

下水道整備が洪水流出現象に及ぼす影響

AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN FLOOD RUN-OFF AND THE BASIN AREA SERVED BY THE URBAN SEWERAGE SYSTEM

和泉 清*・吉川秀夫**

By Kiyoshi IZUMI and Hideo KIKKAWA

In recent years, there has been an increased in the frequency of floods in small river basins within the Tokyo metropolis. From the disaster-prevention perspective, this is a serious problem. This phenomena is a result of the progress of urbanization works in the basins, like the increased in the basin area drained by the urban sewerage system. Thus the volume of rainwater flowing into the urban rivers have greatly increase.

The aim of this paper is to clarify the cause of this phenomena. It is an analysis of the relationships between, the basin area served by the sewerage system and its rate of increase, with the characteristics of the flood discharge from the basins. The analysis is based on actual data of flood discharge and rate of increase of the area served by the sewerage system in a basin.

The importance of the extent of the area of a river basin served by a sewerage system, in addition to the amount of impermeable area, on the time of concentration has been clarified.

Keywords : small river, urbanization, sewerage system

1. 緒 言

中小河川の洪水流出現象に直接的な影響を及ぼす都市化要因は、主として流域内の不浸透域の拡大と下水道等の排水施設網の整備によるものである。

本文は、これら都市化要因のうち、特に、下水道の整備が都市中小河川の洪水流出現象に及ぼす影響を定量的に分析したものである。

流域の規模、形状、地形（勾配など）等の差異に影響されず、下水道の整備過程がある範囲で明確な形で変化量を把握できる流域として東京山の手の中小河川を調査対象とし、これら各河川の観測記録をもって下水道整備と洪水流出の変化との関係について考察する。

都市中小河川では、近年、1975年代初期においては安全であった降雨規模に対して、雨水の集中化に伴う流出量の増大による浸水被害が顕著に発生するようになった。この現象は、流域の都市化、特に下水道を含む排水施設網の整備に伴う雨水の集中化によって、相対的に河川の流下能力が不足したために発生したものと推定され

17

本文は、それら都市化要因のうち、下水道整備率を取り上げ、下水道整備と洪水流出の変化の関係について、降雨強度別に分析し、これから下水道整備の方法等について考察したものである。

2. 流域の都市化と洪水流出の変遷

(1) 都市域における洪水流出の実態

流域の都市化に伴う洪水流出の実態について、都内中小河川を例に、洪水到達時間と流出係数の2つの流出特性指標から考察する。

a) 洪水到達時間

本文では、洪水到達時間について、観測記録から得たピーク流量の発生時刻をベースとして次式により整理した結果を対象とする。

ここに、 t_p :洪水到達時間(min), t_1 :ピーク雨量発生時刻に先行し、ピーク流量発生時刻に生起している雨量とほぼ等しい雨量が生起している時刻¹⁾, t_2 :ピーク流量の発生時刻、ただし、 t_1 , t_2 は、10分単位で整理する。

都内中小河川の神田川を例に下水道の整備が促進された期間を選び、その期間の洪水到達時間の短縮化状況の変化の実態を整理した。

* 正会員 東京都土木技術研究所技術部主任研究員
(〒108 港区港南1-1-18)

** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科
(〒160 新宿区大久保3-4-1)

1973年から1976年の間で、降雨強度が5 mm/h以上 の42出水例の洪水到達時間の実態、ならびに、1979年 から1982年における36の出水例の場合をそれぞれヒス トグラムに表わすと、Fig.1のようになる。

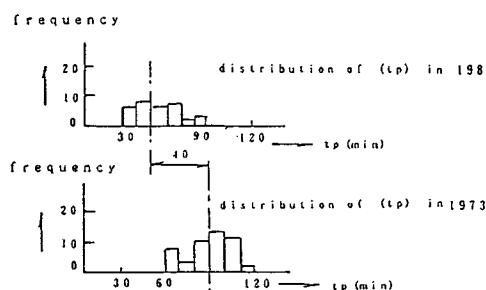


Fig. 1 The downward shift in the median of the 1973 frequency distribution of the time of concentration (t_p) with respect to that of the 1982 distribution for the Kanda river.

