

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

Runoff Characteristics of Pilot Basins in Tama Newtown
and Urbanization Effects

住宅・都市整備公団 正 員 志子田 典 生
住宅・都市整備公団 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 八 尋 康 雄

1. はじめに

多摩ニュータウンを流域とする多摩川右支川大栗川・乞田川流域は、住宅・都市整備公団と東京都によって、昭和44年以来大規模な宅地造成事業が実施されている地域であり、地形・地質構造及び土地利用や不透水域面積が急激に変化してきた。当地域では、流域の開発の着手と同時に建設省土木研究所水文研究室、同省京浜工事事務所、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¹⁾、住宅・都市整備公団南多摩開発局²⁾の手によって水文観測が継続されてきた。その観測成果は、流域の都市化に伴う流出機構の変化を示す貴重なデータであると考えられる。

昭和59年度当初より、これら15年間の観測データを取りまとめるため、上記5者によって検討会が持たれてきた。本報告は、住宅・都市整備公団が中心となって観測を実施してきた乞田川流域のデータを用い、主として流域面積1㎢以下の小流域における流出特性と、都市化によるその変化を研究したものである。

研究をすすめるにあたっては、宅地開発の現場担当者が講じる雨水流出に係わる防災対策を念頭において実用的な見地から検討を加えた。

2. 試験流域の概要

試験流域一帯は多摩丘陵と呼ばれ、三浦層群に属する平山砂層、連光寺互層および稲城砂層と、これを不整合でおおう御殿峠礫層、おし沼砂礫層、下末吉層、関東ローム層などの洪積統で構成されている。表層の地質断面は模式的に図2のように表わされる。火山灰質粘土層と連光寺泥層が難透水層をなし、その上部の新时期ローム層、御殿峠礫層および稲城砂層が帯水層となっている。

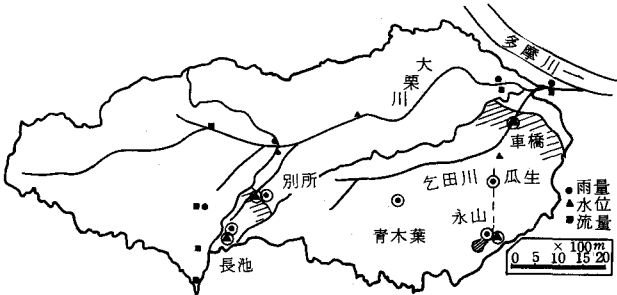


図1 試験流域位置図

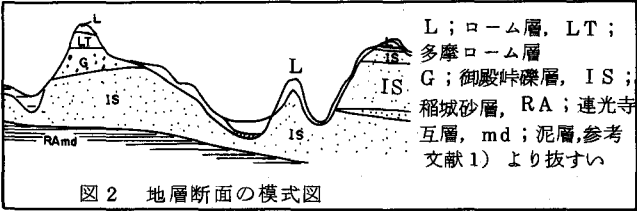


図2 地層断面の模式図

試験流域は、図1に示す4流域を対象とし観測データは、表1の4水位観測所、5雨量観測所を用いた。

別所流域と長池流域が自然流域を代表し、永山流域が都市流域を代表している。さらに車橋上流域は、乞田川のほぼ全流域

表 1 解析対象観測所一覧

試験流域	対象雨量 観測所	解析対象期間 (昭和年)																対 象 洪水数
		44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	
別所	別所	—																24
長池	長池																	17
永山	永山	—	—	—	—	—	—											24
車橋	別所・青木葉 永山・瓜生	—	—	—	—	—	—											12

破線 観測期間 ; 実線 本検討における解析期間

に相当し、流域の開発による影響を経年的にみることができる。(図3)

本報告では、流域の都市化を表わす指標として、市街化面積率と不透透域面積率を使用した。前者は土地利用別の面積のうち、宅地・造成地・公共用地の面積が全流域面積に占

める割合であり、後者は屋根、舗装面、河川・沼沢地、水田などの雨水が地下に浸透しないと考えられる面積の割合である。不透透域面積の算定は、土地利用別に表3の基準値を乗じて求めた。各基準値は、当地域における既往の実測値³⁾を使用した。造成地の値は、市街地浸透域の浸透能に対する造成地の浸透能の割合として、新たに設定した。

