

都市化と降雨強度別ピーク流出係数の関係について
Relation between Urbanization and Run-off Coefficient
on each grade of Rainfall intensity

東京都建設局河川部 正員 佐藤一夫
東京都土木技術研究所 正員 ○和泉 清

1. はしがき

流域の都市化が河川の流出形態に変化を及ぼすということは、周知のとおりである。東京の中小河川は、昭和 40 年代以降、流域の都市化による洪水流出時の弊害が顕在化してきたが、加えて、近年の公共下水道の普及など著しい都市施設の整備が行われるに伴ない、新たな問題として、比較的、小規模な降雨状況と考えられる状況において、雨水の集中による浸水被害の発生が多くみられる。

この研究は、都内の主要な中小河川流域を対象に、降雨規模に応じた雨水の集中化による最近の流出現象の実態から、とくに、降雨強度とピーク流出係数の関係を把握し、水害発生防止策に関する対策資料として、あるいは、現状における洪水流出予測情報の基礎データとして活用するとともに、ひいては、再改修計画に資することを目的として検討したものである。

2. 対象河川と対象出水

本稿で扱った中小河川は、図 - 1 に示す神田川、善福寺川、妙正寺川、石神井川、田柄川、目黒川（北沢川、烏山川を含む）、蛇崩川、野川などである。

そして、これら河川の流域および河道に関する諸元は、表 - 1 に示すとおりである。流域の規模は、6 km²

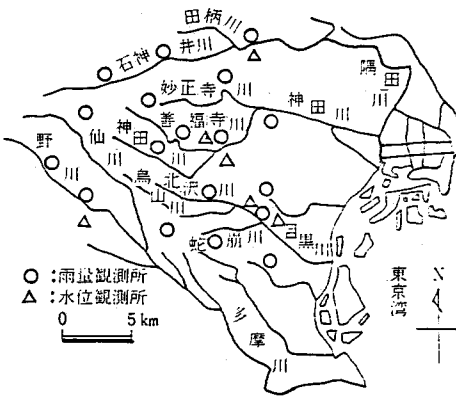


図 - 1 対象河川

表 - 1 対象流域の諸元

から 44 km²程度で、これら流域の都市化状況は、流域内の道路面積と家屋面積に限定した不透透面積が流域面積に占める割合、すなわち、不透透域率（以下、Impと略）が現状で 28 ～ 64 %、公共下水道の普及率（以下、S_dと略）が 44～100%、後述する都市化数（以下、U_nと略）が 53～84 という状態の各流域が対象である。

つぎに、対象出水は、各流域における水文資料の実存状況により、比較すべき対象期間に多少違いはあるが、河道の整備状況など都市排水施設の整備状況などを考慮して、降雨規模として強度が 3mm/hr 以上の出水例とする。そして、各降雨データは、各流域において、経年的な流況の変化を把握するため、比較対象年時における諸条件に統一性をもたせる必要から、昭和 48 年当時、都内に既存する観測所の記録に限定し、整理したものである。各観測の 10 分単位の記録を単純平均し、流域平均雨量とした。

また、各河川の対象出水例は、神田川が昭和 48 年～昭和 57 年にわたる 77 出水、善福寺川が同じく、72 出水、妙正寺川も同様の 69 出水である。つぎに、石神井川および田柄川が昭和 48 年～ 57 年までの 112 出水、目黒川が昭和 45 年～ 57 年の 109 出水、蛇崩川が同様の 57 出水で、残る野川の場合が、昭和 49 年～

項目 河川名	対象流域面積 (km ²)	平均流域勾配 1/s	河道長 L(km)	平均河道勾配 1/s	不透透域率の推移 (%)	下水道普及率の推移 (%)	都市化数
神田川	11.79	1/110	10.8	1/650	46～54	65～100	78
善福寺川	18.95	1/140	10.4	1/840	49～56	63～100	82
妙正寺川	19.20	1/120	7.8	1/570	56～59	77～100	84
目黒川	27.45	1/119	19.9	1/360	51～56	0～65	72
蛇崩川	6.45	1/65	4.1	1/200	61～64	0～63	77
石神井川	44.10	1/170	14.7	1/530	42～48	32～44	59
田柄川	10.83	1/150	5.6	1/600	44～50	12～75	61
野川	30.64	1/115	9.9	1/330	22～28	28～69	53

