

都市化による洪水流出の変化

——石神井川流域の例（第1報）——

岸 井 徳 雄*

国立防災科学技術センター

Change of Flood Runoff by Urbanization in the Shakujii River Basin (I)

By

Tokuo Kishii

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

In this study, the change of flood runoff characteristics is investigated, on the Shakujii River which flows from west to east on Musashino Terrace in the northern part of Tokyo Metropolis. The basin of the river is 48 km² in area with a total channel length of 19 km. The surface geology of the area is the volcanic ash of high permeability, called Kanto Loam. After 1950's, this basin has been urbanized rapidly and in 1975 it had over 50% of impermeable area and a population of 590 thousands. On this river there are available data of rainfall and discharge of floods which occurred between 1958 and 1977 and the data have made it possible to investigate the change in flood runoff characteristics in these 20 years.

As a result, no considerable difference in runoff ratio was found between each year. From this it is considered that the surface geology of high permeability influences much more than the urbanization does. The time of concentration was reduced remarkably to about a half after urbanization. This is supposed to have been caused by the decrease of roughness in the basin and the channel. Concerning runoff coefficient of Rational Formula, no conspicuous difference is seen. Because the shortening on time of concentration causes high rainfall intensity the time of concentration and the increase of peak discharge, consequently, the runoff coefficient is not so different year by year.

These results were derived only from data of the period from 1958 to 1977, in which period only a few floods were recorded. Further investigation of runoff ratio and runoff coefficient with enough records of big floods in future is expected.

1. はじめに

山林・原野等を主とした土地利用が行なわれていた自然流域に人工的改変が加えられ、開

* 第1 研究部風水害防災研究室

発の進行とともに宅地等の占める面積が増大し、その過程において洪水流出がどの程度の変化をするのか、いわゆる都市化に伴う洪水流出が変化するのは、水文学上の問題にとどまらず水防災上においても重要である。

しかし、都市化に伴って洪水流出がどの程度変化するのか、あるいは顕著な変化がないのかを流出モデルを使っての検証はできず、現実のデータで実証的に解明する方法しかない。このため水文観測の期間がある程度必要である。すなわち、流域の都市化を追跡して行くには、一般に長年月を要し、数多い洪水の発生をも含めて、都市化と洪水資料両方の資料の蓄積を得るには数十年という観測が継続されねばならず、また、数年という短期間に都市化が完了した場合、たとえば大規模団地の開発が数年で完成したとしても、この期間の都市化と洪水流出との関係を見出すには短期間にかなりの数の洪水の実測が必要とされる。また、都市化以前の自然流域で洪水時の水文観測が行なわれていることはまれであり、このことが一層都市化によって洪水流出が変わるのかを検討することを困難にしている。

これらの難点を解決する方法として、異なる流域間の自然流域と都市流域を比較し、間接的に都市化による洪水流出の変化を推定することも行なわれた(岸井・青木, 1979)。

しかし、本報告の対象流域である石神井流域は、1958年(昭和33年)以後、水文観測が継続されており、我が国においてこれ程長期間にわたり、同一の流域で洪水資料が得られている都市流域は数少なく、直接的に都市化と洪水流出の変化との関係を明らかにできる貴重な流域である。

本報告は、この流域で得られた水文観測資料をもとに、ほぼ20年間にわたる本流域の都市化の状態を述べ、洪水流出特性を調査したものである。

この結果、洪水流出率および合理式の流出係数は経年的に大きく変化したとは言い難く、一方、洪水到達時間は、ほぼ1/2に短縮され、そのため石神井川流域においては、ピーク流量は増大の傾向にあるといえる。

2. 流域の概要

2.1 流域の諸元

石神井川は東京都の北部をほぼ国鉄中央線に平行に西から東へ流れ、下流で左支川の田柄(たがら)川を合わせ荒川の派川隅田川に入る都市河川である。その流域面積は60 km²、河川延長30 kmであり、流路勾配は1/400~1/500である。

