

## 土地利用変化を評価する洪水流出モデルに関する研究

## A STUDY ON THE LAND-USE HYDROLOGICAL SYSTEM MODEL

橋 本 健\*・森 田 正\*\*

By Takeshi HASHIMOTO and Tadashi MORITA

## 1. ま え が き

社会経済活動が大規模化・活発化するに従い、土地利用の変化が広域的かつ急速に生ずるようになってきた。土地利用の変化が、洪水時における降雨流出機構を大幅に変化させることは、過去 10 数年間における各種の調査・研究によって解明されてきたところである。これらの知見は、近年においては河川計画にも取り入れられるようになってきている。すなわち、従来静的に扱われてきていた流域の流出機構を人間活動との関係において動的に把握するもので、この面での影響が無視し得なくなっていることによる。

本報告では、近年の水文学における基礎的研究の諸成果を応用することにより、土地利用の変化を評価する流出モデルを提案する。次いで、本モデル（準線形貯留型モデル）を実流域に適用し、適用性の検討等を行う。

## 2. 流出モデルが備えるべき要件

土地利用の変化が流出に及ぼす影響を評価するために備えるべき要件として次の 5 項目を設け、モデルを組み立てる方法をとった。

I. 斜面上の流れの非線形性が表現できること。

日本のように、強雨を計画対象としている河川流域では、特に流域斜面上の流れの非線形性は無視できない。貯留関数法、タンクモデル法、kinematic wave 法等、すべてこの条件を満足している。

II. 河道の洪水伝播機能が表現できること。

流域のスケールがある大きさを超えれば、河道は流域の流出機構の中で無視できない役割を果たすようになってくる。また、大部分の河川計画では、区間的であれ、

必ずといってよいほど河道改修計画を盛り込んでいる。

III. 土地利用形態の差異による流出の差異を表現できること。

IV. 総合化の程度が高いこと。

複数の土地利用形態の一つ一つに複数のパラメーターが取り付く。「パラメーターがいっぱい」のこのモデルでは、下手をすると、何をやっているかわからない「パラメーターいじり」に終始してしまう可能性がある。この条件は、後述するように、実証的資料の蓄積の乏しさということもあって現状ではかなり厳しいものである。しかしながら、河川計画を策定する必要がある流域中に占める無資料流域の多さなども考えあわせると、使っていきながら総合化も進められるモデル、もしくは、何らかの新しい実証データが得られたらただちにパーツの交換が可能なモデルが望ましいわけである。

さらに、計画論的に有効なモデルであるためには、次のことが重要である。

V. 当該河川流域内の他の排水計画（下水道計画・支川計画等）に使われるモデルと共通性が高い。

従来から、下水道と都市河川、また支川と本川等々の間の計画ギャップが大きな問題になっている。計画論の違いも重要な原因だが、使われているモデルの差異が大きすぎたことも否めない。特に土地利用の変化が問題になるような流域では、下水道計画等を必ず伴っており、河川を対象とした流出モデルもこれを取り込んでいく必要がある。

## 3. 土地利用変化を評価する流出モデルの提案

ここに提案するモデルは、有効降雨モデル、斜面モデル、河道モデルの三要素を主体として構成されている。

## (1) 有効降雨モデル

有効降雨モデルは、本モデルの同定過程で最も困難な

\* 正会員 建設省近畿地方建設局河川計画課

\*\* 建設省近畿地方建設局大滝ダム工事事務所

ものである。山林、市街地に比し水田、畑地、丘陵、ゴルフ場、放牧地等については、ほとんど観測が行われておらず、実証的な資料に乏しい。山林については岡本によってまとめられた全国ダム流域の「総雨量-総流出量図」が代表的な資料となっている<sup>1)</sup>。市街地については、流出試験地調査の成果<sup>2)</sup>等を通じて資料の蓄積が進んでいる。ここでは、土地利用形態ごとに、最も適すると考えられる有効降雨モデルを採用し、そのパラメーターを試算によって最適化する方法をとった。斜面モデル、河道モデルに含まれるパラメーターは、後述するように、あらかじめ物理的に固定しておくので、本モデルでは、有効降雨モデルのみが試算パラメーターをもつことになる。試算方法は文献 16) に詳しい。

(2) 斜面モデル

下水道・中小河川の排水計画においては、合理式が使用されることが圧倒的に多い。条件 V. を満たすには合理式からスタートするのが最も合理的なようである。合理式は周知のように

