

都市化流域の洪水流出モデル

A RAINFALL-RUNOFF SIMULATION MODEL FOR ASSESSING
THE EFFECTS OF URBANIZATION ON FLOOD RUNOFF

鮎川 登*・北川 善廣**

By Noboru SUKAGAWA and Yoshihiro KITAGAWA

1. ま え が き

昭和 30 年代後半以降の経済の高度成長に伴う人口の都市集中により都市の周辺では急激に宅地開発が進められた。そのため流域の保水機能が低下し、雨水がすみやかに河川に流出するようになり、洪水流量が増大し、水害問題が発生している。このような流域の宅地開発による水害問題に対処するためには、宅地開発に伴う洪水流出の変化を推定することが必要である。

流域の土地利用の変化を考慮する流出解析には kinematic wave 法が適用されることが多いが、橋本・長谷川¹⁾は 1 段の線形貯水池モデルを用いた簡明な解析法を提案している。橋本・長谷川の解析法では、角屋ら²⁾の洪水到達時間の算定式を用いて線形貯水池モデルの貯留係数 K の値を求め、流域斜面からの流出量を計算している。しかし、この方法によると、一洪水には一つの洪水到達時間、すなわち、一つの K の値が対応し、流出計算は線形的に行われることになり、各単位時間降雨の降雨強度に対する非線形性は考慮されないことになる。著者はこの点を改良するために、各単位時間降雨ごとに kinematic wave 理論により洪水到達時間（流域斜面の雨水流の伝播時間）を求め、それから各単位時間降雨に対する貯留係数 K の値を算定し、すなわち、単位時間降雨の降雨強度に応じて K の値を変えて各単位時間降雨ごとに流出計算を行い、それぞれの計算結果を降雨時刻に応じて時刻をずらしながら重ね合わせることによって流出量を求める方法を提案し、この流出計算法について検討してきた^{3)~5)}。

本論文では、まず、洪水流出に及ぼす流域の都市化の影響について考察し、次に、流域の都市化に伴う洪水流出の変化を予測するための流出モデルを提案し、雨量と

流量の観測値に基づいてパラメーターの同定と流出モデルの検証を行い、最後に、流域の都市化に伴う洪水流出の変化を算定する計算例を示した。

2. 洪水流出に及ぼす都市化の影響

流域が自然の状態である場合には、降雨は樹木の葉に遮断されたり、地面に達した雨水は凹地に溜まったり、地中へ浸透したりして徐々に河川へ流出するが、宅地開発が行われ、家が建ち、道路が舗装され、排水施設が整備されると、屋根や道路などに降った雨はただちに排水溝や下水管に排水され、すみやかに河川に流出するようになり、洪水のピーク流量が増大する。流域の都市化によりどの程度洪水のピーク流量が増大するかが問題であり、このことを明らかにするためには、一つの流域で開発前と開発後において降雨と流出の観測を行い、それらの観測資料に基づいて開発前後の降雨と流出の関係を比較検討すればよいと考えられる。しかし、そのような観測資料を入手することができなかったので、ここでは、山地流域、丘陵地流域および都市流域における降雨と流出の観測資料を用い、自然流域（山地流域と丘陵地流域）と都市流域における流出の違いについて比較検討し、洪水流出に及ぼす都市化の影響を推定する。

(1) ピーク流出高

山地流域（多摩川⁶⁾、裏筑波試験地⁷⁾）、丘陵地流域（大栗川⁸⁾、香流川⁹⁾）および都市流域（谷端川¹⁰⁾、桃園川¹¹⁾）の雨量と流量の観測資料を用いてピーク流出高（＝ピーク流量÷流域面積）と洪水到達時間内の雨量の関係を示すと、図—1 のようになる。ここで、洪水到達時間は後掲の図—5 の関係から推定して雨量と流量のピーク発生時刻の時間差（遅れ時間）の 2 倍として算出した。図—1 によると、山地流域、丘陵地流域、都市流域の順にピーク流出高が大きくなることがわかり、流域が都市化す

* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 工修 国士館大学講師 工学部土木工学科

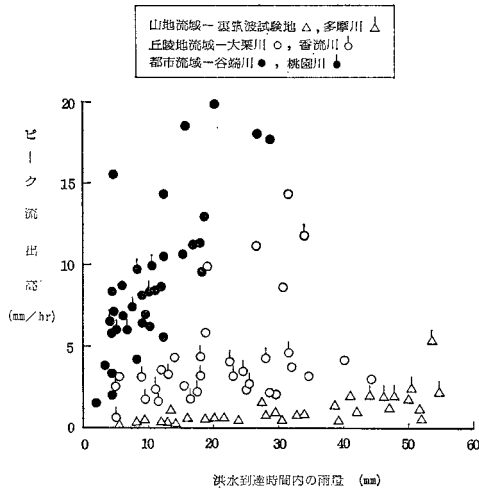


図-1 ピーク流出高と洪水到達時間内の雨量の関係

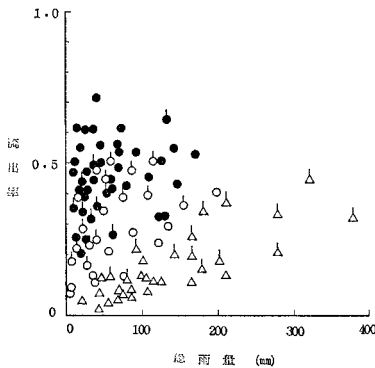


図-2 流出率と総雨量の関係 (記号は 図-1 と同じ)