本報告で対象とした流域は、その一部であり、隅田川との合流点約6 km上流の根村橋より上流の流域で流域面積47.98 km²、河川延長19 kmに達する(図1)。

本流域を行政区域の一部として含む関係区市は、上流から順に小平市、小金井市、田無市、武蔵野市、保谷市、練馬区および板橋区の5市・2区にわたる。

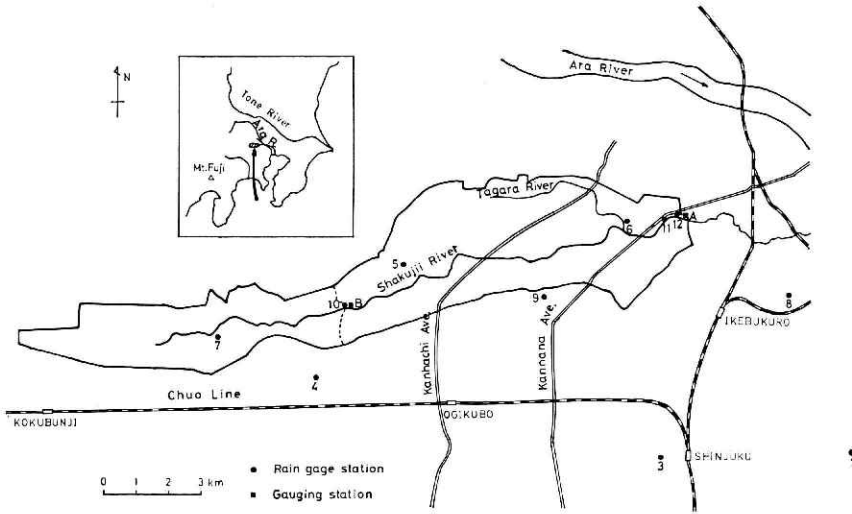


図 1 石神井川流域図 (図中の数字, アルファベットは表 2 の記号に対応)
 Fig. 1 Location of Shakuji River Basin, raingage and gaging stations (Arabic numerals and alphabets correspond to those in Table 2)

2.2* 地形および表層地質

石神井川は武蔵野台地面を浸食して流下し、河道の両側に最大幅 700 m に達する谷底平野 (氾濫原) を形成している。この谷底平野と台地面との比高は上下流とも 7~8 m 程度であり、台地面の標高は、下流で 30 m, 上流で 70 m 程度を示す。

台地を被う表層地質はいわゆる「関東ローム」に属する武蔵野ローム・立川ロームであり、その層厚は平均 7~8 m となっている。谷底平野においては武蔵野礫層の上に薄い沖積層が被っている。そして関東ロームは火山灰層の一種でありこの結果、本対象流域は浸透性が高く、著者ら (岸井・青木, 1978) が用いた分類の区分に従えば浸透流域に属し、洪水流出率、合理式の流出係数ともに小さいと推定される。

2.3 都市化

都市化に伴って洪水流出が変化するかどうかを考察する場合に水文学的に意味のある都市化の指標が必要とされる。一つの考え方として表層地質が大きな意味を持っており、都市化という人工的な土地利用の変化は二次的な意味しか持たない (岸井・青木, 1979) ということが報告されている。一般的に考えられている都市化を水文因子に限定し、それが洪水流出に影響を与える効果を述べる (木下, 1867)。

まず水文因子を流域に影響を及ぼすものと河道に影響を及ぼすものと大別すると、前者として不浸透域の増大、表面粗度の減少、湛水域の減少等があり、後者には、河道粗度の減少、河道貯留の減少等の因子がある。これらの結果ハイドログラフパラメータは次のように

* 本節の記述は (宮田, 1966) に拠る所が大きい。

変化するとされている。

洪水流出率は不浸透域の増大によって増加し、ピーク流量は粗度の減少および湛水域の減少によって増大し、洪水流下速度も粗度の減少および河道貯留の減少によって増加する。また、下水道の普及は河道の影響に含まれると考えられる。

以上のような水文因子を完全に定量化することは困難であるが、以下、流域に影響する因子として不浸透域（宅地）の推移について、また河道に影響する因子として河道改修、下水道の普及の推移について述べる。