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

で、 $Q_p$ : ピーク流量 (m<sup>3</sup>/s),  $A$ : 流域面積 (km<sup>2</sup>),  $r_e$ : 洪水到達時間  $t_c$  内の最大平均有効降雨強度 (mm/h) である。流出の単位を  $r_e$  と同じにとり、

$$q_p = r_e \dots\dots\dots(1)'$$

とする。合理式をさらに一般化すれば

$$U(\tau) = \begin{cases} 0 & (\tau < 0, t_c \leq \tau) \\ \frac{1}{t_c} & (0 \leq \tau < t_c) \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

という単位図 (矩形単位図), または

$$q(t) = \frac{1}{t_c} \int_{t-t_c}^t r_e(\tau) d\tau \dots\dots\dots(3)$$

なる移動平均過程である。

$t_c$  が斜面について定まる定数であると仮定すれば、合理式は流れに関して線形なモデルであり、条件 I. を満足しない。一方、kinematic wave 法によれば  $t_c$  は有効降雨強度  $r_e$  などの関数で

$$t_c = \left( \frac{L r_e^{1-m}}{\alpha} \right)^{1/m} \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる<sup>3)</sup>。ここに、 $L$  は力学的斜面長、 $\alpha$ ,  $m$  は斜面上の水深  $h$  と単位幅流量  $q$  との関係

$$q = \alpha y^m \dots\dots\dots(5)$$

とした場合の定数である。層流では  $m=3$ , Manning 型の流れでは  $m=5/3$ , Chézy 型の流れでは  $m=3/2$  である。さらに Manning 型の流れでは、斜面の力学的平均勾配を  $S$ , 等価粗度を  $N$  とすれば、

$$\alpha \propto \sqrt{S}/N \dots\dots\dots(6)$$

なので

$$t_c = L^{1/m} \cdot N^{1/m} \cdot S^{-1/2m} \cdot r_e^{(1/m)-1} \dots\dots\dots(7)$$

を得る。

角屋ほかは、

$$t_c = C \cdot A^b \cdot r_e^{-c} \dots\dots\dots(8)$$

として、 $A=0.13 \sim 143.6$  km<sup>2</sup> の丘陵山林流域 18 河川について次の実験式を求めた<sup>4),5)</sup>。

$$t_c = 290 A^{0.22} \cdot r_e^{-0.35} (\text{min}) \dots\dots\dots(8)'$$

式 (8) で用いられた流域面積  $A$  は、計量地形学的に、主河道長や流域幅と従属関係にあることがわかっているので、力学的斜面長  $L$  に替わるものとみてよい。

ある単流域について任意の継続時間に関する流域平均最大有効降雨強度  $r_e(t_c)$  が与えられれば、図-1 のように、ある継続時間とその時間内の最大平均有効降雨強度との関係を示す曲線 (有効降雨強度曲線) を引くことができる。この曲線と式 (8) の交点に対応する継続時間が、その単流域からの最大流出量  $q_p$  を与える到達時間  $t_c$  である。さらに式 (2)

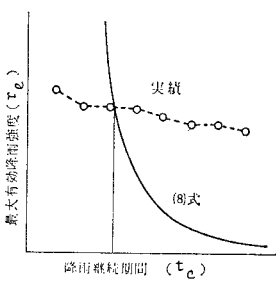


図-1  $t_c$  の決定法

によって、流出ハイドログラフを得ることもできる。しかし、この矩形単位図によって計算された流出は、 $t_c$  を経過すると流出量がゼロになるという著しい特徴をもつ。洪水の低減部に関しては、現象をよく simulate できない。そこで、ここでは比較的滑らかな流出ハイドログラフが得られるように、ここでは次の指数単位図を用いる。なお、線形流出モデル一般についても、たとえば Nash のモデルなどについても、以下の議論は同様に成り立つ。

$$U(\tau) = \begin{cases} 0 & (\tau < 0) \\ \frac{1}{K} e^{-\tau/K} & (\tau \geq 0) \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

ここに

$$K = t_c/2 \dots\dots\dots(9)'$$

式 (2) と式 (9) の 2 つの単位図を結びつける  $t_c$  から  $K$  への換算式 (9)' は、

吉野<sup>6)</sup>による 図-2 を根拠にしている。すなわち、同図において  $T_l$  は降雨流出のピーク遅れ時間であるが、多数の流域について同定された  $K$  におおむね等しい。またピーク遅れ時間は概念的に洪水到達時間の 1/2 で

