

多摩ニュータウン流出試験地における
流出モデルのパラメーターと都市化による相違

Changes of Parameters of Runoff Model Caused by Urbanization
in Tama Experimental Basin

住宅・都市整備公団 正員 友納 寛 幸
東京大学生産技術研究所 正員 虫 明 功 臣
住宅・都市整備公団 正員 ○柳 原 和 憲
建設技術研究所 正員 阿 部 令 一

1 はじめに

多摩川右支川大栗川・乞田川流域にその殆どの区域が含まれる多摩ニュータウンでは、昭和44年の大規模宅地造成事業着手と同時に、都市化による流出（特に洪水流出）特性の変化の水文学的意味を明らかにする目的で、建設省土木研究所、同京浜工事事務所、東京都土木技術研究所、東京大学生産技術研究所虫明研究室及び住都公団南多摩開発局の5機関によって流出試験地が設けられ、昭和59年まで水文観測がなされてきた。このうち、住都公団が中心となって観測してきた4試験地（別所、長池、永山、車橋）の①流出率、②洪水到達時間、③流出係数についての検討成果を、第29回水理講演会において報告した(*1)。本報では、現在実用に供されている洪水流出モデルについて、これら試験地におけるパラメーターと都市化によるその相異（変化）について、宅地開発において講じられる雨水流出に係わる防災対策を念頭において研究した成果とこれを他の試験地における既往成果と比較した結果を報告する。

2 流出試験地の概要

流出試験地は多摩丘陵に位置し、三浦層群に属する平山砂層、連光寺互層及び稲城砂層と、これを不整合におおう御殿峠礫層、オシ沼砂礫層、下末吉層、多摩ローム層、武蔵野ローム層などの洪積統で構成されている。

火山灰質粘土層と連光寺泥層が難透水層をなし、その上部の武蔵野ローム層、御殿峠礫層及び稲城砂層が帯水層となっている。急峻な地形のため武蔵野ローム層の保存はよくない。

本報では、前報で対象とした4試験地のうち、洪水時の流量データに難のある長池を除く3試験地を対象とした。

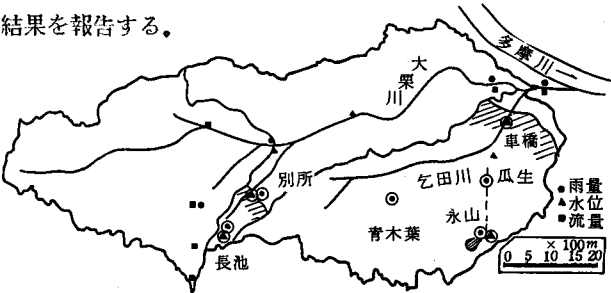


図1 流出試験地の位置

表1 対象試験地の特徴・諸元

要素 試験地	流域の性格		流域 面積 (km ²)	流路 長 (km)	流路 勾配	斜面 勾配	切・盛土 面積率 (%)		市街化率 (%)		不透水域 面積率 (%)	
	規模	市街化度					切土	盛土	S45	S58	S45	S58
永山	ミクロ	市街地	0.028	0.6	1/47	1/47	60	40	100	100	42	54
別所	メソ	自然	0.925	2.08	1/2.8	1/2.8	—	—	7.2	44.0	18	37
車橋	マクロ	開発途上	13.47	6.85	1/31	1/31	34.3	65.7	9.8	73.5	19	37

(注) 切土には盛土以外の土地を含む。

3 解析対象出水

解析対象出水としては各試験地ともに、①出水の規模、②出水の継続時間、③流出波形のピークの数から

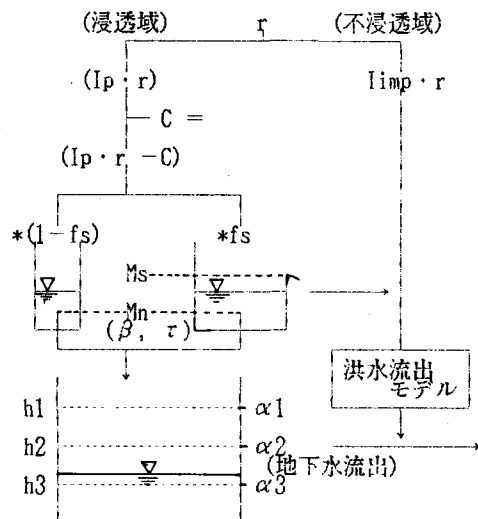
みて、色んなタイプの出水が含まれるよう、永山試験地はS46年～S58年の11出水、別所試験地は観測精度に難のあるS53年以降を除くS46年～S52年の9出水、車橋流域はS47年～S54年の7出水を選定した。別所試験地については当該期間内において造成工事は殆ど着手されていない。

