

都市流出モデルのパラメータ標準化と評価
Standardization of parameters and evaluation of runoff model in urban area

建設省土木研究所 正員 吉野 文雄
〃 正員 吉谷 純一
〃 堀内 輝亮

1. はじめに

流域の開発に伴って、洪水の流出形態は変化する。流出に影響する流域の開発としては、都市化・森林開発・工場整備等があげられ、特にその影響の大きい都市化による流出形態の変化は、昔から問題とされてきた。しかし、十分なデータが得られていなかったこともあり、どれだけの流出変化があるのか予測することは難しい問題であった。一方、近年における流域の開発は大規模かつ急激に行われるようになり、それにみあった河道改修を行うことは困難であることもあり、現在では何らかの対策を事前に講ずるうえで、都市化による流出変化の予測手法を確立することがより必要とされている。

建設省では、このような目的で、昭和44年から全国に流出試験地を設置し、水文データを収集してきた。設置当時はまだ自然地だった流域も、現在では多くの流域でかなり都市化が進み、開発前後のデータがある程度集収され、昨年度・今年度にわたり解析された。本研究は、都市化の程度に応じた流出の予測手法を確立することを目的として、この全国流出試験地データの解析結果¹⁾をもとに、現在、実用に供されている合理式・貯留関数法・等価粗度法・準線形貯留型モデルについて、モデル定数の標準化を検討したものである。

2. 対象流域

本研究は、表1に示す7試験地12観測所での解析結果を用いたものである。これらの試験地では、雨量・流量データが10分間隔で整理され、継続的に土地利用調査が行われている。

土地利用区分は、地形図または航空写真から山林・田・畑・市街地(浸透域)・市街地(不浸透域)の5区分に分類した。また、都市化の程度を表す指標として都市化率(T)を、全流域面積に対する市街地の面積率として定義した。

表1. 試験地一覧

試験地名	河川	観測所	流域面積 (Km ²)	解析洪水数
北広島	輪厚川	輪厚川	23.96	6
	音江別川	音江別川	9.67	7
筑川	筑川	鈎取橋	6.37	4
	筑川	ひより台	0.32	6
庄内川	香流川	猪子石	26.99	5
	〃	岩作	10.42	5
	山崎川	山崎	13.48	5
平城	小松川	No.1	0.69	4
New Town	渋谷川	No.5	0.37	4
落合川	諸木川	諸木	1.24	6
奥野川	奥野井谷川	大内	8.0	5
多摩N.T.	大栗川	南大沢	0.97	7

3. モデルパラメータの標準化

3-1 有効降雨モデル

都市化が進むにつれ、流出量は増大する。このことを評価できるモデルとして凹地貯留～浸透能モデルについて検討した。水平分離法による総損失量がこのモデルによる総損失量と同等かそれに近くなるよう各土地利用の浸透能を流域ごとに決定した結果、表2に示すとおりの土地利用であっても流域ごとにより違った値をとった。これは、流域の特性が非常に影響するということもあるが、本来このモデルは、雑多な土地利用からの流出が下水管等の排水路にすぐ流入し、たとえば屋根の水が浸透するようなことはないことを前提としている。都市小流域では、山口らの研究²⁾によりこのモデルが有効であることが確かめられているが、山林や田畑が混在する流域でこのモデルを用いる

表2. 土地利用ごとの浸透能

試験地	浸透能 (mm/h)			備考
	山林	畑	市街地	
筑川	4	4	6	
庄内川	15	15	10	
平城N.T.	10	10	5	
落合川	7	10	14	
奥野井	0~22	—	—	山林100%
多摩N.T.	15	15	7	造成地を別扱い

北広島は一定率

のは無理があるかもしれない。しかし、率という概念で都市化による流出量の増加を評価するのは難しく、また損失現象は量的に評価すべきものであることから、さらにこのモデルについて検討を加えていく必要があろう。

