

流域の土地利用形態を考慮した洪水流出解析(2)

Flood Run-off Analysis on the Consideration of Land Use Pattern (2)

(株)日本水道コンサルタント 正員 中 川 芳 一
同 上 正員 森 野 彰 夫
同 上 正員 蔵 重 俊 夫

1. はじめに

流域の都市化などといった土地利用の変化を容認した上で治水対策を実施していく考え方のもとでは、増大する洪水災害に対処することが難しく、土地利用規制等といった流域の管理を治水対策の手段として積極的にとり入れようとする総合的な治水対策が必要となってきた。

本稿では、このような問題意識のもとでの一つのアプローチとして、前回¹⁾に引きつづき、流域の土地利用形態と洪水流出量との関連を把握できる流出モデルの検討を行ない、丘陵林地の開発などといった流域の土地利用形態の変化が洪水流出量に及ぼす影響を分析し、土地利用形態からみた流域の治水効果を明らかにする。

2.では、まず、流域の土地利用形態と洪水流出量との関連を把握すべく、流出量に影響を及ぼす流域諸元を雨水流出の物理機構を通して考察する。この結果をもとに土地利用形態の差異が考慮できる洪水流出の予測モデルを作成する。ついで、3.では、洪水流出モデルを用いた流出量予測シミュレーションにより、土地利用形態の差異による流出量変化を明らかにし、流域内における各種土地利用の面積比、分布状態と流域の治水効果との関連を分析する。

2. 洪水流出モデル

2-1 概 説

洪水流出解析に際し、有効降雨の設定は常に問題となるところである。筆者らは降雨が有効降雨へと変換されるプロセスにおいて、時間遅れ効果を見逃したとき、すなわち、有効降雨を実降雨から一定量の初期損失を除き、一定率の流出率を乗じて表現した場合、流出ハイドログラフの再現性という観点からは有効降雨の変換系は流出系において無視しうることを確認した。¹⁾そこで本稿は、有効降雨への変換プロセスを時間遅れを表現できる最も簡単なモデルとしてタンクモデルを援用し、これと貯留関数モデルとを併せた洪水流出モデルを作成する。

モデルを集中定数系として表示するとき、内在するパラメータは流域の特性、すなわち、量的特性としての流域面積や流域延長、流域勾配、あるいは質的特性としての流域土地利用形態との関連付けが実用上必要とされる。このため、各々特性の異なる12流域を対象として決定されたパラメーターに対し、理論的背景を踏まえた上で流域特性との関連について検討を行なう。なお、パラメーター同定は、試行錯誤が回避できる手法として前回提示した準線形化手法を用いて行なった。

2-2 洪水流出モデル

流域において、洪水流出場が存在することが知られているが、この面積比はせいぜい10%といわれている。^{2),3)}このことから、本稿は流域全体を有効降雨発生場と認識し、降雨は一旦地下浸透し、浸透流を経て有効降雨として再び地表に湧出する。湧出した有効降雨は洪水流出場への入力となり、地表流により流域末端へ流出すると考える。モデルの概要を図-1に示す。

ここで、有効降雨の発生プロセスを表わすものは浸透流であり、洪水流出プロセスについては地表流となることを考えれば、前者についてはダルシー則、後者についてはマニング則により水の運動を記述すること

が可能である。

以上のことを踏まえ、洪水流出を集中定数系で記述すると^{4),5)}
有効降雨発生モデルはタンクモデルと等価となり、次式で表示
できる。

$$R_e = e(R - R_e) \dots \dots \dots (1)$$

$$e \propto k \cdot i_b \cdot \ell^{-1} \dots \dots \dots (2)$$

ここに R_e : 有効降雨量 (mm/hr), e : 定数, R : 実降雨
量 (mm/hr), k : 透水係数, i_b : 動水勾配, ℓ : 流下距離
一方、洪水流出モデルは貯留関数モデルとして表示できる。

$$\dot{S} = \frac{A}{3.6} \cdot R_e - Q \dots \dots \dots (3)$$

$$S = kQ^p \dots \dots \dots (4)$$

$$p = 0.6 \dots \dots \dots (5)$$

$$K \propto n^{0.6} \cdot i_s^{-0.3} \cdot A^{0.4} \cdot \ell^{0.6} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 S : 貯留量 (m^3)、 A : 流域面積 (km^2)、流出量 (m^3/s)、 K : 定数、 n : 粗度係数、 i_s : 地表勾
配

