

都市化と洪水流出変化の定量的分析 Quantitative Analysis, the Difference of Flood Runoff Depth Associated with Urbanization

東京都土木技術研究所 正員 ○ 守 田 優
東京都土木技術研究所 正員 和 泉 清

1. はじめに

都市化が洪水流出にどのような影響を及ぼすか。これは、流域の規模あるいは地形条件などによって異なった現れかたをするであろう。また都市化という現象も、さまざまな要素から成り、その洪水流出に与える影響も様ではない。本研究では、中規模の丘陵地河川を対象とし、流域の都市化要素として、不透透率の増大、下水道の普及、そして河道の整備という3要素を考える。

都市化にともなう洪水流出機構の変化を調査するため、東京都では、大規模宅地開発の予想される多摩ニュータウン地区を中心に、他機関と共同して「流出試験地」を設定し、多摩川水系の大栗川、乞田川流域において、昭和44年以降、水文観測を続けてきた。本研究は、この15年間の観測成果の第1報として、流出定数の評価あるいは単線型貯留型モデルによる流出解析を通して、都市化と洪水流出の関係を明らかにしようとするものである。

2. 対象流域と対象洪水

(1) 流域の概要

本研究で対象とする流域は、大栗川上流域および乞田川流域である(図-1)。ともに多摩丘陵に位置している。大栗川上流域は、大栗川橋地点に水位観測所をもち、流域面積は 14.07 km^2 である。現在でも流域の60%が山林、農地として残り、自然流域と見なすことができる。一方、乞田川流域は、車橋地点に水位観測所が設置してあり、流域面積は 13.47 km^2 である。この流域も、昭和45年当

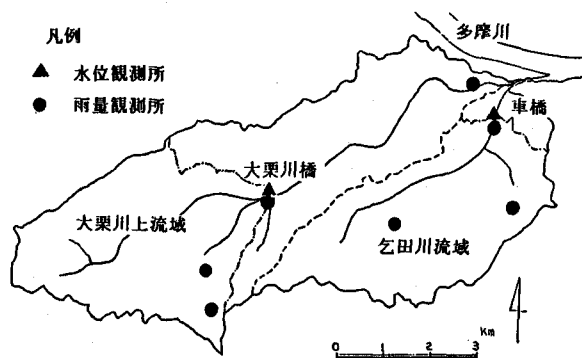


図-1 対象流域

時は、全体の70%が山林で占められていた。しかし、その後宅地造成にともなって開発が進み、現在では不透透率が55%に達し、都市流域としての性格が強い。

大栗川上流域と乞田川流域は、ともに丘陵地河川として地形的に同じ条件にあり、また隣接して流域面積もほぼ等しい。前者が自然流域、後者が都市化流域という対照的な性格から、その流出現象を比較することによって、都市化にともなう洪水流出の変化を調べることができる。その意味で、この2流域は適切な試験流域であると言える。

(2) 都市化と流域の変化

大栗川上流域および乞田川流域の土地利用が、経年的にどう変化してきたか。このことを50年代にわたって表わしたものが図-2である。図からわかるように、昭和45年当時は、両流域とも、山林、水田、畑、荒地が流域の90%を占め、自然流域として同じ状態にある。大栗川上流域は、以後、宅地、道路、造成地などが漸増してはいるが、全体として自然流域のまま現在まで推移している。しかし、乞田川流域では、急激な都市化が進展し、昭和50年の段階で、すでに山林、農地が一举に30%に減少し、以後、都市流域としての

性格を強めている。

さて、都市化による流域の変化のなかで、流域の水文特性に影響する要因として、不浸透域の増大、下水道の普及、そして河道の整備があげられる。そこで、これらの要因の経年的な変化を、5カ年代について図示したものが図-3である。不浸透域率 Imp は、図-1に示した各工種についてモデル地区を設定し、工種ごとに不浸透域率を決定し、それを積み上げて流域全体の不浸透域率を算出した。下水道普及率 Sd は、流域に占める下水道普及面積の割合から算出した。また、河道整備率 Cd については、いちおう 60 mm/hr の暫定河道を基準にしている。図-3から、大栗川上流域、乞田川流域における都市化の進行状況、そして両流域の対照的な性格を経年的に見ることができ。

流域における都市化の程度を総合的に表わす指標として、すでに都市化数というパラメータを導入している¹⁾。この都市化数 U_n は次式によって定義する。

$$U_n = \frac{Imp(X)}{Imp(70)} \times 50 + \frac{Sd(X)}{Sd(100)} \times 30 + \frac{Cd(X)}{Cd(100)} \times 20 \quad (1)$$