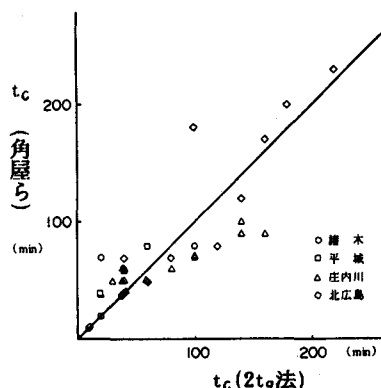


図1. 洪水到達時間

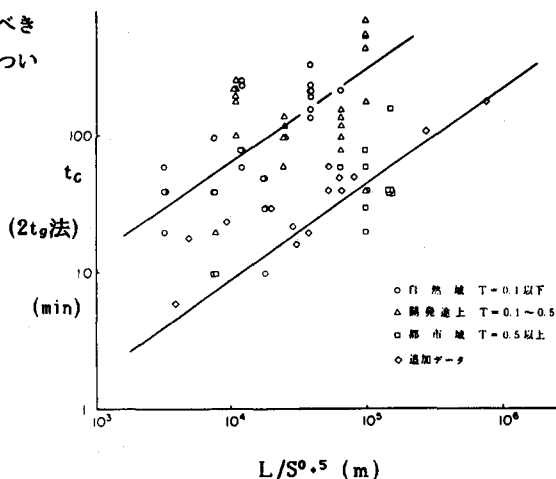


図2. L/S と t_c の関係

3-2 合理式

合理式は次式のように表わされる。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f_p \cdot r \cdot A \quad (1)$$

ここで、 Q_p :洪水ピーク流量(m^3/s)、 f_p :流出係数、 r :洪水到達時間内の平均降雨強度(mm/h)、 A :流域面積(km^2)であり、 r の算定に洪水到達時間 t_c (min)が必要である。実測の降雨流量データから t_c を決定する方法としては、1)降雨波形のピークから流出波形のピークまでの時間差をとりその2倍を t_c とする方法、2)流出ピーク時の有効降雨強度と同じ降雨強度の時点との時差を t_c とする方法がある。また、流域特性から t_c を推定する経験式として、Kraven式や土研式等があり、3)流域ごとにあらかじめ経験式により t_c を固定し洪水によらず一定とする方法の3通りで f_p を算出した。

まず、1), 2)の方法による洪水到達時間の違いを図1に示す。洪水到達時間については若干の違いはあるが、これから逆算した f_p の違いはこの洪水到達時間の違いよりも小さくなり、2通りの方法による違いは実用上ないといえる。

さて、異なった流域での洪水到達時間を取扱う場合、流域の条件が異なるため、これらのデータを同列に扱うことはできない。そこで、洪水到達時間を支配する要因として、流路長 L とその勾配 S を用いて解析を行った。建設省土木研究所²⁾の調査によると

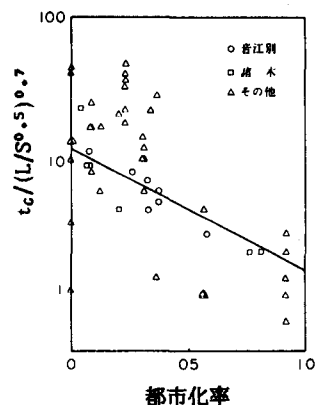


図3. 都市化率と $(L/S^{0.5})^{0.7}$ の関係

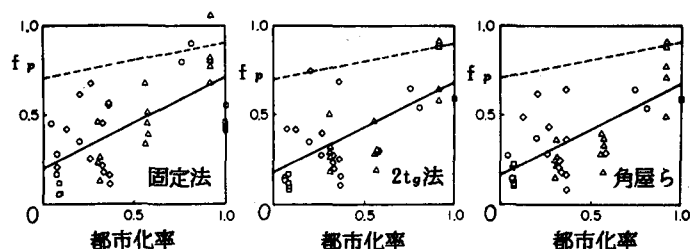


図4. 都市化率と流出係数の関係

さて、異なった流域での洪水到達時間を取扱う場合、流域の条件が異なるため、これらのデータを同列に扱うことはできない。そこで、洪水到達時間を支配する要因として、流路長 L とその勾配 S を用いて解析を行った。建設省土木研究所²⁾の調査によると

$$t_c = 2.40 \times 10^{-4} (L/S^{0.5}) \quad (\text{Hour}) \quad \text{都市域} \quad (2)$$

$$t_c = 1.67 \times 10^{-3} (L/S^{0.5}) \quad (\text{Hour}) \quad \text{自然域} \quad (3)$$