4 有効降雨モデル

前報では、ひとめ雨量 (Σr) と直接流出高 (Σq_d) との関係が基本流出率 (f_0) と一次付加流出率 (f_1) 及び一次遷移雨量 (R_c) によって表わせることを示し、 f_0 は流域の直接流出域面積率 (別所, 長池試験地では河道沿いの沖積地や沼沢地の面積率に等しく、車橋, 永山試験地では不浸透域面積率 (l_{imp}) に等しい) に等しいことを示した。

さらに、虫明, 岡, 小池が示すように永山試験地と別所試験地における浸透域不飽和帯水分増加量 (ΔM) がひとめ雨量 (R) が R_c よりやや小さい60mm程度まではほぼ R に等しい(*2)ことから、 f_1 が浸透域における表面流出発生のみによる寄与と考えることができる。

そこで、ここでは前報で示した浸透域飽和流出率 (f_s) を使い、安藤, 虫明, 高橋が長池試験地と永山試験地について日単位と時間単位の水収支から、浸透域からの流出を不飽和帯と地下水帯の2つのタンクとして表現した(*3)と同様のモデルを援用して、有効降雨モデルを図2に示すタンクモデルとして表わした。即ち、降雨の増大に応じて浸透域において、



r : 降雨量, l_p : 浸透域面積率, l_{imp} : 不浸透域面積率, C : 樹冠遮断量 ($C=0.2 \cdot r$), f_s : 浸透域飽和流出率, M_s : 飽和容量, M_n : 最小容量, $*$: 乗ずることを示す

図2 タンクモデルを用いた有効降雨モデル

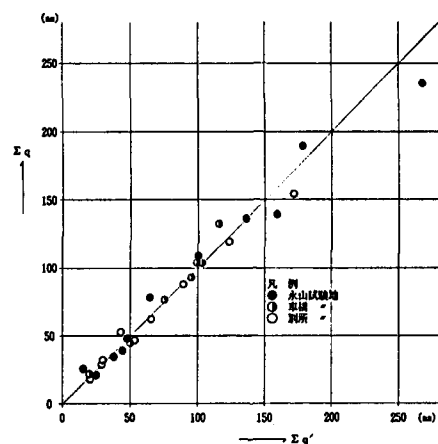


図3 タンクモデル型有効降雨モデルによる総流出高の実測値 (Σq) と計算値 ($\Sigma q'$) との比較

f_s に対応する面積から飽和容量 (M_s) を超過した水分量に相当する表面流出が発生するものとした。

このモデルを用いて日単位で年間の流況を再現した結果から、解析対象出水初期の浸透域不飽和帯の水分量を与えて、同じモデルを用いて10分単位 (別所, 車橋試験地) もしくは 2.5分単位 (永山試験地) の計算によって得られた総流出高を実測値と比較したところ、図3に示すように両者はほぼ等しいことが示された。

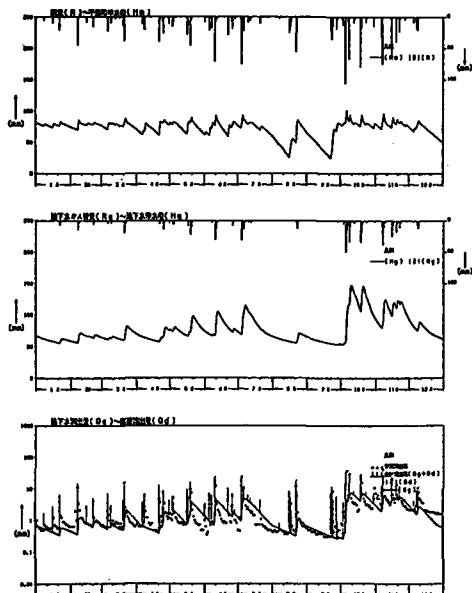


図4 タンクモデルによる流況の再現 (車橋試験地)