2.3.1 宅地面積の推移

宅地面積の増加は水文因子でいうと不浸透域の増加に相当し、洪水流出に影響を及ぼす重要な因子である。本流域に関し、この宅地面積の経年変化を調べた。

本流域は前述のごとく5市・2区の行政区域の一部をそれぞれ含み、1955年（昭和30年）以後、急速に都市化が進み、流域内人口の10年ごとの推移は、

- ・1955年（昭和30年） 20.8万人（人口密度4.3千人/km²）
- ・1965年（昭和40年） 46.0万人（人口密度9.6千人/km²）
- ・1975年（昭和50年） 58.8万人（人口密度12千人/km²）

と20年間に3倍程度に増加し、特に1955年からの10年間の伸びがめざましい。

一方、宅地面積の調査結果は次のようである。宅地面積は、人口と同じく各市・区の統計値をもとに各市・区が本流域に占める割合で比例配分して求めたものである。ここでいう「宅地」とは、各市区の固定資産税台帳に記載されている課税対象宅地と非課税対象の学校・病院等公共用建物の敷地との合計値を「宅地面積」と定義したものである。1955年（昭和30年）以後1975年（昭和50年）までの5年ごとの宅地面積の推移を図2に●印で示した。

この図から、1955年（昭和30年）から20年間に宅地面積は11.66km²から26.42km²と127%増加し、年平均4.2%程度の高率で増加したことがわかる。宅地面積率で表わす

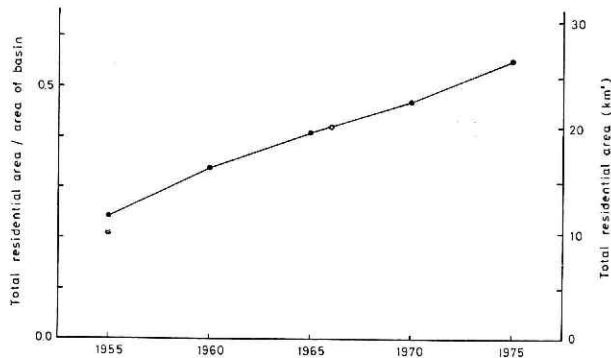


図2 宅地面積の推移
Fig. 2 Change of residential area rate of Shakuji River Basin of every five year.

と 0.243 から 0.551 と増加し流域の 55% が宅地化されたことになる。

さらにここで定義した宅地面積と水文因子である不浸透域の面積との比較をするため、水越ら（水越・尊田，1967）の定義に従い、家屋・建築物の密集している区域は一括して、不浸透域として扱って本流域の不浸透域の面積を求めた値（宮田，1969）を図 2 中○印で示す。この値は、1955 年（昭和 30 年）および 1966 年の空中写真を用いて求められたものである。

この結果、1955 年において固定資産税台帳から求めた宅地面積率は 0.24 であり、空中写真から求めた不浸透域の面積率の 0.21 と同程度である。さらに 1966 年においては宅地面積率（1965 年と 1970 年の内そう値）は 0.42 で不浸透面積率と一致する。

2.3.2 下水道の普及

本流域において本格的に下水処理区域が拡大したのは 1973 年（昭和 48 年）以後であり、1976 年（昭和 51 年）現在で下水処理区域面積普及率は区分によって異なるが 20% から 50% に変化した（表 1*）。本流域の全面積に対しては同じく 12% から 33% の下水処理区域面積普及率である。各区分の境界を図 3 に示す。

本流域の下水道幹線は 1976 年 4 月現在下流域のみ埋設されており、田柄川幹線，練馬幹

表 1 石神井川流域下水道普及率推移（面積普及率，単位 %）

Table 1 Change of sewer coverage rate in each sub-basin of the Shakuji River Basin

流域区分	年	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
3		2	3	4	4	6	6	7	13	28	36	46	50
4		0	0	0	0	0	0	1	6	24	32	42	47
5		0	0	0	0	0	0	1	5	20	26	35	39
6		0	0	0	0	0	0	1	5	19	25	35	39
7		0	0	0	0	0	0	0	5	14	18	26	30
8		0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	15	19
9		0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	18	22
全流域		0	0	0	0	1	1	1	3	12	15	22	33