実態的な神田川の洪水到達時間の発生頻度である Fig.1によれば、この10か年間に1982年における t_p は1973年当時のそれより約30~50%程度短縮しており、平均値で40分程度短縮していることがわかる。

この現象が、合流式による下水道普及区域面積が対象流域面積に占める割合で表わした下水道整備率（以下、 S_d と表わす）等の排水施設の整備による影響の結果と考えられる。

b) 流出係数

次に、流出係数は、降雨観測記録による流域平均降雨強度と観測ピーク流量を有効降雨強度に変換した値から次式により算定した結果を用いる。

$$f_p = \frac{r_e}{r_m} = \frac{3.6 Q_p}{A \cdot r_m} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 f_p ：流出係数、 r_e ：洪水到達時間内の有効降雨強度（mm/h）、 r_m ：洪水到達時間内の流域平均降雨強度（mm/h）、 Q_p ：ピーク流量（m³/s）、 A ：流域面積（km²）

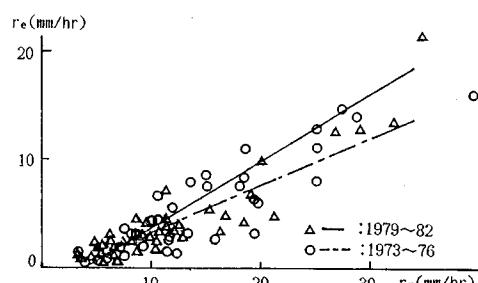


Fig. 2 The difference in the relation between the effective rainfall intensity versus the mean basin rainfall intensity for floods in the Kanda river over two distinct periods.

f_p の実態についても、神田川の場合を例にみると、その変化状況はFig.2に示すとおりである。

既成市街地流域である神田川のような場合においても、この10年間での f_p の増加現象をみることができる。

3. 下水道整備と洪水流出の変化

都市中小河川の洪水流出解析例²⁾などで実績のある洪水流出計算法により下水道整備率 S_d が洪水出現象に与える影響について、下水道整備過程や状況の変化を観測記録で検証できる流域を選定する。

さらに、できる限り各流域に均一な降雨状況をもたらせた台風性の洪水を検証対象洪水として選定し、以下のように検討する。

(1) 流出計算による検討

a) 下水道整備区域

本文では、下水道整備に伴う洪水流出の変化について表現するのに、下水管内の流出と貯留の関係を貯留閑数 $S-Q$ 曲線で表現する修正RRL法の簡便法^{3)~5)}を下水道整備区域に適用し検討した。

本法は、降雨-損失-流下-流出というモデルによって各機構における定数を推定する方法であるが、ここでは、以下のように計算を行う。

イ) 有効雨量（損失）

有効雨量は流域内の道路および屋根面積だけに限定した不浸透域 $A_{I_{mp}}$ ($A_{I_{mp}} = A \times I_{mp}$ 、ただし、 I_{mp} ：不浸透域率(%))、 A ：流域面積(km²))を説明変数とした都内中小河川の目黒川の解析例⁶⁾から得られた次式により求める。

$$R_e = I_{mp} \cdot R - (D_{I_{mp}} \cdot I_{mp} + 6.87) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 R_e ：有効雨量(mm)、 R ：流域平均雨量(mm)、 $D_{I_{mp}}$ ： $A_{I_{mp}}$ における貯留量(2 mm)とする。

ロ) 等到達時間域図（流下）

各下水道排水区の到達時間および等到達時間域図は、各下水管路網を利用し対象流域のほとんどが遮集管によって順次河川に放流されていることからFig.3に示すように流域長500 mに対し到達時間5分とした。

ハ) S-Q曲線（貯留）

流域面積の規模に応じて最大到達時間と貯留量の関係を利用して、流量 $Q=30$ mm/h時の下水管内の貯留

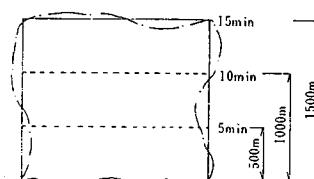


Fig. 3 The conceptual representation of the time of concentration in drainage basin.

量 S_{30} 等を推定し、 $S_{30} = KQ^{0.7}$ として定数 k を定め⁷⁾、この関係式から各分割流域において、流入量から流出量を以下のように算定する。

$$I = \frac{dS}{dt} + Q \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

式(5)を差分式で表わす.