流域の定数 ($M_s, M_n, \beta, \tau, h_1, h_2, h_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) の値は、永山試験地については安藤らの成果(*3)を用い、別所試験地については同じく安藤らの長池試験地における成果(*3)を援用した。但し、 M_n と M_s の値を各々 150mm, 180mmとした。車橋試験地については虫明らが提案している不飽和帯の土壌の水分保持特性から M_n と M_s の値を設定し、地下水帯 Tanks の定数は流出高の低減部を片対数紙にプロットして得られる勾配から $\alpha_1 \sim \alpha_3$ を設定し、試算により $h_1 \sim h_3$ の値を設定した。

実用的な見地からはこのような Tank モデルを用いず洪水初期の不飽和帯水分量 (M_0) を推定する必要がある。そこで、対象出水の ($M_s - M_0$) と降雨開始迄の 2 週間について N 日間の日雨量との重相関関係をみたところ $N=10$ を境に、 $N > 11$ となると急に相関度が高くなることがわかった。参考までに 14 日間の日雨量 $R_1 \sim R_{14}$ との重相関関係式は下式のようにになった。

$$M_s - M_0 = a_0 + a_1 \cdot R_1 + a_2 \cdot R_2 + \dots + a_{14} \cdot R_{14} \quad (1)$$

$a_0 = 55.1, a_1 = -1.06, a_2 = -1.10, a_3 = 5.23, a_4 = 0.639, a_5 = -0.572, a_6 = 2.10, a_7 = -30.5, a_8 = 2.39, a_9 = -0.498, a_{10} = -1.78, a_{11} = 14.7, a_{12} = -8.40, a_{13} = -74.1, a_{14} = 3.25$

ここに、 M_s ; 飽和容水量 (mm), M_0 ; 出水直前日の不飽和帯水分量 (mm), R_i ; 出水 i 日前の日雨量 (mm/日), $a_0 \sim a_{14}$; 係数

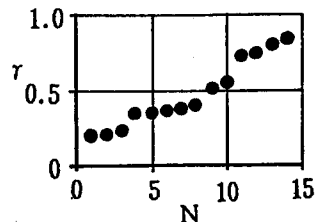


図5 降雨開始前 N 日間の日雨量と ($M_s - M_0$) との重相関係数

本検討では資料数 (27出水) が少ないことから、 M_0 の推定手法については今後さらに検討する必要がある。

5 斜面流出モデル

斜面流出モデルとして①貯留関数法、②準線形貯水池法、③等価粗度法をとりあげた。基本式は次の通り

(1) 基本式

①貯留関数法	②準線形貯水池法	③等価粗度法
$S = k \cdot q^p \quad \dots\dots\dots (2)$	$S = k \cdot q \quad \dots\dots\dots (4)$	$h = k \cdot q^p \quad \dots\dots\dots (8)$
$re - q = dS/dt \quad \dots\dots\dots (3)$	$re - q = ds/dt \quad \dots\dots\dots (5)$	$\partial h / \partial t + \alpha q / \alpha x = re \quad \dots\dots\dots (9)$
ここで、 S ; 貯留量 (mm), q ; 流出高 (mm/hr), re ; 流入量 (mm/hr), k, p ; 定数。	$k = tc/2 \quad \dots\dots\dots (6)$ $tc = C \cdot A^{0.22} \cdot re^{-0.35} \quad \dots\dots\dots (7)$ ここに、 S, k, q は貯留関数法と同じ。 re ; 有効降雨強度 (mm/hr), tc ; 洪水到達時間 (hrs)。 A ; 流域面積 (km ²)。	雨水流がManning 則に従うとすると、 $k = (N/I^p)$, $p=0.6 \quad \dots\dots\dots (10)$ ここに、 h ; 雨水流の水深 (mm), q ; 単位斜面幅当たりの流量 (m ³ /s), re ; 有効降雨強度, k, p ; 定数, N ; 等価粗度 (m ^{-1/3} · s), i ; 斜面勾配

(2) モデルの最適パラメーターと流域条件

上記 3 手法について、解析対象の各出水の再現性が最も高いパラメーターを試算により検討した。さらに、流域の条件として流域面積 (A)、市街化面積率 (U) 及び不浸透域面積率 (I_{imp}) をとり上げ、最適定数との相関関係を検討した。再現性の評価には、相対誤差 (Et)、ピーク誤差 (Ep)、二乗誤差 (Eq) の 3 つを用い、ピーク流量の 20% 以上の流量について誤差を最小とするパラメーターを調べた。

$$Et = \sum |q - q_p| / q_p, Ep = \sum |q_p - q_{p0}| / q_{p0}, Eq = \sum |q - q_p|^2 / q_p^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