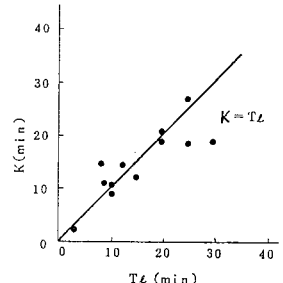
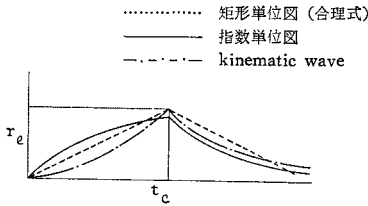


図-2  $T_l$ - $K$  の相関 ( $T_l = t_c/2$ )



図—3 流出波形の比較

あることから式 (9)' を得た。

式 (9) の単位図は線形貯留型モデル (線形貯水池) ともよばれる。ここでは 図—1 の関係を用いて  $t_c$  (すなわち  $K$ ) を求め、これを洪水期間中一定として扱うものとする。 $t_c$  が与えられたときの、矩形単位図、指数単位図、および kinematic wave による流出の比較を 図—3 にあげる。

式 (8) により有効降雨強度の影響が取り入れられて非線形的な効果が表現できるが、最終的には式 (9) によるので、このようなモデルを「準線形貯留型モデル」とよぶことにする。

この斜面モデルでは、ある土地利用形態に固有な斜面上の流れは、式 (8) の  $C$  によって集約的に表現される。 $C$  に影響を与える因子は、式 (7) にみられるように、等価粗度  $N$  と斜面勾配  $S$  である。このうち、 $S$  は地形図等から容易に求め得る。また、 $N$  については、最近になって、ようやく等価粗度法による流出解析例が充実してきたこともあって、表—1 のような標準値が得られている<sup>7)~11)</sup>。

(3) 河道モデル

河道の流出モデルとして現在採用可能であると考えられるものを表—2 にあげる。同表で下になるほど計算等に手間がかかるだろう。河川改修が洪水流出に及ぼす影響については文献調査が行われている<sup>12)</sup>。河道の洪水伝播機能は、大別して、① 輸送速度と ② てい減効果で特性付けられる。大陸系の河川では、何十 km という区間

表—1 土地利用形態と等価粗度  $N$  の標準値<sup>7)~11)</sup>

土地利用形態		等価粗度 $N$ の標準値
水	田	2
山	林	0.7
丘陵, 放牧地, 公園, ゴルフ場, 畑地		0.3
市街	地	0.03
市街化度による細分	区画割, 道路整備ができるが, 相当裸地面積が残る。排水路整備済。(1°)	0.1
	道路舗装がかなり進む。下水路整備不十分。(2°)	0.05
	舗装されるべき面積の 50% 以上が舗装され, 下水路整備もほぼ十分。(3°)	0.01
	舗装されるべき面積の舗装。下水路整備完了。(4°)	0.005

表—2 河道の流出モデル

線形	単位図	線形水路
		線形貯水池 (Muskingum 法 etc.) 統計的単位図 etc.
非線形	単位図	タンクモデル
		貯留関数
		不等流
		kinematic channel 不定流 etc.

を洪水波が流下する例がまれではない。このような場合は、②のてい減効果が顕著であり、線形貯水池 (Muskingum 法, convex 法等), 貯留関数, natural reservoir のようなモデルが適している。一方、日本の大部分の河川では、短い区間ごとに次々と支川が合流するので、むしろ①の輸送速度で規定される「合流時差」が第一義的な重要性を帯びてくる。さらに、場合によっては、河道はらん効果や改修によるはらんの減少効果が無視できない河川も多い。

