

丘陵地の中小河川流域の都市化に伴う洪水流出の変化
Change of Flood Runoff in Hilly Basins by Urbanization

東京大学工学部 正員 高橋 裕
東京都土木技術研究所 正員 和 泉 清
東京大学工学部 正員 安藤 義久
東京大学大学院 ○学生員 金尾 健司

1. はじめに

近年、大都市周辺の丘陵地では、ニュータウン建設等に伴い、大規模な都市化が進行しつつある。このような都市化は、丘陵地の中小河川流域の洪水流出機構を変化させ、ひいては、都市水害の原因ともなることが指摘されている。したがって、流域の都市化に伴う洪水流出機構の変化を評価することは工学的に重要な課題のひとつとなっている。金尾・高橋・安藤¹⁾は東京都の南西部に位置する多摩ニュータウン区域内の中小河川流域を対象として、都市化に伴う洪水流出特性の変化について若干の考察を加えた。本稿では、前報をふまえて同じ流域を対象として都市化に伴う洪水流出の変化について直接流出特性、単位図、およびR R L法による解析を行なう。

2. 対象流域の概要

対象とする流域は、東京都の南西部に位置する多摩丘陵の大栗川流域と乞田川流域である。多摩丘陵では1963年(昭和38年)から始まったニュータウンの建設を契機に大規模な宅地開発が進行し、乞田川流域はその大半が宅地開発され、都市化が進行した。それに対し、大栗川上流域はニュータウン計画区域内に含まれながら、未だ宅地開発は進行していない。図1に対象流域の概要を示し、表1に対象流域の土地利用状況を示す(出典:参考文献2))。表1の土地利用状況によると、大栗川上流域に位置する大栗川橋流域は自然流域と考えられ、乞田川の車橋流域は都市流域と考えられる。流域面積は、大栗川橋流域が14.05Km²、車橋流域が12.81Km²であり、ほぼ同程度である。両流域とも流域の出口に1ヶ所ずつ雨量観測所と水位観測所が存在し、東京都土木技術研究所によって一貫した水文観測が行なわれている。

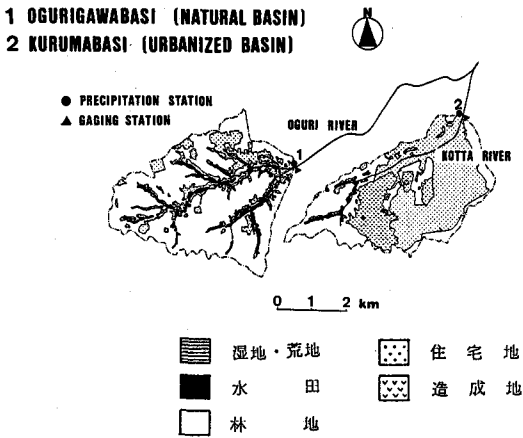


図1 対象流域の概要

表1 対象流域の土地利用状況
(1977年現在)

(a) 大栗川橋流域		
土地利用	面積 Km ²	面積率 %
水 田	1.11	7.9
畑・荒地	1.42	10.1
造成地	1.21	8.6
住宅地	2.33	16.6
山 林	7.98	56.8
合 計	14.05	100.0

(b) 車橋流域		
土地利用	面積 Km ²	面積率 %
水 田	0.0	0.0
畑・荒地	0.40	3.1
造成地	4.36	34.0
住宅地	5.05	39.4
山 林	3.00	23.4
合 計	12.81	100.0

3. 直接流出特性

ここでは、一雨雨量とそれに対する直接流出量の関係を検討する。図2には、大栗川橋流域と車橋流域における一雨雨量Pと直接流出量Dの相関図を示す。

3-1 自然流域における直接流出特性

安藤・虫明・高橋³⁾は多摩丘陵の自然小試験流域において直接流出が谷部の飽和域から生ずることを示した。さらに、Ando and Takahasi⁴⁾は、多摩丘陵の自然流域では、一雨雨量 P と直接流出量 D の間には次に示すような関係が成り立つことを指摘している。

$$D = \begin{cases} f_0 P & P < P_1 \\ f_0 P + f_1 (P - P_1) & P \geq P_1 \end{cases} \quad (1)$$