ここに、 $Imp(70)$ ：流域内不浸透域率が70%の状態、 $Sd(100)$ および $Cd(100)$ ：公共下水道の普及率、河道整備率が100%の状態、 (X) ：それぞれの値がX%の状態。

都市化数 U_n は、都市化の程度を定量的に表わすだけでなく、流域の水文特性量（流出定数）を推定する指標としてもいえることもできる。この場合、対象とする流出定数によって、(1)式の各都市化要素の重みづけが変わることも考えられる。

図-3には、(1)式によって算出した各年代の都市化数 U_n も図示している。

(3) 対象洪水

大栗川上流域では、大栗川橋地点、乞田川流域では車橋地点で水位観測を行なっている。また、降水量は、図-1に示した8地点で観測している。これらの水文データは、昭和44年以降、主要洪水について10分ごとに整理されている。流域平均雨量は、各流域ともティーセン法で算出した。

本研究で対象とする洪水は、大栗川上流域が、昭和44年から昭和58年までの20洪水、乞田川流域が、昭和44年から昭和58年までの21洪水である。

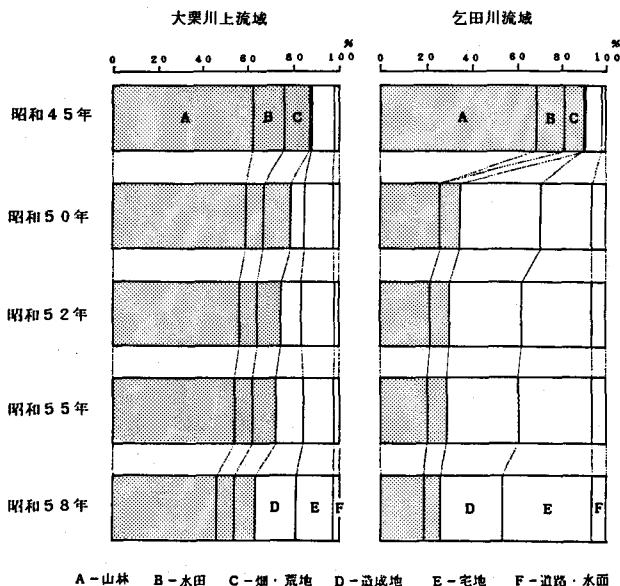


図-2 土地利用の変化

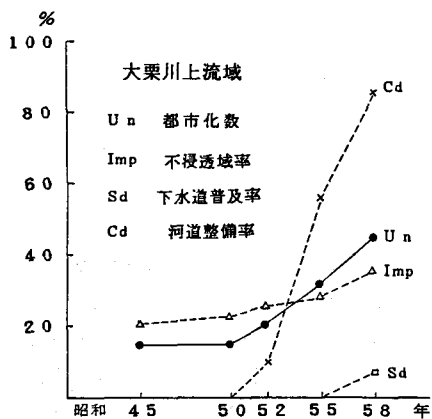


図-3(a) 都市化要素の変化

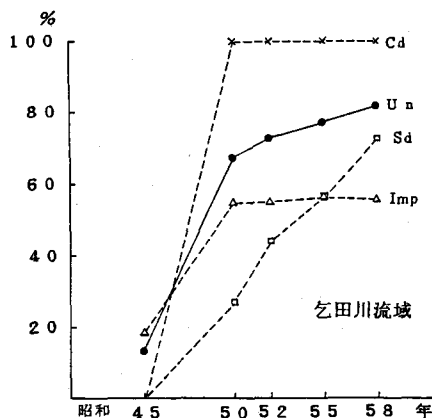


図-3(b) 都市化要素の変化

3. 都市化と流出定数

河川流域のもつ流出特性は、流域の規模、地形、地質、あるいは気候といった自然条件だけではなく、社会的経済的な条件によっても異なったものになる。都市化は、流域の水文特性に影響する社会的経済的要因として最も重要である。

都市化による洪水流出の変化を評価するため、大栗川上流域と乞田川流域の各々について、実績の降雨、流量データから、流出定数の経年的な変化を検討する。流出定数としては、ピーク流出率 f_p （流出係数）、および洪水到達時間に関する C 値をとりあげる。

(1) 流出定数の算出方法

まず、ピーク流出率 f_p は、実績ピーク流出高（洪水到達時間内有効降雨強度 r_e 、 mm/hr ）と、洪水到達時間内平均降雨強度 r_m （ mm/hr ）から、次式によって求める。