古典的な Muskingum 法や現在広く行われている貯留関数法などでは、貯留係数  $K$  や遅滞時間  $T_1$  のようなブラックボックス・パラメーターを含んでおり、条件 IV に照らしてみると若干問題があるといえる。そこで、本モデルでは kinematic channel を採用した。kinematic channel は、河道の河積  $A$  と流量  $Q$  の関係が

$$Q = f(A) \dots\dots\dots (10)$$

で表わされるとき、kinematic wave の速度  $c$  を  $Q = \text{const.}$  上において

$$c = \frac{dQ}{dA} \dots\dots\dots (11)$$

で表わすものである。

4. 実流域への適用

(1) 多摩川 (モデル作成の経緯)<sup>13)</sup>

モデルの適用例として、まず多摩川 (石原地点,  $A = 1040 \text{ km}^2$ ) における昭和 49 年 9 月 1 日出水を取り上げた。流域分割は、各種土地利用形態の上下流分布による差異も評価できるように 図—4 に示すごとく 19 流域とした。降雨は分割された小流域ごとに算出した (以下 (2), (3) についても同じ)。各流域の土地利用形態も記入してある。単流域の中に複数の土地利用形態がある場合には、流出計算を各土地利用ごとに独立に実施して、面積率で加重平均を行った。山林流域については、岡本の関東東地域の調査結果をもとにまとめられた資料<sup>15)</sup> から第一近似値を  $f_1 = 0.5$ ,  $R_{sa} = 150 \text{ mm}$  としたが、試算の結果修正は不要であった。ここに  $f_1$  は一次流出率,  $R_{sa}$  は飽和雨量である。また、丘陵、市街地等においては  $f_1 = 0.7$ ,  $R_{sa} = \infty$  とした。まず、斜面モデルでは矩形

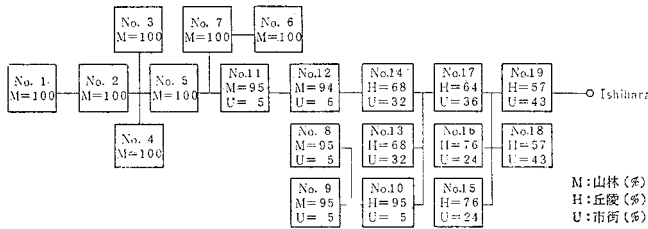


図-4 流域分割と土地利用形態の分布

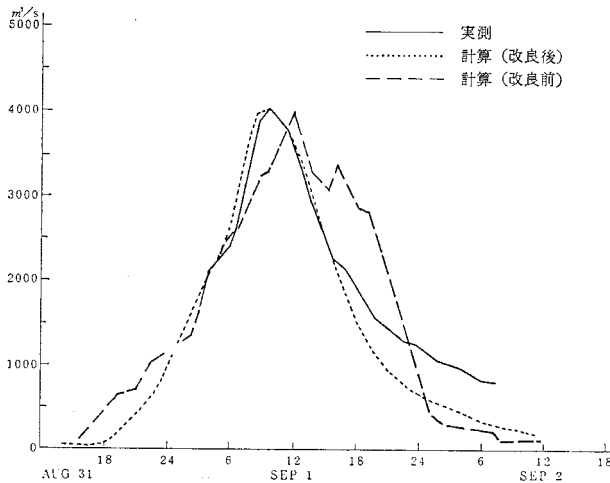


図-5 昭和49年9月洪水

単位図, 河道においては最も簡単な線形水路を採用してみた。線形水路はよく知られているように

$$O(t) = I(t - T_l) \quad (12)$$

で流入  $I(t)$  を流出  $O(t)$  に変換するもので、 $T_l$  は線形水路の輸送時間とよばれる。 $T_l$  をどのように評価するかが問題であるが、ここでは簡単に

$$T_l \propto l/V \quad \text{かつ} \quad V = k\sqrt{S} \quad (13)$$

とした。 $l$  は河道長、 $V$  は洪水波の速さ、 $S$  は河床勾配である。実際の計算にあたっては、 $k$  を試算パラメーターとした。計算結果を図-5に示す。斜面に矩形単位図を用いたため、各部分流域からの流出は、降雨の終了後急速に減少する。そのため、下流端の波形に、①細かい凹凸が現われ、②流出のてい減が急勾配である、といった特徴がある。

次いで、斜面モデルを前述の準線形貯留型モデルに、また、河道モデルを広矩形断面の kinematic channel に変更した。有効降雨はそのままにした。結果を図-5に示す。波形の凹凸は解消したが、てい減の急速さはそれほど改良されていない。特にピーク以後の流出ボリュームの適合度に問題が残るが、有効降雨モデルの