るとピーク流量が増大することが推定される。

図-1 に示されるような自然流域と都市流域のピーク流出高の違いの原因としては自然流域と都市流域における流出率と洪水到達時間の違いが考えられる。

(2) 流出率

図-1 にプロットしたのと同じ河川の観測資料を用いて流出率と総雨量の関係を示すと、図-2 のようになる。図-2 によると、流出率の値はばらついているが、全体的な傾向としては山地流域、丘陵地流域、都市流域の順に大きくなること、および山地流域と丘陵地流域では総雨量が増加すると流出率は大きくなるが、都市流域では流出率は総雨量によってあまり変化しないことがわかる。流出率の値がばらつくのは雨量と流量の観測誤差、直接流出量の算定誤差のほかに、流出率には地形、地質、降雨分布、前期雨量などが影響するためであると考えられる。

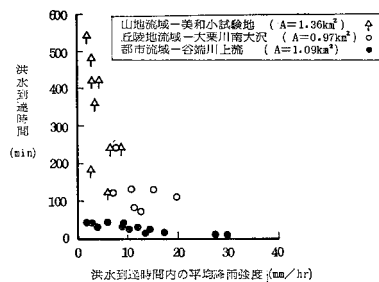
青木ら¹¹⁾は建設省の流出試験地の観測資料に基づい

て、流出率の値は非常にばらつくこと、流域を地質により浸透流域と非浸透流域とに分類してみると、浸透流域では都市流域の方が自然流域よりも流出率が大きい傾向が認められるが、非浸透流域では都市流域と自然流域の流出率には差が認められないこと、および浸透流域と非浸透流域との差の方が自然流域と都市流域の差よりも大きいことを指摘している。

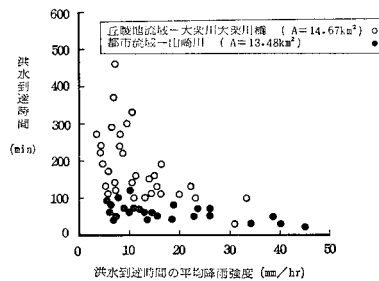
山口ら¹²⁾は都市流域の流出率は不浸透面積率にほぼ等しいことを示している。これは宅地造成によって地面が平坦に整地されるために、都市流域では庭、運動場などの浸透域に降った雨はほとんど流出せず、屋根、舗装道路など不浸透域に降った雨だけが流出するためであると考えられる。石崎ら¹³⁾が建設省の流出試験地の観測資料を整理した結果によると、丘陵地流域の流出率は浸透流域の場合は0.1~0.4、非浸透流域の場合は0.25~0.7である。都市流域の不浸透面積率は0.4~0.6程度のことが多いので、浸透流域の場合は都市化により流出率はかなり大きくなるが、非浸透流域の場合には流出率はあまり変化しないものと考えられる。なお、図-2 にプロットした流域のうち裏筑波試験地と大栗川は浸透流域、多摩川と香流川は非浸透流域、谷端川と桃園川は市街化率100%の都市流域である。

(3) 洪水到達時間

洪水到達時間は流域の面積、形状、地形、地質、土地利用状態や降雨強度などと関係するものと考えられる。流域の土地利用状態が洪水到達時間に及ぼす影響を検討



(a) 山地流域、丘陵地流域、都市流域の比較



(b) 丘陵地流域、都市流域の比較

図-3 洪水到達時間と洪水到達時間内の平均降雨強度の関係

するために、流域面積がほぼ等しい山地流域、丘陵地流域および都市流域について洪水到達時間と洪水到達時間内の降雨強度の関係を示すと、図-3 のようになる。流域勾配は山地流域、丘陵地流域、都市流域の順に小さくなるにもかかわらず、洪水到達時間は山地流域、丘陵地流域、都市流域の順に短くなるのが認められ、流域が都市化すると、洪水到達時間が短くなるのが推定される。図-3 において洪水到達時間は降雨と流出のピーク発生時刻の時間差（遅れ時間）の2倍として算出した。

3. 流出モデル

流域の都市化による洪水流出の変化としては洪水到達時間の減少が重要であり、都市化による洪水流出の変化

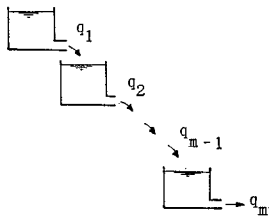


図-4 線形貯水池モデル

を予測するためには、洪水到達時間の変化の影響を考慮し得る流出モデルを用いることが必要である。そのような流出モデルとしては Nash¹⁴⁾ の線形貯水池モデルがある（図-4）。 m 段の線形貯水池モデルの瞬間単位図は次式で与えられる。

$$u(t) = \frac{1}{K\Gamma(m)} \left(\frac{t}{K}\right)^{m-1} \exp\left(-\frac{t}{K}\right) \dots\dots(1)$$

