

流域の都市化に起因する洪水災害の変化
On the Change of Flood Damages due to Urbanization

建設省土木研究所 正 ○吉川勝秀
同 同 吉野文雄
同 同 中島輝雄

1. はじめに

流域の都市化が進むと、被害ポテンシャルの増大、流出機構の変化、および治水対策の実施により、洪水災害が量的・質的に変化することが認識され始めている。例えば既応の大出水が現在生じたとすると、当時と比較して被害の様相がどのように変化するかを推定することは、河川工学上重要な課題であるといえる¹⁾。一方、最近では流出・はんらん解析が、降雨・有効降雨・斜面・河道およびはんらん原モデルに区分されたシステム・モデルにより行われるようになりつつある。さらに、これらのモデルのパラメータが土地利用状況別に整理され始めて^{2),5),10)}これらの応用水文学上の成果を活用することにより、はんらん状況の変化を推定し、その原因についての要因分析も可能になりつつある。本文では、上記の背景から、現状において可能な範囲内で、掘込み河道の流域での都市化による洪水災害の変化について分析を行った。

2. 対象流域

対象流域としては、昭和33年に狩野川台風による大出水を経験し、その後宅地開発が急激に進んだA川（流域面積約35km²、河川延長約12km）をとりあげた。この流域では、都市化が進むにつれて、表－1に示すように不浸透面積が増大し、畑・水田面積が減少した。また、狩野川台風後に立案された河川改修計画により、下流部分の改修が行われている。したがって、流域の都市化に起因する洪水災害の変化を分析する上で適当な流域であると考えられる。

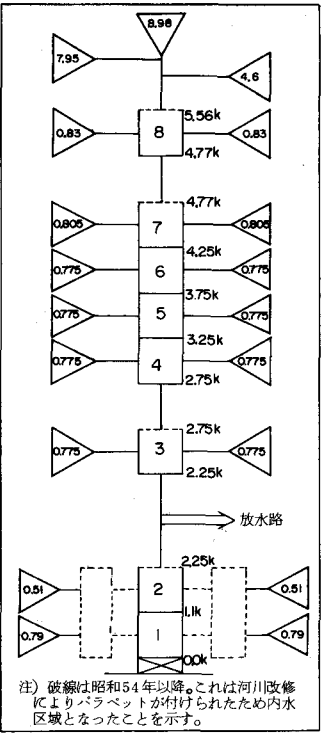
A川は洪積台地を浸食した沖積低地を貫流しており、昭和33年当時は全川無堤の掘込み河道であった。現在でも、下流のある区間を除いて無堤であり、下流区間は低いパラベットを有しているにすぎず、はんらん解析が有堤河川に比較して容易である。A川の流域分割・河道およびはんらん原の分割を図－1に示す。下流部分は、昭和33年当時は無堤であったが、現在ではパラベット（約1m）が作られたために内水区間となっている。また、河口から225kmの地点に自然流下する放水路があり、50mm/hrの中央集中型降雨時に最大約5.6m³/secが放流される。

3. モデルの概要

流出・はんらん解析に用いたモデルは、降雨モデル・有効降雨モデル・斜面モデル・河道およびはんらんモデルから構成されるシステム・モデルである。降雨モデルとしては、昭和33年の狩野川台風の実績降雨、および東京の降雨強度曲線を用いた中央集中

表－1 A川流域の土地利用状況

年度	土地利用状況			
	浸透域	不浸透域	畑	水 田
S.30年	5.39 (160 %)	2.60 (77 %)	20.73 (61.8 %)	4.88 (14.5 %)
S.40年	7.58 (225 %)	5.65 (168 %)	16.57 (49.4 %)	3.80 (11.3 %)
S.50年	10.91 (32.5 %)	9.35 (27.8 %)	11.45 (34.1 %)	1.89 (5.6 %)
S.65年	13.57 (40.4 %)	12.06 (35.9 %)	7.01 (20.8 %)	0.96 (2.9 %)