※ 不透透域及び下水道普及の推移は、昭和48年から昭和57年の状況を示す。

昭和56年までの82出水である。

3. 都市化と流出係数

流域の都市化、とくに都市施設の整備に伴ない、これら各河川の流出形態が、どのように変化してきたかという点について、流出係数の変遷過程から検討する。神田川をはじめ都内の既成市街地化河川における都市化進行状況を定量的に表現する方法として、つぎのような定義にもとずく都市化数を利用する。

東京都の現状を考慮して対象流域における100%の都市化状況とは、①建べい率を考へ、 I_{mp} が70%以上の状態にあること。② S_d が100%の状態にあること。③河道の疎通能力として、

計画降雨強度50mm/hrの整備率が100%であること。などが満たされている流域状況を $U_n = 100$ の状態とする。そして、比較すべき各対象年時における流域の都市化進行状況を I_{mp} 、 S_d 、現況河道の整備率(以下、 C_d と略)を要因とする次式によって算定する¹⁾。

$$U_n = \frac{I_{mp}(X)}{I_{mp}(70)} \times 50 + \frac{S_d(X)}{S_d(100)} \times 30 + \frac{C_d(X)}{C_d(100)} \times 20 \quad (1)$$

こゝに、 $I_{mp}(70)$:流域内不透透率が70%以上の状態、 $S_d(100)$ および $C_d(100)$:公共下水道の普及率および河道の整備状況が100%の状態、(X):それぞれの値がX%の状態、 U_n :都市化数

さらに、(1)式の定数については、つぎのような考え方により定めた。

I_{mp} の多寡は、流出量の大小、とくに総流出量を支配する都市化要因であり、 S_d と C_d は、洪水到達時間を支配する要因であるとして、これら総流出量を支配する要因と洪水到達時間を支配する要因が、都市化による流出現象の変化に与える寄与率は、それぞれ50%とする。その理由は、目黒川の既往洪水による流出計算結果から都市化に伴う総流出量とピーク流量の増加率がほぼ同程度であったとする結果²⁾による。

また、河道の整備および公共下水道の普及に伴うピーク流出高の増加分に対する両者の寄与率が2:3であったとする善福寺川における調査結果³⁾により、それぞれの都市化要因の重みとした。その結果、現状における各対象河川の基準地点における都市化状況としての U_n は、表-1に示すとおりである。

こゝで、昭和48年～昭和57年の10カ年間に於ける各河川の流出係数および洪水到達時間の変遷について、1.2事例を示すと図-2および図-

3のようになる。これは、つぎの式⁴⁾により整理した結果である。

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

$$T_p = T_2 - T_1$$

こゝに、 f_p :ピーク流出係数、 r_e :洪水到達時間内の有効降雨強度(mm/hr)、 r_m :洪水到達時間内の実測流域平均降雨強度(mm/hr)、 Q_p :ピーク流量(m^3/sec)、 A :流域面積(km^2)、 T_p :洪水到達時間(min)、 T_2 : Q_p の発生時刻、 T_1 :時刻 T_2 に先行する降雨の内、時刻