表 2 試験流域の地形量

試験流域	地形量	流域面積 (km ²)	河道長 (km)	河道勾配	斜面勾配	不透透域面積率 (%)
別所		0.925	2.08	1/31	1/2.8	18
長池		0.044	0.20	1/67	1/3.5	10
永山		0.028	0.16	1/47	1/47	36~48
車橋		13.470	6.85	1/73	1/31	25~35

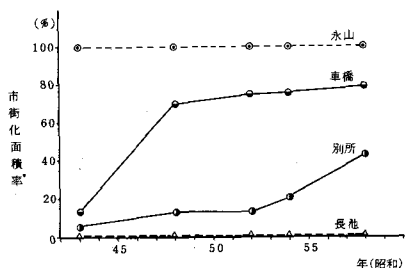


図3 市街化面積率の経年変化

3. 流出率の検討

洪水の流出率 f は、総直接流出高 ΣQ_D の総雨量 ΣR に対する比で表わされる。

$$f = \Sigma Q_D / \Sigma R$$

本検討では、水平分離法を用いて基底流出量をカットすることにより直接流出高を算定し、図4に示す総雨量と流出率の関係図が得られた。

流出率の値は大きくばらついているが、各試験流域ごとにみた場合に、次のような特徴が指摘できる。

- ① 自然流域(別所)と開発途上流域(車橋)では、総雨量の増加に伴い、流出率が増加している。
- ② 自然流域でも、長池では、総雨量の大小にかかわらず、流出率は0.1付近に分布している。これは、同流域の不透透域面積率(池と周辺湿地の面積率)にほぼ等しい。

- ③ 市街化流域である永山では、総雨量と流出率に相関はみられないが、不透透域面積率の増加する昭和53年を境として、流出率が増加している。

高橋らは⁴⁾山地流域において、ひとあめ雨量 ΣR と直接流出高 ΣQ_D との関係が、基本流出率 f_0 、一次付加流出率 f_1 、一次遅移雨量 R_1 によって表わされ、 f_0 が、流域の飽和流出域の面

表 3 土地利用別不透透域面積率 (%)

土地利用	水田	畑・荒地	山林	造成地	独立住宅等	中高層住宅	学校	公園・緑地	道路
不透透域面積率	100	0	0	40	46	43	63	24	100

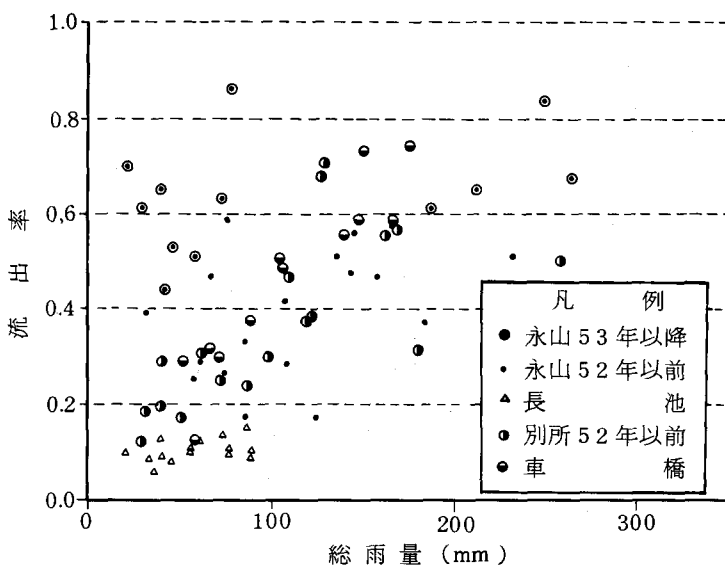


図4 流出率と総雨量の相関図 (永山)

積率に等しいことを示した。(図5)

$$\Sigma Q_D = \begin{cases} f_0 \cdot \Sigma R & 0 \leq \Sigma R < R_1 \\ f_0 \cdot \Sigma R + f_1 \cdot (\Sigma R - R_1) & R_1 \leq \Sigma R \end{cases} \quad (2)$$

当試験流域について、総流出高と総雨量の係に、飽和流出域の面積率を不透流域面積率として上記の考え方を適用したところ、次のことが明らかとなった。(図6)