ここで、 m は線形貯水池の数、 $u(t)$ は瞬間単位図、 $\Gamma(m)$ はガンマ関数、 K は貯留係数で、 $K=M/m$ 、 M は降雨ハイトグラフの重心と流出ハイドログラフの重心の時間差である。降雨と流出の関係を模式的に示すと、図-5 のようになると考えられるので、 M と洪水到達時間（雨水流の伝播時間） t_c の間には $M=t_c/2$ の関係があることが想定される。この関係を用いると、

$$K=t_c/2m \dots\dots\dots(2)$$

となる。

洪水到達時間（雨水流の伝播時間） t_c は kinematic

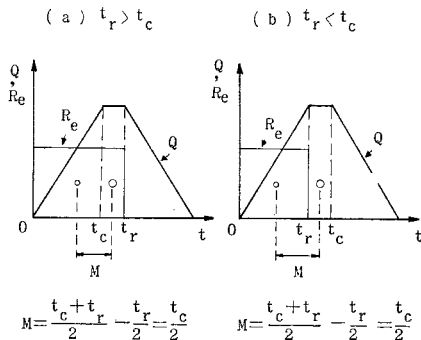


図-5 M と t_c の関係

wave 理論によると次式で算定される¹⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} t_r \geq t_c : t_c &= (L/\alpha R_e^{2/3})^{3/5} \\ t_r < t_c : t_c &= t_r + \frac{3}{5\alpha} (L - \alpha R_e^{2/3} t_r^{5/3}) / (R_e t_r)^{2/3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 t_r は降雨継続時間、 L は流域斜面長、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta}/N$ 、 θ は流域斜面の傾斜角、 N は流域斜面の等価粗度、 R_e は有効雨量である。

有効雨量 R_e は貯留関数法¹⁶⁾における有効雨量の算定法を参考にして次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \Sigma R \leq R_c : R_e &= f_1 R \\ \Sigma R > R_c : R_e &= f_2 R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 R は単位時間内の雨量、 ΣR は累加雨量、 f_1 は一次流出率、 f_2 は二次流出率、 R_c は流出率が f_1 から f_2 に変化するときの雨量である（ R_c は貯留関数法の飽和雨量 R_{sa} に相当するが、ここでは、 $f_2=1$ とせず、試算により f_2 の値（ $f_1 < f_2 \leq 1$ ）を決めるようにしたために、 R_{sa} とは別の記号を用いた）。

本流出モデルにはパラメーターとして線形貯水池の個数 m 、洪水到達時間（雨水流の伝播時間）を算定するための流域斜面の等価粗度 N 、および有効雨量を算定するための f_1 、 f_2 、 R_c が含まれているが、これらの値は本流出モデルを適用して流出計算を行い、流量ハイドログラフの計算値と観測値が一致するように試算によって決定する。線形貯水池の個数 m については、 $m=1 \sim 4$ の範囲では計算結果にあまり差がなかったの、 $m=2$ とすることにした（ $m=2$ の場合の単位図は佐藤・吉川・木村¹⁷⁾の流出関数と同じになる）。流域斜面の等価粗度 N は洪水到達時間（雨水流の伝播時間）に関するパラメーターであり、山地流域、丘陵地流域および都市流域における洪水到達時間の差異を示すために、それぞれに特有の値として決定されることが望まれる。有効雨量を算定するためのパラメーターである f_1 、 f_2 および R_c は、前節で示したように流出率の山地流域、丘陵地流域、都市流域による差は判然とせず、地質の影響を強く受けるので、各河川流域ごとに決定せざるを得ないものと考えられる。

$m=2$ （2段の線形貯水池モデル）の場合には継続時間 t_r の一定強度の有効雨量 R_e による流域斜面からの流出量 $Q(t)$ は次のように計算する。

$$Q(t) = \int_0^t u(t-\tau) \cdot R_e(\tau) d\tau \dots\dots\dots(5)$$

式(1)において $K=t_c/2m=t_c/4$ とした式を式(5)に代入し、積分すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} t \leq t_r : Q(t) &= R_e \left[\exp\left(\frac{4t}{t_c}\right) - \frac{4t}{t_c} - 1 \right] \exp\left(-\frac{4t}{t_c}\right) \\ t > t_r : Q(t) &= R_e \left[\left\{ \exp\left(\frac{4t_r}{t_c}\right) - 1 \right\} \left(\frac{4t}{t_c} + 1\right) \right] \end{aligned} \right\}$$

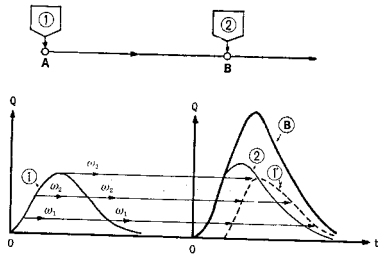


図-6 流出計算の手順の説明図

$$\left[-\frac{4t_r}{t_c} \exp\left(\frac{4t_r}{t_c}\right) \right] \exp\left(-\frac{4t}{t_c}\right) \dots\dots\dots(6)$$

任意の降雨ハイトグラフによる流量ハイドログラフは各单位時間ごとの有効雨量について式(3)により t_c を求め、式(6)により流量ハイドログラフを計算し、単位図法のハイドログラフの合成法と同様にそれらのハイドログラフを降雨時刻に応じて時刻をずらしながら重ね合わせるによって求める。