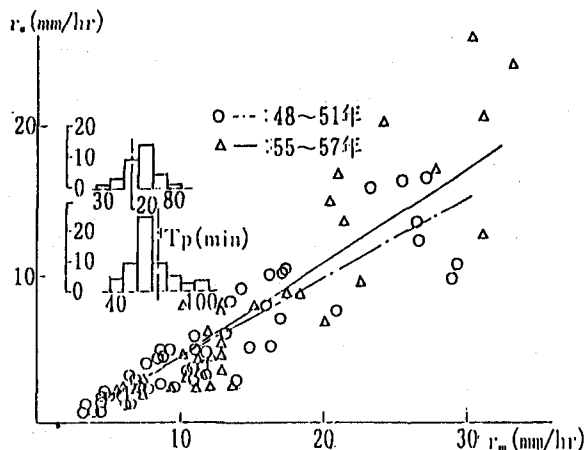


図-2 妙正寺川の T_p と f_p

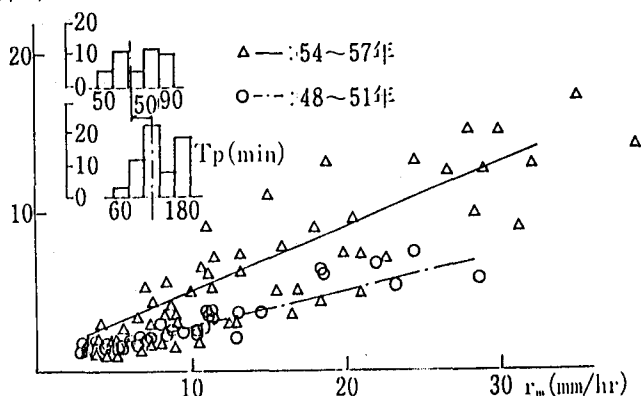


図-3 田柄川の T_p と f_p

T_2 に生起している降雨量とほぼ等しい降雨量が生起している時刻

神田川水系の支川、妙正寺川における f_p および T_p の変遷状況が図-2 であり、石神井川水系の支川、田柄川の例が、図-3 である。この 10 カ年間に、妙正寺川は、 f_p が 0.1 程度増大し、 T_p は、20 分程度短縮している。一方、田柄川の場合、流域の都市化状態が、妙正寺川に比べ、 U_n の値で 10 ポイント程度少ない状況にあること。いゝかえれば、都市化が著しい進行速度でいまだに続いている状況にあるため、妙正寺川の例に比べ、 f_p の変化、 T_p の短縮が、見掛け上、著しいことが判る。

また、各河川別の f_p の状況について、この期間内の変遷として r_e と r_m の関係を表-2 に示す。

表-1 および表-2 から明らかなように、総じて、現在、都市化の変化が大きい河川、例えば、石神井川や田柄川、野川の場合、 f_p の値が、この 10 カ年間に大きく変化していることが判る。

一方、すでに著しい既成市街化状況におかれている妙正寺川の場合などは、 f_p の値の変化は、比較的小さい。流域内の公共下水道などの都市施設が、整備途上におかれている流域にあっては、見掛け上、経年的な f_p の変化は、大きい。

排水施設網等が完備しているところにおいては、 f_p の変化が小さい。

また、当然なことながら、 U_n の大きい河川の f_p は、小さな U_n の河川の f_p より、降雨規模にもよるが、総じて、大きな値となっている。大体、 U_n が 10 ポイント増加することによって、 f_p の値が、こゝで対象とした河川の場合、0.07 ~ 0.08 程度、平均的に増大する。因みに、降雨強度 50 mm/hr の場合、 U_n の最も小さい野川の場合と、 U_n の最も大きい妙正寺川の場合を比較すると、妙正寺川の f_p は、野川のそれに比べ、0.13 程度大きな値となっている。そして、これら 8 河川の U_n と f_p の関係を、近似的に式で表わすとつぎのようになる。

$$f_p = 0.005 U_n + 0.196 \quad (8)$$

4. 降雨強度別流出係数

各河川別に、こゝ 10 カ年間の流出係数の変遷について検討してきたが、本項では、この流出係数と降雨強度との関係、さらに各河川の降雨強度別流出係数の経年的な変遷に関して検討する。

降雨強度の分類数は、5 mm/hr、10、15、20、25、30、35、40 mm/hr 以上の 9 ケースとし、その分類方法は、降雨記録が 3 mm/hr 以上 7.5 mm/hr 未満のものを降雨強度 5 mm/hr の部類に、7.5 mm/hr 以上 12.5 mm/hr 未満のものを $r_m = 10$ mm/hr とする。以下、同様の方法により各降雨強度別に、その部類に入れる。ただし、37.5 mm/hr 以上のものは、実測例も少ないこともあって、すべて、 $r_m = 40$ mm/hr とした。

