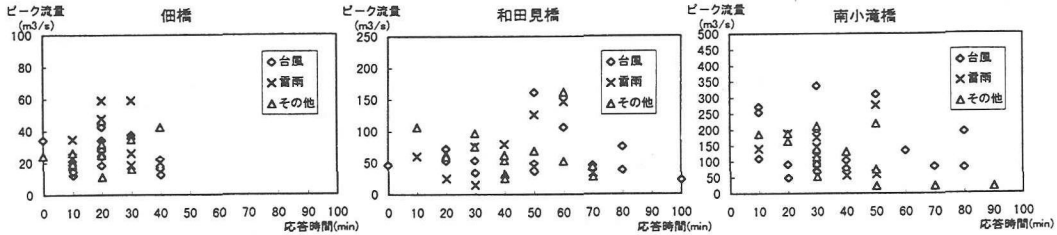


図-4 各地点のピーク流量と応答時間の関係

a) 検討方法

対象とした河川水位は、図-2に示すように10分雨量の変動に鋭敏に反応しており、雷雨の様な短時間に集中する1山の洪水以外は、降雨や水位波形の山は一般に1洪水中に複数存在する。本検討では、個々の洪水の雨量と水位の変動に着目し、その両波形を見比べ、その応答関係が明確なものについてデータを抽出し、応答時間を求めるものとした。これは、1洪水中に存在する複数の波形の山から、降雨や水位の数値的な最大のみを抽出した場合に、雨と水位が全く対応しない場合が多くみれるためである。

降雨波形は、対象とする水位観測所より上流の流域について、先に示した方法で10分毎の流域平均雨量として求めた。

b) 地点毎の比較

図-3に降雨に対する水位の応答時間の頻度分布を示す。最上流の佃橋での応答時間は、10~20分程度に集中しており、他に比べバラツキは小さい。これは、流域が小さい(5km<sup>2</sup>程度)のために各時刻の降雨の空間的な一様性がほぼ保たれているためと考えられる。これに比べ和田見橋では、20~70分の間ではほぼ同じ頻度を示しており、バラツキが大きい。これは、佃橋に比べて流域が大きく、支川善福寺川が合流している影響と考えられ、合流後の水位は、到達時間の違う本川と支川の各々に影響されているためと考えられる。南小滝橋では、30分の応答時間の頻度が最も多く、流域面積が大きいことや流路

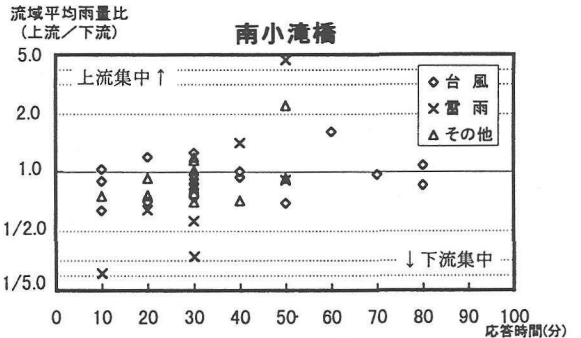


図-5 降雨の集中域による応答時間の比較

延長も長いことからすればかなり速い応答を示している。これは、和田見橋から南小滝橋間に流入している下水道幹線からの流出がピーク水位に対して支配的となっているためと考えられる。

c) ピーク流量、降雨要因による比較

図-4にピーク流量、降雨要因による応答時間の比較を示す。一般には、流出流量が大きい程その下流への伝播時間も速くなり、到達時間、応答時間も短くなると考えられるが、本検討では、その顕著な傾向が見られない。降雨要因毎には、佃橋では雷雨により大きいピーク流量を示す場合が多いが、南小滝橋では、台風によるものが大きい傾向にある。これは、流域が小さい場合には局地的な集中豪雨に大きく影響されるが、流域が大きくなると流域全体として規模の大きい降雨により大きい洪水が発生する傾向を示しているものと考えられる。

