

# 既成市街地流域における洪水流出に対応する都市化の指標

## A MEASURE OF ESTIMATING THE RELATION BETWEEN THE CHANGE OF RUN-OFF BY URBANIZATION AND URBANIZED BASIN

和泉 清\*・吉川秀夫\*\*・木下武雄\*\*\*

By Kiyoshi IZUMI, Hideo KIKKAWA and Takeo KINOSHITA

The flood run-off form of medium and small rivers have been changing markedly with the improvement and expansion of public facilities such as sewerage systems and roads. This paper describes the Urbanization Number, one of the urbanization indices which evaluate the relation between the progress of urbanization in the river basins in built-up areas and the change in the flood run-off form. The Urbanization Number is expressed by a linear model composed of percent impervious area, percent river improvement, percent sewerage improvement, etc. It is characterized in that it can quantify the degree of influence of the improvement of sewerage systems and rivers on the flood run-off form.

Moreover, the use of this Urbanization Number permits to easily estimate the run-off coefficient and effective rainfall in the national formula relating to the run-off characteristic of medium and small rivers in urban areas.

*Keywords* : urbanization index, public facilities, built-up areas

### 1. はじめに

既成市街地流域において、公共下水道や街路等のいわゆる都市施設の整備・拡充は、中小河川の洪水流出形態を著しく変貌させている。

特に、流域の小さい中小河川では、排水施設網の整備による影響が大きい。

加えて、近年、都市域において実施されてきている総合的な治水対策としての雨水流出抑制策の進展は、従前とは異なる新たな洪水流出形態の変化が予測される。

本文は、既成市街地における都市施設の整備・拡充に伴う洪水流出形態の変化、雨水流出抑制施設の普及に伴う洪水流出形態への影響等の関係をきめ細かく定量的に表現できる流域の都市化の進展程度を表わす指標について考察したものである。

この指標は、洪水流出に直接かかわりをもつ都市化要因に流域内の不浸透率、公共下水道の普及率、河道の整備率を選択し、これら要因を説明変数とする線形式で

洪水流出に対応する流域の都市化過程を定量化したものである。

その特徴は、流域の都市化とそれに伴う洪水流出形態の変化に関して、説明変数である各都市化要因がそれぞれの程度関与しているのかを表現することができることである。

また、この指標によって、既成市街地をはじめ都市域の中小河川の実態的な有効雨量、流出係数等を容易に推定することができることである。

### 2. 都市化の指標

流域の都市化について論ずる場合、都市化の進行過程度を表現する手段、あるいは数値化し評価する方法には、基準尺度となる物差しが必要である。

この物差しとなる手法としては、角屋らが提案している都市化度<sup>1)</sup>、市街化率などがあるが、これらの都市化の指標は、使用データの種類の目盛りの粗密など個々様々な定義のもとに使用されていることや既成市街地流域などにおける都市施設の整備状況の違いによる流域の微小変化などをきめ細かく定量化することができない。

本文では、既成市街地においても使用可能な流域の都市化とそれに伴う洪水流出形態の変化との関係を説明資料の客観性と代表性を重視して、きめ細かく定量化でき

\* 正会員 東京都土木技術研究所主任研究員  
(〒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)

\*\*\* 正会員 理博 国立防災科学技術センター第一研究部長  
(〒305 茨城県新治郡桜村天王台3-1)

る都市化の指標を提案し、その手法の物理的な意味、実用性について考察する。

ここでは、流域の都市化とそれに伴う洪水流出形態の変化について、Fig. 1 に示す都内中小河川における以下に示す算法によって求めた流出係数  $f_p$  や洪水到達時間  $t_p$  の実態、流域内不浸透域と等価粗度  $N$  ( $m^{-1/3}s$ ) の関係などから考察する。

$$r_e = \frac{3.6Q_p}{A} \dots\dots\dots (1)$$

$$f_p = r_e / r_m \dots\dots\dots (2)$$

$$t_p = t_2 - t_1 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $r_e$ ：洪水到達時間内の有効降雨強度 (mm/h)、 $Q_p$ ：実績のピーク流量 ( $m^3/s$ )、 $A$ ：対象流域面積 ( $km^2$ )、 $f_p$ ：流出係数、 $r_m$ ：洪水到達時間内の流域平均降雨強度 (mm/h)、 $t_p$ ：洪水到達時間 (min)、 $t_2$ ： $Q_p$  の発生時刻、 $t_1$ ：時刻  $t_2$  に先行する継続降雨でピーク雨量発生以前において時刻  $t_2$  において生起している降雨量 (単位時間 10 分で整理した値) とほぼ等しい降雨量が生起している時刻。

いま、Fig. 2 に示すような流域が長方形で面積が  $M$ 、流域長と河道長が同じとして  $L$ 、流域幅 (等価流域幅) が  $2W$ 、勾配  $i$  が一定な理想斜面流域を考える。

次に、Fig. 2 に示す最下流地点の流量を  $Q(t)$  とおく。

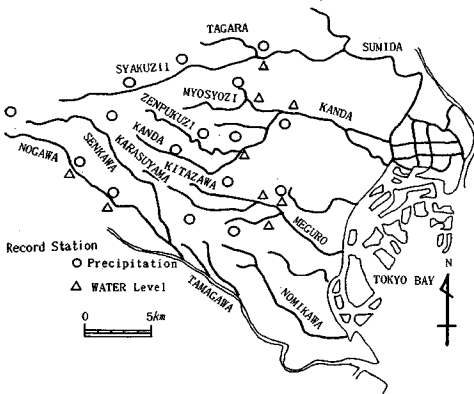


Fig. 1 Rivers in Tokyo and observation networks.