以上のような方法により整理したものが図-4 に示す各河川別の f_p と r_m の関係である。

各河川ごとに特徴があり、統一的な傾向を述べることはむずかしい。たとえば、 r_m と f_p の関係で、比例的な型で両者の関係が明白な河川例は、石神井川、目黒川、蛇崩川の一部を除いた他の河川である。

しかし、 f_p の経年的変遷についてみれば、降雨規模による違いはあるが、この 10 カ年間で、 f_p の増大化が明白な河川例として、 U_n の比較的小さい野川、石神井川、田柄川をあげることができる。

各降雨強度別ごとに、現状の f_p は、従前に比べ、0.1 ポイント程度大きくなっている。また、降雨強度が 30 mm/hr 以上の場合においては、ほとんどの河川において、 f_p の経年的な増加傾向をみることができる。全体的には r_m と f_p の関係が、比例関係にあるといえる。

河川によって、多少の違いはあるが、降雨強度が 10 mm/hr 程度の f_p の値に比べ、現状の 30 mm/hr 程度の f_p の値は、0.1 ポイント、40 mm/hr 以上の場合、0.2 ポイント程度、大きな値となっている事実がみられる。既述のように、都市化と流出係数の変化について、都市施設が整っている流域にあっては、この 10

表-2 各河川における r_e と r_m の関係

河川名	流域面積(kd)	関係式 (mm/hr)	
		昭和48年代	昭和57年代
神田川	11.79	$r_e = 0.46 \quad r_m - 1.00$	$r_e = 0.62 \quad r_m - 2.63$
善福寺川	18.95	$r_e = 0.33 \quad r_m + 0.22$	$r_e = 0.60 \quad r_m - 2.65$
妙正寺川	19.20	$r_e = 0.53 \quad r_m - 0.98$	$r_e = 0.62 \quad r_m - 1.63$
目黒川	27.45	$r_e = 0.49 \quad r_m - 0.70$	$r_e = 0.61 \quad r_m - 1.85$
蛇崩川	6.45	$r_e = 0.62 \quad r_m - 1.57$	$r_e = 0.57 \quad r_m - 1.34$
石神井川	33.27	$r_e = 0.23 \quad r_m + 0.60$	$r_e = 0.39 \quad r_m + 1.11$
田柄川	10.83	$r_e = 0.23 \quad r_m + 0.70$	$r_e = 0.53 \quad r_m - 1.28$
野川	30.64	$r_e = 0.29 \quad r_m - 0.14$	$r_e = 0.48 \quad r_m - 0.85$

(注) 目黒川及び蛇崩川は、昭和45年代、昭和57年代の値

カ年間の変遷過程で大きな変動はみられないが、反対に U_n の小さい流域での f_p の変化が、著しいことは、指摘してきたところである。

このことは、この降雨強度別流出係数の経年的変遷の実態からも U_n の小さい流域では、 f_p が都市化要因のうち、下水道等の排水施設網の整備による増大化は、あまり考えられない。

f_p の増大化は、都市化要因のうち、Imp に起因することが大きい

いものとする。

流域内の排水施設網等による流出形態への影響は、洪水到達時間の短縮という点に顕著な型で表われる。

現実の問題として、合理式による洪水到達時間内の流域平均降雨強度と有効降雨強度との相対比である f_p は、間接的な型で、洪水到達時間の長短による影響を受けるが、結果として、