図－1 流域分割図

型降雨を与えた。有効降雨モデルとしては、浸透域・不浸透域・水田・畑について、凹地貯留量Dと浸透能fcを設定する損失モデルを用いた。斜面モデルには貯留関数法を用いた。河道モデルとしては、勾配の急な上流は等流を仮定した貯留関数、下流部分是不定流とした。また、はんらんが生じる場合には、河道およびはんらん原を流路とする一次元流れによって近似し(ロッターの式による)³⁾、河道モデルと同じ解析方法を用いた。

以上のモデルの概要を表-2に示す。

4. モデルの同定

(1) 流出モデルの同定

流出計算においては、都市化区域・畑・水田の状況、凹地貯留量・浸透能、および斜面モデルの定数KとPを定める必要がある。土地利用状況は各年度ごとに地図より読みとって表-1に示した結果を得た。損失のパラメータについては、類似流域で用いられている値を参考にし、実績の総流出量による検証を行って表-3 a)に示す値を得た³⁾。次に斜面モデル定数のK, Pは、斜面の流れを Manning式により近似する方法に基づいて、Pを0.6とし、Kは $K=7.35(N \cdot l / \sqrt{I})^p$ (l : 斜面延長, I : 平均斜面勾配)として求めた^{2), 5)}。このNは斜面の等価粗度であり、橋本らにより流域特性と関係づけて整理されている²⁾。その結果を参考にし、実績流量による検証を行って表-3 b)に示すような値を設定した³⁾。

図-2に、表-3に示したパラメータを用いた場合

の検証結果を例示する。図より、ほぼ妥当な結果が得られていることが分る。このように、流域状況別に得られている各パラメータがA川の流出をほぼ表現す

表-2 モデルの概要^{3), 4), 6), 7)}

モデル	概要	概要図
水文モデル	①確率降雨モデル 流出計算には、中央集中型降雨波形を用いる。 ②有効降雨モデル 損失モデルは浸透域・不浸透域別に設定する。 ③斜面モデル 流出計算は貯留関数法を用いる。 $\frac{dS}{dt} = R_e - Q$ $S = KQ^p$	
水理モデル	①河道およびはんらんモデル はんらん計算は不定流計算で行う。等価粗度係数はロッターの式を用いる。 $n = \frac{SR^{5/3}}{S_1 R_1^{5/3} n_1 + \dots + S_n R_n^{5/3} n_n}$	

表-3 設定した流出モデルのパラメータ

a) 有効降雨モデル

損失機構(凹地貯留・浸透能)のパラメータ

区域 損失機構	都市化区域		水田・畑区域	
	不浸透域	浸透域	水田域	畑域
凹地貯留	2 mm	6 mm	50 mm	6 mm
浸透能	—	3 mm/hr	—	10 mm/hr

b) 斜面モデル

等価粗度係数N

区域 年度	都市	畑	水田
S.40年	0.1	0.3	2.0
S.50年	0.05	0.3	2.0

注)