ここに, I : 流入量, S : 貯留量, Q : 流出量, Δt : 単位時間(10分とする), A : 対象分割排水区

b) 下水道未整備区域

下水道未整備区域では、下水道管内の貯留高を考慮した修正 RRL 法と共に性をもたせた S - Q 曲線の逐次計算により等価粗度 N を考慮した貯留閖数法⁸⁾により流出計算を行った。

1) 有效雨量

下水道未整備区域における有効雨量については、前述の下水道整備区域における修正 RRL 法の場合と同様、式 (3) から求め、式 (4) により流入高 I を求める。

口) 流域 (流域貯留高や流域定数)

次に示す流域定数 k や流域貯留高 S については、各分割流域における等価粗度 N を用いて推定する式から求める。

$$k = 7.349 (NLI_0^{-1/2})^{0.6} \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここに, S : 貯留高 (mm), L : 流路長 (km), I_0 : 斜面勾配, N : 等価粗度 ($m^{-1/3}$, s), q : 流出高 (mm/h), k, p : 流域定数

ここで、式(7)および(8)の N については、Fig.4に示す都市域の氾濫原における水理模型実験結果⁹⁾を利用し、都内中小河川の洪水例から推定される実質的な平均氾濫水深(h)として、1m程度であると考え、Fig.4の $n=0.06$ を使用した。この n や各分割流域に

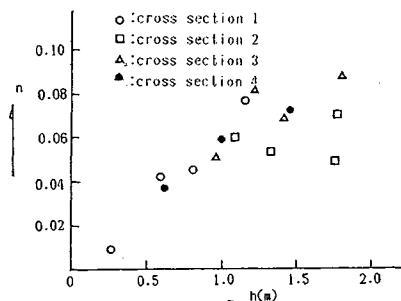


Fig. 4 The relation between the coefficient of roughness (n) at the flood periphery against the depth of flow (h), as determined from hydraulic experiments on scaled models of flood plains.

おける河道長 L および流域面積 A (km^2) と、 I_0 に各流域の平均勾配を使用して式 (7) および (8) から貯留高 S や流域定数 K が求まる。

八) 河道 (河道貯留や河道定数)

各河道の定数は、各分割モデルの河道について等流理論に基づく特性曲線法の河道定数を貯留関数法¹⁰⁾に変換する次式から貯留高 S や河道定数 K, P を求める。

$R = K' a^z$ として、

$$K = \frac{L}{3600} \left(\frac{n}{i^{\frac{1}{2}} \cdot K'^{\frac{2}{3}}} \right)^p \dots \dots \dots \quad (10)$$

ただし、 $P = \frac{3}{2z+3}$

ここに、 R ：径深（m）、 L ：河道長（m）、 i ：河道勾配、 k' 、 z ： $R = K' a^z$ （ただし、 a を流積（ m^2 ）とした場合）の定数、 n ：粗度係数、 Q ：各河道区間の平均流量（ m^3/s ）である。

c) 解析結果

下水道整備区域と未整備区域が混在する都内中小河川流域において、流量観測データの揃っている河川基準点を検証地点として、下水道整備区域に修正 RRL 法を下水道未整備区域には、 N を考慮した貯留関数法を適用した流出モデルにより 1955 年代、1965 年代、1975 年代の流域状態に 1965 年 5 月 15 日の洪水を対応させ、各年代の流出波形の状況について検討した。

これら各年代の各流域状態での流出計算から得た一例として、都内中小河川の1つである善福寺川の q の変化や t_0 の変化の状態をFig.5に示す。

この期間の著しい洪水流出現象の変化をみることができる。流域内の I_{mp} や S_d の変化による影響であることかが推測される。

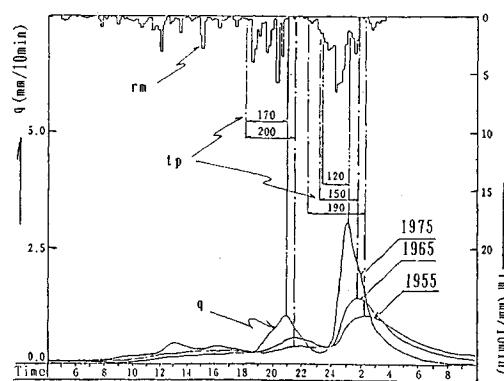


Fig. 5 A comparison of the changes in the concentration for three stages of urban development in the Zenpukuji river basin, from simulated hydrographs derived from a storm occurring on May 15, 1965.

イ) 下水道整備率とピーク流出高の関係

次に、不浸透面積率の増大や下水道の整備による洪水流出現象の変化に対する影響について、都内中小河川においてそれぞれ実測値による検証を踏まえた洪水流出計算等から考察する。

都内中小河川流域の下水道整備等の排水施設が未整備の状態、すなわち下水道整備以前の対象各洪水のピーク流量 (q_1 と表わす) と下水道整備が実施された状態、すなわち下水道整備以後の対象洪水のピーク流量 (q_2 と表わす) との関係をいくつかの実績洪水によりシミュレーションを行った結果が、Fig. 6 である。

Fig. 6によれば、氾濫を伴わない洪水の場合と氾濫を伴った洪水の場合では、 q_1 に対する q_2 の比（**Fig. 6**における各直線の勾配）に違いがあることがわかる¹¹⁾。