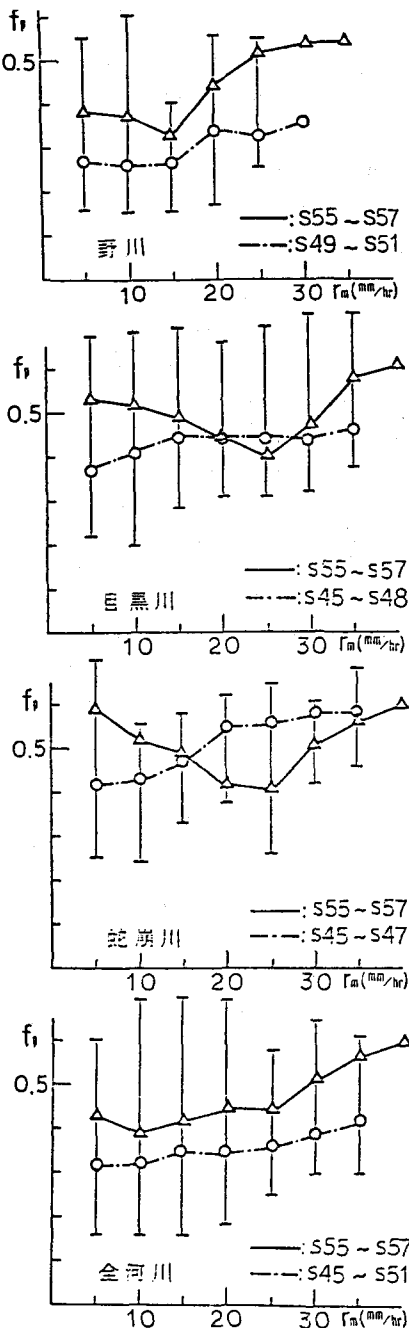


図 - 4 - 1 降雨強度別流出係数

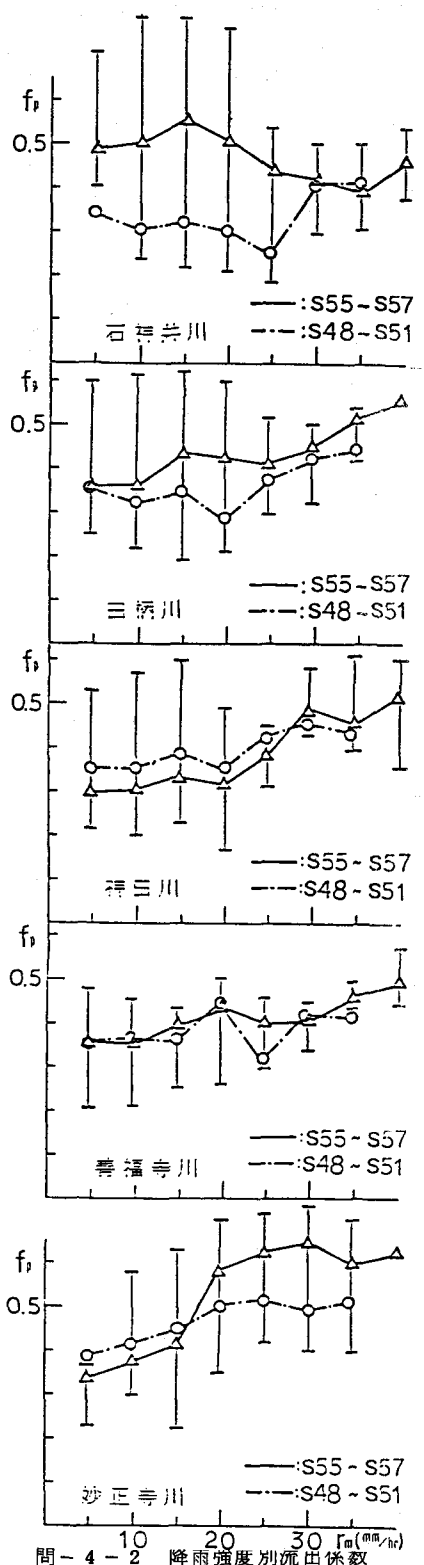


図 - 4 - 2 降雨強度別流出係数

洪水到達時間の長短が必ずしも降雨強度の大小を支配することにはならない。

それ故、下水道等の排水施設網の整備状況が、必ずしも、 f_p の大小を支配する結果を生むことにならない。都市化に伴う雨水の集中によりピーク流量の増大化は必然な現象となって生起するが、流域平均降雨強度も相対的に増大することがあり、したがって、両者の相対比である f_p が、見掛け上、必ずしも増大する結果を生むとは限らない。結果として、小さな値となる現象が、見掛け上、出現する。

図-4にみられるように、個々の洪水例をみると、 f_p の実態は、バラツキが大きい。こゝで対象とした8つの河川の場合、 f_p の最大は、0.85、最小が0.16、である。平均的には、0.4~0.6程度である。