$$K = 7.35 \left(\frac{N \cdot l}{\sqrt{I}} \right)^p$$

l : 斜面延長(km)
 I : 斜面の平均勾配

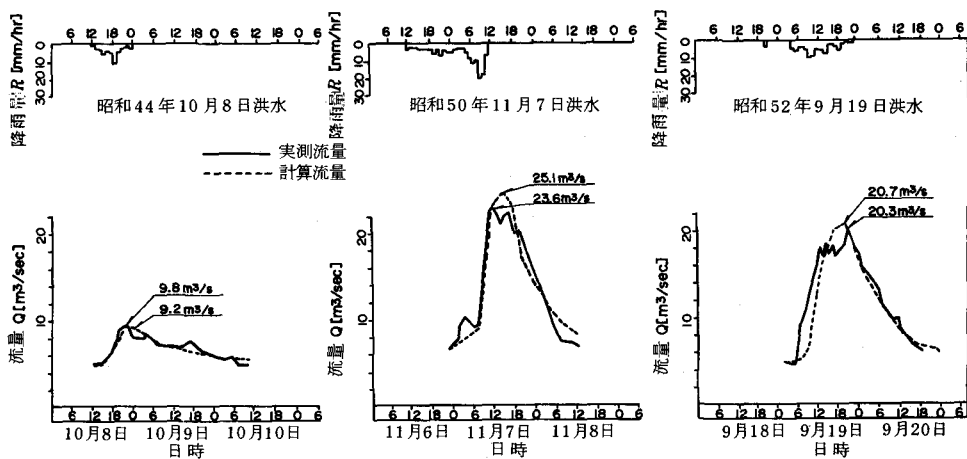


図-2 流出モデルの検証例(水位観測所N地点)ーハイドログラフー

るので、過去の流域に対しては土地利用状況との対応から、橋本らの提案しているパラメータにより、表-4に示すような等価粗度 N を採用することにした。

(2) はんらんモデルの同定

はんらんモデルの同定は、上述の流出モデルを与件として、河道の粗度係数 n は改修前を0.035、改修後を0.03とし、はんらん原の粗度係数 n' を実績と合うように同定した³⁾。その結果 $n' = 0.15$ を得た。 n' については、河川沿いの土地利用が大規模には変化していないことから、昭和30～50年に対して同じであるとした³⁾。

図-3に、狩野川台風時および昭和54年洪水に対する検証結果を例示する。最大水深を包絡する水位縦断での対応は良好であり、はんらんボリュームでみても約7%程度の誤差となっている。もちろん、これら2洪水の計算においては、前述の各年代ごとのパラメータから、当該年度の値を与えた。

(3) 各年度ごとのパラメータ

以上のモデルの同定結果より、A川の流出・はんらん解析モデルの各パラメータは、年代ごとに表-4に示す値を採用することにした。斜面の土地利用状況は、表-1に示したとおりである。これらのパラメータを用いることにより、既応大出水の現状での再現、はんらん状況変化の原因についての要因分析が可能となる。

5. 既応大出水の現在流域での再現

既応大出水として狩野川台風時の降雨を与え、現在流域でのはんらん状況を上述のモデルにより推定した。すなわち、モデルのパラメータとして表-4に示した当該年のものを与え、土地利用・河川改修状況も当該年度のものを設定して、狩野川洪水時の降雨のもとでのはんらんを推定した。図-4～6にその結果を示す。昭和33年当時と昭和50年のものを比較することにより次のことが分る。

①図-4、5より、下流部分(33kmより下流)については河川改修の効果が都市化による流出増を上回っており、はんらん水位が最大0.5m程度、平均0.3m程度低下すると推定される。

②一方、上流部分(33kmより上流)については、河川改修が行われ

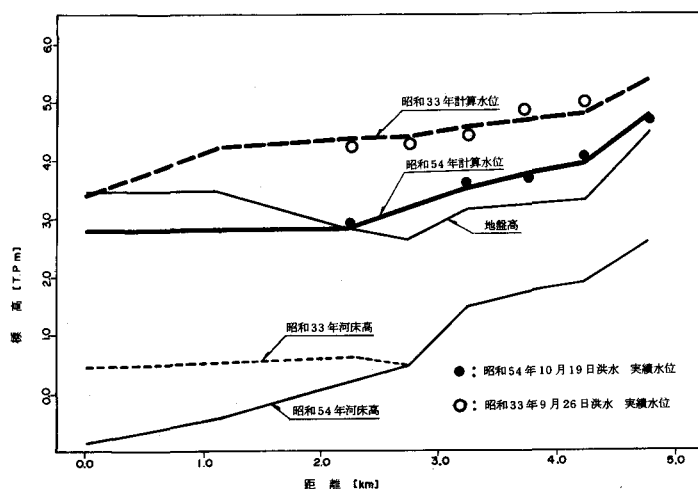


図-3 はんらんモデルの検証例(水位縦断図)

表-4 各年度のパラメータ

パラメータ 年度	河道の粗 度係数 n	不浸透面 積率(%)	斜面の等価粗度 N			はんらん原 の粗度係数 n'
			都市	畑	水田	
昭和30年	0.035	7.7	0.1	0.3	2.0	0.15
昭和40年	0.030	16.8	0.1	0.3	2.0	0.15
昭和50年	0.030	27.8	0.05	0.3	2.0	0.15