2-3 モデルパラメータに関する考察

まず、表-1 に示される特性を有する 12 流域を対象とし、準線形化によるモデル同定を行なった。モデ
ル同定結果を図-2 に示す。また、準線形化による推定ハイドログラフの一例を図-3 に実測値と併示した。
この結果、推定結果と実測値は良好な一致をみており、洪水流出モデルの妥当性が確認される。

なお、図-4 には K と $I^{-0.3} \cdot A^{0.4} \cdot L^{0.6}$ 及び e と $I \cdot L^{-1}$ の対応関係を示した。 K については全体的にば
らつきは大きい、ほぼ(6)式の関係が認められる。

表-1 流域諸元

このばらつきは流域の粗度及び洪水流出場面積比が
流域ごとに異なることに起因していると考えられる。

一方、 e については、一見(2)式の関係は認めがた
いが、このことは流域により透水係数の値が異なる
ことに起因すると考えられる。事実、流域①~④は
隣接した流域であり、透水係数の大きさを表わす地
質が同質と考えられ、この場合(2)式の関係が成立し
ているとみなせる。

流域番号 No	流域面積(km^2) A	流域延長(km) L	流域勾配 I	土地構成比 (%)		
				市街地 (a_1)	田畑 (a_2)	山森 (a_3)
①	9.3	4.8	0.007	40	55	5
②	7.7	5.7	0.031	15	55	30
③	4.7	2.9	0.018	10	40	50
④	8.9	3.0	0.018	20	75	5
⑤	7.5	6.4	0.002	15	80	5
⑥	8.1	4.5	0.0003	20	75	5
⑦	2.6	1.3	0.0007	20	75	5
⑧	5.8	2.2	0.002	10	85	5
⑨	7.3	1.5	0.004	20	65	15
⑩	3.2	1.2	0.001	20	70	10
⑪	6.1	4.2	0.0006	30	65	5
⑫	4.4	2.9	0.001	15	25	60

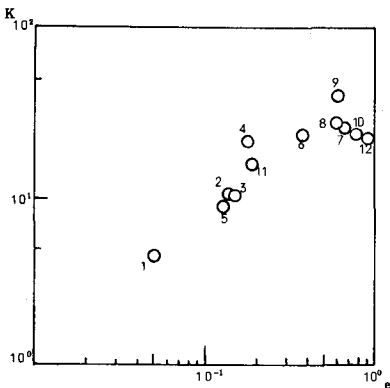


図-2. パラメータ同定結果

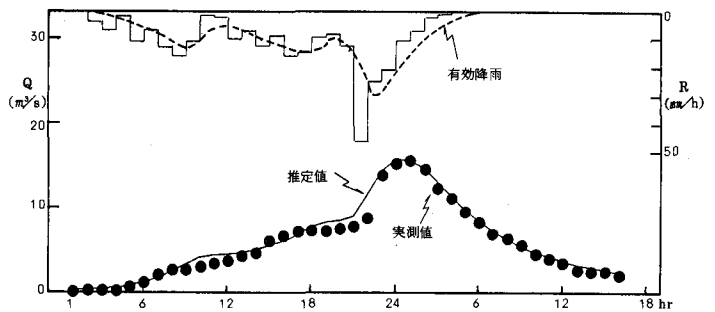


図-3. ハイドログラフ推定結果
(流域番号⑩)