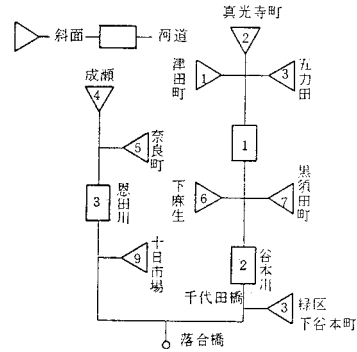


図-6 流域の分割図

変更はあえて行わなかった。

### (2) 鶴見川

対象地点は、上流部落合橋 ( $A=109 \text{ km}^2$ ) である。この流域はいわゆる多摩丘陵地帯で、地質的には関東ロームが上部土壌層となっている。近年、首都圏のスプロール化現象を受け、都市化が進行しつつある。流域分割を図-6に示す。土地利用面積率は昭和33年で水田5.6、畑地25.3、山地61.1、市街地8.0、昭和41年で水田5.0、畑地18.5、山地52.4、市街地24.1、昭和50年では水田4.9、畑地13.3、山地38.9、市街地42.9(単位は%)である。最近の顕著な出水である昭和51年9月8日の出水を用いた。斜面は準線形貯留型モデルである。河道は井田法により、実測横断面から  $H-Q$ ,  $H-A$  を作成し、さらに  $Q-dQ/dA$  関係を求めた。試算結果を図-7に示す。同図には  $f_1$ ,  $R_{sa}$ ,  $f_{sa}$  の試算結果を示す。ここに  $f_{sa}$  は飽和流出率である。

次に過去に遡って、土地利用の変化が流出にどのような変化をもたらしたかを検討してみる。有効降雨パラメ

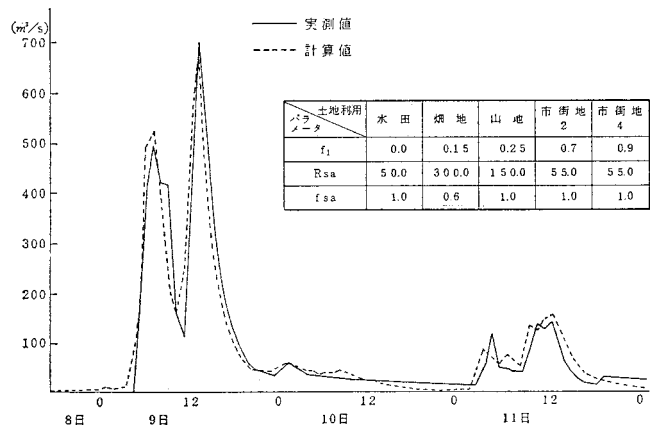


図-7 昭和51年9月8日出水

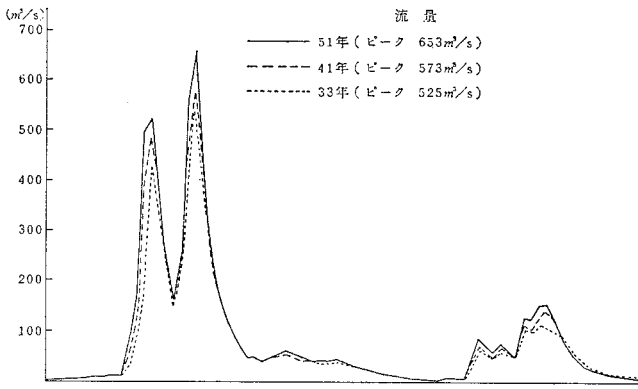


図-8 土地利用の変化による流出変化

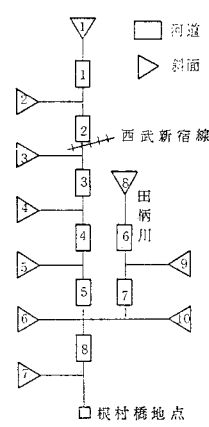


図-9 ブロック構成図

ーターは動かさない。結果を 図-8 に示す。

(3) 石神井川<sup>(4)</sup>

石神井川は荒川水系隅田川の右支川で、武蔵野ローム、立川ロームで被覆された台地を主体とした流域(根村橋地点、 $A=62 \text{ km}^2$ )である。流域分割を 図-9 に示す。土地利用面積率は昭和 33 年で畑地 80.46、市街地 19.54、昭和 41 年で畑地 50.47、市街地 49.53、昭和 50 年では畑地 41.28、市街地 58.72 (単位は%) である。

この流域の流出機構を変化させてきた要素としては以下にあげる 3 つが考えられる。まず、① 戦後、特に昭和 30 年代から急激に都市化が進行し、前述のように畑地(若干の水田、雑草地を含む)が大幅に市街地に変換されていった。また、② 昭和 40 年代中頃からは、河道改修がスタートした。現在、西武新宿線から下流部は、いわゆる 30 mm/h 暫定の改修がなされており、さらに