S_d が 100 % の状態で河道氾濫が生じているような洪水の場合、 q_2 は q_1 より 25 % 程度、洪水規模の小さい、氾濫を伴わない降雨規模の小さい ($r_m = 30 \text{ mm/h}$ 程度以下) 場合は、 q_2 が q_1 の 2 倍以上に増加していることが推定される。

また、河川の流下能力に左右されることではあるが、 S_d の状況により、 q_1 に対する q_2 の割合に、大きな違いがあることがわかる。

口) 降雨強度別による相違

前述のように S_a と q の関係は、河道の疎通能力によって判別する必要がある。

現在、都内中小河川の疎通能力が r_e にして 20 mm/h 程度であるのでこれに対応するものとして r_m として 50 mm/h 未満の洪水と 50 mm/h 以上の洪水に分類し以下考察する。

① r_m が 50 mm/h 未満の場合

r_m が 50 mm/h 未満の場合、各河川で氾濫は生じない

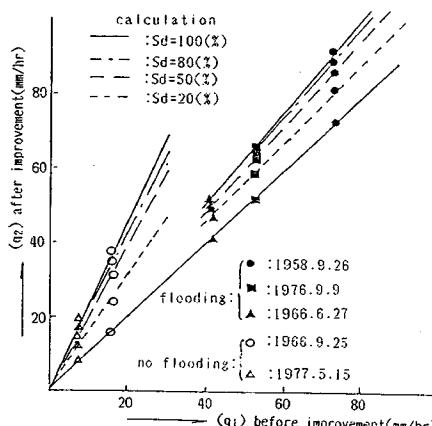


Fig. 6 A simulation of the changes in the peak discharges, with respect to changes in the area served by the sewerage system, for five different storms.

ので、下水道による影響を直接、実測値により把握することができる。

すなわち、同一期間中で排水施設網の普及状況が異なる各河川の流出高の変化に着目する。

1955年代初期から1965年代にかけて、河道の整備が行われず、下水道の整備のみが先行した神田川の流出高と同期間に内に下水道整備が行われず、河道の整備が先行した善福寺川の流出高の変化¹²⁾を対比させる。

この期間、不浸透域面積率は両河川とも1~2%の増加に過ぎないが、 I_{mp} の増加による有効雨量の寄与分を差引き、さらに河道改修による効果による q の増加分を差し引くことによって、 S_d の増加に伴う q の増加分が全体の流出の増加に占める割合（寄与率）を求めることができる。

すなわち、 I_{mp} は、総流出量を支配する要因であり、 S_d や河道の整備が洪水到達時間に関与する要因として都市中小河川の洪水流出現象の特徴的な変化であるピーク流量の変化に着目して、1955 年代の都内中小河川の実測値に基づく洪水流出特性要因を基準として作成した洪水流出の変化に対応する流域の都市化指標である都市化数^[3]を利用して、対象期間の流域の I_{mp} の変化によるピーク流量の変化量等への寄与量を差し引くことで、 S_d の増加に伴う洪水流出の変化への寄与分を数量化することができる。

都内中小河川における場合の例が、1958年から1983年までの洪水流量観測データ等に基づくTable 1およびFig. 7に示す各流域の S_d の状況と S_d の変化に伴うピーク流量の増加量との関係である。

ここに, q_1 :下水道整備前ピーク流出高, q_2 :下水道整備後ピーク流出高, δq :ピーク流出高増加率(%)

② r_m が 50 mm/h 以上の場合

この場合、現況河川の流下能力を超える流出現象であ

Table 1 The change in the percentage of the impermeable area and the percentage area served by the sewerage system from 1973 to 1982, for a number of river basin in Tokyo

item river	A (km ²)	I	L (km)	i	Inp (%)	Sd (%)
Kanada	11.79	1/110	10.8	1/650	46~54	65~100
Zennpukuji	18.95	1/140	10.4	1/840	49~56	63~100
Myousyouji	19.20	1/120	7.8	1/570	56~59	77~100
Meguro	27.45	1/119	19.9	1/350	51~56	0~65
Jyakuzure	6.45	1/65	4.1	1/200	61~64	0~63
Syakujii	33.27	1/170	19.9	1/530	42~48	32~44
Tagara	10.83	1/150	5.6	1/600	44~50	12~75
Nogawa	30.64	1/115	9.9	1/330	22~28	23~69

(* Imp. Sd: 1973~1982)

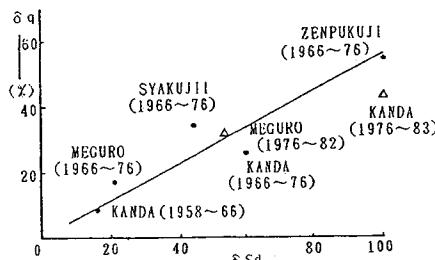


Fig. 7 The relation between the percentage change in the peak discharge (δq), and the percentage change in the area served by the sewerage system, over a defined period, for a number of river basins in the Tokyo Metropolis.