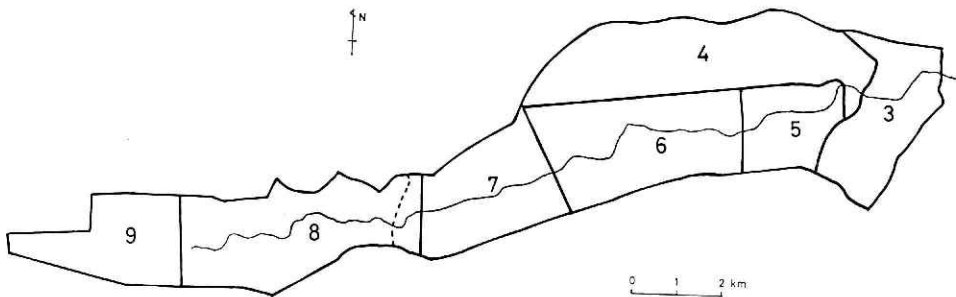


図 3 下水道普及率の流域区分

Fig. 3 Sub basins corresponding to the sewer coverage rate table (Table 1)

* 建設省土木研究所都市河川研究室の資料による。

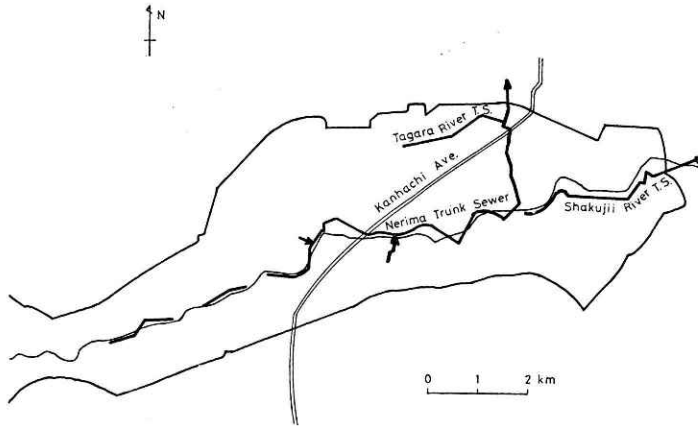


図 4 下水道幹線系統
Fig. 4 Trunk sewer systems

線および石神井川幹線の3系統からなる。その下水の流下状況は環状8号線より上流域では汚水・雨水とも石神井川へ落しており、それより下流域では田柄川および練馬幹線は汚水のみを受け雨水は石神井川に入る。石神井川幹線では晴天時汚水量の2倍までの雨水は流域外へ流去し、その雨水を越える分は、石神井川にはいる(図4)。

2.3.3 河川改修の進捗

石神井川の河道改修は1958年(昭和33年)、22号台風(狩野川台風)を契機に着工され、1979年(昭和54年)を目標として30mm/hr対応河道の改修を目ざしており、上流では護岸は完成し河道掘削を残すのみとなっている(土木研究所, 1978) 根村橋観測所における河道断面は、

- ・1968年 河幅12.5m×高さ3m 断面積37.5m²
 - ・1975年 河幅17m×高さ5m 断面積85m²
- となっており、河道断面積は、ほぼ2.3倍に増大した。

3. 洪水流出特性

3.1 水文資料

本章で用いる洪水資料は「石神井川流域水文観測資料(建設省土木研究所, 1972)および「石神井川流域水文観測資料(その2)(建設省土木研究所, 1979刊行予定)」に拠る。

対象となる雨量観測所および流量観測所の位置は図1に示すとおりであり、その一覧が表2である。流量

表 2 雨量観測所および流量観測所一覧
Table 2 List of raingage and gaging stations

雨量観測所		
記号	観測所名	資料収集期間(年)
1	東京(気象庁)	1958
2	調布	1958
3	淀橋	1958
4	成蹊	1958~1968
5	石神井支所	1965~1968
6	桜台	1965~1968
7	田無	1965~1970
8	豊島	1966
9	練馬区役所	1968~1970
10	上石神井	1970~1977
11	板橋	1969~1970
12	根村橋	1973~1977
流量観測所		
A	根村橋	1958~1977
B	上石神井	1968~1977