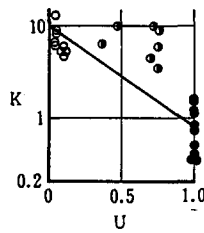
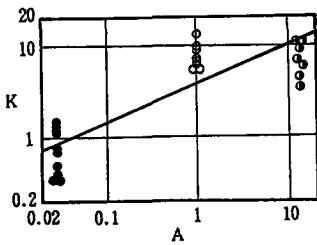
ここに、 q ; 計算流出高, q_p ; 実測流出高, p はピーク流量を示す添字。単位は mm/hr。

実績と計算によるハイドログラフを重ね合わせた結果、全般に Eq を最小にするパラメーターを用いた場合の再現度が最も高いと判断されたことから、以下は Eq を最小とするパラメーターについて述べる。

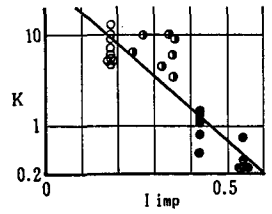
① 貯留関数法

パラメーター k と p とは相互に従属する関係にあること、 k と流域面積とは高い相関関係にあること、 k は都市化により小さくなる傾向があることなどが指摘されている(*4)。 p の値は 0.5~0.6 の範囲で用いられることが多いことから、ここでは p を 0.6 に固定して k を中心に検討した。

k の値は上記流域の 3 条件のいずれとも高い相関を示すが、特に流域面積 (A) 並びに不浸透域面積率



凡 例
● 永山試験地
● 車橋
○ 別所



(1) $k = 3.73 \cdot A^{0.414}$ (16) (2) $k = 11.2 \cdot 10^{-1.04 \cdot U}$ (17) (3) $k = 39.8 \cdot 10^{-3.51 \cdot l \text{ imp}}$ (18)
 $r = 0.847$ $r = 0.789$ $r = 0.882$

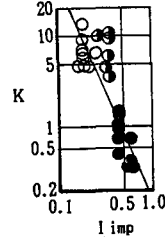
(l imp) との相関が高い。重相関関係では次のような関係が得られる。いずれも相関係数0.95程度を示している。

$k = 0.561 \cdot A^{0.272} \cdot l \text{ imp}^{-1.51}$ (12)

$k = 19.1 \cdot A^{0.237} \cdot 10^{-2.30 \cdot l \text{ imp}}$ (13)

$k = 2.24 \cdot A^{0.339} \cdot U^{-0.444}$ (14)

$k = 7.96 \cdot A^{0.292} \cdot 10^{-0.621 \cdot U}$ (15)



(4) $k = 0.158 \cdot l \text{ imp}^{-2.40}$ (19)
 $r = 0.832$

図6 貯留関数法のパラメータ k の値と流域条件との単相関関係

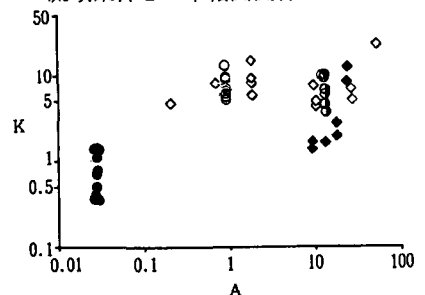
佐合らは自然流域において k の値は A の $0.4 \cdot p$ 乗に比例することを示している(*5)が、上記重相関関係の A の指数は 0.24 ~ 0.34 であり、この結果と大きく隔っていない。また、同じく $10^{-0.8 \cdot U}$ に比例することも示しているが、(14)式の指数は $-0.62 \cdot U$ あり、大きな隔たりはない。吉野らの示した k ~ A 相関図及び k ~ U 相関図(*4)中に本検討の値をプロットすると図7, 8のようになり、このことはこの図上からもうかがえる。

② 準線形貯水池法

準線形貯水池法は角屋らによる洪水到達時間の半経験式と実績の有効降雨強度曲線とから tc を決定し、吉野が示した k ~ tc 関係から算定される k の値を用いる方法で、定数 C については角屋ら(*6)建設省土木研究所(*7)により土地利用用途毎の標準値が提案されている。