流出計算は次のような手順で行う。流域を尾根線や河道によって斜面勾配が単一の傾斜角で代表させられるような小流域に分割し、式(6)を用いて各小流域からの河道への流出量を計算する。そして、図-6に示すように、最上流の小流域からの流出量ハイドログラフ①を一つ下流の小流域からの河道への流出点Bまでの河道区間を洪水の伝播速度 ω に応じて伝播させ(図-6のハイドログラフ①), その流出点への流出量ハイドログラフ②と重ね合わせ、流出点Bにおける流量ハイドログラフ⑤を求める。以下、順次この計算を繰り返し、各小流域からの流出量を合流させていき、所定の地点における流出量を算定する。なお、洪水の伝播速度は Manning の式を用い、kinematic wave 理論により求める。

4. パラメーターの同定

前節で提示した流出モデルを適用して山地流域、丘陵地流域および都市流域の流出解析を行い、計算値と観測値を比較し、パラメーターの同定を行う。

本流出モデルにより流出計算を行うためには、流域斜面の等価粗度 N と有効雨量の算定のためのパラメーター f_1, f_2, R_c , および河道の Manning の粗度係数 n の値を決定することが必要である。ここでは、これらのパラメーターの値を適当に仮定して流量ハイドログラフを計算し、計算値と観測値が一致するようにパラメーターの値を決定する(ハイドログラフの形状は N の値を変えることにより合わせ、ピーク流量は f_1, f_2 および R_c の値を変えることにより合わせる)。なお、河道の Manning の粗度係数 n の値は河道の状況から推定する。流出率は同一の河川でも洪水ごとにかなり異なり、計算値と

観測値を一致させるためには流出率の値を洪水ごとに換える必要があるが⁵⁾、本研究は流域が都市化した場合の洪水流量を予測することを目的としているので、パラメーターの値は河川ごとに一定とし、各洪水について流出計算を行い、計算値と観測値が各洪水全体としてよく合うときの値としてパラメーターの値を決定する。

(1) 山地流域

小河内ダムより上流の多摩川(流域面積 263 km², 流路延長 24 km, 流域斜面勾配 1/1.2~1/2)を対象として、東京都水道局小河内貯水池管理事務所から提供された洪水資料について、図-7に示すように流域を16の

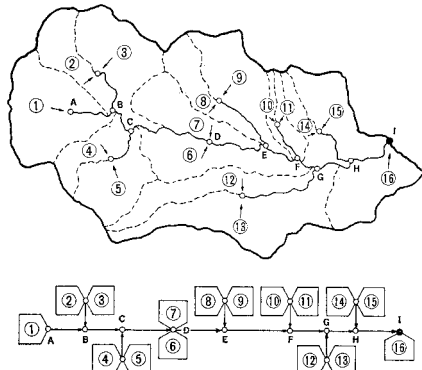
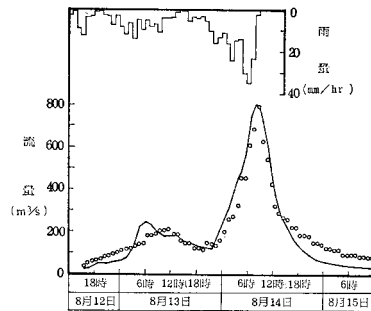
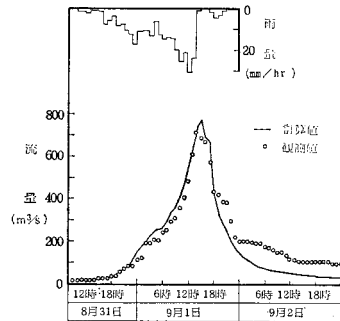


図-7 多摩川の流域分割図



(a) 昭和13年8月14日出水



(b) 昭和24年9月1日出水

図-8 多摩川の流出解析例

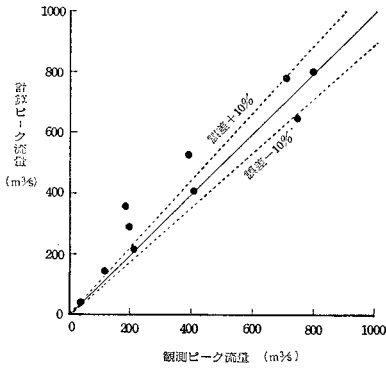


図-9 ピーク流量の計算値と観測値の比較 (多摩川)

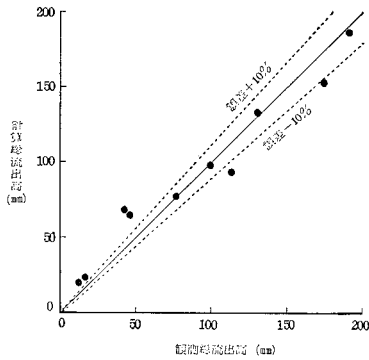


図-10 総流出高の計算値と観測値の比較 (多摩川)

小流域に分割して流出解析を行った。パラメーターの値を $N=0.7$, $f_1=0.3$, $f_2=0.5$, $R_c=100$ mm, $n=0.08$ とした場合の流量ヒドログラフの計算値と観測値の比較例を図-8に示す。また、ピーク流量および総流出高 (=総流出量÷流域面積) の計算値と観測値の比較を図-9および図-10に示す。これらの図によると、本流出モデルはほぼ妥当な結果を与えていることがわかる。なお、流域斜面の等価粗度は神流川および薬科川についても $N=0.7$ が得られている。