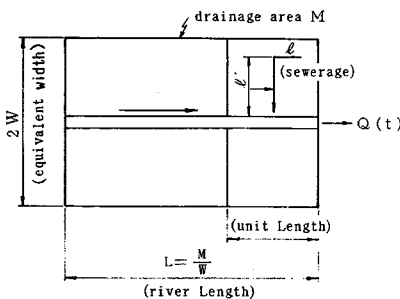


Fig. 2 Schematic map of the ideal river basin.

ここで、この流域において、まず河道改修が進む場合の状況を考える。河道改修前は流域内には小排水路のみであったと仮定すると、河道改修は、断面の定まった新しい河道を作ることであるから河道改修につれ  $L$  が作られていくと考える。流域面積  $M$  は一定でありしたがって等価流域幅  $2W = M/L$  が相対的に狭くなることに相当する。

雨水が幅方向、すなわち、斜面長  $W$  の上を流下速度  $V_1$  で流下すれば、この斜面の最遠点から河道までの流入時間  $T_1$  は、

$$T_1 = W / V_1 \dots\dots\dots (4)$$

である。

いま、雨量  $R$  は単位時間に降ると仮定すると任意の降雨波形に対する流出量  $Q$  は単位時間の雨量の重ね合わせと考えることができる。

この  $R$  に対して、浸透などの損失分を除いた有効雨量を求めるために、流出係数に相当する  $f$  をもって Fig. 3 に示す  $fR$  とし、これを有効雨量とする。

これが長さ  $W$  の斜面を  $V_1$  なる速度で流下して水路に入る場合には木下の簡易な式<sup>2)</sup>により以下に示す式のように  $Q_1$  となるのがわかる。

$$Q_1 = \frac{fRW}{T_1} = \frac{fRW}{W/V_1} = fRV_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_p = 2LQ_1 = 2fRV_1L \dots\dots\dots (6)$$

$Q_1$  は単位長の河道への流入流量である。 $Q_p$  は Fig. 2 における最下流での  $Q(t)$  のピーク値である。

ここで式 (6) を吟味すると、ピーク流量  $Q_p$  は、 $V_1$ 、 $L$  等に比例する。すなわち、 $Q_p$  は斜面の流下速度が速

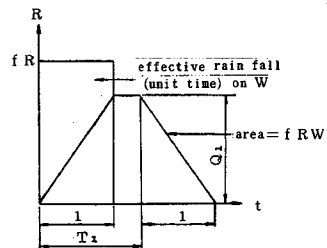


Fig. 3 Effective rain fall ( $fR$ ) induced by the unit hydrograph on the ideal river basin.

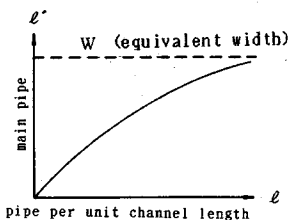


Fig. 4 Limit of the expansion of main sewerage pipe.

いほど大きく、改修河道が長くなるほど大きくなることに対して、等価流域幅  $W$  には無関係となっている。

流域の都市化としての不透水面積率（以下、 $I$ と表わす）の増加の効果は、 $f$ 、 $V_1$ によって表わされ、河道改修長が伸びる効果は  $L$ によって表わされる。

次に、 $Q_1$ が下水道の普及によって変化する有様について考察する。

単位長の河道の片岸へ接続される下水道の長さを  $l$ と置く（ $l$ は無次元、 $2Ml/W$ が流域  $M$ における下水道の総延長）。

斜面に降った雨は  $l$ に入り  $l$ を流下する。したがって斜面の最遠点から河道までの流入時間  $T_1$ は斜面の流下時間と下水道の流下時間との和である。

下水道の普及により等価斜面長は

$$\frac{2W \cdot \frac{M}{W}}{\frac{2Ml}{W} + \frac{2M}{W}} = \frac{2M}{\frac{2M(l+1)}{W}} = \frac{W}{l+1} \quad (7)$$

である。また、斜面の流下時間 ( $t$ ) は

$$t = \frac{W}{l+1} \cdot \frac{1}{V_1} \quad (8)$$

であり、下水道の流下時間との和である  $T_1$ も次のように同形における。

$$T_1 = \frac{W}{l+1} \cdot \frac{1}{V_1} + \frac{l}{V_2} \quad (9)$$

ここに、 $V_2$ は下水道内の流下速度 (m/s) で一定とする。 $l$ は、Fig. 2に示すような雨水流下に関する代表的な一本の下水道（幹線）の長さである。

下水道がいくら増しても流下時間にかかわる一本の下水道長は  $W$ をこえないため、 $l$ は定性的に Fig. 4のように変化する。この関係は次式の形で表わされる。

$$l = \frac{WL}{1+l} \quad (10)$$

よって、式 (9) は

$$T_1 = \frac{W}{l+1} \cdot \frac{1}{V_1} + \frac{WL}{l+1} \cdot \frac{1}{V_2} = \frac{W}{l+1} \left( \frac{1}{V_1} + \frac{l}{V_2} \right) = \frac{W}{l+1} \left( \frac{V_2 + V_1 l}{V_1 V_2} \right) = \frac{W}{V_1} \left[ \frac{V_2 + V_1 l}{V_2(l+1)} \right] \quad (11)$$