るため、各河道で氾濫が生じ、氾濫河道を考慮していないこの流出モデルによる計算法では、下水道と河道による流出増加分を分離することが難しい。

S_d の増加に伴う δq を直接求めることは困難であるが、下水道の流下能力を上回る雨水は、路面に滞留または、路面を流下し河川に流入する。都内中小河川流域の場合、氾濫を伴う洪水は、氾濫原と河道を復断面水路として、河道内の粗度係数に流量観測結果の値を使用し¹⁴⁾、氾濫原のそれに Fig. 4 に示す水理実験の結果の $n=0.08$ を使用して流出計算を行い S_d の変化に伴うピーク流量の変化量を推定する。

すなわち、都内中小河川の場合、氾濫原においては、氾濫水深が大きいほど、土地利用形態（家屋の配置や密度の相違、道路面積率など）による影響が大きく、Fig. 4 に示すように n が大きくなる傾向がみられる¹⁵⁾。

しかし氾濫水深が 1 m 程度の洪水例による n の値を代表値として、前述の下水道未整備区域における式(7)、(8) の N の値に氾濫原の路面の粗度係数 n を使用した路面上の流下量と下水道による流下量とを加算する方法で、 r_m が 50 mm/h 以上の場合における S_d の効果による δq を推定した結果である。

Fig. 6 に示す氾濫を伴った場合の q_1 と q_2 との関係から δq と S_d の関係を求めることができる。

(2) 重回帰分析による検討

以上、流域内の下水道整備区域に修正 RRL 法を下水道未整備区域には貯留関数法を適用し、流域内の下水道の整備状況と洪水流出の変化との関係を観測値と流出計算により検証してきた。

しかし、この流出モデルは、特に下水道整備区域に適用される修正 RRL 法では下水道の流下能力を上回るような洪水、すなわち、現状における都内中小河川の場合、降雨強度 50 mm/h (有効降雨強度に換算して、25 mm/h 以上) を上回る現象を対象とする場合、すなわち、下水道の流下能力を超える出水については、既述のように

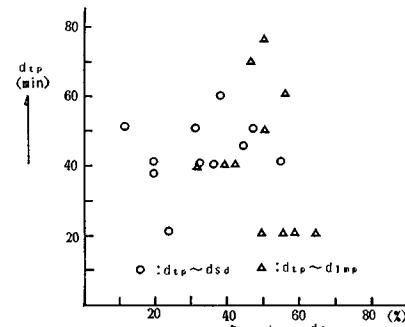


Fig. 8 The effect of percentage change in the impermeable area (δI_{mp}), and the percentage change in the area served by the sewerage system (δS_d), on the change in the time of concentration (d_{tp}).

下水道整備と洪水流出の変化の関係を観測値に裏付けられた形で定量化することが困難である。

そこで、都内中小河川のうち、神田川、石神井川等の山の手の支川を含めた 12 流域を対象に現象面に視点をおき回帰分析により洪水流出の変化と各種指標との関係を検討し、下水道の整備率が、洪水流出の変化、特にピーク流量の変化に与えている影響の程度について分析した。

まず、各河川の流域面積、下水道整備率等の流域特性指標と流出係数や洪水到達時間の流出特性指標との相互関係を回帰分析により、洪水流出の増大等、これら流域特性指標が洪水流出の変化に対する寄与率等を把握する。

すなわち、流域の都市化による洪水流出の変化を直接支配している流域特性指標として、既述の流出解析結果を参考に、流域面積 A 、流域平均勾配 R_l 、河道長 L 、河道勾配 I 、と S_d 、 I_{mp} 等を選択する。

次に、 R_l と I 、 A と L とは、それぞれ相互に関係が強い。したがって、 I や L を除き、 R_l と A の指標で代表させることで、 f_p や t_p の変化に影響を与えている指標として、結局 A 、 R_l 、 S_d 、 I_{mp} の 4 つの指標で代表させることができる。

ところで、 A や R_l は、本文で例としている都内中小河川のような既成市街地流域のような場合、人工的に流域を分割したり、流域を変更するような場合を省き、流域の都市化により変化する指標とはならない。また、そのような河川は対象としていない。