根村橋上流約 500 m 地点から隅田川合流点までの区間は 500 mm/h の改修が完了している。最後に、③ 下水道の整備があげられる。現在、田柄川筋の練馬幹線が完成して 30 mm/h までの流出は流域外に排除されている。また、将来は北多摩 1 号幹線流域下水道により最上流端の雨水が流域外排水となる予定である。

試算に使用した出水は、昭和 33 年 9 月 26 日、昭和 41 年 6 月 28 日のものを用いた。有効降雨モデルでは、市街地、畑地ともに「一次流出率( $f_1$ )-飽和雨量( $R_{sa}$ )-飽和流出率( $f_{sa}$ )モデル」を採用した。河道については 図-10 に示すような断面で、河道部とはならん部を別

別に追跡計算を行い各河道ブロックの出口で合成する手法をとった。試算結果および使用した有効降雨パラメーターを 図-11、表-3 に示す。有効降雨パラメーターのみを試算で求めたが、その値は昭和 33 年、41 年の両出水で共通である。

表-3 有効降雨パラメーター

	$f_1$	$R_{sa}$	$f_{sa}$
畑地	0.15	300.0	0.6
市街地	0.6	$\infty$	—

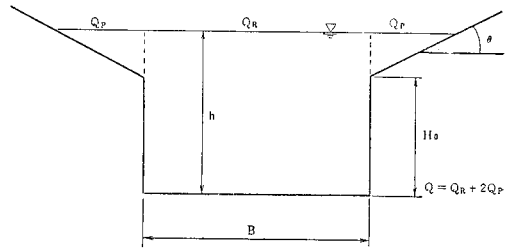
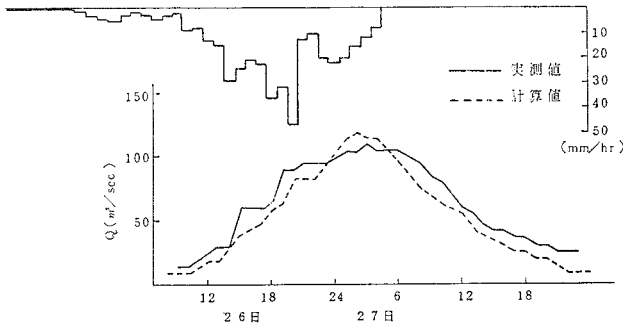


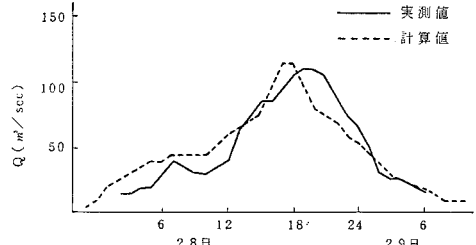
図-10 河道横断モデル

次に調整の済んだモデルを用いて、前述した 3 つの要素について流出の変化を予測してみる。入力としては昭和 33 年の狩野川台風による降雨を用い、表-4(a),(b),(c) の検討を行った。結果をそれぞれ 図-12(a),(b),(c) に示す。