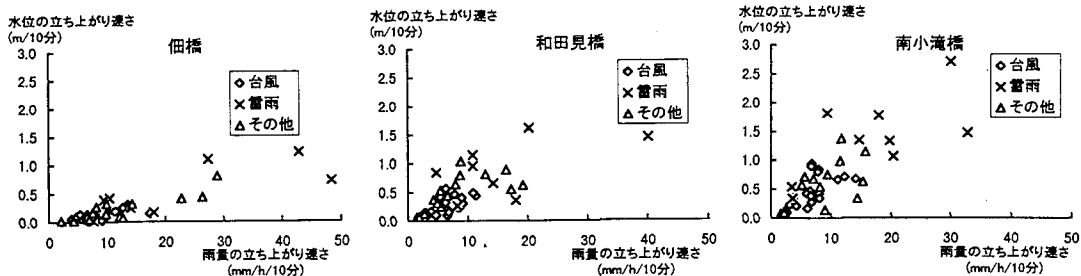


図-6 雨量と洪水位の立ち上がり速さの関係

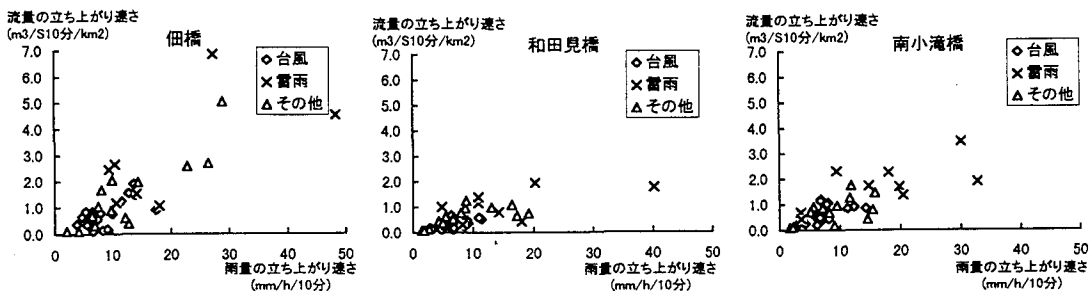


図-7 雨量と比流量の立ち上がり速さの関係

d) 降雨の集中域による比較

図-5に降雨の集中域による、降雨-水位の応答時間の比較を示す。対象流域を上・下流に(図-1に示す流域の東西方向に流域面積が同じになる様に)分割し、各々10分毎の流域平均雨量を算定し、その水位ピークに対応するピーク雨量強度の上・下流の比を求め、応答時間との関係を調べた。パラツキは大きい、下流へ降雨が集中した場合に速い流出を示す傾向にある。これは、下流にいく程にその河川近傍の下水道流域からの速い流出が洪水位のピークを支配してくるためと考えられる。降雨要因別に見ると、雷雨による場合が地域較差が最も大きく、応答時間に、より強く影響している様である。この様に流域内の降雨分布で大きく異なる雨量と水位の応答関係をもとにして洪水到達時間を評価、推定するのは困難であり、信頼性にも欠けると考えられる。

(2) 洪水の立ち上がり速さ

河川水位の上昇速度は、その河川の洪水予警報発令や、水防体制に入るタイミング、洪水調節施設の制御を行う等に当たり、極めて重要な要素となる。ここでは、この洪水の立ち上がり速さの降雨要因との関係や、降雨の集中域による差異等につき検討する。

a) 検討方法

洪水位の立ち上がり速さは、10分単位で水位データが得られているために、10分当たりの水位上昇量を対象とした。また流量の立ち上がり速さは、各水位差に対応する河道断面のH-Q式をもとにして、10分当たりの流量上昇量を求め、流域規模による差を除くために流域面積で除した値とした。雨量の立ち上がり速さは、10分当たりの30分平均雨量の上昇量を対象に計算した。ここで、30分平均雨量としたのは、小流域の流出との関係が線形であり、実績水位の再現性が良好であった<sup>16)</sup>ことによる。

b) 洪水の立ち上がり速さ

図-6に各水位観測所の洪水位の立ち上がり速さを示す。横軸は、流域平均雨量の立ち上がり速さを示すが、明らかに雷雨性降雨において雨量の立ち上がり、洪水位の立ち上がりが速いことが分かる。各地点は、河道深さ4~6mであり、その40~50%程度が10分間で上昇してしまうことを示している。水位の立ち上がりは、その断面形状にもよるが、下流程大きな立ち上がりが見られる。特に南小滝橋では、雷雨性降雨により10分間で2~3mもの立ち上がりを示す洪水がある。これは、直上流に合流する下水道幹線の速い尖鋭な流出の影響によるものと考えられる。図-7は立ち上がり水位を流量に換算し、各々の流域面積で除すことで、単位面積当たりの流

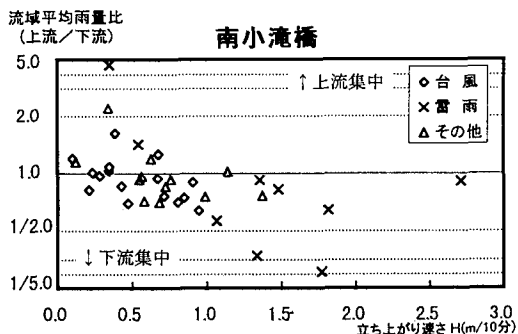


図-8 降雨の集中域と水位の立ち上がり速さ

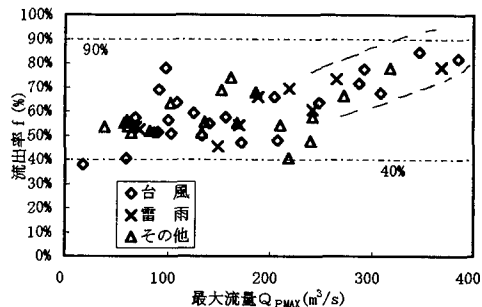


図-9 流出率の算定結果

出流量（比流量）の立ち上がり速さを示したものである。佃橋では流域面積が小さく速い立ち上がりを示すが和田見橋、南小滝橋では立ち上がり速さは比較的小さくなる。これは、雷雨時の局地的豪雨により立上りは速くなるが、その立上がり流量を全体の大きい流域面積で平均化したことによると考えられる。和田見橋と南小滝橋が同程度の速さであることから雷雨等の集中域の広がりより流域面積が大きくなることで、比流量の立ち上がりの速さはある程度限度があるようである。

### c) 降雨の集中域と立ち上がり速さ

図-8に前述の雨量の上・下流の地域的な集中度と洪水水位の立ち上がり速さの関係を示す。バラツキは大きいものの、下流域に集中する程洪水の立ち上がりは、速くなる傾向にある。これは、水位観測地点近傍の到達時間の速い尖鋭な流出波形が、上流からのものに付加されることに起因すると考えられる。