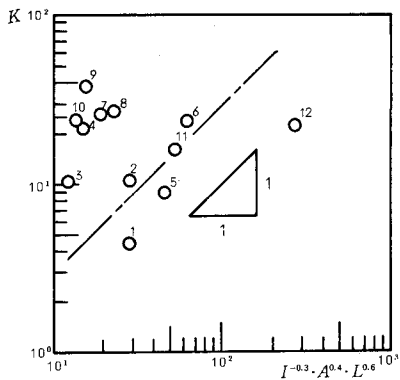


図-4(1) K v.s. $I^{-0.3} \cdot A^{0.4} \cdot L^{0.6}$

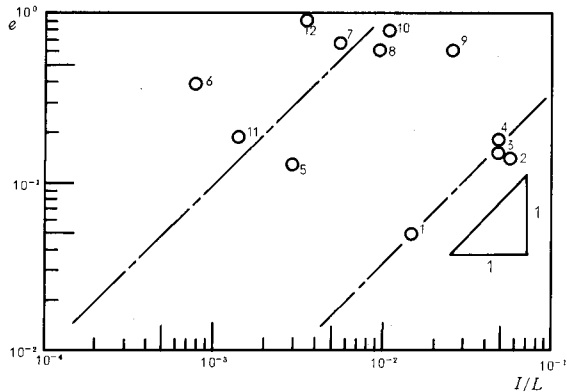


図-4(2) e v.s. I/L

モデルパラメーター K , e について、上述したように流域の量的特性と明確な対応が見つからない原因として異なる土地利用域の面積比、分布状態が考えられる。以下、これら質的な流域特性との関連について考察を行なった。

(7)(8)式に流域の特性を表わす指標として、前掲表-1に示す6つの指標すなわち、流域面積(A)、流域延長(L)、流域勾配(I)、土地構成比(α_i ; $i=1, 2, 3$)を用い、これらを説明変数としてモデルパラメーター K , e を推定した回帰式を示す。

$$K = 16.2 \times A^{1.07} \times L^{-0.99} \times I^{-0.26} \times \alpha_1^{-0.78} \dots\dots\dots(7)$$

$$e = 0.04 \times A^{0.83} \times L^{-1.14} \times I^{-0.30} \dots\dots\dots(8)$$

各回帰式について相関係数は各々 0.88、0.76 と高く表われ、対象とした12流域における流域の諸元を用いた結果については、流域の特性と上式に示すような対応付けが可能となる。パラメーター K , e と流域諸元との対応を前掲(2)(6)式と比較すると、パラメーター K については流域延長(L)との対応が特に異なり、パラメーター e については流域勾配(I)との対応が異なっている。この原因を考察するために(7)(8)式から推定できるパラメーター K , e と流域諸元 A , L , I との関係を、 $K \propto A \times L^{-1} \times I^{-0.3}$, $e \propto A^{0.8} \times L^{-1} \times I^{-0.3}$ とみなしたとき、 K について $(A/L)^{3/5} \propto L$, e について $A \propto i^{3/2}$ の関係を有するなら、(7)(8)式は理論式(2)(6)と整合性がとれることになる。そこでこれらの対応を図示した結果を図-5に示す。一連の図に示すように、パラメーター K を記述する $(A/L)^{3/5}$ と L との対応、パラメーター e を記述する A と i との対応は比較

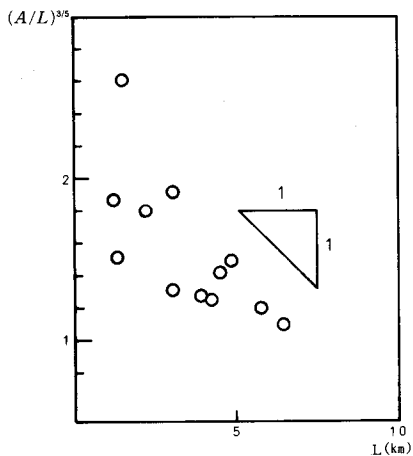


図-5(1) $(A/L)^{3/5} \sim L$ との対応
(パラメーター K)

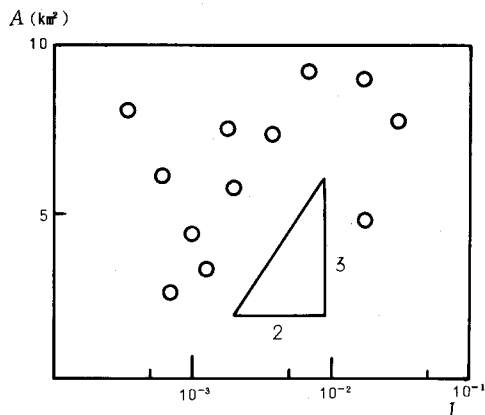


図-5(2) $A \sim I$ との対応
(パラメーター e)