- ① いずれの試験地においても、降雨初期の流出率は、不透流域面積率に等しい。(基本流出率)
 - ② 降雨量がある値に達すると、流出率は上方に折線を示す。
 - ③ 流出率の折線は、自然流域(別所)と開発途上流域(車橋)では明瞭であるが、市街化流域(永山)では不明瞭である。
- 一次付加流出率に、浸透域の面積率を考慮すれば、浸透域単独の流出率 f_p を求めることができる。ここに I_{imp} ; 不透流域面積率。

$$f_p = \frac{f_1}{1 - I_{imp}} = \frac{f - f_0}{1 - I_{imp}} \quad (3)$$

図6の結果を、(3)式に適用した結果が表4である。

浸透域の流出率は、自然流域(別所)と開発途上流域(車橋)で、0.80~0.84であるのに対して、市街化流域(永山)では、0.44~0.50と低い値となった。別所流域の浸透域の殆んどが山林であって、永山流域のそれが、棟間の芝生地であることを考えると、この結果は不合理である。

このようになった原因の1つとして考えられることは、永山の観測所が流出量の全体を把握できていない可能性である。降雨規模が大きくなると下水管に流入できない雨水は、そのまま道路上を流下して、下流で下水管や河川に排水される。永山では、流量観測を下水管内の水位を測定することにより求めているため、上のような現象が起きた場合、流出量の一部が把握できないことになる。市街化流域での流量観測の一つの問題点を指摘しているものと考えられる。

表 4 浸透域の流出率算定表

観測所名		不透流域面積率(%)	基本流出率(f_0)	浸透域飽和雨量(mm)	飽和流出率(f)	一次付加流出率(f_1)	浸透域飽和流出率
別所	52年まで	18	0.18	80	0.84	0.66	0.80
長池	55年~58年	10	0.10	-	-	-	-
永山	49年~52年	36	0.36	75	0.64	0.28	0.44
	53年~58年	48	0.48	40	0.74	0.26	0.50
車橋	47年~54年	24-35	0.33	85	0.89	0.56	0.84

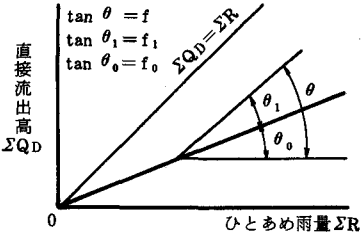


図 5 ΣQ_D と ΣR の関係図

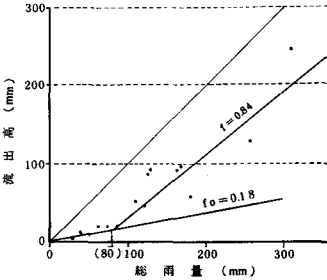


図 6(1) 流出高と総雨量の相関図 (別所)

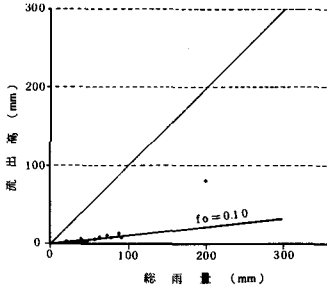


図 6(2) 流出高と総雨量の相関図 (長池)

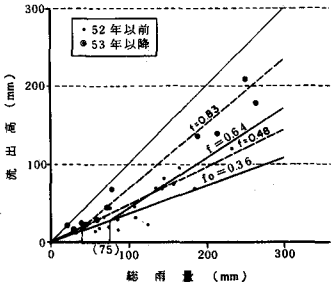


図 6(3) 流出高と総雨量の相関図 (永山)

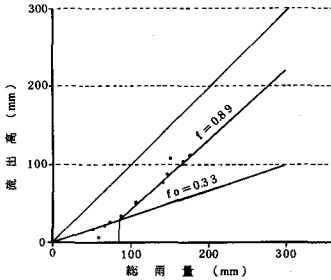


図 6(4) 流出高と総雨量の相関図 (車橋)

4. 洪水到達時間の検討

石原・高棹⁵⁾は、Kinematic Wave 理論より、矩形斜面上の洪水到達時間が、図7のように定義されることを明らかにした(本報告ではTp法と呼ぶ)。一方、遅れ時間Tgの2倍で表わす方法も提案されている(同様に2Tg法と呼ぶ)。