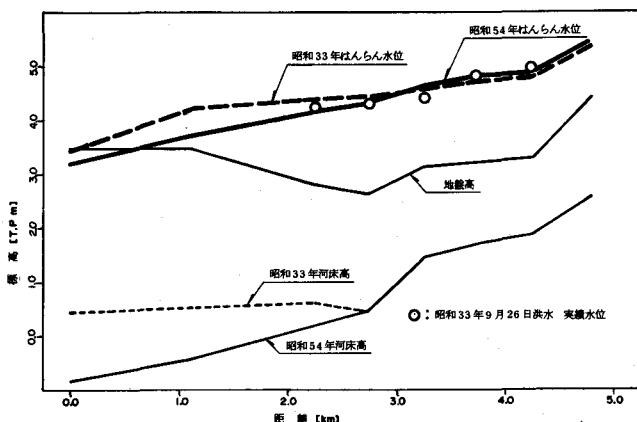


図-4 既応大出水の現在での再現(その1)(水位縦断図)

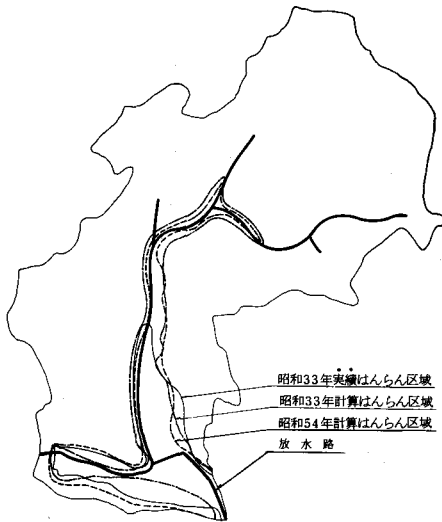


図-5 既応大出水の現在での再現（その2）

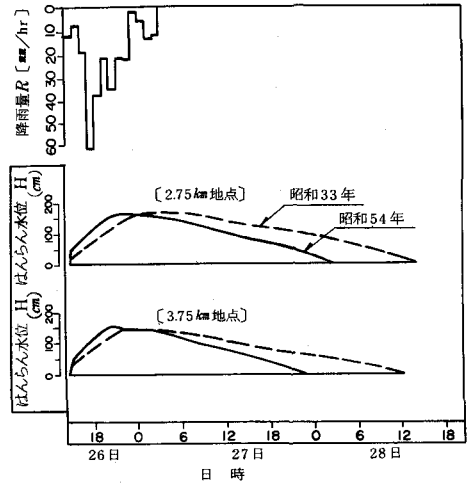


図-6 既応大出水の現在での再現（その3）
（たん水位時間曲線）

ておらず、都市化による流出増のためにはんらん水位が平均0.1m程度上昇すると推定される。

- ⑨ 図-6より、河道および斜面の水路化の促進のために、昭和54年では流出が早くなり、水の引きもすみやかになると推定される。すなわち、2.75km地点での水位のピークまでの時間は6時間早くなり、約12時間早く水が引く。

6. 流出・はんらん変化の要因分析

以上のようにして、既応大出水が現在生じたときにはんらん状況が推定され、都市化に起因したはんらん状況の変化が明らかになった。次にそれらの変化の要因を分析した。要因分析の考え方は次のとおりである。

流域斜面の状況は、降雨損失の変化（浸透面積、不浸透面積、畑・水田面積の変化）および排水路の整備による水路化の促進としてとらえることができ、これをXとする。治水対策の実施状況をYとする。はんらん水位をHとすると、HはX、Yの関数として次のように表わされる。

$$H = H(X, Y) \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって、土地利用状況の変化および治水対策の実施に起因するはんらん水位の変化 ΔH は、式(1)の偏分をとることにより、次のように表現される。

$$\Delta H = \frac{\partial H}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial H}{\partial Y} \Delta Y + \epsilon(\Delta X, \Delta Y) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)ははんらん水位変化の求め方についての概念的説明であるが、Xを33年当時に固定してYのみを ΔY 変化させれば、Yの変化によるはんらん水位の変化が求まる。Xの変化によるはんらん水位の変化は、Yを固定して同様の計算を行うことにより求まる。