(1)式の示す意味は、一雨雨量が P_1 をこえると谷部の飽和域のうち直接流出を生起させる領域の面積率が f_0 から $(f_0 + f_1)$ に拡大することであると考えられている。^{注1)}大

栗川橋流域に(1)式を適用した結果、 $f_0 = 0.10$ 、 $f_1 = 0.23$ 、 $P_1 = 50 \text{ mm}$ という値が得られた。

3-2 都市流域における直接流出特性

都市流域における一雨雨量 P と直接流出量 D の関係については、山口ら⁵⁾は、降雨強度が浸透域の浸透能を上回らない場合には次式のように表わせると指摘している。

$$D = \text{Imp} (P - D_{\text{max}}) \quad (2)$$

ただし、 Imp ：不浸透面積率、 D_{max} ：不浸透域における最大凹地貯留量である。また、米田・和泉⁶⁾は、東京都内の台地部の目黒川流域では、流出率 f と不浸透面積率 Imp の間に次式のような相関があることを指摘している。

$$f = \frac{D}{P} = \frac{(P - D_{\text{max}}) \cdot \text{Imp} - 6.87}{P} = \text{Imp} - K \quad (3)$$

ただし、 D_{max} ：不浸透域の凹地貯留量、 $K = (D_{\text{max}} \cdot \text{Imp} + 6.87) / P$ (P は $30 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$ 程度の一連降雨量)である。(2)、(3)式は、都市流域での直接流出が主に不浸透域から生起することを示したものであるが、車橋流域についても同様な関係が成立すると考え、求めたのが次式である。

$$D = 0.58 (P - 2) \quad (4)$$

なお、 D および P の単位は mm である。ところで、車橋流域の場合には、 $\text{Imp} < 0.58$ であり(表1参照)、不浸透域以外からもかなりの量の直接流出が生じていることになる。この主な原因は、流域内に浸透性のきわめて低い造成地^{注2)}が広く存在するためであると考えられる。造成地の面積と実際の洪水の流出率を勘案すると、造成地の流出率は0.7程度であろうと推定された。

4. 単位図法による洪水流出解析

都市化に伴う洪水流出の変化の現象把握のために、まず、単位図法による解析を行なう。

図3には、大栗川橋流域と車橋流域の単位図を示す。これによると、都市化に伴い、単位図のピーク配分率が約2倍、ピーク遅れ時間と基底長が約 $1/2$ になっており、ハイドログラフが尖鋭化することがわかる。図9・図10には単位図法による洪水流出の再現計算の結果を例示するが、再現性は比較的良好である。

5. RRL法による洪水流出解析

次に、都市化に伴う洪水流出の変化の流域特性との対応を検討するために、流域の土地利用と雨水排水システムとの対応づけが可能なRRL法を用いて、自然

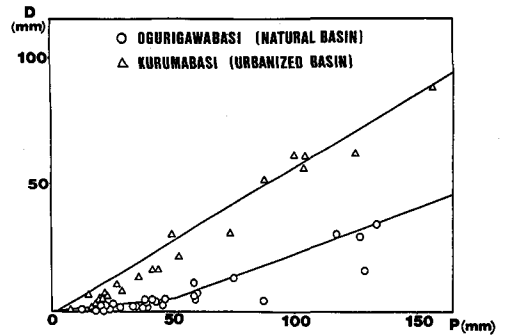


図2 一雨雨量 P と直接流出量 D

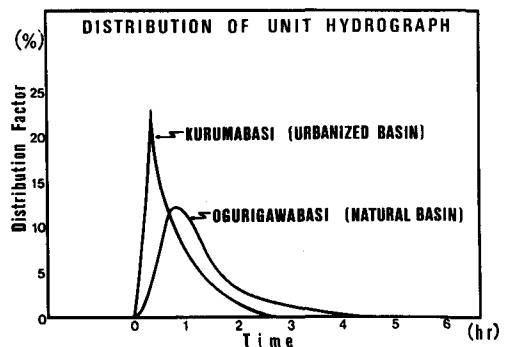


図3 単位図の配分図

流域と都市流域の洪水流出解析を行なう。

5-1 自然流域におけるRRL法による洪水流出解析

大栗川橋流域の1973年から1978年までの洪水のうち一雨雨量が40mm以上の洪水を選んで、RRL法により洪水流出解析を行なった。RRL法は、主に雨水排水システムの整備された都市域での洪水流出解析に適用される方法である^{7), 8)}が、ここではこの方法を拡張して自然流域に適用することを試みた。