(2) 丘陵地流域

多摩川の支川で、多摩丘陵を流域とする大栗川について建設省土木研究所の資料⁹⁾(流量観測地点明神橋:昭和44年~46年)および東京都土木技術研究所より提供された資料(流量観測地点霞ヶ関橋:昭和52年~54年)を使用して流出解析を行った。大栗川の流域面積は明神橋上流で 24.7 km², 霞ヶ関橋上流で 27.0 km², 流路延長は明神橋上流で 12.5 km, 霞ヶ関橋上流で 13 km である。流域の地形は比高 80~100 m のなだらかな丘陵状をなし、流域斜面勾配は 1/4~1/13 である。流域の土地利用状態は昭和 42 年:山林 55.5%, 畑 11.6%, 水田 14.0%, 市街地 18.9%, 昭和 52 年:山林 45.7%,

畑 9.5%, 水田 7.2%, 市街地 37.6% である¹⁸⁾。パラメーターの値は市街地は後述する都市流域の流出解析結果を参考にして $N=0.007$, 不透透面積率が 50% であることから $f_1=0.50$, $R_c=\infty$ とした。水田と畑については面積が小さく、計算結果にはあまり影響を与えないと考えられるので、おおまかな推定から水田は $N=0.1$, $f_1=0$, $f_2=0.6$, $R_c=20$ mm, 畑は $N=0.2$, $f_1=0.3$, $R_c=\infty$ とした(水田については水田を流域とする唐俣川と岸渡川の3洪水の流出解析結果を参考にした)。山林の N , f_1 , f_2 および R_c はこれらの値を仮定し、流量ヒドログラフの計算値と観測値が合うように決定した。その結果、山林は $N=0.3$, $f_1=0.2$, $f_2=0.5$, $R_c=50$ mm となった。河道の Manning の粗度係数は本川 $n=0.025$, 支川 $n=0.035$ とした。パラメーターの値として上記の値を用い、図-11に示すように流域を 21 の小流域に分割して行った流出計算による流量ヒドログラフの計算値と観測値の比較例を図-12に示す。また、ピーク流量および総流出高の計算値と観測値の比較を図-13および図-14に示す。図-14によると、総流出

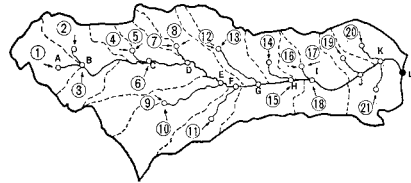
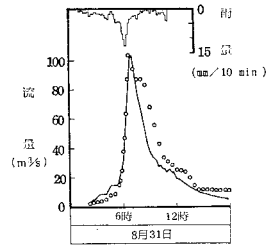
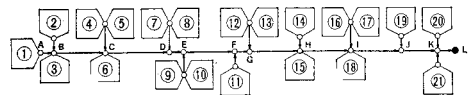
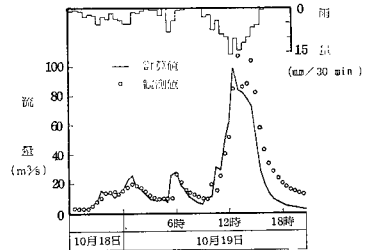


図-11 大栗川の流域分割図

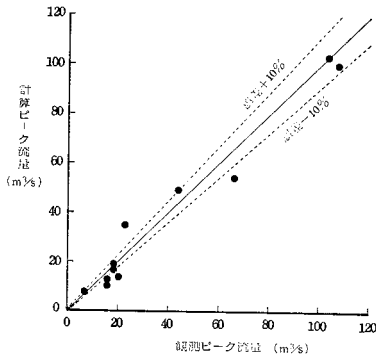


(a) 昭和46年8月31日出水

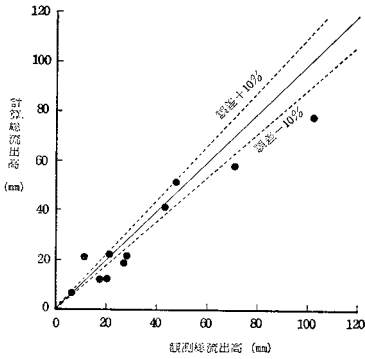


(b) 昭和54年10月19日出水

図-12 大栗川の流出解析例



図一13 ピーク流量の計算値と観測値の比較(大栗川)

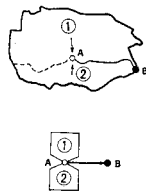


図一14 総流出高の計算値と観測値の比較(大栗川)

高の計算値は観測値よりもかなり小さくなっているが、これは本流出モデルによるとハイドログラフの減水部の計算値が観測値より急速に減少する傾向があるためである。大栗川の場合に、この傾向が顕著になるのは中間流出的な流出成分がかなり存在するためではないかと考えている。本研究では、洪水のピーク流量を合わせることを主眼としているが、総流出量も合わせるためにはより大きい N の値をもつ線形貯水池を並置するなど流出モデルを改良することが必要であろう。なお、流域斜面の等価粗度は香流川についても $N=0.3$ が得られている。