観測所の内本報で対象としたのは根村橋観測所であり、水位から流量への換算は浮子による流量観測から作成された水位流量曲線によっている。

対象とした資料の期間の内 1958 年 (昭和 33 年) から 1970 年 (昭和 45 年) までは、雨量、流量とも時間単位の資料であり、1971 年 (昭和 46 年) 以後は 1977 年 (昭和 52 年) までは 10 分間単位の資料である。その内 1959 年から 1964 年までは観測記録が十分でなく、1967 年、1971 年および 1972 年は根村橋観測所付近の河川改修により流量観測ができず水位記録のみであり、今回の解析対象から除外した。

3.2 洪水流出率

洪水流出率 (以下、流出率とする) は次のようにして求めた。

まず、ティーセン法により各雨量地点のウェイトを求め流域平均の総雨量 R_T (mm) を算出する。次に総有効流出高 Q_T (mm) は、ハイドログラフの立ち上がり点での流量 Q_i の時点からやや右上りの線を引き、この線の下側を基底流量とみなし引き去り、ハイドログラフとこの線とで囲まれる部分を総有効流出高とした。なお、ハイドログラフの減水部と右上りの線の交点での流量はほぼ $1.1Q_i$ である。その結果、流出率 f_T は、

$$f_T = \frac{Q_T}{R_T} \quad (1)$$

として求めた。

このようにして、1958 年から 1977 年までの計 79 洪水の流出率の経年変化を示したのが図 5 である。

この図をみると 1958 年および 1966 年に流出率が 0.5 以上の例がある。これはそれぞれ台風 22 号 (狩野川台風) および台風 4 号によるものである。これら 2 例を除くと流出率 0.5 以上の洪水はなく、ほぼ 20 年間にわたり流出率は全体的には増加していない。

この 2 大台風時の例を除き各年の流出率の算術平均値を計算しさらに、同規模の洪水のみ

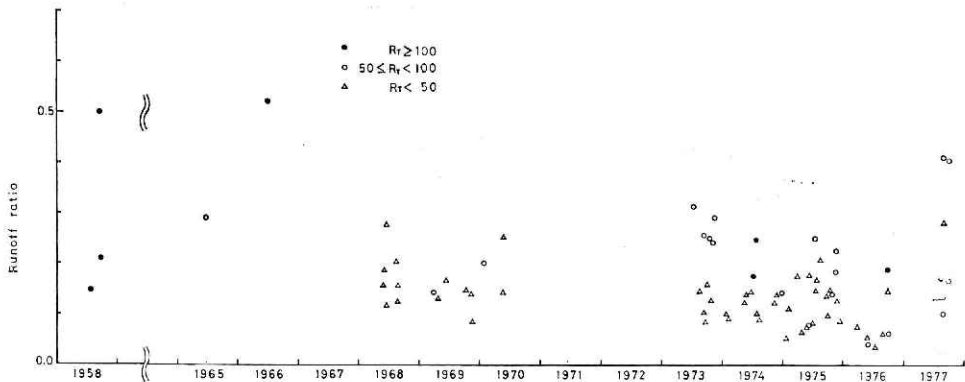


図 5 流出率の経年変化 (R_T は総雨量 (mm))
 Fig. 5 Secular change of runoff ratio (R_T : total rainfall (mm))

表 3 流出率の経年変化
Table 3 Secular change of runoff ratio

流出率	年	1958	1965	1968	1969	1970	1973	1974	1975	1976	1977
全 平 均		0.286	0.290	0.176	0.136	0.200	0.198	0.151	0.140	0.085	0.217
総 雨 量 50~100 mm の洪水		—	0.290	—	0.143	0.203	0.339	0.147	0.178	0.053	0.235