以上の考え方のもとで、土地利用の変化および治水対策の実施によるはんらん水位の変化を分析するために設定した斜面・河道の条件を表-5に示す。表-5に示した各caseの計算結果を図-7に示す。図には、昭和33年の水位が、各要因の変化に対応してどの程度変化するかを表示した。例えば、1.0km地点では、流域の都市化によってはんらん水位が昭和33年に比較して0.4m程度上昇するが、河川改修によって0.9m程度低下するために、差し引約0.5m程度はんらん水位が低下すると推定される。一方、上

表-5 要因分析のための計算ケース

case	降 雨	斜面（流域）	河 道
1	昭和33年9月26日 （狩野川台風）	昭和33年	昭和33年
2	"	昭和33年	昭和54年
3	"	昭和54年	昭和33年
4	"	昭和54年	昭和54年

流では河川改修が行われていないために、都市化による流出増によってはんらん水位が上昇する。

同様に、洪水ピーク流量 Q_p が、土地利用の変化および治水対策の実施によってどの程度変化するかを推定することができる。この時、河道状況、土地利用状況（不透透面積率）および斜面の N の三つが変数なので、一変数のみを変化させた場合と、一つを固定して他の二変数を変化させた場合と結果が多少異なる。そこで、両方の考え方で、50mm/hrの中央集中型降雨に対する流出の変化をそれぞれ算定した結果を図-8、9に示す。これらいずれの結果も、A川では、斜面の保水機能の低下（損失雨量の減少）による流出増が最も大きく、流出増の半分以上がこれに起因していることを示している。したがってA川のような流域での治水対策は、流域の保水機能を高めるような雨水貯留対策が、河川改修とともに重要と考えられる。しかし他流域の同様の検討では、河川改修による流出増が支配的であるという結果も得ている。したがってこの結果は、A川では下水道整備率が低く斜面の水路化による流出増が小さいこと、また河川改修も下流部分のみであり、河川改修による流出増が相対的に小さいことによってしていると解釈されるべきであろう。

7. まとめ

近年、流域の都市化に起因した治水上の問題が指摘され、保水・遊水機能を保持し、排水を進進する多様な治水対策が検討されつつある。そのような対策は総合治水対策と呼ばれている。総合治水対策の検討においては、流出・はんらん解析による災害変化の時系列的な分析、および治水対策の効果の評価が基本となっている。