当試験流域について両手法による洪水到達時間を比較したところ、多少ばらつきはあるもののほぼ等しい値となった。(図8)

(1) 洪水到達時間と降雨特性

ここでは、降雨特性として次の指標を採り上げて、洪水到達時間との関係を調べた。

- | | |
|------------|--------------|
| ① 降雨の全体的規模 | ひとあめ雨量 |
| ② ピーク降雨の規模 | 到達時間内降雨強度 |
| ③ ピーク前の雨量 | 到達時間前降雨量(図7) |

いずれの試験地についても、上記の指標の中では到達時間内降雨強度が、洪水到達時間との相関をはっきり示している。

試験地間について比較してみると、自然流域(別所)と開発途上流域(車橋)では、負の相関が明らかであるが、市街化流域(永山)では洪水到達時間は2.5分～7.5分の間に分布して、降雨強度との相関は小さいようである。

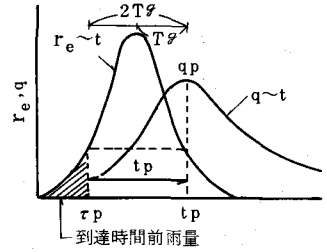


図7 kinematic wave 法によるTpの定義

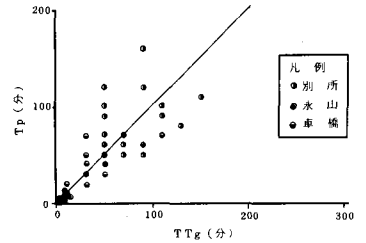


図8 洪水到達時間(Tp法と2Tg法)の比較図(永山)

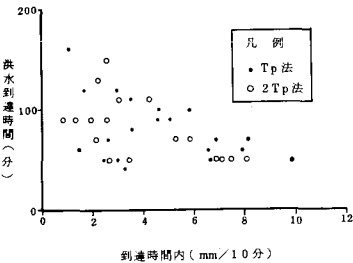


図9 洪水到達時間と降雨強度の相関図(別所)

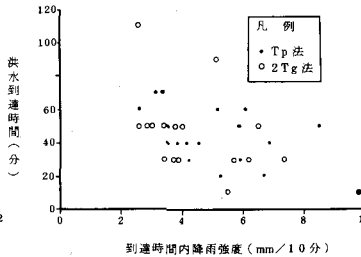


図10 洪水到達時間と降雨強度の相関図(車橋)

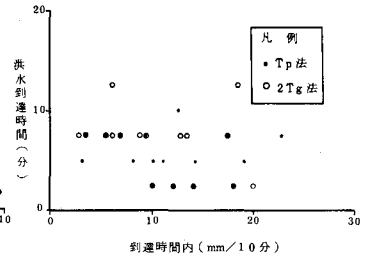


図11 洪水到達時間と降雨強度の相関図(永山)

(2) 洪水到達時間を説明する指標

角屋らは、石原・高棹の考えに、河道長と流域面積に関わる地形則を導入して、洪水到達時間が次式で表わされることを示した。

$$Tp = C \cdot A^{0.22} \cdot re^{-0.35} \quad (4)$$

ここに、Tp; 洪水到達時間(分), A; 流域面積(km^2), re; 洪水到達時間内有効降雨強度(mm/hr), C; 土地利用別の定数

筆者らは、洪水到達時間を決定する因子に表5の8因子を採り上げ、これを4つの特性にまとめることによって、当試験流域全体を表わすものとして、次式を得た(重相関係数0.76)

$$Tp = 25500 \cdot Imp^{-1.86} \cdot A^{0.23} \cdot re^{-0.22} \quad (5)$$

さらに、(4)式の流域面積および有効降雨強度の関数形を固定した場合の式として(6)式(重相関係数0.75)を得、これより(4)式の定数

表5 洪水到達時間を説明する指標

洪水到達時間	降雨特性	到達時間内有効降雨強度 $re(mm/hr)$ 到達時間内降雨強度 $rp(mm/hr)$
	流域規模	流域面積 $A(km^2)$ 河道長 $L(km)$
	勾配	河道勾配 I 斜面勾配 I
	開発状況	不透透地面積率 $Imp(\%)$ 市街化面積率 $U(\%)$