(1) 有効降雨の算定

前述した直接流出特性に基いて有効降雨の算定を行なう。すなわち、(1)式に基き、降り始めからの累積雨量がP₁未満の場合は降雨のうち一定率f₀で有効降雨を算定し、累積雨量がP₁以上になるとこの比率をf₀から(f₀+f₁)に変化させる。また、先行降雨の影響を考慮して洪水前日の日雨量をあらかじめ累積雨量に加算しておく。

(2) 等到達時間域の算出

次に、RRL法では、流域のある点に生じた有効降雨がどのくらいの時間を経て流域の出口に到達するかという到達時間が問題となる。洪水到達時間は、河道への流入時間と河道内を流下する流下時間の2つに大別されるが、既に述べた通り、多摩丘陵の自然流域では河道周辺の谷部で直接流出が生起すると考えられるので、ここでは、河道内の流下時間のみを考慮することとした。洪水到達時間については、角屋・福島⁹⁾は、Kinematic wave法の考え方に基き、流域条件などをパラメータとした定式化を試みている。本稿では、これと同様の考え方に基き、横流入のある河道でのマニング型の流れを仮定して、流下時間t_cを次のように定式化した。

$$t_c = C \cdot L^{0.6} \cdot I^{-0.3}$$
 (5)

ただし、L：河道長、I：河床勾配、C：定数である。Cは粗度や有効降雨強度の関数であるが、本稿では、一応、定数として取り扱うこととし、実際の洪水の到達時間の平均値からC = 0.07 (min・m^{-0.6})と決定した。

等到達時間域の算出は(5)式により行なった。まず、河道に沿って直接流出の主な生起領域である谷地を地形図(1万分の1)上に抽出した。さらに、地形図から河道に沿って河道長Lと河床勾配Iを判読し、(5)式により流域出口までの到達時間を求め、計算時間間隔(10分)毎の等到達時間域を算出した。このようにして求めた等到達時間域図を図4に示す。また、等到達時間域とその面積率を図5および表2に示す。

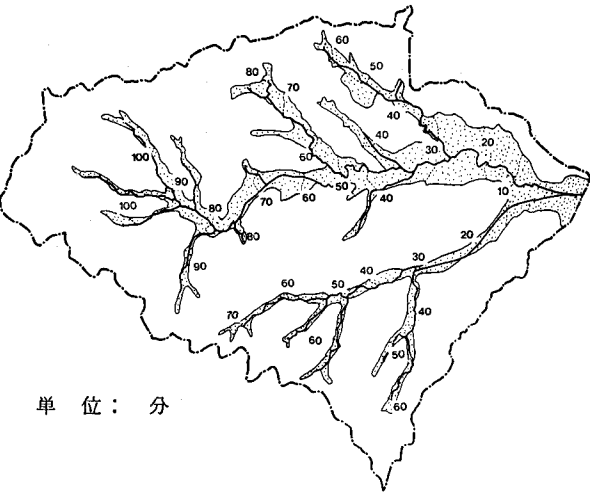


図4 等到達時間域図(大栗川橋流域)

表2 等到達時間域(大栗川橋流域)

到達時間(分)	面積(ha)	面積率(%)
0 ~ 10	23.2	9.7
10 ~ 20	17.4	7.3
20 ~ 30	30.3	12.7
30 ~ 40	31.3	13.1
40 ~ 50	29.9	12.5
50 ~ 60	25.1	10.5
60 ~ 70	28.9	12.1
70 ~ 80	17.0	7.1
80 ~ 90	16.5	6.9
90 ~ 100	11.5	4.8
100 ~ 110	7.9	3.3
合 計	239.0	100.0

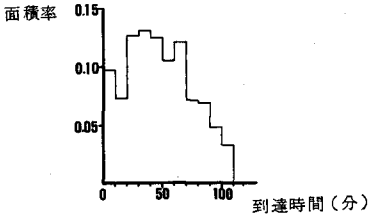


図5 等到達時間域面積率(大栗川橋流域)