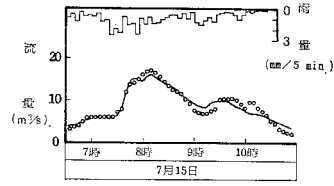
(3) 都市流域

東京都板橋区の住宅地を流域とする谷端川について建設省土木研究所の資料¹⁰⁾を使用して流出解析を行った。谷端川の流域面積は 5.42 km^2 、流路延長は 3.4 km 、流域斜面勾配は $1/69$ である。流域の市街化率は 100% 、不浸透面積率は 53.1% で、下水道が整備されている。パラメータの値を $N=0.007$ 、不浸透面積率が 53.1% であるので、 $f_1=0.55$ 、 $R_c=\infty$ とし、また、 $n=0.03$ とし、図

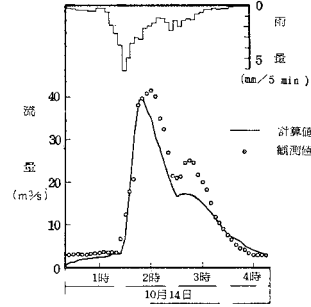


図一15 谷端川の流域分割図

一15 に示すように流域を2つの小流域に分割して流出計算を行った場合の流量ハイドログラフの計算値と観測値の比較例を図一16 に示す。また、ピーク流量および

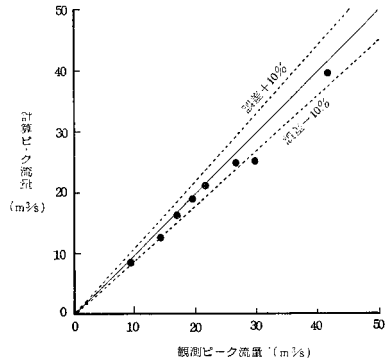


(a) 昭和47年7月15日出水

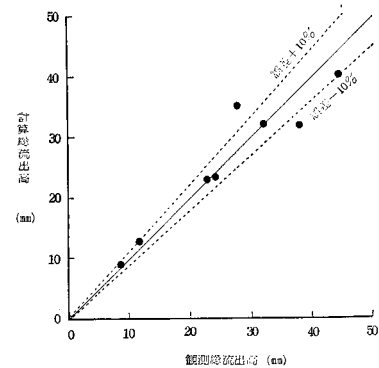


(b) 昭和48年10月14日出水

図一16 谷端川の流出解析例



図一17 ピーク流量の計算値と観測値の比較(谷端川)



図一18 総流出高の計算値と観測値の比較(谷端川)

総流出高の計算値と観測値の比較を 図-17 および 図-18 に示す。これらの図によると、本流出モデルはほぼ妥当な結果を与えていることがわかる。なお、桃園川および山崎川の場合についても流域斜面の等価粗度は $N=0.007$ 、 f_1 は不浸透面積率にほぼ等しくとり、 $R_c=\infty$ とすることによりほぼ妥当な結果が得られている。

5. 流出モデルの検証

昭和 40 年以降流域の宅地化が急激に進行し、現在流域が複合的な土地利用状態を呈している鶴見川の流出解析を行い、流出モデルの妥当性を検証する。

鶴見川は標高 80~170 m の丘陵部を分水界とする丘陵地河川であり、流量観測地点末吉橋より上流の流域面積は 225 km²、流路延長は 28.4 km、流域の斜面勾配は 1/5~1/23 である。鶴見川流域の土地利用状態は昭和 46 年：山林 37.8%、畑 11.8%、水田 8.2%、市街地 42.2%、昭和 50 年：山林 32.2%、畑 11.0%、水田 6.5%、市街地 50.3% である¹⁹⁾。鶴見川は大栗川と流域を接し、地形および地質が類似しているため、パラメーターの値は大栗川の場合と同じ値を用いることにする。すなわち、山林は $N=0.3$ 、 $f_1=0.2$ 、 $f_2=0.5$ 、 $R_c=50$ mm、畑は $N=0.2$ 、 $f_1=0.3$ 、 $R_c=\infty$ 、水田は $N=0.1$ 、 $f_1=0.0$ 、 $f_2=0.6$ 、 $R_c=20$ mm、市街地は $N=0.007$ 、 $f_1=0.5$ 、 $R_c=\infty$ とする。また、河道の Manning の粗度係数は本川 $n=0.035$ 、支川 $n=0.04$ とする。建設省京浜工事事務所から提供された昭和 46 年~54 年の資料について、図-19 に示すように流域を 27 の小流域に分割して行った流出計算の結果を 図-20 に示す。また、ピーク流量の計算値と観測値の比較を 図-21 に示す。これらの図によると、本流出モデルによりほぼ妥当な結果が得られることがわかる。