Cが、不透透域面積率Iimpによって(7)式のように表わされることが明らかとなった。

$$T_p = 15500 \cdot I_{imp}^{-1.62} \cdot A^{0.22} \cdot re^{-0.35} \quad (6)$$

$$\therefore C = 15500 \cdot I_{imp}^{-1.62} \quad (7)$$

(7)式に、試験流域の不透透域面積率を適用して、C値として、次の値が得られた。

- ①別所（自然） 135
- ②車橋（開発中） 60
- ③永山（市街地） 35

実用上からみれば、(6)式の有効降雨強度のかわりに、降雨強度を使うことができれば便利である。そこで、降雨特性の指標として、到達時間内降雨強度rpを用いて(8)、(9)式を得た。

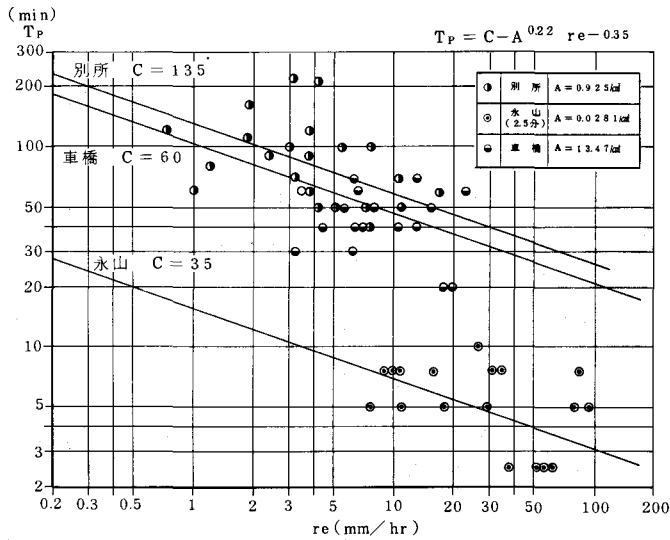


図12 Kinematic Wave理論による洪水到達時間(Tp)～有効降雨強度(re)図

$$T_p = 75000 \cdot I_{imp}^{-1.90} \cdot A^{0.21} \cdot r_p^{-0.42} \quad (\text{重相関係数 } 0.81) \quad (8)$$

$$T_p = 1250 \cdot U^{-0.65} \cdot A^{0.25} \cdot r_p^{-0.41} \quad (\text{重相関係数 } 0.77) \quad (9)$$

両式ともに有効降雨強度を使わないにもかかわらず、重相関係数は(6)式と変わらない。これは、不透透域面積率Iimpまたは市街化面積率Uが、有効降雨強度との間に相関を有しているため、降雨強度を用いても、どちらかの都市化を表わす指標を使えば、有効降雨強度のもっていた特性を補うことができるためである。

5. 流出係数の検討

流出係数fpは、合理式における洪水到達時間内降雨強度rpとピーク流出高qpの関係を表わす。

$$f_p = q_p / r_p \quad (10)$$

図13は、前節で算定した2種の洪水到達時間に対応する流出係数を比較したものである。両手法による流出係数は、洪水到達時間のばらつき(図8)に比較して、かなりよく一致している。この理由は、同一降雨では、到達時間が変化しても、降雨強度が大きく変わらないためである。(図14)

流出係数と降雨特性との関係では、ひとめ雨量、到達時間前雨量、到達時間内降雨強度の3指標のうち、自然流域(別所)と開発途上流域(車橋)において、到達時間前雨量との間に相関がみられる。(図15・16) この理由は次のように考えられる。自然域では浸透域が多く、浸透域では、降雨量の増加によって浸透能力低下する。したがって、表面流出成分が増加し、流出ピークが増大する。一方、市街化流域では、浸透域の占める割合が少なく、土壌水分の大小に影響される成分が少ないため、

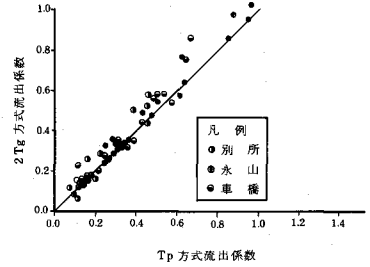


図13 2Tg方式とTp方式による流出係数の比較図 (永山)