その結果、上記 6 つの指標のうち t_p と f_p の変化に関する流域特性指標としては、 S_d と I_{mp} の 2 つの指標とすることができる。

既述の Fig. 2 や Table 1 の例にみられるような支川流域を含めた 12 の都内中小河川の t_p の変化量とその間の S_d および I_{mp} の変遷との関係を示すと Fig. 8 のように

なる。

相関係数 $r=0.63$ と強い関係とはいえないが、これらの関係を回帰式で表わすと以下のようになる。

ここで、 t_{p_2} :下水道整備後の洪水到達時間 (min), t_{p_1} :下水道整備前の洪水到達時間 (min), d_{tp} :短縮した洪水到達時間 (min, ≥ 0), $d_{t_{mp}}$:不浸透域面積率の変化量 (%), δS_d :下水道整備率の変化量 (%)

このように、 S_a の増加が d_{tp} に大きく影響していることがわかる。

4. 洪水流出への影響度

(1) 流出特性からみた場合

S_d と I_{mp} の変化が洪水流出に与える影響には基本的な違いがある。

I_{mp} は、 f_p の値を直接的に説明できる都市化指標の 1 つであるが、 S_d は、 f_p や t_p の値の変化に関係する指標である。既述の式 (13) に示すような重回帰分析による結果にみられるように、 S_d は、特に t_p の変化量を説明できる都市化指標の 1 つである。

すなわち、 t_p の値を決める指標は、既述のようにおむね、流域面積の大きさ、流域勾配、河道勾配等の流域要素と降雨強度等であると考えられるが、これらの指標は、流域の都市化により変化する指標ではなく、したがって、既述のように t_p の大きさを決定する指標ではあるが、 t_p の変化量 d_{t_p} を説明できる指標とはならない。

d_{tp} を説明する場合、流域の都市化によって変化する指標は、 I_{mp} や S_d ということになる。

特に、都内中小河川の場合、 S_d が 50 % を越えた状態から急激に Q_b が増加する現象が発生しており¹⁴⁾、この S_d の変化状況が t_p の変化量 d_{tp} に著しい影響を与えることが、式(13)の結果からも推定される。

また、都内中小河川の流出解析例^[15]によっても、下水道の流下能力以下の洪水では、 S_d が Q_p に及ぼす影響量が大きいことは、既述の Fig. 7 などから明らかなことである。

また、下水道整備の流下能力を越える洪水、すなわち、浸水が発生しているような洪水例においては、流出解析結果や重回帰分析による結果においても、降雨強度が大きいほど、 S_d の変化量に対する δq の値は見掛け上小さく、これは、路面が水みちとなって流下する現象が発生することから、 S_d による影響が見掛け上小さく結果として現われるためといえる。

(2) 流域特性からみた場合

a) 単流域の場合

一般に、雨水の放流先が河川である場合、下水道の整

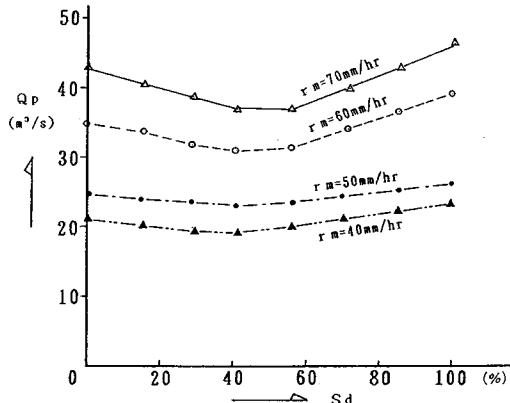


Fig. 9 The change in the value of peak discharges (Q_p) against the percentage area of a basin served by the sewerage system (S_s) for four rainfall intensities.

備は下流側から行われる。

下水道が、下流側から整備されていく場合、既述の流出モデルによる計算結果によれば、対象地点の河川ピーク流量が、Fig. 9 に示すように一時低減する現象が発生することが推定される。

そして、下水道の整備区域が対象流域の過半域を超えた状態において、再び対象地点のピーク流量が増大化する現象が生ずることが推定される。

下水道が下流側から整備され、 S_d が 40 % 程度までの場合、下水道整備区域からの雨水が先に流下し、上流域の下水道未整備区域からの雨水との時差が大きく、 Q_p が一時低下する現象が考えられる。

そして、下水道が下流側から整備され下水道整備率が50 % を超える状態から対象地点のピーク流量が急激に増加する現象が発生する。

S_d が 50 % 以上となると、雨水の流出が早まる区域
が大きくなり、対象地点の Q_p は、雨水の集中化による
 Q_p の生起時刻が早まると同時に急増するためと考えら
れる。