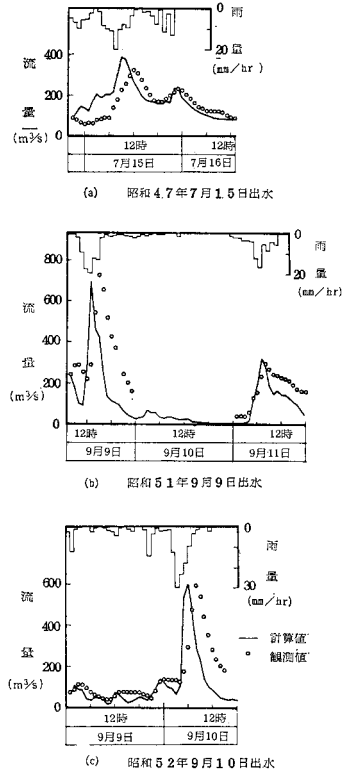


図-20 鶴見川の流出解析例

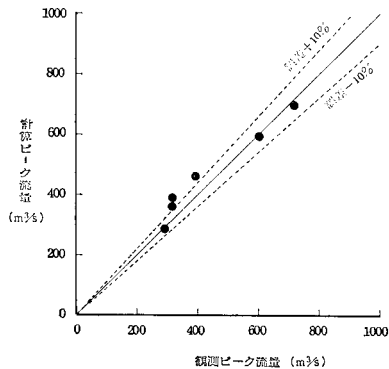


図-21 ピーク流量の計算値と観測値の比較（鶴見川）

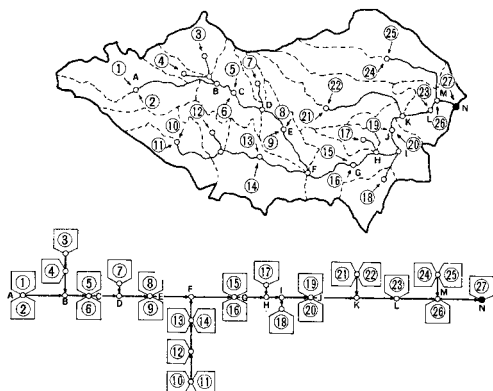
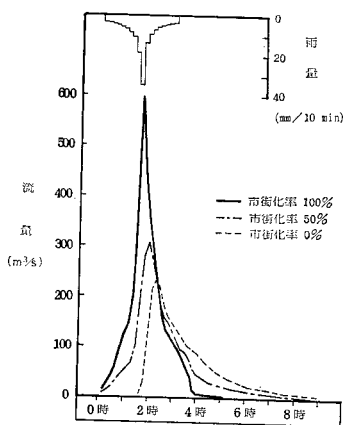


図-19 鶴見川の流域分割図

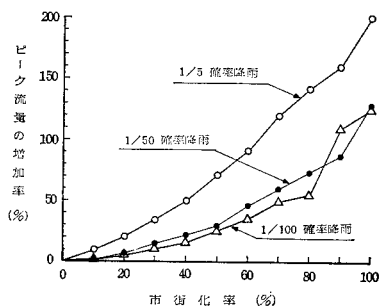
6. 流域の都市化に伴う洪水流出の変化

丘陵地河川の大栗川を例として流域が都市化することによって洪水流出がどのように変化するかを本論文で提案した流出モデルによる計算結果に基づいて考察する。

流域全体が山林の状態から平均的に一様に都市化していく場合を想定し、市街化率が 10% ずつ増大する場合について降雨強度曲線に基づいて設定した 1/2, 1/5, 1/50 および 1/100 確率の中央集中型の降雨（降雨強度は

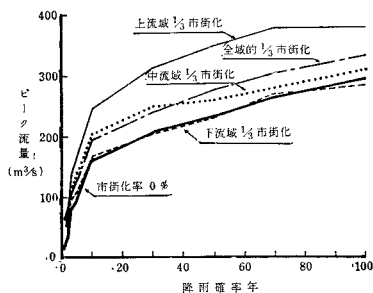


図—22 都市化による洪水流出の変化(1/50 確率降雨)



図—23 洪水ピーク流量の増加率と市街化率の関係

それぞれ 40, 60, 95 および 110 mm/h である) が流域全体に一樣に降るものとして流出計算を行った。1/50 確率降雨について市街化率が 0, 50 および 100% の場合の流量ハイドログラフの計算例を 図—22 に示す。図—22 によると、市街化率が大きくなるにつれてハイドログラフが尖鋭化し、ピーク流量が増大し、ピークの発生時刻が早くなることわかる。都市化の程度に応じてどのように洪水ピーク流量が増大していくかを示すと、図—23 のようになる。図—23 によると、市街化率が大きくなるにつれてピーク流量が増大していくが、ピーク流量の増加率は降雨強度が大きくなるにつれて小さくなる



図—24 都市化する地域の位置による洪水ピーク流量の違い

る傾向がみられる。たとえば、流域の 50% が市街化すると、自然状態(市街化率 0%) のときと比べて 1/5 確率降雨の場合は約 70%, 1/50~1/100 確率降雨の場合は約 30% ピーク流量が増加し、流域が 100% 市街化すると、1/5 確率降雨の場合は約 200%, 1/50~1/100 確率降雨の場合は約 130% ピーク流量が自然状態のときより増加することが推定される。