という結果を得ており、今回の検討においても図2に示すようにほぼ同様な結果が得られた。都市化率と流路長とその勾配により基準化した到達時間 $t_c / (L/S^{0.5})^{0.7}$ の関係を示したのが図3である。流域ごとのばらつきは大きい、音江別、諸木については、都市化が進むに従い到達時間は対数グラフ上でほぼ直線的に短くなっているといえる。

3通りの方法により算出した流出係数は、図4に示すとおり流域および洪水によりかなり違った値となっている。しかし、洪水到達時間決定法による流出係数の差はほとんどなく、流出係数は平均で自然域において0.2, 都市域において0.7 となっており、その上限は自然域において 0.6 , 都市域において0.9 である。設計に用いる場合はこの上限値を用いるべきであろう。

3-3 貯留関数法

貯留関数法の基礎式は次のように表される。

$$S = K q^p \quad (4)$$

$$r_e - q = \frac{dS}{dt} \quad (5)$$

ただし、S:貯留高(mm), q:流出高(mm/h), r_e :有効降雨(mm/h), K, p:定数でこの他に遅れ時間 T_t があるが、流域が小さいことから原則として0とした。

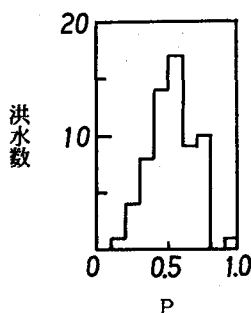


図5. Pの分布

まず各洪水ごとに定数K, pの最適値を求めた結果、図5に示すとおり平均のpは0.6 となった。pが変動すればKの最適値も変動することから $p=0.6$ と固定し各洪水についてKの最適値を求めた。この洪水ごとに求めたKの最適値は理論的にも過去の研究⁴⁾によっても A^b に比例することが確かめられている。今回得られた結果によっても図6に示すとおり流域面積が大きくなればKの最適値も大きくなるという明瞭な関係が得られている。そこで、 $K = a \cdot A^b \cdot 10^c$ の関数形を仮定し重回帰分析を行った結果次式を得た。

$$K = 8.6 \cdot A^{0.10} \cdot 10^{-0.81} \quad (p=0.6 \text{ に固定}) \quad (6)$$

都市化率と $A=10 \text{ km}^2$ に相当する K_{10} の関係を図7に示す。これからKは

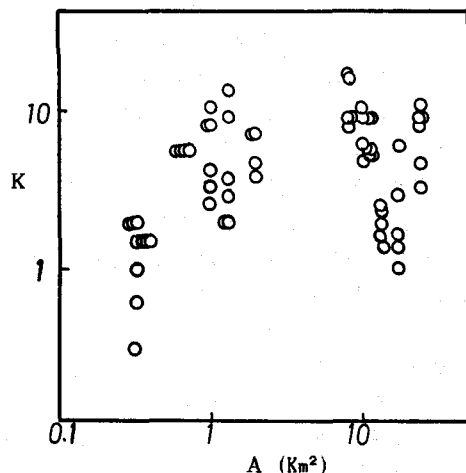


図6. 流域面積とKの関係

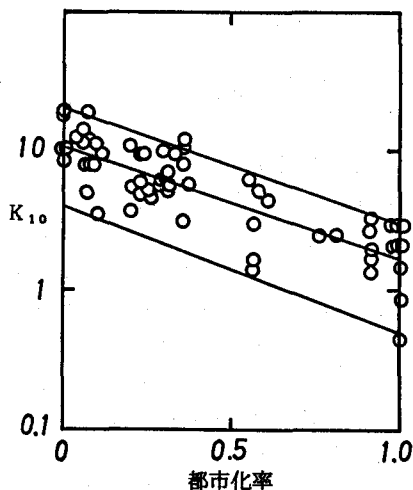


図7. 都市化率と K_{10} の関係

- 自然域 (T=0.0) で $K=0.5 \sim 3$
 開発途上 (T=0.5) で $K=1.5 \sim 8$ (7)
 都市域 (T=1.0) で $K=4 \sim 20$

程度の変動幅を持っていることがわかる。

3-4 等価粗度法

等価粗度法の基礎式は次のように表される。

$$h = k q^p \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (9)$$

$$k = (N/I^{0.5})^p, \quad p=0.6 \quad (10)$$

ここで、 N :等価粗度($s/m^{0.33}$)、 I :斜面勾配、 h :水深(m)、 q :単位幅当り流量(m^2/s)、 r_e :有効降雨強度(m/s)である。なお、本流出モデルにおいて有効降雨は一次流出率～飽和雨量モデルを用いている。