を比較するため総雨量 50 mm から 100 mm までの例を選びその算術平均値を計算した。これらをまとめたのが表3である。

この表から、台風 22 号、台風 4 号時の流出率を除くと 1968 年以後、流出率の顕著な増加はみられず高々 0.2 程度の平均値を示す。

一方、下水道の普及によって流域外に雨水が流下することも考えられる。本流域では石神井川幹線(図 4)が雨水を流域外へ流下させ、その流量は東京都下水道局によると $1.45 \text{ m}^3/\text{s}$ とされ、この量を本流域の流出高に換算すると 0.1 mm/hr 程度であり、ハイドログラフの基底長を 10 hr とするとこの時間に対応する下水道流量は 1 mm 程度である。一例として総雨量 50 mm でその時総有効流出高 10 mm とすると総有効流出高は $10 - 1 = 9 \text{ mm}$ となり流出率は、0.2 から 0.18 と 10% 程度の影響しか持たない。さらに大洪水においては下水道の影響はより小さくなる。

以上のように流出率に大きな変化がみられない原因として本流域の地質は関東ロームという火山灰の一種で被われており、雨水を多量に浸透させることにより、不浸透面積率が増加してもそれ程流出率に影響がないと推定される。たとえば、1975 年の不浸透面積率 0.5 を対象としてみると、関東ロームの土層は 1 m につき 300 mm 程度の保水能力がある(青木, 1971)と見積もることができその 0.5 すなわち 1 m につき 150 mm 程度の有効保水能力を都市化しても持っていることになる。いかえれば都市化によって不浸透面積率が 0.5 となった場合、流域の 1/2 全面がすべて自然流域で、残り 1/2 全面がすべて不浸透域という状態ではない。実際は建物の回りの敷地は依然自然流域に近い状態であり、屋根・道路面からの表面流はその周囲の敷地等に浸透し、このような流出率の小さい範囲の洪水では都市化によって流出率は変化しないといえる。

3.3 洪水到達時間

流出率と同じように 1958 年から 1977 年までの 90 洪水の洪水到達時間の変化を図 6 に示す。(流出率の場合より洪水例が多いのは、ピーク付近の流量データが得られているがその前後のデータが得られていない場合があるからである。)

ここで、洪水到達時間は各洪水ごとにピーク雨量の測定時間間隔の中央から流量ピーク時までの遅れ時間 t_0 の 2 倍を洪水到達時間 t_i 、すなわち

$$t_i = 2t_0 \quad (2)$$

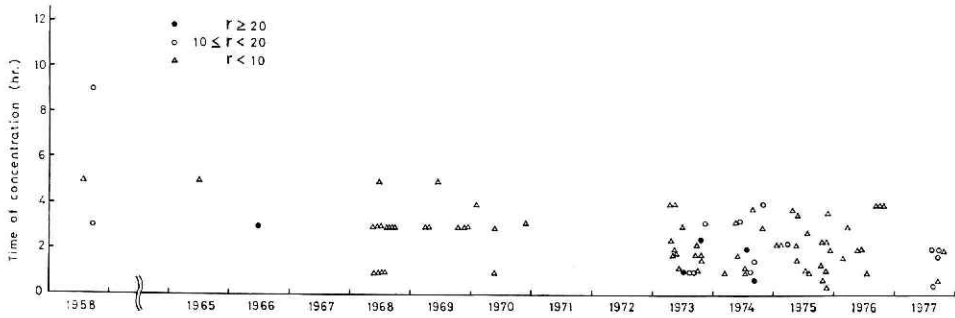


図 6 洪水到達時間の経年変化 (r は洪水到達時間内平均降雨強度 (mm/hr))
 Fig. 6 Secular change of time of concentration (r : average rainfall intensity within time of concentration (mm/hr))

と定義したものである。たとえば、2時から3時にかけて雨量が最大で、流量ピークが5時とすると、遅れ時間は2.5時間となるので、この場合の洪水到達時間は5時間とした。

図 6 から 1958 年から 1977 年の間に明らかに洪水到達時間は短縮している傾向がある。このことを流出率と同じように各年の単純平均値で整理したのが表 4 である。