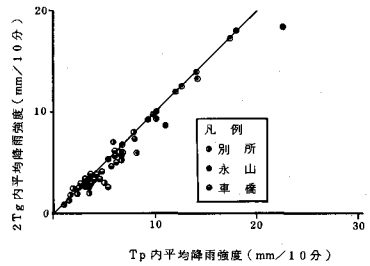


図14 到達時間の算定方式の違いによる降雨強度の比較 (永山)

このような相関が明らかとならない。

市街化流域では、流出率の場合がそうであったように、不透透域面積率が増加する昭和53年を境として流出係数が増加している。

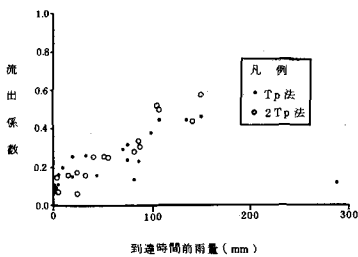


図15 流出係数とピークまでの雨量の相関図 (別所)

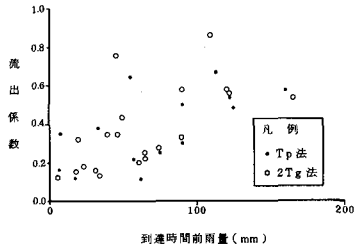


図16 流出係数とピークまでの雨量の相関図 (車橋)

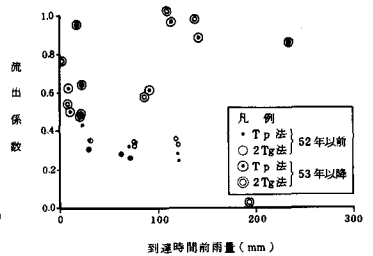


図17 流出係数とピークまでの雨量の相関図 (永山)

6. まとめ

本検討の結果、多摩ニュータウンにおける流出特性に関して、次の諸点が明らかとなった。

- ① 流出率は、不透透域面積の増加に伴って増加する。(図4)
- ② 流出率は、基本流出率と1次付加流出率に分けられ、前者は流域の不透透域面積率に等しい。(図6)
- ③ Kinematic Wave 理論に基づいて洪水到達時間を表わす式(4)の定数Cは、不透透域面積率を指標として、(7)式のように表わされる。
- ④ 洪水到達時間の推定式は、到達時間内降雨強度を使って、実用上(8)式または(9)式として表わされる。
- ⑤ 流出係数を実測データから算定する場合は、到達時間の推定法としてTp法と2Tg法のどちらを用いても大差ない。(図13)
- ⑥ 自然流域の流出係数は、到達時間前雨量との相関が高い。(図15)
- ⑦ 市街化流域の流出係数は、不透透域面積の増加に伴って増加する。(図17)

当地域における水文観測は、建設省土木研究所の竹内俊雄先生によって開始され、その後、木下武雄先生の御尽力もあり、多摩ニュータウン全域にわたる観測として、現在まで15年間継続されてきた。両先生には、本報告の進行にあたって、多大な御指導をいただいた。最後に、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、守田の両氏、建設省土木研究所水文研究室の吉野室長・吉谷研究員、同京浜工事事務所の方々の御協力によって、でき上がったことを付記し、あわせて感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 虫明, 安藤, 小池; 多摩丘陵における水循環機構と都市化によるその変化に関する研究; とうきゅう環境管理財団助成研究; 1981。
- 2) I kuse, Mimura, Takeuchi and Matsushita; Effects of Urbanization on Runoff Characteristics; IAHS; No 117; Dec.1975。
- 3) 東京都土木技術研究所; 大栗川・乞田川流域調査報告書; 昭和54年3月。
- 4) 高橋, 安藤, 有賀; 山地河川流域の直接流出特性とそれに対する土地条件の効果; 第26回水理講演会論文集; 1982。 2。 「年3月。
- 5) 石原, 高棹; 単位図法とその適用に関する基礎的研究; 土木学会論文集第60号別冊3-3; 昭和34
- 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号B, 昭和51年9月。
- 7) 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; 1982