的良好であり、(7)(8)式に示した回帰推定式は物理現象を必ずしも記述するものではないが、対象とした12流域の諸元に依存して、最も推定精度が良い対応関係を表わす式として設定できることがわかる。

3. 土地利用形態の変化による流出量予測

丘陵林地の開発、低平農地の宅地化などいわゆる流域の都市化現象に伴って流出量が増大することはよく知られたことである。

ここでは、2.で作成した洪水流出モデルを用い、流域の土地利用形態の変化に伴う流出量の変化をシミュレーションにより把握し、治水計画上の意義を考察する。

3-1 土地利用形態の分布の差異が流出量に及ぼす影響分析

土地利用形態の変化に起因する将来流出量の変化を予測する場合、あるいは治水対策の手段として土地利用規制の実施などを考える場合には、対象とする流域内において異なった土地利用形態を有する地域の分布状態の差異が流出量に及ぼす影響を分析・把握することが必要である。

ここでは、土地利用形態の変化として分布状態の差異に着目し、流出量の変化を把握する。分析対象として設定した土地利用形態の分布パターンを図-6に、シミュレーションに際して設定したモデル流域の諸元を図-7に示す。図-7に示すようにシミュレーションに際しては、土地利用形態の分布パターンの差異が記述できるよう、対象流域を上・下流に2分して取り扱い、流域全体での市街地面積率50%の下で、分割流域の市街地面積率を5

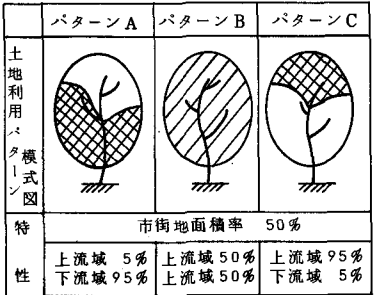


図-6 土地利用パターンの設定

%, 50%, 95%に割り付けた。流出モデルに含まれる2つのパラメーター K , e については、想定した流域の諸元を用いて前掲(7)(8)式により算出した。なお、入力となる降雨条件については、ハイトグラフの形状の差異による影響をも分析するために、1峰型降雨として、(a)継続時間内において前半部にピークを有する降雨、(b)継続時間内において後半部にピークを有する降雨の2降雨及び2峰型降雨の合計3つの降雨ケースを設定した。

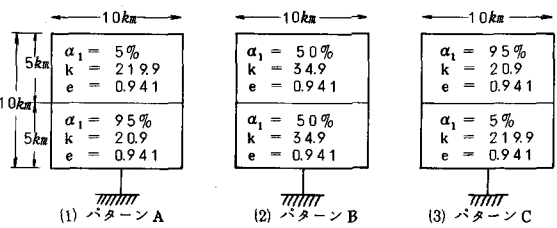
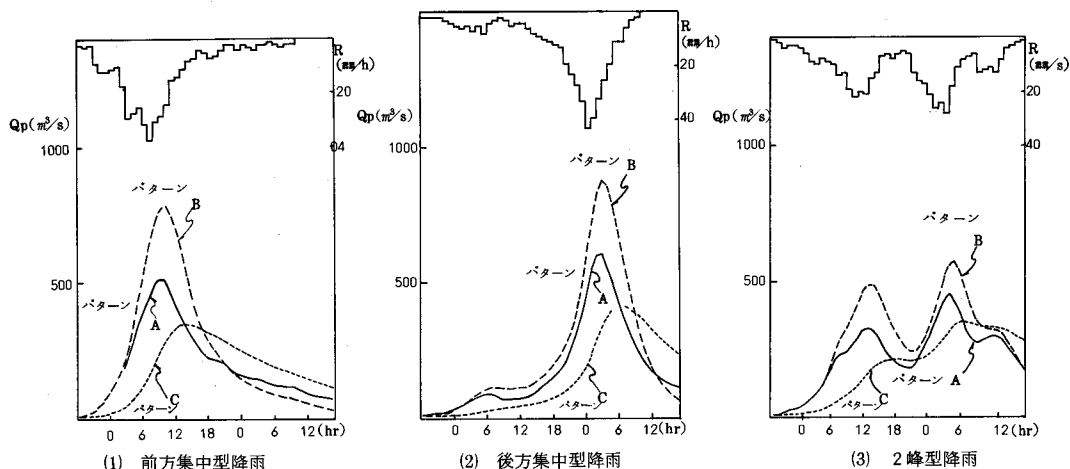