(3) 貯留量一流出量曲線 (S-Q 曲線) の推定

RRL法では、流域の貯留の効果を考慮してモデルの計算の中にS-Q曲線を導入している。ここでは、降雨終了後の洪水の減水部より、S-Q曲線を決定した。ただし、観測値以上の流量に対しては、実測ハイドログラフと計算ハイドログラフが一致するようにS-Q曲線を推定した。このようにして求めたS-Q曲線を図6に示す。

(4) ハイドログラフの計算とその結果

RRL法の計算手順は、基本的には、単位図法のそれと同一である。まず、(1)で算定した有効降雨と(2)で求めた等到達時間域面積率を用いて、単位図法的に重ね合わせを行ない、流入ハイドログラフを求める。次に、(3)で求めたS-Q曲線を用いて次式を数値計算で解き、計算ハイドログラフを求める。

$$\frac{ds}{dt} = I - O \quad (6)$$

ただし、S：貯留量、I：流入ハイドログラフ、O：計算ハイドログラフ、t：時間である。

このようにして得られた計算ハイドログラフを実測値と対比して図9に示す。計算値は、比較的よく実測値と対応していることがわかる。

5-2 都市流域におけるRRL法による洪水流出解析

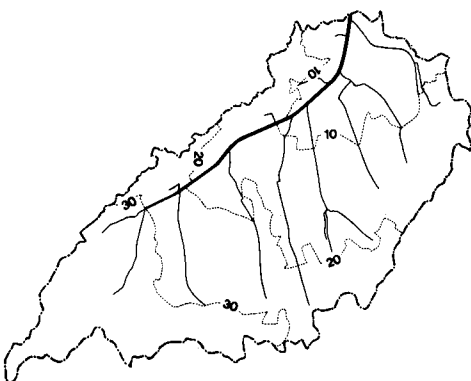
RRL法は、本来、雨水排水システムの整備された都市流域の洪水流出解析として開発されたものであり、従来より都市流域にこの方法を適用した研究が行なわれている^{9),10)}。ここでは、車橋流域を対象として、1978年と1979年の一雨雨量が40mm以上の洪水について、RRL法による洪水流出解析を行なった。

(1) 有効降雨の算定

車橋流域の有効降雨は主に不浸透域と造成地に降った雨水より成ると考えられる。不浸透域については、土地利用の工種別にモデルを設定して工種別の不浸透面積率が求められている²⁾。表3には、その値を示す(出典：参考文献2)。また、造成地については、前述したとおり、流出率を一律に0.7と仮定した。

(2) 等到達時間域の算出

車橋流域の排水系統は、分流式下水道の雨水管と改修された乞田川本川より成る。雨水管については、



単位：分

図7 等到達時間域図(車橋流域)

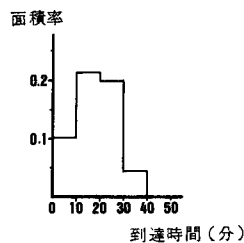


図8 直接流出域面積率

表3 工種別不浸透面積率

土地利用の工種	不浸透面積率%
独立住宅	46
中高層住宅	43
学校	13
公園・緑地	24
公共施設・低層集合住宅	71
道路	100
造成地	70

(注) 造成地は流出率

表4 直接流出域面積

到達時間(分)	直接流出域面積(ha)	流域面積に対する面積率(%)
0~10	131.9	10.3
10~20	274.1	21.4
20~30	254.9	19.9
30~40	57.6	4.5
合計	718.5	56.1