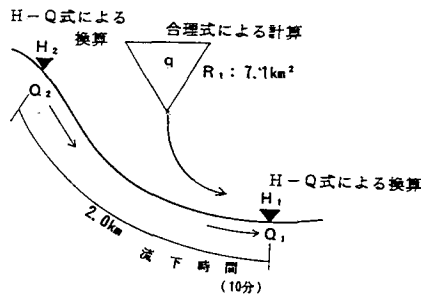


図-10 流出流量推定模式図

### (3) 流出率

図-9に南小滝橋上流流域の流出率を示す。ここで流出率は、各洪水の流域平均総雨量と10分毎の水位から得られた総流出量の比で算定した。

流出率は40%~90%の間でバラツキが大きい。市街化された地域にすれば、流出率が40%程度と小さい場合があるが、これは短時間の降雨強度が強く下水道や側溝での溢れや下水道施設自体での貯留の影響、公園やグラウンド等の浸透域への降雨の集中、降雨自体の観測精度、面積雨量の誤差、流量-水位関係式の誤差等が考えられる。流出率はピーク流量が $250\text{m}^3/\text{s}$ 以下の小さい洪水で特にバラツキが大きく、ピーク流量が $250\text{m}^3/\text{s}$ より大きい範囲では大きくなる程流出率が大きくなる傾向がみられる。これは、強い雨ほど、初期損失や浸透等の影響度合が相対的に小さくなることと関連があると考えられる。

雷雨においてのみ、 $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上で右上がりの傾向がとくに明確にみられる。これは、雷雨が局所的に集中しているために集中域の流出率が反映されるのに対し、台風やその他の降雨は広域的に降るのでその集中位置や流域内の流出率のバラツキに依存するためと考えられる。 $50\text{km}^2$ の流域内でも降雨の降り方や流域内の状況により様々な流出形態を示している様である。

## 4. 洪水流出解析

### (1) 降雨と流出の線形的関係

著者ら<sup>16)-18)</sup>は、都市中小河川流域の流出がその狭い範囲の降雨と極めて線形的な関係にあることを調べている。ここではまず対象流域内の水位記録の得られた2地点間の小流域を抽出し、その流出について調べた。

一般に合理式は、洪水到達時間に対応する確率降雨強度を与え、ピーク流量のみを算定するものであるが、木下<sup>21)</sup>は刻々の実績雨量の到達時間内移動平均雨量をもとに、合理式における流出率の経時変化や雨量強度との関係等を調べている。本研究では、この方法で刻々の流出流量を計算するものとした。流出流量の推定方法の模式図を図-10に示す。上流

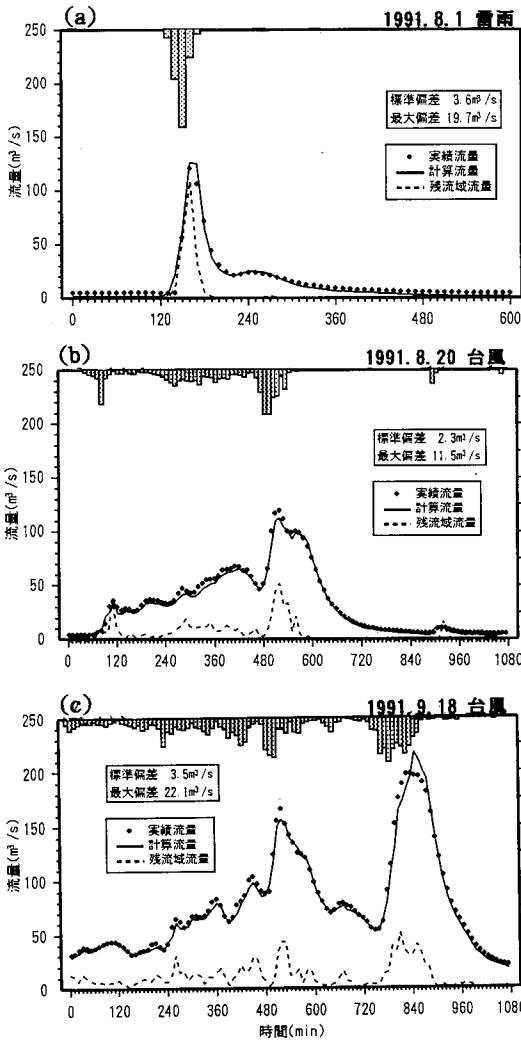


図-11 小流域流出流量推定結果

流量 ( $Q_2$ ) は、等流計算で  $H-Q$  関係式を作成し実績水位 ( $H_2$ ) を用いて求めた。又、残流域流出流量 ( $q$ ) は、流域平均ハイトグラフの刻々の到達時間内移動平均雨量から合理式を用いて算定した。流出係数は実績流量と最も適合度が良好であった 0.5 とし、到達時間は、流域面積規模や、下水道幹線の流下時間等を考慮し 30 分とした。この上流からの流量を河道流下時間 10 分で移相させたものと残流域からの流出流量の合計を下流計算流量 ( $Q_1$ ) とした。下流の実績流量は、上流と同様に  $H-Q$  関係式により、実績水位 ( $H_1$ ) から算定した。以上の方法で求めた下流計算流量 ( $Q_1$ ) は図-11 に示すように洪水波形、ピーク流量ともに実績流量を良好に再現できることがわかる。残流域流出流量と上流流