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

ここで、洪水到達時間 t_e は、ピーク流量生起時の降雨 $r(t_2)$ と同一の降雨 $r(t_1)$ までさかのぼった時間（ $t_2 - t_1$ ）によって求め、さらに2tg法によって検討を加えた。

洪水到達時間に関する定数である C 値は、つぎの角屋らの²⁾式から算出する。

$$t_e = C \cdot A^{0.25} \cdot r_e^{-0.35} \text{ (min)} \quad (3)$$

ここに、 A ：流域面積（ km^2 ）、 r_e ：洪水到達時間内有効降雨強度（ mm/hr ）である。上式に代入する t_e および r_e は、(2)式でもちいたものと同じ値である。

(2) 都市化と流出定数の変化

上述の方法で算出した f_p と C の値を、大栗川上流域、乞田川流域についてプロットしたものが、図-4、図-5である。図-3の都市化要素の変化と対比させるため、5カ年代の平均値の変化も図示している。

まず、経年的な変化を全体的に見ると、両流域ともに、ピーク流出率 f_p が上昇、 C 値が減少の傾向にある。この2つの流出定数の変化は、図-3の都市化数の経年的な増加と対応している。

ここで、自然流域と都市化流域の対比を行なってみる。図-4、図-5には、 f_p と C の平均値を示している。流域の都市化による流出定数の変化をみるのに、自然流域である大栗川上流域の流出定数と、都市化流域の乞田川流域のそれを比較するのも一方法である。大栗川上流域の流出定数の平均値は、 $f_{p1} = 0.30$ 、 $C_1 = 9.2$ である。また、乞田川流域では、 $f_{p2} = 0.44$ 、 $C_2 = 6.9$ である。両流域の f_p 、 C について検討すると、 $f_{p2}/f_{p1} \approx C_1/C_2$ という関係が成立していることがわかる。洪水到達時間が $1/2$ になるとピーク流量は2倍になるなどと言われているが、この関係式はそれを裏付けている。

以上は、都市化による全体的な流出定数の変化の考察であるが、ここでさらに、図-3の都市化要素の変化と流出定数の対応を考えてみる。

都市化数 U_n の、(1)式に示した各都市化要素の重みづけは、ピーク流出高の評価を背景に設定したものである。この都市化数 U_n とピーク流出率 f_p の変化を対比してみると、両流域とも、両者が全体として同じ傾向をもつことが認められる。しかし、さらに細かく見ると、乞田川流域において、 f_p の変化がむしろ下水道普及率 S_d の変化を反映しているように思われる。下水道の普及とピーク流出高の関係については、これまであまり議論してこなかったが、他の不透透率 I_{mp} や河道整備率 C_d が一定であることを考慮す

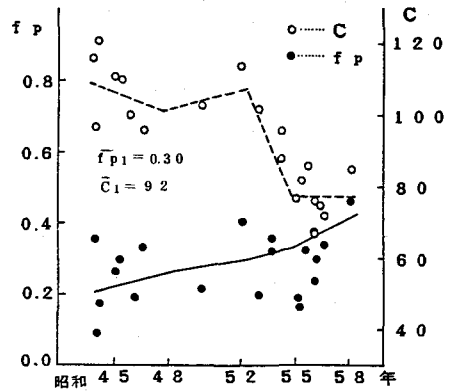


図-4 流出定数の変化（大栗川上流域）

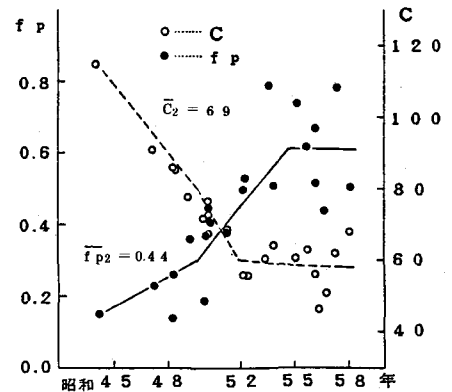


図-5 流出定数の変化（乞田川流域）

ると、乞田川流域の結果から判断するかぎり、下水道の普及がピーク流出高を増大させることが結論できる。

洪水到達時間については、大栗川上流域の昭和55年以降のC値の低下が目立っている。図-4において、C値が昭和52年頃までC=100~110とほぼ一定であるが、その後昭和55年、58年と低下している。この原因として考えられるのは、河道の整備である。図-3(a)から明らかなように、不透透域率Impや下水道普及率Sdに比べて、河道整備率Cdが、昭和55年以降急激に上昇している。このCdの変化と、図-4のC値の変化を対比させると、河道の整備が、洪水到達時間短縮の要因となることが認められる。