図-7 シミュレーションモデル流域
(α_1 :市街地面積率)

図-8に各降雨を入力として行なった流出量の推定結果を示す。一連の図に示すように各降雨ケースについて、土地利用形態の分布パターンの差異が流出量に与える影響は大きいことがわかる。この傾向を推定流量のピーク値について比較した結果を図-9(1)に示す。同図は横軸に対象とした3降雨の時間最大雨量をとり、降雨と流量とのピーク値の対応関係を土地利用形態の3つの分布パターンをパラメーターとして表示した結果であるが、図に示すように土地利用形態の分布パターンにより流出量のピーク値は大きく異なるとともにハイトグラフの形状による影響も認められる。しかしながら、流出量が最も大きく現われる土地利用形態の分布パターンは全ての降雨ケースに対して同一であり、流域の市街地面積率を均一とみなしたBパターンである。このことは、流域を1つの貯留型モデルとして流出量予測を行なう際には異なる土地利用域の分布状態を考慮しない方が治水計画上安全側であることを示している。

図-9(2)は、前掲図-7に示した土地利用パターンを並列型に置き換え、同様なシミュレーションを行なった結果であるが、並列型についても図-9(1)と同様、流域の土地利用分布を均一として取り扱ったBパターンにおいて流出量の推定値が大きくなり、河道形状にかかわらず集中定数系モデルとしての取り扱いの方が治水上は安全側になっていることがわかる。



図－8 ハイドログラフ推定結果

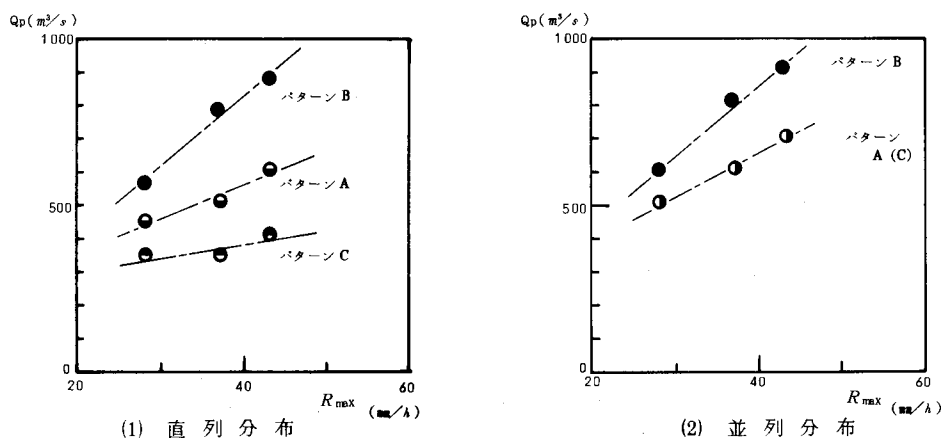


図 9 土地利用形態の分布パターン別
流出量推定結果

3-2 将来流出量の予測と治水効果の把握

3-1の分析結果を踏まえ、ここでは土地利用形態の変化を面積率の変化とし、将来流出量の推定を行ない、流域処理方策として土地利用規制を実施する場合の治水効果を明らかにする。

図-10に土地利用形態の差異を表わす指標として面積率を取り、市街地面積率の変化に伴う流出量の変化を推定した結果を示す。同図は各降雨ケースについて、3-1で設定したモデル流域を市街化が均一に点在する1つの流域とみなし、この流域において市街化面積率が変化することにより流出量がどのように推移するか傾向を表示したものである。