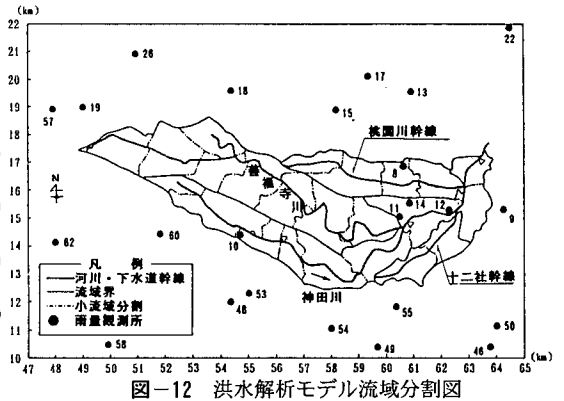


図-12 洪水解析モデル流域分割図

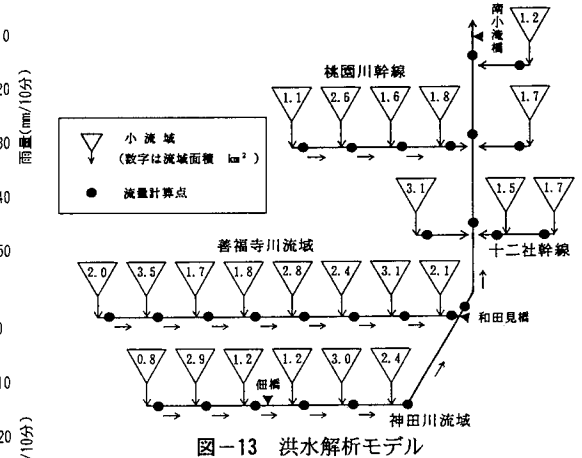


図-13 洪水解析モデル

量の推定結果がともによく再現できているため、その合計である下流のピーク流量や波形が良く実現象と一致していると考えられる。下流流量のうちの  $7 \text{ km}^2$  の残流域流出流量分を点線で示すが、上流約  $30 \text{ km}^2$  からの流量と同程度に下流流量の波形やピーク、それらの生起時刻を支配している様である。このことから、個々の小さい流域からの流出流量は、移動平均雨量 (30 分平均) を用いた合理式を適用することとし、これらを河道流下時間で合成する方法で洪水解析モデルを構築するものとした。

## (2) 洪水流出解析モデル

本研究では、降雨の地域分布を細かに反映するために、流域を下水道の排水流域を参照し、およそ  $2 \sim 3 \text{ km}^2$  程度以下に分割し (図-12) 小流域毎の到達時間内 (30 分とした) 移動平均雨量を用いた合理式による流出流量を、河道流下時間によって合成を行う流出解析モデルを構築した (図-13)。