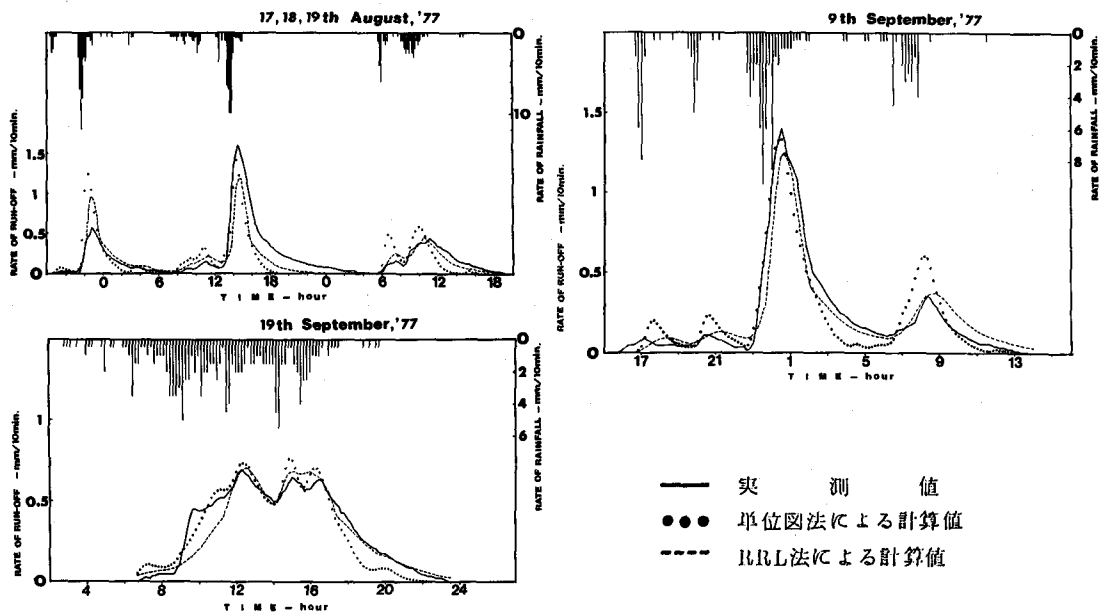


図9 洪水流出解析の結果 (大栗川橋流域)

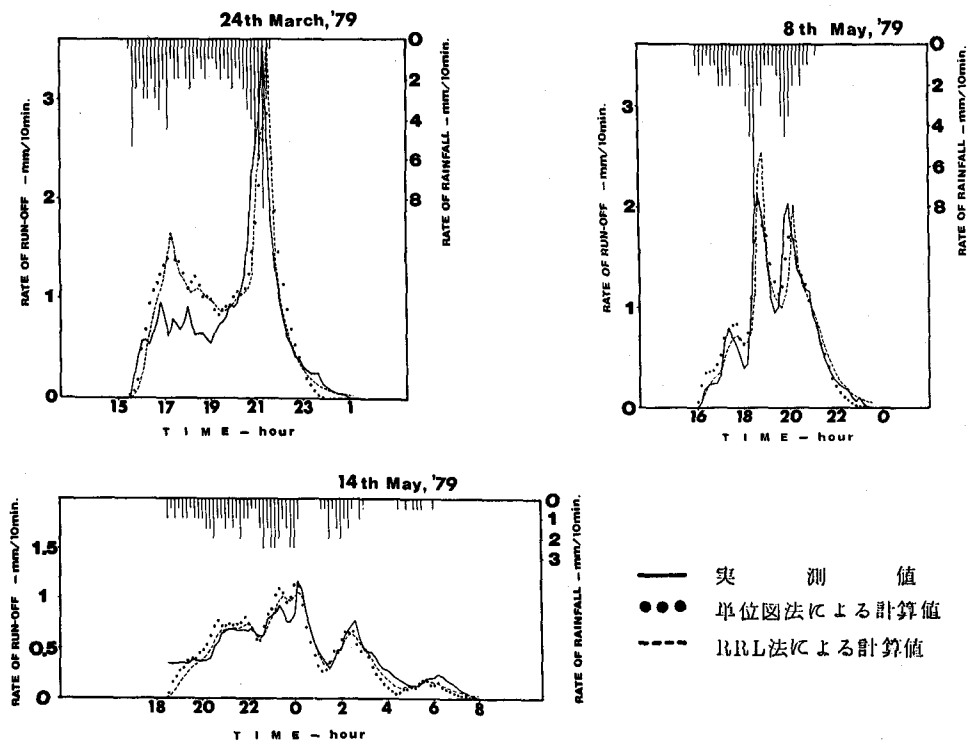


図10 洪水流出解析の結果 (車橋流域)