となる。これは下水道の未普及  $l=0$ の状態では流入時間  $T_1$ は、 $W/V_1$ となり、十分普及した状態で流入時間  $T_1$ は  $W/V_2$ となることを示している。式 (4) と同形であるから式 (5) に対応して、

$$Q_1 = \frac{fRW}{T_1} = \frac{fRW}{\frac{W}{V_1} \left[ \frac{V_2 + V_1 l}{V_2(l+1)} \right]} = fRV_1 \left[ \frac{V_2(l+1)}{V_2 + V_1 l} \right] \quad (12)$$

さらに、式 (6) に対して、 $Q_p$ を求めると、

$$Q_p = 2LQ_1 = 2fRV_1L \cdot \frac{V_2(l+1)}{V_2 + V_1 l} \quad (13)$$

式 (6) と比べると下水道普及の効果

$$P = \frac{V_2(l+1)}{V_2 + V_1 l} \quad (14)$$

と表わされる。

ところで、 $V_2 > V_1$ と考えられる下水道普及が低い範囲、すなわち、 $l$ が小さいときには  $P = l+1 \approx 1$ であり、式 (13) は式 (6) とほぼ同じとなる。一方、下水道の普及が高い範囲、すなわち、 $V_2 < V_1 l$ では

$$P \approx \frac{V_2(l+1)}{V_1 l} \approx \frac{V_2}{V_1} \quad (15)$$

となって式 (13) は

$$Q_p = fRV_2L \quad (16)$$

となり、ピーク流量には斜面の流下速度  $V_1$ でなく、下水道内の流下速度  $V_2$ が効くことを示している。

式 (13) 右辺の各項は、流域の都市化によって変わっていくので、その最終状態にサフィックス  $F$ を示し、次のような無次元化を行う。

$$Q_p = f_f R V_{1F} L_F \frac{V_2(l_f+1)}{V_2 + V_{1F} l_f} \times \frac{f}{f_f} \cdot \frac{V_1}{V_{1F}} \cdot \frac{L}{L_F} \cdot \frac{l_f+1}{\frac{V_2 + V_1 l}{V_2 + V_{1F} l_f}} = Q_{PF} \cdot U_n \quad (17)$$

式 (17) の右辺  $\times$  記号より左が都市化最終状態におけるピーク流量  $Q_{PF}$ で、それに  $\times$  記号より右の無次元化都市化指標  $U_n$ が掛けられている。

$$U_n = \frac{f}{f_f} \cdot \frac{V_1}{V_{1F}} \cdot \frac{L}{L_F} \cdot \frac{l_f+1}{\frac{V_2 + V_1 l}{V_2 + V_{1F} l_f}} \quad (18)$$

都市化最終状態の  $l_f$ では、流域面積  $M$ の中に一辺  $a$ の正方形の街区に下水道が整備されているとすると、

$$l_f = \frac{M}{a^2} \times 2a \times \frac{1}{2L} = \frac{2WL}{a} \times 2 \times \frac{1}{2L} = \frac{2W}{a} \quad (19)$$

ここで、 $a$ に対応する式 (19) の結果と中小河川流域の流域幅  $2W$ 、街区割長などの実態から、次の近似式が成立する。

$$l_f + 1 \approx l_f, \quad V_2 + V_{1F} l_f \approx V_{1F} l_f$$

したがって、式 (18) は

$$U_n \approx \frac{f}{f_f} \cdot \frac{V_1}{V_{1F}} \cdot \frac{L}{L_F} \cdot \frac{\frac{l_f}{l_f} + \frac{1}{l_f}}{\frac{V_1}{V_{1F}} \cdot \frac{l_f}{l_f} + \frac{V_2}{V_{1F} l_f}} = \frac{f}{f_f} \cdot \frac{V_1}{V_{1F}} \cdot \frac{L}{L_F} \cdot \frac{\frac{l_f}{l_f} + K_1}{\frac{V_1}{V_{1F}} \cdot \frac{l_f}{l_f} + K_2} \quad (20)$$

と表わされる。

ここに、 $K_1 = 1/l_f$ 、 $K_2 = V_2/V_{1F} l_f$ でともに、無次元値

である。

ところで、流出係数に相当する  $f$  は、Fig. 5 に示すような都内中小河川の解析例<sup>3)</sup>や山口らの谷端川の例<sup>4)</sup>などから不浸透面積率  $I$  に比例するものと考えられる。

また、斜面流下速度  $V_1$  は、流域の  $I$  が増加することによって流域斜面の等価粗度  $N$  ( $m^{-1/3} \cdot s$ ) が減少し、その結果、速度が速まるものと考えられる。

Fig. 1 における都内中小河川等を例に実施した等価粗度法<sup>5)</sup>による洪水流出解析結果を利用する。

Fig. 6 は昭和 41 年 6 月の台風 4 号などの実績洪水例による検証結果をもとに等価粗度  $N$  ( $m^{-1/3} \cdot s$ ) と対象年代における各流域の不浸透面積率  $I$  (%) との関係を表わしたものである<sup>6)</sup>。

ところで、斜面流下速度  $V_1$  は、降雨強度、流域勾配、等価粗度等に支配されるものである。

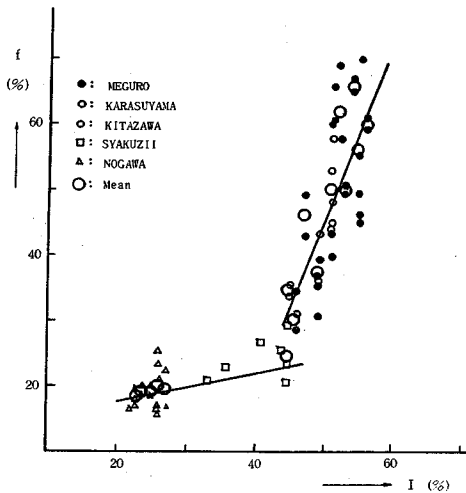


Fig. 5 The relation between the impervious area ( $I$ ) and the run-off ratio ( $f$ ) at the medium and small rivers in Tokyo metropolis.