各々の小流域の流出係数や河道の流下時間は、水位観測値をもとにトライアルにより設定した。

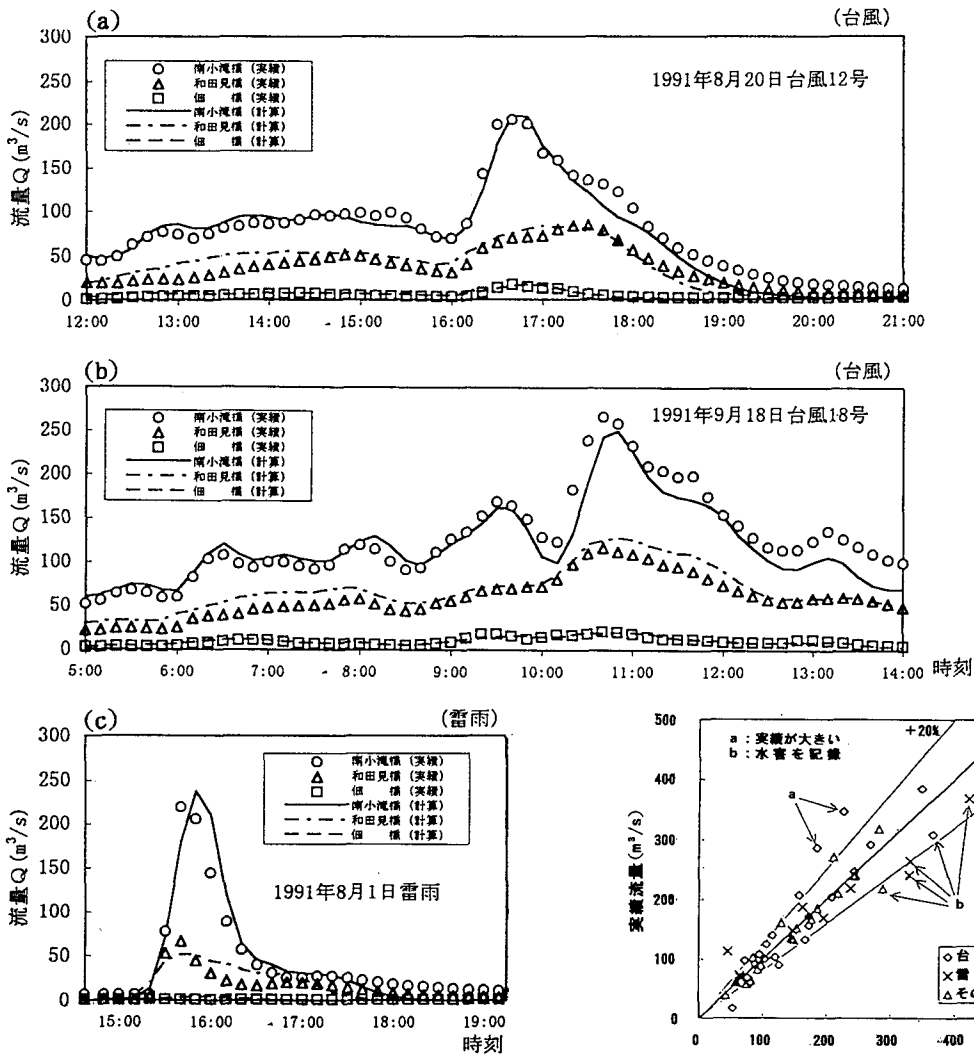


図-14 実績洪水の再現結果

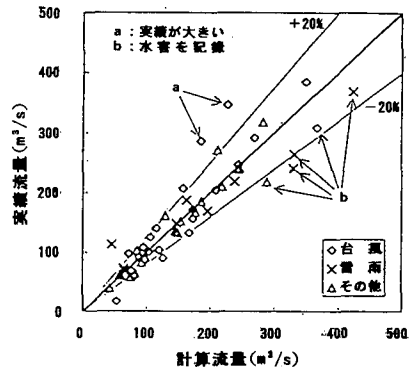


図-15 ピーク流量の比較

### (3) 実績洪水の再現結果

図-14に水位の実測値から求まる流量と解析モデルによる計算結果を示す。検証の対象洪水は氾濫の起きていない範囲で規模の大きい1991年の台風(8.20, 9.18)と雷雨(8.1)を選んでいる。検証の3洪水において、流出係数や河道流下時間等のパラメータは、同じ値を用いており、時間的にも一定で与えている。再現結果は比較的流域内で均一な雨量分布である台風のみでなく、局所的集中度の高い雷雨においても、洪水波形を良く再現しており、解析モデルは当該河川の流出システムを十分反映出来ているものと考えられる。

図-15に44洪水のピーク流量の実績と計算結果

の比較を示す。殆どの洪水は約20%の誤差にはいる良好な結果を示している。実績流量の方が特に大きい数洪水(図中aを付した)は、規模の大きい台風性降雨で下流の橋桁などに水位が達したことでの堰上げにより、実際の流量の割に水位が上昇したことによると考えられる。また、大きい流量の範囲で計算流量が大きくなる洪水(図中bを付した)は、ピークの大きい集中豪雨で、上流で氾濫しているか、下水道等の能力を超えて内水氾濫を起こしている可能性もあり(水害を記録している)、これらの流域の下水道や河道の排水能力を超える洪水現象は本モデルでは再現が難しい。

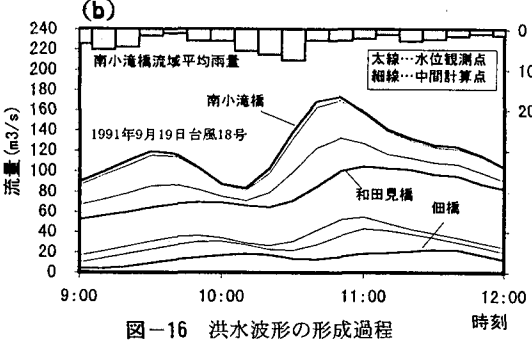
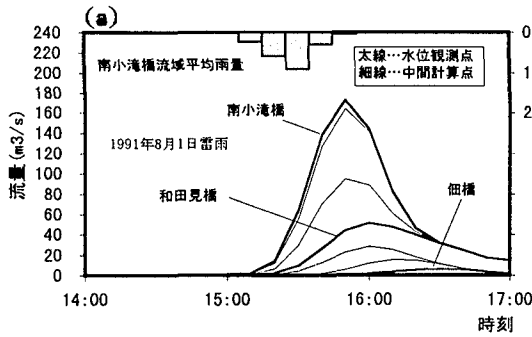
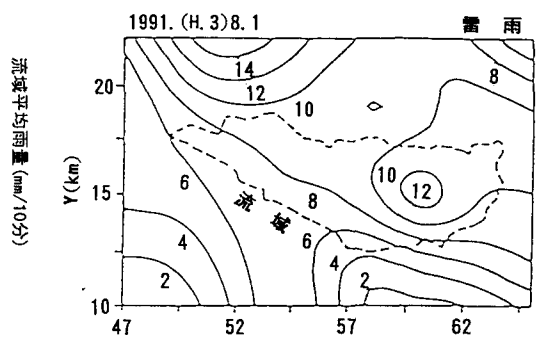


図-16 洪水波形の形成過程



図中数字は降雨量 (mm/10分)  
図-17 実績降雨分布

## 5. 都市中小河川の洪水流出特性

### (1) 洪水波形の形成過程

図-16に神田川の各流出流量計算点における流量ハイドログラフを示す。各ハイドログラフは、各地点から南小滝橋までの流下時間分だけ遅らせて示している。どの洪水も、上流からのハイドログラフの立ち上がり部に、降雨波形に即応する残流域からの速い流出成分が重なり、立ち上がりの速いハイドログラフが形成されていく様子がわかる。特にピーク時においては上流からの流量ピークでなく残流域の速く大きい流出流量によりその量と発生時刻が支配されている。このことから、下流に降雨が集中する程、立ち上がりが速く、応答時間も短くなることが説明出来る。この立ち上がり部が急となる現象は、降雨の初期損失が洪水の立ち上がり時間と重なった場合にも現れる可能性があるが、図-16(b)に示す様な洪水前期の降雨が十分に降った場合にも同様に上流から下流にいくに従い、徐々に急な立ち上がりを示すため、都市中小河川の場合には下流域の尖鋭な速い流出成分の影響が大きいと考えられる。