等価粗度 N は土地利用によって変化する値であり、角屋ら⁵⁾や土研⁶⁾による標準値が得られている。今回すべて単流域扱いで N の最適値を調べた結果、図8に示すような関係が得られた。 N と T の関係式は

$$N = 1.3 \cdot 10^{-2.1T} \quad (11)$$

で表され、 N は

- 自然域 (T=0.0) で $N=0.3 \sim 4.0$
 開発途上域(T=0.5) で $N=0.035 \sim 0.64$ (12)
 都市域 (T=1.0) で $N=0.004 \sim 0.1$

の変動幅をもっている。

3-5 単線形貯留型モデル⁶⁾

単線形貯留型モデルの基礎式は、次のように表わされる。

$$S = Kq \quad (13)$$

$$r_e - q = \frac{dS}{dt} \quad (14)$$

$$\text{ただし、} K = t_c / 2 \quad (15)$$

ここで、 S :貯留量(mm)、 q :流出高(mm/h)、 t_c :洪水到達時間(hour)である。式(15)は、完全に都市化された小流域での関係⁷⁾をもとにしており、これを他の場合にも拡張したものである。

t_c は、式(16)に示す角屋による洪水到達時間の経験式と実績の有効降雨強度曲線から決定される。

$$t_c = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (16)$$

ただし、 r_e :降雨継続時間内の最大平均有効降雨強度(mm/h)、 A :流域面積(Km^2)、 t_c :洪水到達時間(min)、 C :土地利用形態によって定まる定数である。そして、ある流域からの流出波形は、その流域を一種類の土地利用形態として計算しておき、その後で土地利用比率により加重平均して合成する方法をとった。

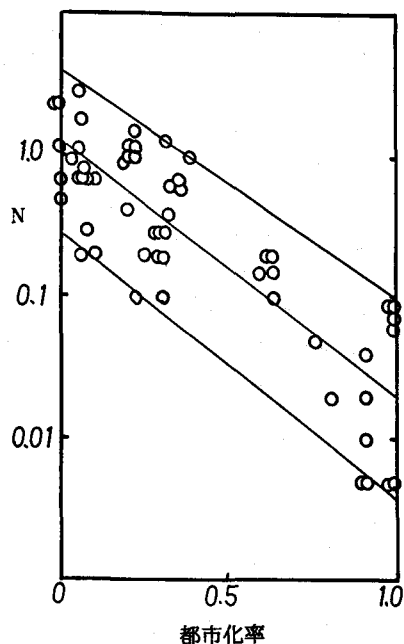


図8. 都市化率と N の関係

表3. 土地利用ごとの C 値

試験地 観測所名	C 値			
	山林	田	畑	市街地
輪厚	140	360	90	30
音江別	130	340	80	30
芥川	510	2800	650	150
猪子石	290	1000	290	80
岩作	290	1000	290	130
山崎	290	1000	290	60
平城N.T.	180	630	120	30
諸木	350	1000	250	70
奥野井	650	—	—	—
南多沢	200	1000	150	50

このモデルにおける土地利用ごとのC値は、土研での調査等により、おおよそ山林で290、田で1000、畑で200、市街地で70程度の値となるものと予想されたが、今回の検討の結果、表3のような値が得られた。庄内川・平城N. T.・諸木などのかなり都市化の進んでいる流域では適合度のよい結果を得ているものの、まだ多くの問題点をのこしており、今後より詳細な検討が必要である。

4. モデルの適用性と評価

以上の検討結果から各モデルごとに、都市化率に応じた流出モデル定数を決定し流出波形の各モデルにより都市化による流出変化を示す例として、表4に示す標準的と思われる条件により、自然域(T=0.0)、開発途上域(T=0.5)、都市域(T=1.0)の3通りの土地利用での流出を貯留関数法、等価粗度、準線形貯留型モデルによりモデル計算を行った。