乞田川流域では、ピーク流出率fpと同様、図-3(b)と図-5のC値の変化から、下水道の普及が、洪水到達時間の短縮に影響することが確認できる。

4. 流出解析による流出定数の検討

流出解析は、準線型貯留型モデルで行なう。自然流域から都市化流域へと移行している乞田川流域を対象に解析を試み、図-5の流出定数の変化とも合せて、都市化による洪水流出特性の変化を検討する。この解析の目的は、流出機構の詳細な解明ではなく、都市化という見地から、流出モデルのパラメータの変化を追うことである。

(1) 流出モデルの計算方法

まず、有効降雨の算出方法について説明する。準線型貯留型モデルでは、土地利用ごとに、1次流出率f飽和雨量Rsa、飽和流出率f_{sa}を与えて有効雨量を算出する。しかし本解析では、上述の目的もあり、流域を単工種であつかい、1個の流出率fで代表させる。単位時間有効降雨量reは、単位時間平均降雨量rmから、 $re = f \cdot rm$ として求める。

準線型貯留型モデルは、次式で表わされる指数単位図によって計算する。

$$U(\tau) = \begin{cases} 0 & (\tau < 0) \\ \frac{1}{k} \exp(-\tau/k) & (\tau \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

また、上式のkの値は、洪水到達時間tcから、 $k = tc/2$ として算出する。³⁾ tcについては、単位時間有効降雨をもとに、実績有効降雨強度曲線を作成し、この曲線と(3)の角屋らの式との交点から、その値を決定する。⁴⁾

以上の考え方にもとづき、流出モデルのパラメータとして流出率fとC値を与え、10分ごとの流域平均雨量のデータから、基準地点の流量を計算する。実測流量と計算結果を比較し、計算結果の再現性が得られるように、パラメータf、Cを固定する。

(2) 計算結果と考察

流出解析の対象とした洪水は、乞田川流域の車橋基準地点における、5か年代にわたる21洪水である。各年代で代表的なものを取りあげ、その計算結果を示したのが図-7である。流出モデルのパラメータf、Cは、各洪水ごとに固定した後各年代で調整したもので、多少再現性が劣る場合でも、最終的に各年代を代表する値としている。こうして、流出解析によって固定したパラメータf、Cの経年変化を示したものが図-6である。

まず流出率fであるが、図-6から経年的な増加の傾向が明らかである。流出率は、都市化要素のうち不透透域率Impと強い相関があると言われている。この図-6のfの変化を図-3(b)のImpの変化と対比してみると、昭和47~50年の年代で両者の対応が劣っているが、他の年代については、同傾向を示している。この流出率は、総降雨量