### (2) 降雨の集中位置や移動が流出に与える影響

流域内における降雨の集中位置によりどの程度

流出波形が変化するかを実績の降雨分布と流域の位置関係を変化させることで調べる。図-17に下流部に集中した実績の雷雨の降雨分布を示す。この降雨の集中位置が中流部、上流部へ集中した場合を想定し、先の流出モデルを用いた流出解析結果を図-18に示す。本計算では雨量の集中位置とその流出形態の差を観るために、流出係数は一様とし、全体の流域平均総雨量を同じくなる様、調節している。雨量が下流域に集中する程、流出流量の波形は尖鋭となりピークも速く大きくなる結果となった。50km<sup>2</sup>程度の流域でもその内の降雨の集中位置によっては、160m<sup>3</sup>/sから90m<sup>3</sup>/s(約1.8倍)ものピーク流量の変化があり、流域内の降雨分布が、流出に与える影響は大きいことが分かる。図-19に南小滝橋における実績のピーク流量と降雨の集中域の関係を示す。降雨が下流に集中している程大きいピーク流量が現れる傾向がある。また、当該河川(主に和田見橋～南小滝橋間)で浸水被害を発生した洪水に( )を付しているが、その殆どが、降雨が上下流で同程度か下流に集中していた場合であり、このことから流出流量は、流域内の降雨の分布状況に大きく左右されることがわかる。

降雨の地域的集中位置のみでなく雨域の移動も流出に大きく影響することが考えられる。著者らの都市中小河川流域規模での降雨特性の調査<sup>13), 14)</sup>では、台風による雨域の移動速度が10~20km/hr(3~6m/s)の事例を示している。また伊藤<sup>15)</sup>は、雷雨の雨域の移動が10km/hr程度である事例を示している。これは、河道流速のオーダー(等流平均流速で3~5m/s程度)と同程度であり、雨域が上流から下流へこの河道流下時間と同様な速度で移



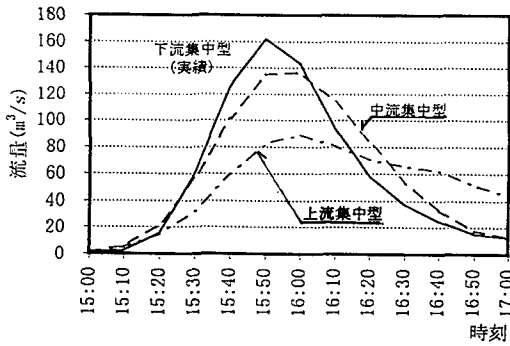


図-18 降雨集中位置と流出ハイドログラフ

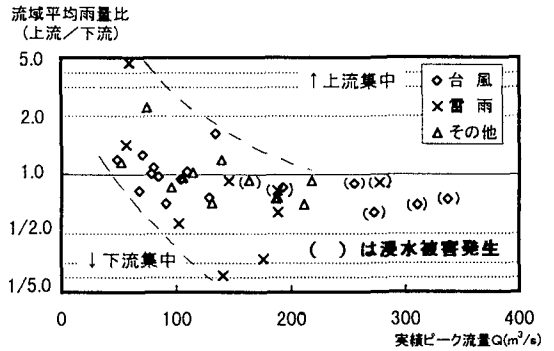


図-19 降雨の集中域と実績ピーク流量の関係

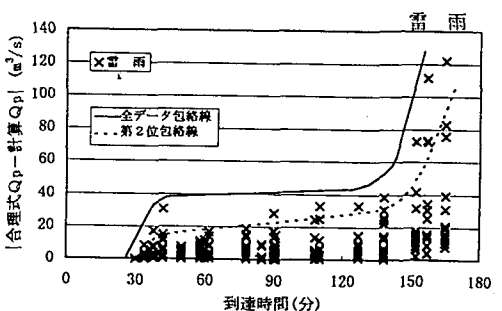
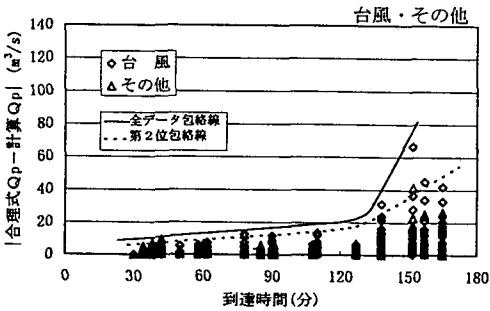
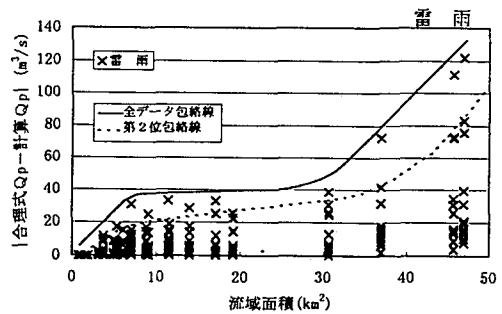
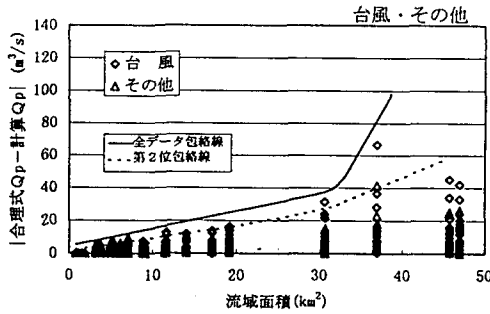