本法は通常、流域を土地利用用途別に区分し、各用途毎に特徴的な C の値を用いて算出した流出高を合成して流域の流出高とする。ここでは、前報で示した流域別の C の値(別所試験地(自然; 135); 車橋試験地(開発途上); 65; 永山試験地(市街地); 35)から用途毎に C の値を設定し、用途毎に C の値を与えて流出高を合成する通常の方法と、用途別面積を重みとする C の加重平均値を流域全体に適用して流出高を算出する方法とのハイドログラフを比較した。山林・畑地と市街地とがある車橋流域を対象とし、ピーク流出高が 2.0 を超える比較的規模の大きい出水の中から 1 山、2 山、多山の 3 タイプの出水を対象としたところ流出波形は殆ど同じであった。

土地利用を洪水流出の面から評価するという本法の開発目標から、地目別に C の標準値が提案され、地目別流出計算結果を合成



◇ 自然域 全国流出試験地の値
◆ 市街化域
● 永山試験地
● 車橋
○ 別所

図7 k の値と流域面積との関係(*4に加筆)

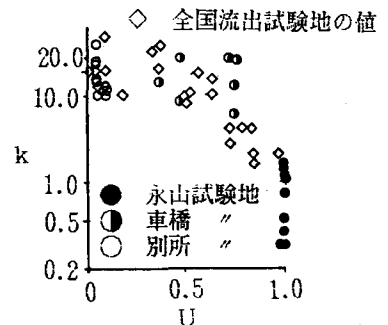


図8 k の値と市街化率との関係(*4に加筆)

するという方法が採られてきたと考えられるが、洪水流出の再現性からは必ずしもこのような方法を用いる必要はないと判断される。

そこで、各出水の再現性が最も高いC の値と流域の条件との相関関係をみたところ、図9に示すように市街化率 (U)とも不浸透域面積率(Iimp)とも高い相関関係のあること

がわかった。

これら4式についてみると、市街地 100% (不浸透域面積率40~70%に相当する)の流

表2
地目分割モデルと
流域一括モデルの
計算に用いた Cの
値

用途	C の値
山 林	135
畑	135
市街地	35
造成地	42~50
全流域	65

域では、市街化率 (U)を用いる場合はC の値は 130~140 と評価されるのに対して、不浸透域面積率を用いる場合はC の値は 180~40 と評価される。また、山林・畑地面積が 100 % (市街化率 0 %) の流域では、市街化率(U)を用いた場合のC は 720と評価され、不浸透

域面積率(Iimp)を用いた場合、山地流域でも 5~15%程度の直接流出域のあることを考慮してIimpを10%とすると、C の値は 930と評価される。いずれの式についても山林・畑地が 100%の流域についてのC の値はこれまで提案されているC の標準値に比しやや大きく、吉野らが全国の流出試験地について示したC の値(*4)に比較しても大きい。但し、市街地 100%の流域についてのC の値は同様な比較から (たとえば *9)はば妥当な値と評価される。従って、両式は主として開発途上流域及び市街地について適用されるものと判断される。

③ 等価粗度法

等価粗度法は洪水流出現象を様な斜面の流れとして物理的に計算する方法で、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(*8)や建設省土木研究所(*7)の標準値が得られている。また、吉野らは全国流出試験地のN の推定値から市街化率 (U)を用いて、N とU との間に $N=1.3 \cdot 10^{-2.1 \cdot U}$ という相関関係のあることを示した(*4)。

ここでは、N とU 及び不浸透域面積率(Iimp)との間の相関関係を検討したところ図9(1)(2)のような関係が得られた。

図9(1)中にはN とU との相関について、吉野らが示した図に本検討で得られた値をプロットしてある。同図から、ここで得られたN の値は吉野らが示した値の範囲にあること、ここで得られた相関式も吉野らが示した相関式に近似していることがわかる。

(22), (23)式ともに、開発途上流域~市街地流域については標準とされている値とはほぼ同じ値を与えるが、市街化の割合が低い流域では標準とされている値に比しやや大きな値を与える。たとえば市街化率 0 %の山林・畑地流域においては、(22)式ではN の値が 1.9と評価され、(23)式では直接流出域率を10%とするとN の値は 3.0と評価される。これらの値は角屋らが示した山林地の標準値 0.6~ 1.2、及び土研が示した山林の標準値 0.7に比し著しく大きく、水田のN の標準値 (N=2 ~3)に相当する。