マニング式を用いて $n = 0.013$ と固定して満管流速を求め、乞田川本川については、マニング式を用いてその地点で 20 mm/hr に相当する流量が流れた場合の流速を求め、これらの流速で流下距離を除いて到達時間を算出した。このようにして求めた等到達時間域図を図 7 に示す。

次に、図 7、土地利用基本図、および空中写真を参照しながら、等到達時間域毎に土地利用の工種と面積を判読し、表 3 に示した工種別の不透透面積率（造成地の場合は流出率）を用いて、等到達時間域毎の直接流出域面積の算定を行なった。その結果を図 8 および表 4 に示す。

(3) S-Q 曲線の推定とハイドログラフの計算

S-Q 曲線は、自然流域の場合と同じ方法によって推定した（5-1 参照）。その結果を図 6 に示す。

計算手順も自然流域の場合とほとんど同じであるが、流入ハイドログラフを求める際には実測降雨と(2)で求めた等到達時間毎の直接流出域面積率を用いて単位図法的に重ね合わせを行なった。

RRL 法による洪水流出解析の結果を図 10 に示す。計算値は、比較的よく実測値と対応している。

6. 結 論

多摩丘陵の自然流域と都市流域の洪水流出特性の比較により、得られた主な成果を以下に列記する。

- (1) 一雨ごとの雨量と直接流出量の相関図により、都市化に伴い直接流出率は約 0.3 から 0.6 へと約 2 倍に増大することがわかった。これは、自然流域では飽和流出域（水田・湿地など）から直接流出が生起するのに対して、都市流域では不透透域と造成地などから直接流出が生起するためと推察された。
- (2) 単位図の流出波形は、都市化に伴い、ピーク値が約 2 倍、基底長が約 $1/2$ となり、尖鋭化する。
- (3) 流域の土地利用と雨水排水システムとの対応づけが可能な RRL 法を用いて、自然流域と都市流域の洪水流出解析を行なったところ、単位図法と同程度の再現性が得られた。したがって、RRL 法により、中小河川流域の都市化による洪水流出の変化を評価しうることが示せた。なお、RRL 法を自然流域へ適用する場合に飽和流出域から直接流出が生起すると考えて解析を行なった点が本研究の特色である。

注 1) 直接流出の生起領域が谷部の飽和域であることは、裏をかえせば、林地・畑などからは直接流出が生起しないことであり、参考文献 12) に示されている林地・畑の浸透能が極めて高い結果と符合している。

注 2) 多摩ニュータウン内の造成地の浸透能が低いことは参考文献 12) で示されている。

謝 辞 / 本研究を進めるに当って、貴重な資料を提供された、住宅都市整備公団南多摩開発局の稲田隆一氏、および東京都南多摩新都市開発本部建設計画部の明山功氏に深く謝意を表します。

参考文献 / 1) 金尾・高橋・安藤：多摩丘陵の中小河川流域の都市化に伴う洪水流出特性の変化、

第 36 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 2 部，1981

2) 東京都土木技術研究所・三井共同コンサルタント：大栗川・乞田川流域調査報告書，1979

3) 安藤・高橋・虫明：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

4) Y. Ando and Y. Takahasi : A hydrological model of hillslope basins,
J. of Fac. of Eng. Univ. of Tokyo, 1981.

5) 山口・松原・山守：都市流出調査一降雨損失機構の検討一，土木技術資料，Vol. 13, No. 10, 1970.

6) 米田・和泉：不透透域率と流出率，東京都土木技術研究所年報，1978.

7) L.H. Watkins: The design of urban sewer systems, Road Research Laboratory
Paper No. 55, Dept. of Scientific and Industrial Research, London, HMSO, 1962.

8) M.L. Terstrip and J.B. Stall : Urban runoff by Road Research Laboratory
method, HY 6, J. of ASCE, 1969.

9) 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，第 19 号 B-2, 1976.

10, 11) 山口・松原・山守：都市域からの降雨流出調査 第 2・3 報，土木技術資料，Vol. 14, No. 11,
Vol. 15, No. 7, 1972, 1973.

12) 安藤・岡本・金尾・菅：土地利用別の浸透能に関する現地実験と考察，第 26 回水理講演会論文集。