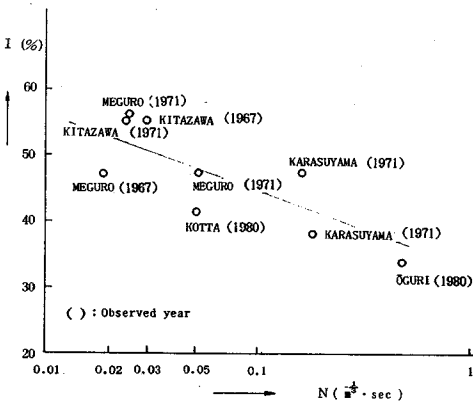


Fig. 6 The relation between equivalent roughness ( $N$ ) and impervious area ( $I$ ).

そこで、ここに利用した各年代別の実績洪水は、降雨強度が 25 mm/h ないし 30 mm/h の規模に限定して、 $V_1$  の降雨条件として同一性をもたせた。

また、流域勾配の扱いについては、1/250~1/800 程度の流域を選択し、次のような考えから、 $V_1$  の流域勾配を同一視することにした。

流域の都市化が進行しても、流域全体が変貌するような造成開発が行われるような場合を除き、流域勾配はなんら変化するものではない。

したがって、斜面流下速度  $V_1$  が流域の都市化によって変化する要素は、等価粗度  $N$  であるとして、以下のように  $f$  および  $V_1$  を仮定する。

$$f = \alpha I \dots\dots\dots (21)$$

$$V_1 = \beta I^\gamma \dots\dots\dots (22)$$

したがって、式 (20) の  $U_n$  は、

$$U_n = \frac{\alpha I}{\alpha I_F} \cdot \frac{\beta I^\gamma}{\beta I_F^\gamma} \cdot \frac{L}{L_F} \cdot \frac{\frac{l}{l_F} + K_1}{\frac{\beta I^\gamma}{\beta I_F^\gamma} \cdot \frac{l}{l_F} + K_2}$$

$$= \left(\frac{I}{I_F}\right)^{1+\gamma} \cdot \frac{L}{L_F} \cdot \frac{\frac{l}{l_F} + K_1}{\left(\frac{I}{I_F}\right)^\gamma \cdot \frac{l}{l_F} + K_2} = x^{1+\gamma} \cdot y \cdot \frac{z + K_1}{x^\gamma z + K_2}$$

.....(23)

ここに、 $x = I/I_F$ ,  $y = L/L_F$ ,  $z = l/l_F$  とともに無次元値で、 $0 \leq x, y, z \leq 1$  の値をとる。

$I_F$  は、現実の都市化状況を見ると 70 % 程度の  $I$  が最終状態と判断される。

$U_n$  の微小変化に対し、

$$dU_n = \frac{\partial U_n}{\partial x} dx + \frac{\partial U_n}{\partial y} dy + \frac{\partial U_n}{\partial z} dz$$

$$= \left\{ (1+\gamma) x^\gamma y \frac{z+K_1}{x^\gamma z + K_2} + x^{1+\gamma} y \frac{(z+K_1)(-\gamma x^{\gamma-1} z)}{(x^\gamma z + K_2)^2} \right\} dx + x^{1+\gamma} y \frac{z+K_1}{x^\gamma z + K_2} dy + x^{1+\gamma} y \frac{(x^\gamma z + K_2) - (z+K_1)x^\gamma}{(x^\gamma z + K_2)^2} dz$$

.....(24)

となる。

これは、式 (17) に示す都市化最終状況のピーク流量  $Q_{PF}$  に対し、都市化が進行中であることを示す都市化指標  $U_n$  の変化高  $dU_n$  は、①現在の不浸透面積率  $I$  が最終状況の不浸透面積率  $I_F$  に対する比率の増分  $dx$ 、②現在の改修河道長が最終状態の改修河道長に対する比率の増分  $dy$ 、③現在の下水道が最終状態の下水道長に対する比率の増分  $dz$  という 3 者の線形和として表わされることを示す。

ここで、都市化の最終状態に対する現状あるいは被対

象年代の都市化状況を示す係数として

$$A = (1 + \gamma) x^\gamma y \frac{z + K_1}{x^\gamma z + K_2} + x^{1+\gamma} y \frac{(z + K_1)(-\gamma x^{\gamma-1} z)}{(x^\gamma z + K_2)^2}$$

$$B = x^{1+\gamma} \frac{z + K_1}{x^\gamma z + K_2}$$

$$C = x^{1+\gamma} y \frac{(x^\gamma z + K_2) - (z + K_1) x^\gamma}{(x^\gamma z + K_2)^2}$$