図-20 流域面積，到達時間による合理式と本モデルの流量ピークの差

動した場合には，上流からの流量と下流域からの流量のピークが重なり，大きな流出となりうるということが容易に推定出来る。

また，降雨の時間的集中位置による効果は，一般に自然状態の残された流域では，浸透や初期損失の関係から，前期降雨が続いた後に降雨のピークを迎えた場合にピーク流出流量が大きくなると考えられる。しかし，本研究で対象とした都市中小河川では，一洪水中でも流出係数一定の値を用いて良好な再現性を示したため，この前期降雨の影響は小さいと考えられ，降雨の前方集中，中央集中，後方集中等の時間的集中位置による流出に対する影響は殆どみられないと考えられる。

### (3) 合理式の適用範囲について

都市中小河川では， $50\text{km}^2$  程度の流域においても降雨の地域分布や時間的変動により様々な流出形態を示すことが流出実態や洪水解析からわかった。

もともと，中小河川の治水計画に用いられる合理式は，対象とする流域内での降雨の空間分布と到達時間内の時間分布の，時空間的な均一性を仮定している。このため，流域が大きくなり，到達時間が長くなる程この均一性が失われ，実態にそぐわない流出計算となる。

ここでは，先述の実績の降雨分布を反映出来る洪水解析モデルを用いて算定した結果と，同じ降雨で計算点上流を単一の流域とし，到達時間内雨量の平

均を用いた合理式による計算結果を比較し、流出現象から把えた都市中小河川流域規模での、実績降雨の時空間的な均一性と合理式の適用できる範囲を考察する。合理式での到達時間は、最上流小流域の集水時間（30分とした）と河道流下時間の合計とし、流出係数は、小流域毎の面積による荷重平均値を用いることで、洪水解析モデルと整合を図っている。両計算方法の差は、ある時間や空間の中で実績雨量の分布を均一としたことによる流出流量の差を意味する。

図-20に合理式と本検討での洪水解析モデルにおける流出計算結果の差を示す。その差は到達時間や流域面積が大きくなるD程に大きくなる。つまり、降雨の時空間的な分布が均一であると仮定する合理式では、表現しきれない流出現象となることを示している。雷雨は台風その他に比べ明らかに到達時間内での変動も激しく、空間的にも均一性に欠けるため、差が大きく現れている。その流量差の最大を抱絡する線を見ると、およそ流域面積 $30\text{km}^2$ 、到達時間120分程度で、急激に差が大きくなる様子がわかる。台風、その他ではこの範囲で $20\sim 30\text{m}^3/\text{s}$ 以内の差でありおよそ降雨が均一とみなせるかと考えられる。雷雨では、地域的な均一性に欠けるため台風と同等の差（ $20\text{m}^3/\text{s}$ 程度）とすれば、流域面積 $5\text{km}^2$ 、到達時間40分程度までが限度であろう。流出解析を行う場合には、これ以下の流域面積や到達時間で小流域に分割を行っておく必要がある。

## 6. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に挙げる。

### (1) 洪水流出の実態

都市中小河川の流出は極めて速く、降雨のピークから20～30分の遅れで水位のピークが現れることが多い。また、降雨に対する流出の応答時間は、流域が大きい程遅いとは限らず、支川や下水道幹線の合流状況、降雨の集中域により異なる。特に $50\text{km}^2$ 程度の流域でも、下水道流域の流出の影響が大きいと、降雨のピークから20～30分の応答時間で流出のピークを迎える。洪水の立ち上がりは、特に雷雨等の降雨自体の立ち上がりが速い場合に速い。また、対象地点近傍の下流域に降雨が集中する場合に洪水の立ち上がりが速い傾向にある。

### (2) 洪水流出解析

流出解析は、降雨強度の時空間的な分布を細かに反映するように、対象流域 $47\text{km}^2$ を $2\sim 3\text{km}^2$ 程度に分割し、各々の小流域毎の降雨から合理式による流出流量を河道流下時間で移相させて重ね合わせるモデルを神田川に適用した。その結果、雷雨、台風の降雨要因や降雨分布、強度の異なる3洪水において同じパラメータで流出波形、ピーク流量とも良好に再現出来ることを確認し、44洪水のピーク流量をほぼ20%程度の誤差の範囲で計算出来た。都市中小河川での洪水流出は、降雨との線形性が強く、刻々の降雨の空間分布を細かに把えることで、同じパラメータにより再現出来ると考えられる。