図9にモデル計算によって得られた都市化によるピーク流量の変化を示す。等価粗度法と貯留関数法についてはパラメータの不確定さによりピーク流量がどれだけ変動するかも示した。都市化の進んでいる流域で、貯留関数法の方が等価粗度法よりピーク流量のばらつきが多少大きくなっている。これは、図7、8に示したように、等価粗度Nは自然域が完全に都市化されると約1/100になるが、貯留関数法のKは約1/10であり、Kの方が感度が鈍く、それをからみるとパラメータの不確定さは等価粗度NよりKの方が大きいことからわかる。これは、等価粗度法では、地形条件として流域の長さ・勾配が考慮されているに対し、貯留関数法では地形特性を流域面積だけで代表させているため地形特性の影響を十分に除去できていないこと等が原因として考えられる。

また、ピーク流量の変動幅、及び流出モデルによる予測ピーク流量の差は、都市化が進む程、小さくなっている。これは、流域での貯留効果がなく、降った雨がすぐ流出する状態に近づくためである。すなわち、都市域では雨水の運動形態にまして有効降雨の算定がより一層重要となってくることを意味している。

5. 結論

都市化による流出形態の変化を評価するモデルとして合理式、貯留関数法、準線形貯留型モデルについて検討した。

表4. モデル計算条件

土地利用	山林	田	畑	市街地 浸透	市街地 不浸透	単位
T=0.0	55	10	35	—	—	%
0.5	25	5	20	25	25	
1.0	—	—	—	50	50	
凹地貯留量	6	50	10	6	2	mm
浸透量	10	—	6	6	—	mm/h
準線形C	290	1000	200	70		
降雨	総降雨量 300mm 中央集中型			最大降雨強度 50mm/h		
流域面積	10 km ²			流路勾配	1/200	
流路長	4 km			斜面勾配	1/20	

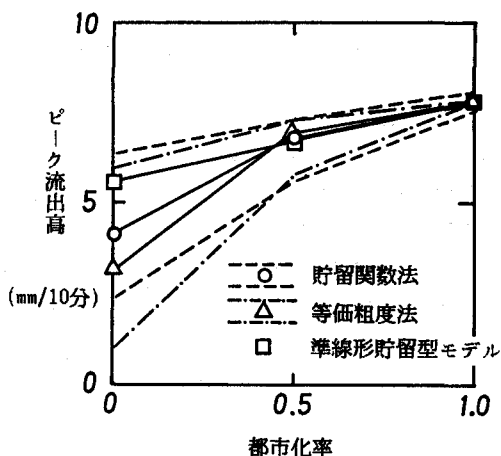


図9. 都市化率～ピーク流出高モデル計算

合理式については、洪水到達時間の推定式として土研式が妥当であり、流出係数は、自然域が都市化されると、平均は0.2から0.7へ、上限値で0.6から0.9へ大きくなった。

貯留関数法では、 $P=0.6$ に固定したとはに K が式(6)で表されることを示した。

等価粗度法では、等価粗度 N が式(11)で表されることを示した。

しかし、凹地貯留～浸透能モデル、準線形貯留型モデルについてはパラメータの標準化はできず、今後検討が必要である。

なお、表5に解析対象流域に地形特性および降雨特性を示すが、今回の検討ではこのような流域を対象としており、いずれも山地、丘陵地を開発することにより都市化が進んだ流域である。したがって、水田地帯等の低平地を開発することによって、都市化が進んだような流域は、もともと地形形状件が違うため、これらの検討結果は適用できないことをことわっておく。

表5. 解析対象流域の地形特性および降雨特性

流域面積	0.32~26.99 Km ²
河道勾配	1/10~1/550
流路長	0.1 14.2 Km
総降雨量	37 300 mm
ピーク雨量	1~20 mm/10分

謝辞

本研究で用いた全国流出試験地での資料は、北海道開発局、建設省各地方建設局、土木研究所水文研究室の諸先輩の並々ならぬ努力の結果であり、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、清水・吉野・青戸：諸木川流出試験地における都市化による流出形態の変化，第29回水理講演会，1985
- 2) 山口・松原・山守：都市流出調査，土木技術資料，昭和46年10月
- 3) 吉野：合理式による洪水流量の算定についての提案，第27回建設省技術研究会
- 4) 吉野・利根川・吉谷：都市化率からみた都市流出の検討，第39回土木学会年講，昭和59年
- 5) 角屋・福島：洪水到達時間推定式について，第31回土木学会年講，昭和51年
- 6) 橋本・長谷川：土地利用を評価するモデル，土木技術資料，昭和52年
- 7) Yoshino: Runoff Characteristics of Small Urbanized Areas, IAHS Tokyo Symposium, 1975