従って、上述の準線形貯水池法のC の値と同様、上記(22), (23)式は開発途上~市街地に限定して適用すべきものと判断される。

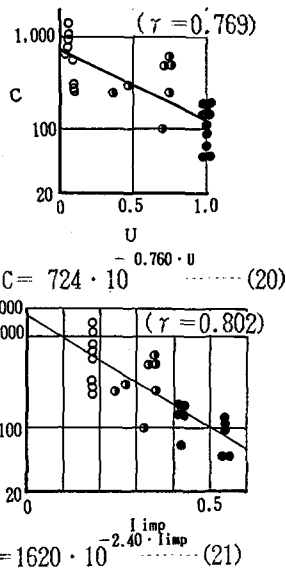
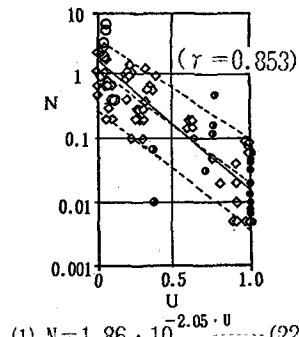


図9 Cの値と流域条件



◇ 全国流出試験地の値
● 永山試験地
● 車橋
○ 別所

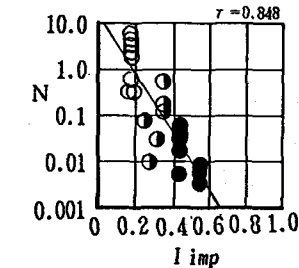


図10 Nの値と流域条件

6 まとめ

本検討の対象3試験地について得られた洪水流出の有効降雨モデル並びに斜面流出モデルのパラメータと既往成果との比較から、次の諸点が明らかとなった。

(1) 有効降雨モデル

虫明らが示した、浸透域のひとあめ雨量と不飽和帯水分増加量が自然流域と市街化流域とを問わず、ひとあめ雨量がある一定量に達するまではほぼ等しいことから、前報で示した一次付加流出率が浸透域からの表面流出に起因するものと推定し、タンクモデル型の有効降雨モデルを提案した。洪水流出における有効降雨は不飽和帯水分量の初期条件量(M_0)に依存する。 M_0 は洪水発生前10日間以上の日雨量と高い相関がある。

(2) 斜面流出モデルのパラメータ

- ① 貯留関数法のパラメータ k 、 p のうち、 p を0.6と固定した場合、 k の値は流域面積(A)と市街化面積率(U)もしくは同じく A と不浸透域面積率(I_{imp})を用いて式(13)、(15)のように表すことができる。
- ② 準線形貯水池法を用いる場合、 C の値を地目別に与えて地目別に流出計算して得られた波形を合成した波形と、地目別面積を重みとする C の加重平均値を流域全体の C の値として与えて計算した波形とは殆ど同じ。
- ③ 準線形貯水池法のパラメータ C の値は市街化面積率(U)及び不浸透域面積率と相関度が高く、図9の(20)及び(21)式の関係がある。但し、標準とされている値と比較した結果、自然流域の値がやや大きく算出されるところから、両式の適用は開発途上流域から市街化流域に限定した方が良い。
- ④ 等価粗度法のパラメータ N の値は上記 C の値と同様、図10の(22)及び(23)の関係がある。但し、上記 C の値と同様な理由で両式の適用は開発途上流域から市街化流域に限定した方が良い。

当地域の15年間に亘る水文観測は竹内俊雄先生と木下武雄先生に負うところが大きい。両先生には本報告の進行に当たって多大な御指導をいただいた。本報告が両先生をはじめとして、東京都土木技術研究所の和泉主任研究員、守田研究員の両氏と建設省土木研究所水文研究室の吉野室長、同吉谷研究員並びに建設省京浜工事事務所の方々の協力によるものであることを付記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 志子田、友納、虫明、柳原、八尋；多摩ニュータウン流出試験地における流出特性と都市化によるその変化、第29回水理講演会論文集、1985.2
- 2) 虫明、岡、小池；降雨時の表層不飽和帯水分の自然林地と都市化域における挙動の相違、第27回水理講演会論文集、1983.2
- 3) 安藤、虫明、高橋；丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響、第25回水理講演会論文集、1981.2
- 4) 吉野、吉谷、堀内；都市流出モデルのパラメータ標準化と評価、第29回水理講演会論文集、1985.2
- 5) 佐合、利根川、吉野；実用的な流出解析の適用手法に関する研究、第27回水理講演会論文集、1983.2
- 6) 角屋、福島；中小河川の洪水到達時間、京都大学防災研究所年報19-B-2、1976
- 7) 橋本、長谷川；土地利用を評価するモデル、土木技術資料19-5、1977
- 8) 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、1976
- 9) 佐藤、和泉；都市中小河川の流域規模と洪水到達時間、第30回水理講演会論文集、1986.2