とおき、その結果を式 (23) に代入し、現状あるいは被対象年代の  $U_n$  を求める。

ところで、 $U_n$  の変化高  $dU_n$  は

$$dU_n = A dx + B dy + C dz \dots (25)$$

であり、これを式 (23) まで戻して表現すれば

$$U_n = U_{n0} + dU_n = U_{n0} + A dx + B dy + C dz \dots (26)$$

さらに、式 (17) まで戻して表現すれば

$$Q_P = Q_{PF} \cdot U_n = Q_{PF} (U_{n0} + A dx + B dy + C dz) \dots (27)$$

となる。

この式 (27) は、流域が長方形、流出係数に類似した係数  $f$  は不浸透面積率  $I$  に比例し、斜面流下速度  $V_1$  も  $I'$  に比例するという仮定のもとに、都市化最終状態のピーク流量を  $Q_{PF}$  とおいたとき、現状の不浸透面積率  $I$ 、河道改修  $L/L_F$ 、下水道長の最終状態に対する比率  $l/l_F$  という都市化状況における  $Q_P$  つまり最終状態の  $Q_{PF}$  に対するピーク流量の大きさを表わしている。

そして、このとき、不浸透面積率、河道改修状況、下水道の普及状況が最終状態に対してそれぞれ、 $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  ずつ変化すれば、ピーク流量は、それぞれ  $A dx$ 、 $B dy$ 、 $C dz$  だけ変化することを示している。

ここで、式 (25) の  $dU_n$  を差分式の形で次のように展開する。

既述のように  $x = I/I_F$ 、 $y = L/L_F$ 、 $z = l/l_F$  であるから、これらの各微小変化を  $dx = (I_2 - I_1)/I_F$ 、 $dy = (L_2 - L_1)/L_F$ 、 $dz = (l_2 - l_1)/l_F$  として、式 (25) の  $dU_n$  を以下のように表わす。

式 (25) の  $dU_n$  を以下のように表わす。

$$dU_n = \left( A \frac{I_2}{I_F} + B \frac{L_2}{L_F} + C \frac{l_2}{l_F} \right) - \left( A \frac{I_1}{I_F} + B \frac{L_1}{L_F} + C \frac{l_1}{l_F} \right) \dots (28)$$

そして、この  $dU_n$  を流域の都市化状態の進行過程の変化の差と考えると、たとえば流域の都市化状況が  $U_1$  の状況から  $U_2$  の状況に推移した変化差として、次のように表わす。

$$U_1 = A \frac{I_1}{I_F} + B \frac{L_1}{L_F} + C \frac{l_1}{l_F} \dots (29)$$

$$U_2 = A \frac{I_2}{I_F} + B \frac{L_2}{L_F} + C \frac{l_2}{l_F} \dots (30)$$

そして、上記 2 式を実用的なものとして取り扱うために、次のように一般的な形で表わす。

$$U = A \frac{I}{I_F} + B \frac{L}{L_F} + C \frac{l}{l_F} \dots (31)$$

この式 (31) は、対象とする流域の都市化状況を表わす指標の 1 つと考え、ここに、この  $U$  を都市化数とよぶことにする。

そして、対象流域の都市化最終状態である式 (25) での  $U_{n0}$  は、式 (18) の関係から

$$U_{n0} = A \frac{I_F}{I_F} + B \frac{L_F}{L_F} + C \frac{l_F}{l_F} = A + B + C \dots (32)$$

であり、都市化最終状態とは、実用性を考えた場合式 (31) における  $U$  が 100% の状態 (流域の都市化状況が 100% である状態) であると置き換えて、

$$U = A + B + C = 100 \dots (33)$$

とする。

また、式 (31) の各定数、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  について、Fig. 1 の都内中小河川の洪水流出解析例<sup>7)</sup>の結果と式 (33) の

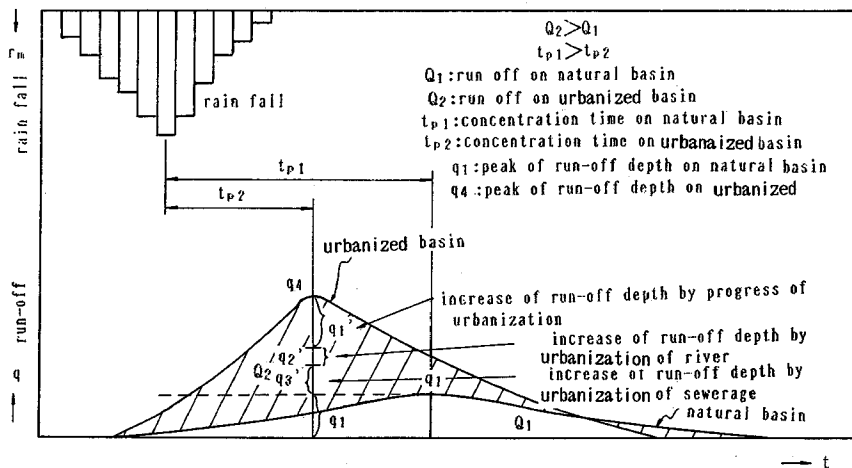


Fig. 7 Effect of the urbanization in the river basin on the hydrograph.

関係を求め、以下のような実用式を作成した。

### 3. 都市化数

一般に流域の都市化が進行すると洪水流出形態は、Fig. 7 のように変化する。

Fig. 7 に示す流域が開発前のピーク流量  $q_1$  と開発後の  $q_4$  とのピーク流量の差 ( $q_4 - q_1$ ) に着目する。

この流量差 ( $q_4 - q_1$ ) は、流域の  $I$  の増加に伴うピーク流量の増分  $q'_1$ 、 $l/l_f$  の変化 (以下、下水道の普及率  $S_d$  と置き換える) の影響に伴う増分  $q'_2$ 、 $L/L_f$  (以下、河道の整備率  $C_d$  と置き換える) の影響に伴うピーク流量の増分  $q'_3$  との和と考える。