5. 洪水流出予測モデルへの適用

f_p の実態分析から得た種々の結果を、洪水流出予測モデルに適用することを試みた。

東京都建設局では、中小河川の雨量水位情報伝送処理システムが、昭和58年度にほぼ完成し、それに合せ、洪水流出予測モデルの技術開発を進めているところである。

この予測モデルは、流出計算法として斜面モデルに準線形貯留モデルを、河道モデルにKinematic Channelを応用する。その概要は、以下のとおりである。

(1) 予測モデルの概要

斜面モデルにおいて、基本となる洪水到達時間の見積りに、つぎの考え方による算定を特徴とする。

$$T_p = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (4)$$

こゝで、上式の r_e は、 $r_e = f_p r_m$ (5)、 $C = 270 - 2.5 U_n^{(6)}$ (6)として算定する。

こゝに、 T_p : 洪水到達時間 (min)、 C : 定数、 A : 流域面積 (km^2)、 U_n : 都市化数

ところで、 r_e は、原則として(5)式によって算出するが、このモデルにおいては、つぎの4つの方法により、比較を行い、その結果、最大値の r_e を採用する。

第一に、各河川別に、表-2に示す回帰式により r_m から r_e を推定する方法、第二は、降雨強度別に図-4のグラフから各河川ごとに推定する。例えば、目黒川の場合、 r_m が $5\text{mm} \sim 10\text{mm/hr}$ 以下であれば、 $f_p = 0.51$ として、既述の(5)式に入れ、 r_e を決める。第三に、各河川ごとに、既述の(3)式により U_n の値から、 f_p を求める。第四のチェック方法として、 r_m が 40mm/hr を超える場合、基準地点における流域内の道路面積の5倍⁷⁾を有効流域面積として、 Q_p を算出し、つぎの式から r_e を求める。

$$r_e = 3.6 Q_p / (A_e r_m) \quad (7)$$

以上、各算定法による最大値の r_e をもって、(4)式の r_e に代入する。さらに、先行降雨の累積が 100mm を超えるような状況が出現した場合は、前述の第一および第二、第三の方法によるとき、 f_p の推定値に0.1ポイント加算し、洪水到達時間(または、流入時間)の推定に使用する。

そして、この洪水到達時間とつぎの指数単位図法を利用する。

$$U(\tau) = \begin{cases} 0 & (\tau < 0 \quad T_p < \tau) \\ \frac{1}{K} e^{-\frac{\tau}{K}} & (\tau \geq 0 \quad T_p > \tau) \end{cases} \quad (8)$$

こゝに、 K は、吉野⁸⁾による $K = T_p / 2 = T_L$ (遅れの時間) である。

つぎに、河道モデルは、簡単な線型水路方式により算定する。 $O(t) = I(t - T_L)$ (9)

こゝに、 $I(t)$: 流入量、 $O(t)$: 流出量、 T_L : 線型水路の輸送時間 (min) $T_L = l / \sqrt{S}$ 00

で、 l は、河道長 (m)、 S は、河床勾配である。

以上のような基本的な考え方による流出予測モデルは、5~10分間隔で伝送されてくる水位雨量情報システムにより、都内の主な地点における水防対策情報を、2分程度で処理することとしている。

このモデルで重要なことは、雨量水位情報の正確さはもとより、流域情報としての Imp 、 S_d 、 O_d 等の基準地点における見積りで、この作業に手間がかかることが、このモデルの問題点となっている。

こうした、未解決な点が残されているモデルではあるが、その適用例を以下に示す。

(2) 適用例

こゝに、例示する洪水は、目黒川の支川、烏山川と北沢川の合流点（東仲橋テレメータ観測点）における集中型（1981.7.22の集中豪雨）と長雨型（1981.10.22の台風24号）の2洪水である。

これら洪水の流出予測モデルによる10分値、30分値による予測結果と現実の波形を図-5に示す。また、図の上に示されている文字類は、基準地点の警戒水位、危険水位等の予測発生時刻とその規模を示す。