都市化する地域の位置の影響について考察するために流域の上流域だけ、中流域だけ、あるいは下流域だけが 100% 市街化する場合(流域全体としての市街化率は 1/3 である) および全域的に流域の 1/3 が市街化する場合を想定して流出計算を行った。その結果により各確率年の降雨に対するピーク流量を示すと、図—24 のようになる。図—24 によると、市街化の位置が下流域、中流域、上流域の順にピーク流量が大きくなること、自然状態(市街化率 0%) と比べて上流域が市街化する場合は約 1.5 倍、中流域が市街化する場合は約 1.25~1.05 倍、全域が 1/3 市街化する場合は約 1.2 倍ピーク流量が増加するが、下流域が市街化する場合はピーク流量は自然状態とほとんど変わらないことなどがわかる。

以上は中央集中型の降雨が流域全体に一樣に降った場合についての計算の結果であるが、流出状況には降雨の時間的空間的分布が関係するので、実際の流域において洪水流出に及ぼす都市化の影響を検討するためには種々の降雨分布の雨について流出計算を行うことが必要である。また、以上の計算では、これまでに得られている雨量と流出量の観測資料に基づいて決定された流出率を用いているが、1/50 確率や 1/100 確率に相当する大きい雨量の場合にも流出率がそのような値をとるのか否か問題があり、流出率、すなわち有効雨量の算定については今後さらに検討することが必要である。

7. まとめ

雨量と流量の観測資料を用いて自然流域と都市流域におけるピーク流出高、流出率および洪水到達時間の比較を行い、流域の都市化に伴い洪水到達時間が短くなり、ピーク流量が増大することを示し、都市化による洪水流出の変化を予測するためには洪水到達時間の変化を評価し得る流出モデルを用いることが必要であることを指摘した。そして、洪水到達時間(雨水流の伝播時間)をパラメータとして含む線形貯水池モデルに基づいた流出モデルを提案し、単一の土地利用形態の流域(山地流域、丘陵地流域および都市流域)の雨量と流出量の観測資料を用いてパラメータの同定を行った。次に、同定されたパラメータの値を用いて都市化流域の流出解析を行い、本流出モデルの妥当性を実証した。最後に、本

流出モデルによる計算結果に基づいてピーク流量の増加率と市街化率の関係について検討し、市街化率が大きくなるにつれてピーク流量が増大していくこと、および降雨強度の小さい方が都市化の影響が顕著に現われる傾向があることを示した。また、流域のどの地域が都市化されるかによって洪水流出が大きく変化することを示した。

謝 辞：本研究の遂行にあたり種々ご教示いただいた建設省土木研究所水文研究室 石崎勝義室長に謝意を表します。貴重な資料を提供して下さいました建設省の土木研究所、京浜工事事務所、静岡河川工事事務所、庄内川工事事務所、ならびに東京都の土木技術研究所、小河内貯水池管理事務所の関係各位に謝意を表します。流出計算および資料整理に協力していただいた早稲田大学大学院理工学研究科 北島久雄氏（現・日本鋼管）および下村哲生氏（現・間組）に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 橋本 健・長谷川正：土地利用変化を評価する流出モデル，土木技術資料，第19巻5号，pp. 11~16, 1977.
- 2) 角屋 睦・福島 晟：洪水到達時間推定式について，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 184~185, 1976.
- 3) 鮎川 登・北川善廣・下村哲生：流域の都市化による洪水流出量の変化の予測法に関する研究，第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，pp. 159~162, 1979.
- 4) 鮎川 登・下村哲生：線型貯水池モデルによる流出解析，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 17~18, 1979.
- 5) 鮎川 登・北川善廣・下村哲生：流域の土地利用形態が洪水流出におよぼす影響の算定法に関する研究，第24回水理講演会論文集，pp. 391~396, 1980.
- 6) 東京都水道局：小河内貯水池管理年報.
- 7) 建設省土木研究所：裏筑波試験地水文観測資料（昭和44年~52年），1978.
- 8) 建設省土木研究所：多摩ニュータウン試験地水文観測資料（昭和44年~46年），1972.
- 9) 建設省中部地方建設局庄内川工事事務所：庄内川流出試験地水文資料（1971~1974年），1975.
- 10) 建設省土木研究所：都内谷端川・桃園川排水区水文観測資料（昭和47年~49年），1975.
- 11) 青木佑久・石崎勝義・岸井徳雄・長谷川正：全国流出試験地調査中間報告，土木技術資料，第21巻8号，pp. 37~44, 1979.
- 12) 山口高志・益倉克成・山守 隆・綿貫克彦：市街地雨水の量的制御—下水道と雨水貯留—，土木技術資料，第21巻7号，pp. 45~50, 1979.
- 13) 石崎勝義・岸井徳雄・北川 明・深代節子・長谷川正：流出試験地調査，土木研究所年報，1979.
- 14) Nash, J.E. : The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, ISAH, Pub. 45, Vol. 3, pp. 114~121, 1957.
- 15) Eagleson, P.S. : Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, pp. 337~344, 1970.
- 16) 木村俊晃：貯留関数法（II），土木技術資料，第4巻1号，pp. 41~51, 1962.
- 17) 佐藤清一・吉川秀夫・木村俊晃：降雨から流出量を推定する一方法，土木研究所報告87号，pp. 1~16, 1954.
- 18) 東京都土木技術研究所：大栗川・乞田川流域調査報告書，1979.
- 19) 建設省関東地方建設局京浜工事事務所：鶴見川流出解析報告書，1979.

(1980.12.5・受付)