### (3) 洪水流出特性

都市中小河川では、河道の貯留効果が殆どなく、上流からの流量の立上がり部に残流域の鋭い流出成分が付加されて洪水波形が形成されている。このため洪水ピークの生起時刻や大きさは、観測所近傍の残流域の流出の影響が大きい。流域面積と到達時間の関係は流域形状や河道の状況により異なるが、流出流量の差という観点からみた降雨の時空間的な均一性の仮定がおよそ成立する範囲は、雷雨でおよそ流域面積 $5\text{km}^2$ 、到達時間にして40分程度以内であり、台風では $30\text{km}^2$ 、120分程度である。この時空間スケールが都市中小河川での合理式で実績雨量を用いた流出解析を行う場合の適用範囲と考えられる。また、これを超える流域では、降雨の分布によって、流出流量が大きく異なる可能性があるため、流出解析を行う場合は少なくともこの程度の細かさで流域分割を行う必要があると考えられる。

都市中小河川の全てで本研究における洪水特性が当てはまるとはいえない。しかし、極度に市街化された都市部では降雨と流出が線形的であり、その流出は小流域毎の合理式による流出流量の重ね合わせで、十分に再現出来ると考えられる。また、流域内の降雨の詳細な時空間的な分布や支川・下水道幹線の合流形態が流出に与える影響は大きく、降雨、水位の細かいデータ収集と解析が今後とも重要であると考えられる。

謝辞：本研究を進めるに当たり、雨量、水位等の貴重な資料を提供して頂いた、東京都土木技術研究所に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 水越三郎：神田川・石神井川の流出解析，土木技術資料6-1，pp. 3-14，1964.
- 2) 水越三郎，尊田継明：都市域からの洪水流出計算（第1報），土木技術資料8-9，pp. 11-18，1966.
- 3) 木下武雄：都市化による流出の変化，土木技術資料9-9，pp. 11-15，1967.
- 4) 吉野文雄，米田耕蔵：合理式の洪水到達時間と流出係数，土木技術資料15-8，pp. 3-6，12，1973.
- 5) 吉野文雄：合理式による洪水流量の算定についての提案，第27回建設省技術研究会報告，pp. 581-586，1975.
- 6) 角屋睦，福島崑：中小河川の洪水到達時間，京都大学防災研究所年報，第19号B-2，pp. 1-10，1976.
- 7) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市流出解析—降雨損失機構の検討—，土木技術資料13-10，pp. 11-15，1971.
- 8) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市における降雨流出調査第2報—修正R. R. L. 法による流出推定—，土木技術資料14-11，pp. 34-39，1972.
- 9) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市における降雨流出調査第3報—修正R. R. L. 法の実用化に伴う諸問題—，土木技術資料15-7，pp. 37-42，46，1973.
- 10) 橋本建，長谷川正：土地利用変化を評価する流出モデル，土木技術資料19-5，pp. 11-16，1977.
- 11) 和泉清，吉川秀夫：下水道整備が洪水流出現象に及ぼす影響，土木学会論文集第399号/II-10，pp. 113-120，1988.
- 12) 福岡捷二，谷岡康，高本正彦：都市域中小河川流域における雨量観測所の密度が面積雨量精度に与える影響，水工学論文集，第37巻，pp. 27-32，1993.
- 13) 谷岡康，福岡捷二，岩永勉，傳雲飛：都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の変動特性と短時間降雨予測の試み，水工学論文集，第39巻，pp. 56-60，1995.
- 14) 谷岡康，福岡捷二，傳雲飛：都市中小河川規模を対象とした地上雨量計による短時間雨量の変動予測，水工学論文集，第40巻，pp. 273-278，1996.
- 15) 伊藤繁之，福岡捷二，谷岡康：都市中小河川流域における雷雨性降雨の時空間変動特性，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，pp. 768-769，1996.
- 16) 谷岡康，福岡捷二，岩永勉，北川明：都市域中小河川における洪水位と雨量の直接的関係を用いた洪水解析，水工学論文集，第38巻，pp. 69-74，1994.
- 17) 谷口将俊，福岡捷二，谷岡康：都市中小河川の洪水実態とその解析，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 688-689，1996.
- 18) 福岡捷二，川重光正，谷岡康：都市中小河川における降雨と流出，第47回平成7年度土木学会中国支部研究発表会概要集，1995.
- 19) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：改訂建設省砂防技術基準（案）計画編，pp. 19-20，同調査編，pp. 149-150，山海堂，1985.
- 20) 東京都建設局河川部計画課：'85東京の中小河川，p. 26，1985.
- 21) 木下武雄：到達時間流出率による合理式流出係数の検討，国立防災科学技術センター研究報告第33号，pp. 1-14，1984.
- 22) 東京都下水道局：数字で見る東京の下水道，区部の下水道普及状況，<http://www.tokyo-teleport.co.jp/tokyo-gesuido/05-01.htm#05>，1997. 8アクセス

(1997. 6. 3 受付)

## CHARACTERISTICS OF FLOODS IN SMALL URBAN RIVERS

Yasushi TANIOKA, Shoji FUKUOKA, Masatoshi TANIGUCHI and Yukiya KOYAMA

In this paper, the characteristics of floods in small urban rivers are examined using well-observed rainfall and water-level data. In an urbanized area where the sewer systems are well maintained, rainfall-runoff relation is extremely linear. If the rainfall is concentrated downstream of a river, the peak discharge becomes larger and the hydrograph becomes sharper than the other cases. In order to reflect precisely the areal distribution and fluctuation of rainfalls, a flood analysis model which divides a basin into sub-basins is built. The model can finely reproduce the flow phenomena of small urban rivers. With the proposed model it is possible to clarify the runoff characteristics corresponding to different types of rainfalls. Further, the applicability of the rational formula for small urban rivers is also discussed.