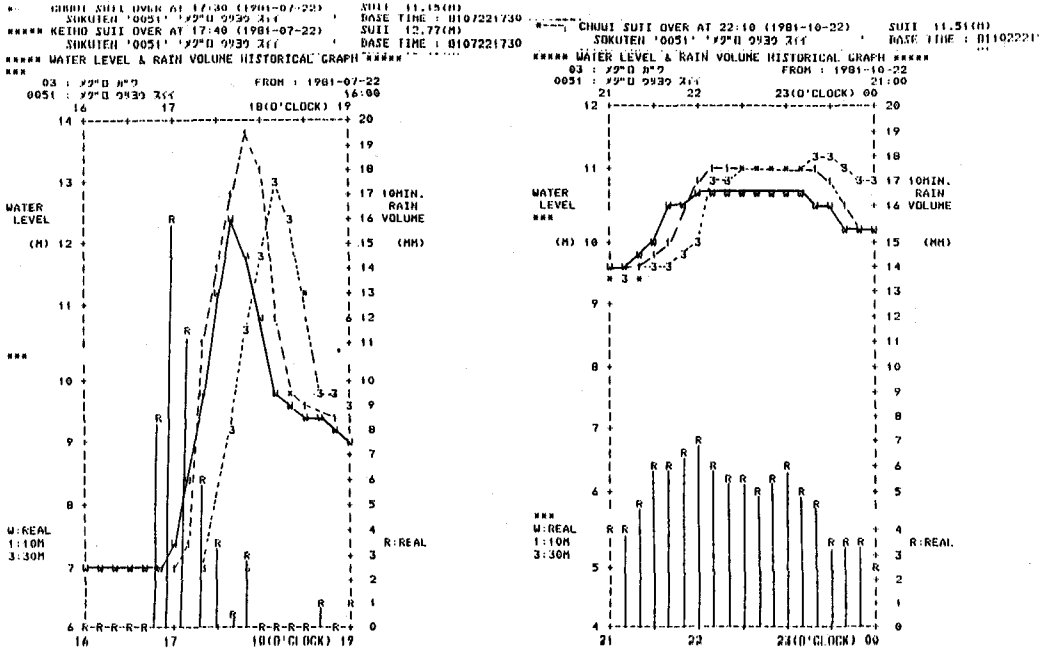


図-5 流出予測モデルによる目黒川（東仲橋地点）の洪水波形

集中型は、降雨の集中地域、広さの想定などに苦慮し、予測がむずかしい面があるが、この例では、比較的、予測値と実値との差が小さい。流域平均降雨量の見積りが現実と一致したにすぎない。一方、長雨型は、先行降雨の多寡による影響があるが、適切な予測結果が示されている。この例では、集中型の流出率と流出係数の値には、長雨型と同様、見掛け上、差がみられなかった。

6. あとがき

都内中小河川の f_p の現況および都市化との関わりについて述べてきたが、現状あるいはここ2、3年ににおける状態が、都内にあっては最も都市化による河川流出への影響が厳しい型で出現するものと考えている。

主な河川流域において、総合的な治水対策の一環として、浸透型施設等の設置による流出抑制策が実施されており、将来、都市化の進行と流出現象の変化の関わりに、新たな現象の出現が予想される。少なくとも、現状の治水安全度を下まわるような現象の出現は、考えにくい。

したがって、現状の f_p を重視している流出予測モデルによる予測値は、対策上、安全側の情報（過大な推定流量）を提供することが考えられる。実用化に際しては、多少、修正すべきプログラム上の問題が残されており、解決に努めているところである。（参考文献）1）米田、和泉（1977）都市化と河川流出変化の定量的分析、都土木技研年報、2）米田、和泉（1976）下水道普及に伴う流出高の変化、都土木技研年報、3）2）に同じ、4）角屋、福島（1976）中小河川の洪水到達時間、京大防災研年報、5）4）に同じ、6）和泉（1978）都内中小河川のテレメータ化と洪水流出予測モデルの開発、第32回建設省技術研究会、7）石川、佐藤、和泉（1981）都内中小河川の都市化に伴う流出率と洪水到達時間第36回年講、8）吉野（1973）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。