そして、ピーク流量の増分 ( $q_4 - q_1$ ) に占める  $q'_1$ 、 $q'_2$ 、 $q'_3$  の割合 (寄与率) から、式 (31) の定数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  の値を以下のように求める。

Fig. 7 における ( $q_4 - q_1$ ) に占める  $q'_1$  の割合を (%) で表わし、それを式 (31) の  $A$  として、 $A = \{q'_1 / (q_4 - q_1)\} \times 100$  と表わし、同様にして  $B$  を、 $B = \{q'_2 / (q_4 - q_1)\} \times 100$ 、 $C$  を、 $C = \{q'_3 / (q_4 - q_1)\} \times 100$  で表わして求める。

そして、特に  $B$ 、 $C$  については、下水道普及率と河道整備率が洪水到達時間を支配する都市化要因であるとして洪水到達時間の短縮化に  $S_d$ 、 $C_d$  がそれぞれ及ぼした寄与率から決定する。

流域の開発前の洪水到達時間を  $t_{p1}$  とし、開発後の洪水到達時間を  $t_{p2}$  としたとき、

$$\frac{t_{p1} - t_{p2}}{t_{p1}} = d \cdot I_p \dots \dots \dots (34)$$

式 (34) は洪水到達時間の短縮率である。ここで、河道整備による開発後の洪水到達時間の短縮化した時間を  $t_{p21}$ 、下水道普及に伴う開発後の洪水到達時間の短縮化した時間を  $t_{p22}$  としたとき、式 (31) における  $B$ 、 $C$  が洪水到達時間の短縮化した時間 ( $t_{p1} - t_{p2}$ ) に影響を及ぼした寄与率は、次の比率となる。

$$B : C = \frac{t_{p21}}{t_{p1} - t_{p2}} : \frac{t_{p22}}{t_{p1} - t_{p2}} \dots \dots \dots (35)$$

また、式 (31) の定数  $A$  は、 $I$  にかかわる定数であり、 $I$  の変化は流出の総量、すなわち、流出率に影響を及ぼすものと考え、流出率の状況によって、表わすことができる。以上の方法から式 (31) の  $A$ 、 $B$ 、 $C$  が決定され実用式が策定される。

#### (1) 定数 $A$ の設定

都内中小河川の洪水解析例から、昭和 30 年代から昭和 50 年代にかけてピーク流量の変化 (ピーク流量の増加率) と河道と下水道の整備率の推移との関係を示した結果が、Fig. 8 である。

Fig. 8 によれば、両者の関係は、勾配が約 0.6 の一次式で近似でき、その結果、河道と下水道の整備に伴うピーク

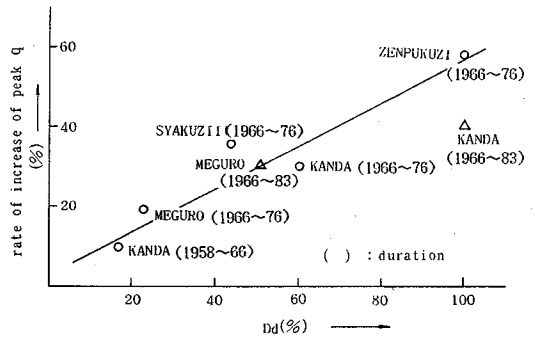


Fig. 8 The relation between the rate of expansion of drainage system ( $D_d$ ) and the rate of the increase of peak run-off ( $q$ ).

ク流量の増加分に寄与している割合は、60 %程度と推定することができる。

したがって、式 (31) の  $B$ 、 $C$  による影響程度を  $B + C = 60$  として表わすことによって、式 (33) の関係から、 $A$  が 40 程度と推定することができる。

また、 $A$  の値は、 $I$  にかかわる定数であり、 $I$  が流出形態を支配する要因で流出率  $f$  を支配する要因であることから、既往洪水の平均的な流出率  $f$  の推移をみて表わせるものとする。

都内中小河川の場合、昭和 40 年代初期から昭和 60 年代にかけ流出率  $f$  は次のような式で近似される。

$$f = \frac{R_e}{R} = \frac{(R - D_{imp}) \cdot I_{mp} - K}{R} \quad (R \geq 30 \text{ mm}) \dots \dots \dots (36)$$

ここに、 $K = D_{imp} \cdot I_{mp} + 6.87$ 、 $R_e$  : 実測総流出高 (mm)、 $D_{imp}$  : 不浸透面積の凹地貯留高 (2 mm とする)<sup>9)</sup>、 $I_{mp}$  : 不浸透面積率

その結果、各年代の  $I_{mp}$  の状況変化や実測の流出率  $f$  の値から、都内中小河川の場合の平均的な流出率  $f$  は、0.4~0.6 と推定されている。

以上のことから、総合的に判断して式 (31) の定数  $A$  の値を 50 とした。

#### (2) 定数 $B$ 、 $C$ の設定

一方、河道と下水道の整備状況の変化が、それぞれピーク流量の増加分に寄与している負担割合 ( $B$  と  $C$  の値) について、以下のように設定する。

一般的には、河道整備と下水道普及が並行した形で流域の都市化が進行するが、都内中小河川の場合、Table 1 に示す神田川や善福寺川等の例にみられるように河道整備状況に変化がない間に下水道のみが整備されていった善福寺川流域の場合、下水道普及率の変化とピーク流量の変化の関係を実態的な形で検証することができる。

Table 1 によれば、昭和 33 年代から昭和 41 年代にか

Table 1 The change of the state of run-off depth with the urbanization of the basin (9.24.1966 flood).