また、Fig. 9 に示すように降雨規模の大小によって Q_p の増減の幅に差があることが考えられる。

降雨規模が大きい降雨では下水道整備率が増加するにつれ、ピーク流量の増減の振幅が大きくなっている。

さらに、 S_d が0%の状態の Q_p に対する S_d が100%の状態の Q_p との比は、降雨規模が大きいほど、小さいことが計算結果から推定される。

これは、降雨規模が排水施設の流下能力を上回る場合、現況の規模の下水道整備状態（たとえば、降雨強度 50 mm/h、流出係数 0.5 程度）では下水道で収容できない雨水が路面上を流下する現象を計算過程に組み入れたことによる結果である。

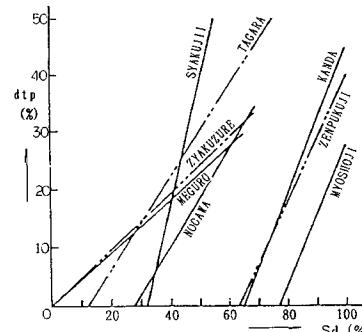


Fig. 10 The percentage change in the time of concentration (dt_p/t_p) with increase in the percentage change in the area served by the sewerage system (δS_d), for a number of river basins in the Tokyo.

S_d が 50 % を越え、 S_d が 100 % に至るまでの過程での Q_p の増減差が最も大きく、そのことは、Fig. 10 に示す都内中小河川流域の S_d と洪水到達時間の短縮率 (dt_p/d_{p1}) の実態からも推測することができる。

以上、本文で使用した流出モデルによる結果から推定されたことではあるが、これらの事象のすべてについて実流域において検証するには、調査対象期間が短く、また必ずしも下水道整備が順次下流側から進行していった流域ばかりでなく常に下水道整備区域と未整備区域が混在している状態を対象としているため困難である。

しかし、少なくとも S_d が 50 % を越える状況の発生が都内中小河川の洪水到達時間に著しい影響を与えていた実態は、Fig. 10 等から把握することができる。

b) 複数流域の場合

複数流域、すなわち、河川の合流点下流域における現象は、支川と本川流域の面積に大きな差がある場合、本川からの雨水が合流点 Q_p を支配するので問題はないが、本川と支川流域にあまり面積差がない場合（たとえば、本川流域が支川流域の 2 倍以下のようないい場合）において、Fig. 11 に示すような S_d の効果により合流点 Q_p が支川流域からの影響を強く受ける現象が発生する。

支川をもつ複数流域の合流点の Q_p は、本川流域と支川流域がともに合流地点より逐次下流側から同じ進歩速度で下水道が整備されていくような場合、既述の単流域の場合と違う現象が発生することがある。

支川流域の下水道が完備したとき、神田川と妙正寺川、目黒川蛇崩川、石神井川と田柄川等の各合流点における場合にみられるように、 t_p の短縮に伴う Q_p の増大化を最も顕著な形でみることができる¹⁶⁾。

流域面積の大きさにもよるが、支川流域とその支川流域の到達時間とほぼ等しい本川流域の対象区域からの雨水が、 S_d の効果により t_p の短縮に伴い、合流点に集中

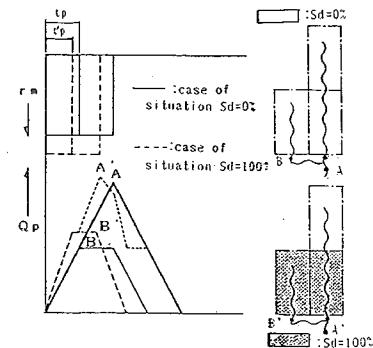


Fig. 11 A conceptual comparison of the characteristics of flood hydrographs for two connected rivers with different time of concentration (t_p), for a 100% increase in the river basin areas served by the sewerage system.

するために起こる現象と考えられる。

Fig. 11 に示すように、下水道が未整備の場合、合流点におけるピーク流量は、図の A 点に現われるが、支川の全域と本川の下流域に下水道が普及していく場合、合流点のピーク流量は、図の A' 点に発生する。

すなわち、図から明らかなように、洪水到達時間内の降雨強度 r_m が、 S_d の普及に伴い t_p が t'_p に短縮する結果、増大し、その結果、合流点のピーク流量も増大する。

この状態は、支川流域の S_d が 100 % となり、この支川流域とほぼ洪水到達時間が等しい本川流域のが下流側の S_d が 100 % となった状態において、支川流域の洪水到達時間にほぼ等しい時間に集中豪雨等が発生したような場合、最も顕著な形として S_d による効果が合流点 Q_p を支配しているような現象が出現する。