一方、近年の応用水文学の重要な分野として、土地利用の変化を表現する流出解析の検討が進められ、例えば全国の流出試験地の調

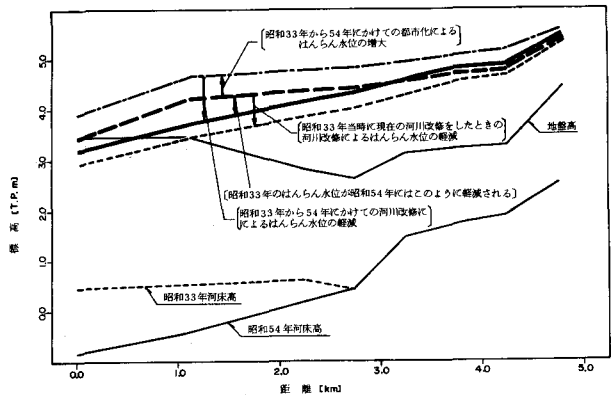


図-7 はんらん変化の要因分析（水位縦断面図）

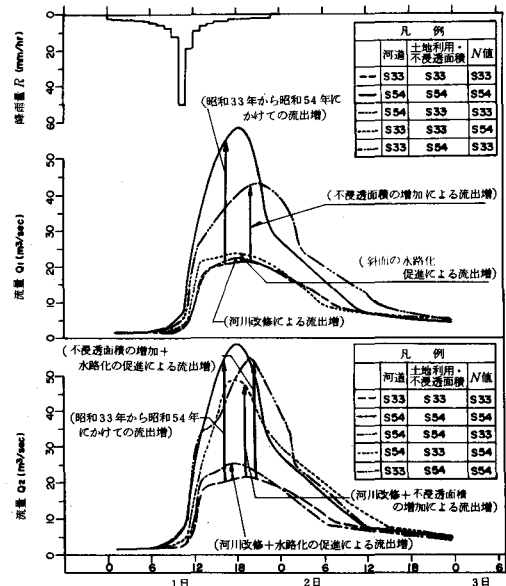


図-8 流出変化の要因分析（その1）（流出ハイドロ）

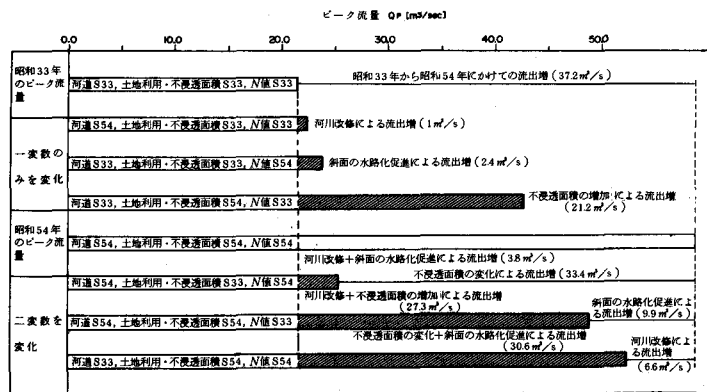


図-9 流出変化の要因分析（その2）（ピーク流量）

査から、モデルのパラメータが土地利用状況と対応づけて整理されつつある。^{2),5)}そこで、本文で提示したシステム・モデルを用いることにより、洪水災害の変化の要因分析も可能になりつつある。

以上の考え方のもとでA川を対象として事例検討を行った結果、次のことが明らかとなった。

①掘込み河道でははんらの再現は、はんらんボリュームで5～10%、はんらん水位で1～10%程度の誤差で再現できる。

②都市化に起因した洪水災害の変化は、都市化の状況・河川改修の状況に対応したパラメータを設定することにより推定される。したがって、既応大出水の現在流域での再現も可能である。主要なパラメータについては参考文献2), 3), 10)がある。

③②のパラメータおよびシステム・モデルにより、流出・はんらんの変化の原因についての要因分析が可能である。

④以上より、保水・遊水・排水に関する治水対策の効果を水文学的に評価することも可能である。⁷⁾

以上は、現在までに調査された土地利用状況別のパラメータを用いて検討を行った結果によっているが、A川での事例検討により、本文で提示したような解析が可能な段階に近づいているように思われた。今後このような解析をより厳密かつ精度高く行うために、現在進められている全国の流出試験地調査の成果を期待するものである。¹⁰⁾また、本文で提示した解析を行うことにより、流出・はんらん変化の特性を十分に考慮した効率的な治水対策の実施が可能になるものと考ええる。

参考文献

- 1) 吉川秀夫：総合的な治水対策について，建設月報，No 367，1980
- 2) 橋本建・長谷川正：土地利用の変化を評価する流出モデル，土木技術資料，Vol. 19，No 5，1977
- 3) 山口高志・吉川勝秀・角田学：治水計画の策定および評価に関する研究(Ⅰ)，土木研究所報告，No 156(予定)
- 4) 山口高志・吉川勝秀・角田学：都市化流域における洪水災害の把握と治水対策に関する研究，土木学会論文報告集（投稿中）
- 5) 青木佑久・他3名：全国流出試験地調査中間報告，土木技術資料，Vol. 2，No 8，1979
- 6) 吉野文雄・吉川勝秀：土地利用変化に起因する洪水災害変化の分析と治水対策の評価，土木技術資料，Vol. 22，No 2，1980
- 7) 建設省土木研究所河川部総合治水研究室：雨水貯留施設の最近の動向，土木研究所資料，No 1579，1980
- 8) 山口高志・松原重昭・山守隆：都市流出調査—降雨損失機能の検討—，土木技術資料，Vol. 13，No 10，1971
- 9) 木下武雄・益倉克成・福岡輝雄：水路網密度が流出波形に及ぼす影響について，第24回水理講演会論文集，1980
- 10) 建設省河川局治水課・土木研究所：流出試験地調査成果報告書（その4），1980
- 11) Walesh, S. G., Videkovich, R. M. : Urbanization : Hydrologic-Hydraulic-Damage Effects, ASCE, Vol. 104, No HY 2, 1978