表 4 洪水到達時間の経年変化
 Table 4 Secular change of time of concentration

年	1958	1965	1968	1969	1970	1973	1974	1975	1976	1977
洪水到達時間 (hr)	4.0	5.0	2.5	3.4	2.8	2.1	2.1	2.0	2.9	1.9

この表から、洪水到達時間は 1958 年から 1970 年までは 2.5 時間から 5.0 時間程度であり、それ以後はほぼ 2 時間程度となって、ほぼ 1/2 に短縮している。

以上のことは、2.3.1~2.3.3 で述べたように、本流域の都市化による流域粗度の減少および河川改修による河道粗度の減少、下水道の普及に伴う側溝の整備等によって洪水流下速度が増加し、その結果洪水到達時間が短縮されたとみることができる。

3.4 合理式の流出係数

合理式の流出係数 (以下、流出係数とする) は、周知のように下水道や中小河川のピーク流量の推算に使われ、

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f_p \cdot r \cdot A \quad (3)$$

で表わされる。ここで、 Q_p : ピーク流量 (m^3/s)、 f_p : 流出係数、 r : 洪水到達時間内平均降雨強度 (mm/hr)、 A : 流域面積 (km^2)。

ここで問題となるのは洪水到達時間内平均降雨強度 (r) であるが、洪水到達時間としては前節 3.3 で求めた各年の平均値を用いて洪水到達時間内平均降雨強度を計算した。

90 洪水を対象にして、以上のようにして求めた流出係数の各年値をプロットしたのが図 7

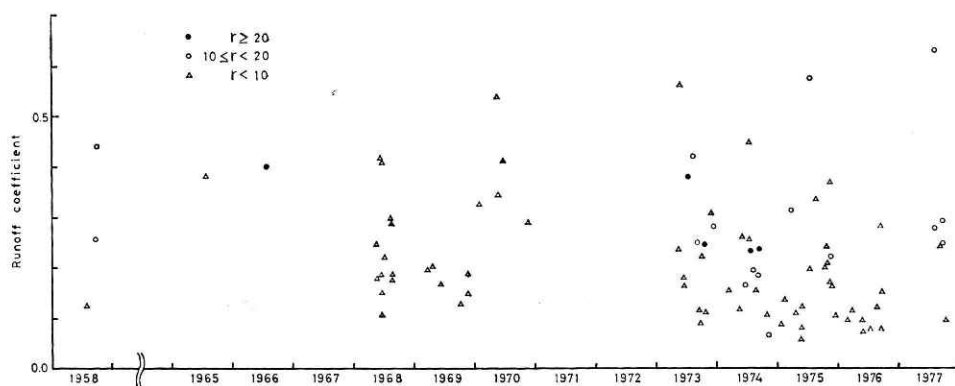


図 7 流出係数の経年変化 (r は洪水到達時間内平均降雨強度 (mm/hr))

Fig. 7 Secular change of runoff coefficient of Rational Formula (r : average rainfall (mm))

である。

この図から、流出係数の各年の最大値は増加傾向にある。つぎに、流出率と同様に各年の算術平均値および洪水到達時間内平均降雨強度 (r) が 10 mm/hr から 20 mm/hr までの洪水のみを対象とした各年算術平均値を一覧表にしたのが表 5 である。この表から流出係数は必ずしも増加傾向はみられず、むしろほぼ一定で、全平均で 0.2 程度、 r が 10~20 mm/hr を対象にした場合で 0.35 となり、流出係数の小さい範囲では、一定値を示す。

表 5 流出係数の経年変化

Table 5 Secular change of runoff coefficient of Rational Formula

流出係数 \ 年	1958	1965	1968	1969	1970	1973	1974	1975	1976	1977
全 平 均	0.276	0.383	0.242	0.188	0.384	0.257	0.196	0.204	0.122	0.303
洪水到達時間内平均降雨強度 10~20 mm/hr	0.350	—	—	—	—	0.323	0.153	0.353	—	0.369