集中豪雨の雨域規模との関係にもよるが、支川流域の面積が、10~20 km² 程度の流域規模の場合に最も顕著な形として、よくみられる。

5. 結論

流域の都市化が洪水流出に及ぼす影響について、流域特性指標として下水道整備率や不浸透域面積率を挙げ、流出特性指標として洪水到達時間や流出係数を特定し、これら各特性指標間の関係について検証してきた。

本文は、特に下水道整備率が流出特性に与える影響について詳述したものである。

厳密には、流域の都市化と洪水流出の変化の関係は、下水道整備率や不浸透域面積率等の限られた指標で簡単な線形式などで洪水流出現象の変化を表現できるものではない。しかし、精度的に問題があるとしても、この 2 つの指標で都市中小河川の洪水流出の変化の概況は、説明できるものと考える。

本文で明らかになったことは、以下のとおりである。流域の都市化指標の1つ下水道整備率をもって洪水流出の変化に対する影響を定量化することができたことがある。

次に、下流側から下水道が整備されていく場合、下水道の整備状況によりピーク流量の増減現象に差異が考えられるが、下水道整備率を媒介としてピーク流量の変化量や洪水到達時間の短縮化について推定できること、そして、下水道整備能力を上回る洪水規模の場合に、実測例はないが、現状の下水道整備区域における洪水現象から推定して、現況下水道整備能力を上回る洪水の場合でも、河川や下水道に流下能力があれば、本文で定量化してきた洪水例の場合と同様な洪水流出への影響が考えられることなどである。

したがって、雨水対策としての下水道の整備水準の向上を図るような場合、従来の整備方式には、問題がある。

本文で対象とした流域の下水道は、主に流下型の方式ではあるが、下水道による雨水対策としての整備水準のレベルアップを図るような場合、従来のような排水方式や流下方式による整備方式では、雨水の集中化を招くことに変わりなく、施設の能力を越える雨水に対してはもちろんのこと場合によっては、能力以下の降雨規模に対しても必ずしも安全な雨水対策とはならない。

これから下水道整備は、河川の場合と同様に従来の流下方式に加え、調節型下水道施設等の貯留方式との併用策¹⁷⁾によりバランスのとれた雨水対策方式が必要と考える。

最後に、本論文に使用したデータの提供などいろいろと便宜を図って下さった東京都建設局河川部の方々に心から、謝意を表します。

参考文献

- 1) 石原藤次郎・高橋琢馬：中間流出現象とそれが流出過程

に及ぼす影響について、土木学会論文集、第79号、1962。

- 2) 佐藤一夫・和泉 清：都市化と降雨強度別ピーク流出係数の関係について、第28回土木学会水理講演会論文集、1984。
- 3) 山口高志・松原重明：都市流出調査—降雨損失機構の検討一、土木技術資料13-10、1971。
- 4) 山口高志・松原重明：都市域における降雨流出調査（第2報）—修正RRL法による推定一、土木技術資料14-9、1972。
- 5) 山口高志・松原重明：都市域における降雨流出調査（第3報）—修正RRL法の実用化に伴う諸問題一、土木技術資料15-9、1973。
- 6) 和泉 清：不浸透域率と流出率、都土木技術研究所年報、1978。
- 7) 3) に同じ
- 8) 水越三郎・専田継明：都市域からの洪水流出計算（第1報）、土木技術資料8-9、1966。
- 9) 木下武雄・和泉 清：都市流域における氾濫原粗度に関する研究、第31回土木学会年次講演、1987。
- 10) 栗林宗人・定道成美：水系の流出解析法とその特性について—主として特性曲線法と貯留閾数法一、第22回建設省技術研究会、1968。
- 11) 佐藤一夫・和泉 清：公共下水道の普及と洪水到達時間の変化について、第27回土木学会水理講演会論文集、1983。
- 12) 米田宗弘・和泉 清：下水道普及に伴う流出高の変化（その1）、東京都土木技術研究所年報、1976。
- 13) 和泉 清・吉川秀夫・木下武雄：既成市街地流域における洪水流出の変化に対応する都市化の指標、土木学会論文集、第387号／II-8、1987。
- 14) 9) に同じ
- 15) 和泉 清：都内中小河川の流域規模と洪水到達時間、東京都土木技術研究所年報、1986。
- 16) 11) に同じ
- 17) 中西祐啓・江藤剛治・室田 明：等危険度線による遊水池計画の安全評価の例、近畿大学理工学部研究報告、第20号、1984。

(1987.8.31・受付)