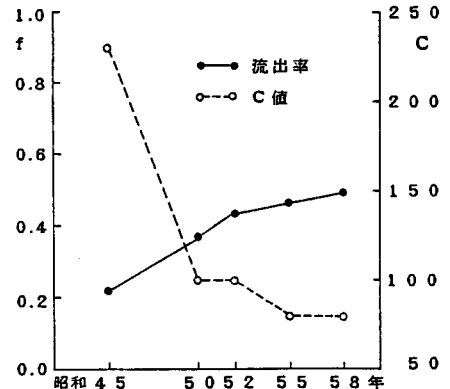


図-6 流出モデルによる定数の変化

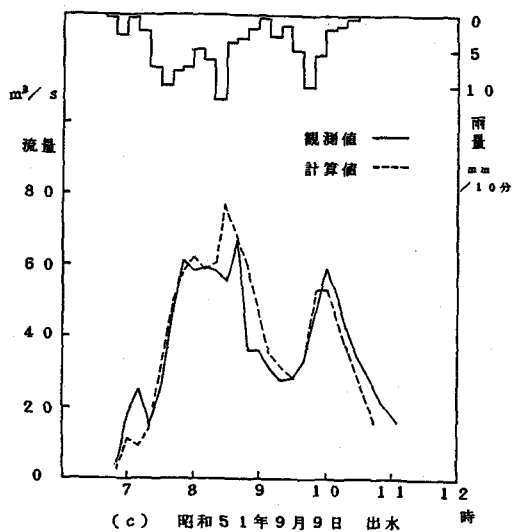
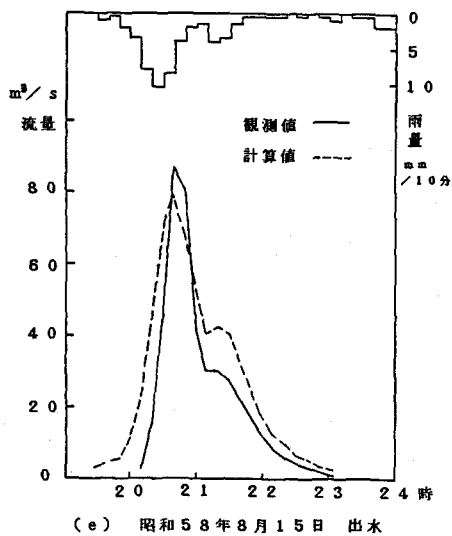
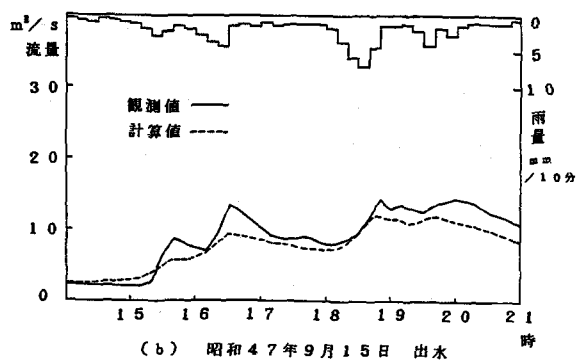
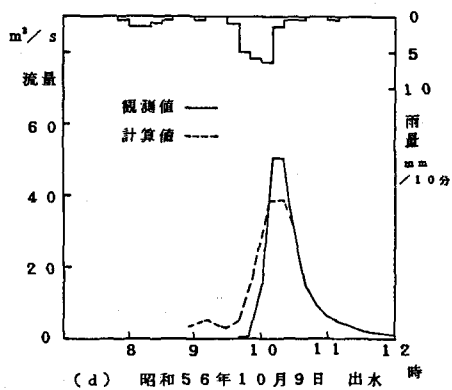
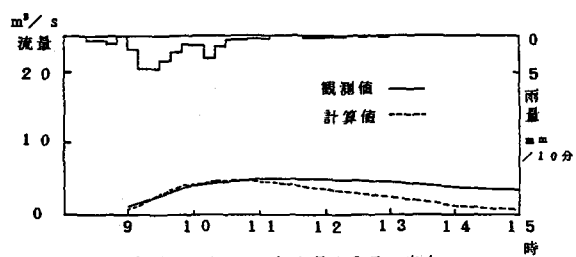


図-7 主要洪水の流出計算例

と総流出高から計算した総流出率と合わせて考察すべきだろう。

つぎに、洪水到達時間に関するC値について検討する。C値は、すでに実績の降雨、流量データから計算しており、図-5にその結果を示している。流出モデルで求めたC値(図-6)と対比してみると、両者の経年的な変化が同傾向であることがわかる。ただ、その値については、流出モデルのC値が、実績値から直接計算したCの値よりかなり大きい。両者の計算方法の相違もあり、今後の検討課題としたい。

5. 結 語

本研究は、大栗川、乞田川流出試験地における観測成果の第1報として、定量化した都市化要素と流出定数の関係を主体に、都市化による洪水流出の変化を調査したものである。流域の都市化を、不透透域の増大、下水道の普及、河道の整備の3要素からとらえたとき、都市化の進行によって、ピーク流出高が増大し、洪水到達時間が短縮することが明らかになった。また、自然流域と都市化流域における、流出定数の平均値の対比から、洪水到達時間とピーク流出高について逆比例の関係が見い出された。本研究でとりあげた都市化要素は、すべて洪水流出に影響する。ただ大栗川上流域では河道の整備が、乞田川流域では下水道の普及が、ともに洪水到達時間の短縮に寄与していることが認められた。流出モデルによる定数の検討においても、洪水到達時間について同様の結論が得られた。本研究で残された課題も含め、都市化と洪水流出機構のさらに詳細な解明を今後とも進めていくつもりである。

なお、本研究でもちいた乞田川流域車橋地点の流量データのうち、昭和49年以前のものについては、車橋地点直上流に位置する関戸水位観測所の水位記録をもとに変換したものである。ご協力いただいた住宅・都市整備公団南多摩開発局の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤, 和泉: 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回水理講演会論文集, 昭和59年2月
- 2) 角屋, 福島: 中小河川の洪水到達時間, 京大防災研年報, 昭和51年
- 3) 吉野: 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, 昭和48年
- 4) 橋本, 長谷川: 土地利用変化を評価する流出モデル, 土木技術資料19-5, 昭和52年