river	item	basin			run-off depth (mm/10min)
		A(km <sup>2</sup> )	I (%)	Sd (%)	
SYAKUJII	33.9	21	0		1.46
		34	6		2.81
		44	50		1.68
KANDA	11.8	34	0		1.83
		37	16		2.79
		48	76		1.07
ZENPUKUJI	18.9	38	0		1.47
		40	1		3.11
		51	100		1.70
MEGURO	33.9	44	0		2.30
		45	0		1.70
		54	21		2.30

upper:1958 middle:1966 lower:1976

け河道整備のみが行われ、下水道の整備は、ほとんど実施されていなかった ( $S_a=1\%$ 程度) 善福寺川のピーク流量の変化過程 (Table 1における昭和33年~昭和41年)において、Table 1でのピーク流出量が1.07 mm/10 min~1.47 mm/10 minに変化し、その変化率37%等を1つの判定材料として河道整備に伴うピーク流量の変化に対する寄与率を40%とし、式(31)の係数Bを式(33)でのA=50、を差し引いた $50 \times 0.4 = 20$ とし、残る係数Cを30とすることができる。

このことを下水道の普及状況と洪水到達時間 ( $t_p$ ) の変化状況との関係から検証することもできる。

Fig. 9は、都内中小河川の  $t_p$  の短縮化状況と下水道普及率 ( $S_a$ ) との関係を表わしたものである。

$S_a$  が10%程度の流域状況から、 $S_a$  が100%の状況となった場合に推定される  $t_p$  の短縮化に与える  $S_a$  の変化による影響度は、40~70%程度と考えられる。

このことから  $t_p$  の短縮化への  $S_a$  の影響度をこの平均値である55%から約60%程度であると考えられる。そして、式(31)の係数Cを  $50 \times 0.6 = 30$  とすることができる。

以上の結果から、式(31)の係数B、Cの値をそれぞれ20、30と設定される。

以上の結果、都市化数は流域内の不浸透面積率、公共

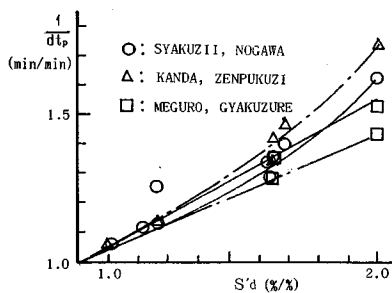


Fig. 9 The relation between the rate of the expansion of the sewerage system ( $S_a$ ) and the rate of the shortening of the concentration time ( $\frac{1}{dt_p}$ ).

下水道の整備率(供用済)、河道の整備率(疎通能力度)、3つの要素を説明変数として、次のように表わせる。

$$U = \frac{I(X)}{I(70)} \times 50 + \frac{S_a(X)}{S_a(100)} \times 30 + \frac{C_a(X)}{C_a(100)} \times 20 \dots\dots\dots (37)$$

ここに、U:都市化数、I(70)、I(X):流域内不浸透面積率が70%、X%、 $S_a(100)$ 、 $S_a(X)$ :公共下水道普及率が100%、X%、 $C_a(100)$ 、 $C_a(X)$ :計画降雨強度50 mm/h ( $f_p=0.8$ )の河道整備が100%の状態、対象河道の疎通能力が、計画降雨強度50 mm/hの河道疎通能力に対し、X%の状態。

都市化数Uが100の流域状態とは、不浸透面積率が70%以上(住宅区域の平均建ぺい率60%を考慮し、道路普及率を合わせて上限を70%とする)、河道整備状況として、当面、中小河川の基準的な計画降雨強度50 mm/h(東京都の場合、 $f_p=0.8$ )の河道整備が完成している状態を100%、そして、下水道の普及率が100%の状態にあるような場合をいい、この状態を1つの基準値とするものである。

4. 都市化数の適用例

ここでは、既成市街地流域の変貌とそれに伴う洪水流出形態の変化の関係を Fig. 1に示す目黒川を例に都市化数によって表わす。

目黒川流域の変貌について、洪水流量観測を開始した昭和41年を始点に昭和60年までの推移をUで表わすと、Table 2のようになる。

そして、都市化の進行程度と洪水到達時間や流出係数の変化の割合を比較するために、昭和41年当時のU(39)を  $U_{41}$  として、各被比較対象年代の  $U_x$  として、Uの変化度を次のように表わす。

$$X = U_x / U_{41} \dots\dots\dots (38)$$

各対象年代の都市化の変化度(X)は、昭和46年代1.10、昭和50年代1.38、昭和55年代1.66、昭和60年代1.87と昭和40年代すでに既成市街地であった目黒川流域でも、この20年間に著しい都市化が進行していったことがわかる。

次に、昭和41年から20年間にわたって観測された洪水例をもとに、 $t_p$  の短縮状況について変化の割合をみると昭和41年当時の平均的な  $t_p$  の値90 minをもとに、

Table 2 The Urbanization of the MEGURO River.

item year	I (%)	Sd (%)	Cd (%)	f p	U
1966	45.5	0	30.6	0.38	39
1971	49.0	0	36.7	0.46	43
1976	54.0	21.0	46.7	0.53	54
1980	56.0	50.0	51.7	0.60	65
1985	58.0	63.0	60.0	0.60	73

各対象年代の  $t_p$  の変化の割合は、昭和46年には31%短縮し、10年後の昭和51年には39%、15年後の昭和56年には43%、そして、20年後の昭和60年には、昭和41年当時の50%にも  $t_p$  が短縮している。