以上の図より、① 昭和 33 年~41 年の約 10 年間に土地利用が大きく変化した影響を受け、この期間に特に顕著に流出ボリュームとピーク



(a) 昭和 33 年 9 月 26 日出水



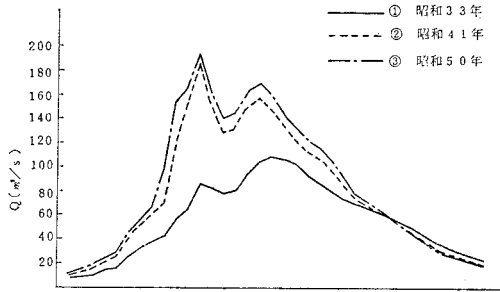
(b) 昭和 41 年 6 月 28 日出水

図-11

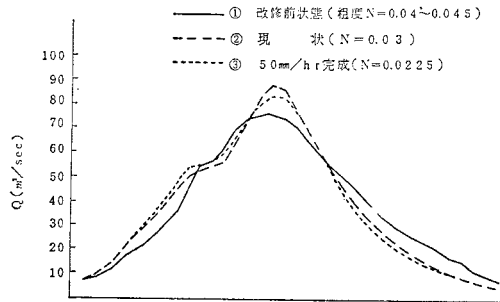
表-4 検討内容

検討内容	モデルへの影響	(a) 土地利用の変化による流出の変化	(b) 河道改修による流出の変化	(c) 下水道の整備による流出の変化
土地利用状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>式(7)のKの変化</li> <li>有効降雨の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 昭和33年</li> <li>② 昭和41年</li> <li>③ 昭和51年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 昭和33年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 昭和50年</li> </ul>
河道改修状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 改修前の状態</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 改修前の状態</li> <li>② 現状</li> <li>③ 50mm/h完了</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現状</li> </ul>
下水道整備状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>流域面積の変化(幹線)</li> <li>Kの変化(その他)</li> </ul>	なし	なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>① なし</li> <li>② 練馬幹線</li> <li>③ ②+多摩1号幹線</li> <li>④ ③+その他の下水道</li> </ul>

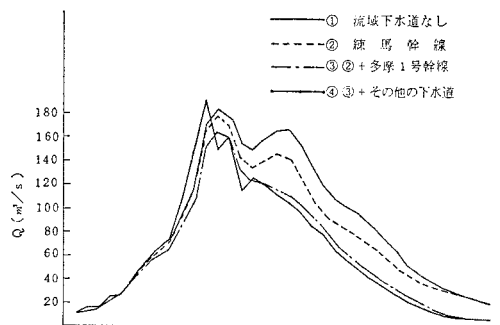
によって田柄川流域(ブロック No. 8, 9)がなくなり、さらに多摩1号幹線により上流域(ブロック No. 1)がなくなるにつれてピークの減少をみるが、さらに将来、残された流域の全体にわたって下水道が整備されると、再びピークの増加および前進がみられる、などがいえる。



(a) 土地利用の変化による流出の変化



(b) 田柄川合流前(河道ブロック No. 5 の出口地点)における河道改修による流出の変化



(c) 下水道の整備による流出の変化

図-12

の増加が起こった。②河道改修によって、図中②の段階では、拡幅による河道貯留の増加が、③で粗度の減少による減少がみられる。③下水道の整備では、練馬幹線

### 5. あとがき

多摩川、鶴見川、石神井川と3つの流域に対して、この準線形貯留型モデルの適用を試みた。本モデルでは、できる限り物理的要素を取り込んで斜面、河道の両者について、いわゆる「試算パラメーター」を少なくすることをねらった。斜面、河道ともに流れの機構の解明が比較的進んでいる現在、降雨の損失機構が再び重要な課題として登場してきつつある。この問題は、流出試験地調査等による息の長い努力を必要とすることはいうまでもない。

本報をまとめるにあたっては、土木研究所水文研究室の石崎室長および京都大学防災研究所の角屋教授に多くの示唆をいただいた。また関東地方建設局・京浜工事事務所、東京都建設局河川部計画課には、貴重な資料を提供していただいた。記して謝する次第である。

### 参考文献

- 岡本芳美：山地河川の洪水流出高について，第18回水講，1974。
- 河川局・土研：流出試験地調査成果報告書，1975。
- Eagleson：Dynamic Hydrology，1970。
- 角屋・福島：洪水到達時間と実用推定式，土木学会第30回年講，1975。
- 角屋・福島：洪水到達時間推定式について，土木学会第31回年講，1976。
- Yosino：Runoff Characteristics of Small Urbanized Areas, IAHS Tokyo Symposium, 1975。
- 角屋：都市化と流出，水工研修，1974。
- 角屋・岡・豊国・福島：横大路低平地の内水の現状，防災研年報，No. 14, 1971。
- 角屋・豊国・大橋：入江干拓地区の内水問題，防災研年報，No. 7, 1964。
- 角屋・岡・早瀬・水山・宮崎：丘陵地の宅地開発に伴う流出変化の予測(2)，第9回災害シンポジウム，1972。
- 岩手工事事務所：北上川系流出解析報告書，1974。
- 建設省：河川改修が洪水流出に及ぼす影響に関する調査，土研昭和50年度河川事業調査報告書，1976。
- 長谷川：都市化による流出機構の変化，土研研究発表会資料，1976。
- 宮田 正：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, 1969。
- 土木研究所：巴川流量検討報告書，土木研究所資料，No. 988, 1975。
- 建設省水文研究会：流出計算例題集(2)，1971。

(1981.7.20・受付)