この図をみると、市街地面積率が50%近くなると、その以降の流出量変化は緩慢になることがわかり、土地利用規制等の実施は市街化があまり進行していない流域に対して有効な手段となりうる事が推測される。さらに、土地利用規制を実施する場合、その実施場所が重要となるが、図-11は前掲図-7に示す直列型の土地利用パターンを形成している流域を対象に、今後の市街地面積率の変化を上・下流域別にシナリオとして設定し、流出量の推移を調べ、治水からみた今後の土地利用計画のあり方について考察したものである。同図に示す矢線は、市街化の進行する区域が流域の上流部か下流部かにより単位面積変化当りの流出増が異なることを表わすものであり、土地利用規制を実施する際の流域に期待できる治水効果（流出量抑制効果）は、現況の土地利用形態に大きく依存したものとすることがわかる。

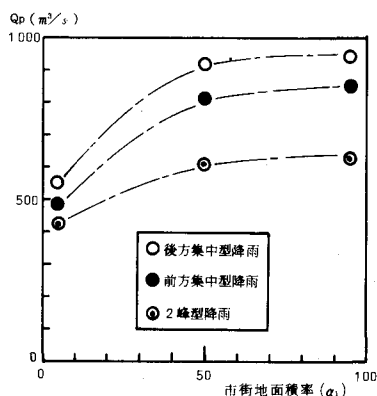


図 10 将来流出量の予測

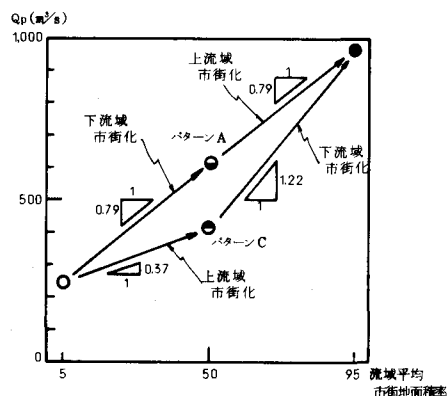


図 11 上・下流域別の土地利用変化に伴う流出量の推移

4. おわりに

流域の都市化に伴う流出量の増大はよく知られたところであり、対象流域の将来流出量の予測、あるいは土地利用規制等に伴う流出量の抑制効果を把握する際には、洪水流出モデルに含まれるパラメーターと流域の土地利用形態を表わす指標との対応付けが実用上必要とされる。

本稿では、1つの流域に対して集中定数系の流出モデルを適用する際に、異なる土地利用を有する区域の面積比、分布状態の差異が流出量に及ぼす影響を分析し、集中定数系モデルとして取り扱った場合の治水計画上の意義を明らかにした。得られた成果を以下に示す。

① 対象流域における土地利用形態の分布状態の差異を考慮せず、総面積に対する比率のみで取り扱う方法は推定する流出量が最も大きくなることから、治水計画上は安全側の評価を行なっていることとなる。

② 市街地面積率の変化に伴う流出量の変化を予測した結果、市街地面積率が50%に達するまでは、単位面積率当りの流出量変化が大きく、土地利用規制等の実施により流域に期待できる治水効果が大きいといえる。

③ 土地利用規制を実施する際に期待できる治水効果は、対象流域における現況の土地利用状況に依存し、最も治水効果の期待できる場合は、上流部に市街地が形成されている流域に対して下流域の規制を行なう場合である。

今後の課題を以下に示す。

今回作成した洪水流出モデルは、決定したモデルパラメーターと流域諸元との対応付けに関し、物理的な関連分析が不十分である。この点に関しては、今後データの蓄積を図り、再検討する予定である。又、流出モデルを集中定数系として取り扱う場合の予測精度についても、実流域を対象とした分割シミュレーションを行ない、集中定数系としてのモデルの適用範囲を明確にする必要があると思われる。

〔参考文献〕

- 1) 中川、森野、蔵重：流域の土地利用形態を考慮した洪水流出解析(1)、第25回水理講演会論文集、PP.243～248、1981。
- 2) 安藤、虫明：丘陵地における直接流出の生起特性、第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集、PP.129～132、1979。
- 3) 福嶋、武居：山地小流域の短期流出に対するモデル、第25回水理講演会論文集、PP.229～236、1981。
- 4) 藤田：斜面長の変動を考慮した貯留関数法に関する研究、土木学会論文報告集、第314号、1980。
- 5) 平野：山地小河川における流出過程について、土木学会論文報告集、第308号、1981。