この  $t_p$  の短縮の割合 ( $dt_p$ ) と流域の都市化の変化度 ( $X$ ) との関係を示したものが Fig. 10 であり、この両者の関係式は次のように表わされる。

$$dt_p = 0.96X^{-1.35} \dots\dots\dots (39)$$

ここに、 $dt_p$  :  $t_p$  の短縮率、 $X$  :  $U$  の値によって表わした都市化程度の変化度

目黒川の場合、都市化の程度が昭和41年当時に比べ、1.8倍程度に変化したとき、 $t_p$  の長さは、昭和41年当時の半分になっていることがわかる。

次に、式(2)の流出係数  $f_p$  の経年的な変化をみる。

Table 2 に示すように  $f_p$  の変化が、この20年間の著しいことがわかる。

都市化に伴う  $f_p$  の変化について、昭和41、42年の洪水による平均的な  $f_p$  の値0.37を基準に各対象年代の平均的な流出係数とを対比させ変化の割合を求めた。

Fig. 10 に  $f_p$  の変化の割合 (経年的な) を示すとともに流域の都市化の進展度との関係について示した。

都市化に伴う  $f_p$  の変化状況が、昭和48年における値 (都内における渇水年) を除き、ほぼ直線的に増加していることがわかる。

目黒川における都市化の程度と  $f_p$  の変化率 (基準とする年代の  $f_p$  の値に対する被比較年代の  $f_p$  の値)  $f'_p$  との関係は式化すれば、次のようになる。

$$f'_p = 0.85X + 0.07 \dots\dots\dots (40)$$

現在の  $f_p$  は、昭和41年当時の  $f_p$  に比べ1.5倍程度

大きくなっていることがわかる。

目黒川流域で公共下水道等が完備した  $U$  が100の状態になった場合、現況の  $t_p$  や  $f_p$  がどのように変化するのか既述の式(39)と式(40)によって推定する。

現況の  $t_p$  は、 $U$  が76の状態では約50~60minである<sup>10)</sup>。したがって、式(40)の  $X=1.31$  から  $dt_p$  は0.67となり、 $U$  が100の状態における目黒川の  $t_p=35\sim40$ min となることが推定される。

また、その場合の  $f_p$  は、式(40)より  $f'_p=1.18$  となり、現況の  $f_p$  が0.60程度であることから、0.7程度に増加することが予測できる。

以上のように、 $U$  を使用することによって流域の都市化とそれに伴う洪水流出形態の変化との関係をきめ細かく定量化することができる。

### 5. おわりに

本文は、既成市街地流域における流域の変化とそれに伴う洪水流出形態の変化との関係などをきめ細かく定量化する手段としての都市化数について詳述したものである。

この都市化数は、既成市街地流域における流域の変貌を的確に定量化できる1つの手段であり、その特徴は、流域の変化と洪水流出形態の変化が中小河川の場合、流域の不浸透域や排水施設等による複合的、相互相乗的な作用と考えられる事象を不浸透域と排水施設との作用がそれぞれ独立事象であるとする線形式で表わされているところにある。

このことは、洪水流出形態における総流出高を支配している主な都市化要因が不浸透面積率であり、洪水到達時間を支配している都市化要因が排水施設網の整備状況であるとした都市化数の論理性を裏付けるものである。

以上のような特徴をもつ都市化数を利用することによって、都市化数の大きさによって流出係数の値を推定し得ること。また、現在、都市域において実施されている雨水流出抑制策に伴う流出形態の変化、すなわち、流出抑制効果等について定量的に推測することも可能である。

### 参考文献

- 1) 角屋 睦・福島 晟：中小河川の洪水到達時間，京大防災研究所年報第19号B，1976。
- 2) 木下武雄：洪水計算の考え方 (I)，水利科学 No. 97，1974。
- 3) 米田宗弘・和泉 清：不浸透域率と流出率，都土木技研年報，1978。
- 4) 山口高志・松原重昭：都市流出調査 (降雨損失機構の検討)，土木技術資料，1971。
- 5) 上田年比古：特性曲線法による不定流計算法の一試算，九大工学集報，Vol. 33, No. 9, 1960。

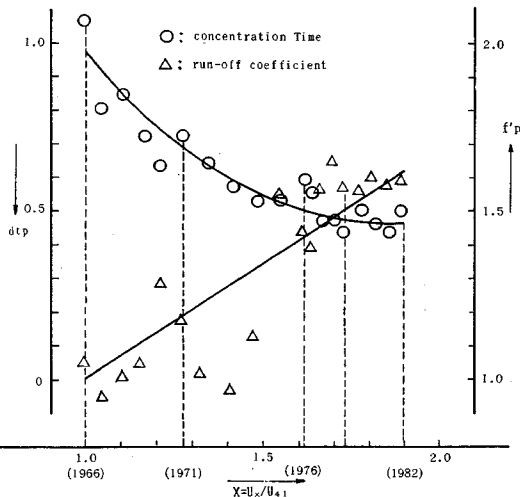


Fig. 10 The relation between the rate of the urbanization number and the rate of shortening of the concentration time, the rate of increasing of the run-off coefficient.



- 6) 米田宗弘・和泉 清：下水道普及に伴なう流出高の変化（その1），都土木技研年報，1976.
- 7) 和泉 清：都市化と河川流出変化の定量的分析，都土木技研年報，1977.
- 8) 3)に同じ.
- 9) 4)に同じ.
- 10) 石川金治・佐藤一夫・和泉 清：都内中小河川の都市化に伴なう流出率と洪水到達時間について，第36回土木学会年次学術講演会概要集，1981.

(1986. 7. 30・受付)

---