以上のことから、各年の流出係数の最大値のみを対象とすればその増加傾向は認められなくもないが全体的にみれば、流出係数は本流域では都市化とともに大きく変化すると断定することは難しい。

このように都市化によって流出係数が変化しない原因としては次のようなことが考えられる。

河川改修により一般には湛水域の減少、河道貯留の減少が考えられている。しかし、本流域の河川改修のように河幅が拡幅され、河道の堀削も行なわれると、河道断面積は以前に比較し 2 倍以上となり、河道貯留の増大等が原因となって流出係数の増大が抑制される方向に作用し、一方河道粗度の減少により洪水到達時間は短縮され、洪水到達時間内平均降雨強度 (r) は増加し、ピーク流量は増加する方向に作用する。これらの逆方向の作用により、相殺され、流出係数としては、それ程変化しないことも考えられる。

もう一つの考えは洪水到達時間が短縮し、そのために洪水到達時間内平均降雨強度 (r) は大きい値となり、流出係数はそれ程変わらない。このことを (3) 式にあてはめれば石神井川においては 1958 年から 1977 年までの間においてピーク流量は、洪水到達時間内平均降雨強度 (r) が増加した分と同程度に増加傾向にあると認められる。たとえば、1958 年の台風 22 号時の降雨波形について洪水到達時間内平均降雨強度 (r) を求める。その結果、洪水到達時間を 4 時間とし、ピーク雨量を中央に挟んで 4 時間の平均降雨強度は 31.4 (mm/hr) となる。さらに洪水到達時間が 1/2 に短縮され 2 時間として、同様に平均降雨強度を求めると、38.1 (mm/hr) となり、洪水到達時間が 1/2 に短縮されると洪水到達時間内平均降雨強度は 20% 増加し、その程度のピーク流量の増大があり、この結果、ピーク流量と洪水到達時間内平均降雨強度との比、すなわち流出係数はそれ程変化しないことになる。

4. ま と め

都市化の推移および洪水流出特性の経年的な推移を石神井川流域を対象として追跡調査した。

この結果、洪水到達時間は都市化とともに短縮する傾向が明らかに認められる。流出率については、1977 年までの観測結果から得た小さい値の範囲では都市化に伴う有意な傾向は認められない。これは、浸透性の高い表層地質の影響が都市化という人工的改変に卓越する効果をもつからである。流出係数についても流出率と同様都市化による有意な傾向は認められないが、これは洪水到達時間の短縮による洪水到達時間内の平均降雨強度の増大と同程度のピーク流量の増大による効果が大きいと考えられる。

謝 辞

本研究に際し、石神井川流域に関する資料などの便宜を計って頂いた建設省土木研究所水文研究室長石崎勝義氏、同研究室長谷川正技官、同都市河川研究室の益倉克成氏、東京都建設局・下水道局ならびに石神井川の水文観測にあたられた土木研究所水文研究室の諸先輩の方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 青木佑久 (1972): 山地流域における洪水流出の追跡. 建設省土木研究所報告, 第 143 号, 18.
- 2) 建設省土木研究所 (1972): 石神井川流域水文観測資料 (昭和 33 年~昭和 46 年).
- 3) 建設省土木研究所 (1979 刊行予定): 石神井川流域水文観測資料 (その 2) (昭和 46~昭和 52 年)
- 4) 建設省土木研究所都市河川研究室 (1976): 治水計画の評価に関する石神井ケース・スタディ調査報告, 59.
- 5) 木下武雄 (1968): 都市化による流出の変化. 土木技術資料, 9-9, 12.
- 6) 岸井徳雄・青木佑久 (1979): 自然流域と都市流域の洪水流出特性の比較. 国立防災科学技術センター研究報告, 第 21 号, 1-33.

- 7) 宮田 正 (1969): 石神井川流域の都市化による流出変化と水害の傾向に関する考察. 地理学評論, **42-10**, 667-672.
- 8) 水越三郎・尊田継明 (1966): 急速に都市化していく地域の流出に関する調査. 建設省土木研究所資料. **201-2**, 5.

(1979年6月11日 原稿受理)