

都市化による流出の変化

建設省土木研究所 木 下 武 雄

吉 野 文 雄

橋 本 健

○米 田 耕 蔵

1. まえがき

最近の都市への人口の集中はいろいろな問題を提起している。そのひとつに河川流域における大規模な宅地造成の結果としての流出現象の変化があげられる。これまでの流出解析の多くは、流域の物理的な性状や流水の運動法則を無視して、流域への入力としての降雨と流域からの出力としての流出を比較し、この両者の関係のみに着目して行なわれてきており、流出現象の生ずる場の物理的な特性と流出現象との関係について詳細な検討が行なわれていなかった。流域が都市化することは流出現象の生ずる場の特性が変化することであって、その変化によって生ずる流出の変化の様相を明らかにすることが、河川改修計画の面から必要とされるようになってきている。流域諸要素の変化が流出現象に及ぼす影響のなかでも、植生要素の流出に対する影響については、試験流域を中心に研究が進められてきたが、都市化の影響については、都市化が徐々に進行するということもあって、試験流域での研究が行なわれ始めたのは比較的新らしい。土木研究所では都市小流域からの流出の研究の手はじめとして昭和39年より東京の武蔵野台地の北部を西から東へ流れる石神井川を試験流域に選び、継続して観測を行なってきた。その後、都市化が急激に進行している多摩ニュータウンに試験地を増設し研究を行なっている。これらの流出試験地での成果は、すでにいくつかの機会に発表されているが、ここではこれらの成果を総合し、都市化による流出の変化を現象論的に明らかにすることを試みた。

2. 都市化の水文学的意義

2.1 都市化要素の分類

(I) 水文気象学的要素

- (イ) アルベード：都市化によって地表状態が変化すれば当然アルベードは変化する。
- (ロ) 比熱・熱容量：都市化は、地表の一部を熱しやすくさめやすいもので覆ったと言えそうである。これは気温に鋭敏に影響をおよぼし、熱収支を変える。さらに蒸発にも大きな影響を持つであろう。
- (ハ) 熱の発生：都市で用いられるエネルギーの大部分は熱となる。都市は熱の発生源である。
- (ニ) 植生：植物は降雨を遮断する。植物の蒸発散作用は重要であるが、実測値に乏しい。

(II) 流出に関する要素

- (イ) 浸透能：自然状態では地表は腐植土など多孔物質に覆われ、根は深くまで地中にはいっている。畑などは耕作によって地表土壌は大きな空隙率をもつ。これが都市化されれば、浸透能の減少を来す。
- (ロ) 浸透域：都市化すれば、建物・舗装によって地表の浸透域が減少することは論をまたない。

- (イ) 表面貯留：自然状態としては到るところ凹地貯留がある（大は湖・沼・田から土塊の間にいたるまで）。都市化はそれらを積極的に排除しようとする。埋立整地などみなこのように凹地貯留を減じる。さらに次項とも関係するが、表面流下に対し自然状態は抵抗が大きいので、表面に水が滞留する効果も多いが、都市化はそれらをなくするように働く。
- (ロ) 表面粗度：自然状態では地表の凹凸、草木などにより表面粗度は大きい。都市化すれば地表をできるだけ平らにするので表面粗度は著しく低下する。
- (ハ) 地下水：都市は用水源を地下水に求めることが多い。また地上の構造物の安定のため地下水を積極的に排除することもある。浸透能・浸透面積の減少も地下水の減少を引きおこす。
- (ニ) 河道貯留：都市内の河川のみではないが、人間活動の場を広げ、洪水の疎通をよくするために、はつとめて河道を直線化し、かつ、川幅を狭くする。これは河道内の貯留効果を著しく減ずる。
- (ホ) 河道粗度：上記(ニ)と関連して、都市河川では河道の粗度を低下させて、洪水の流下を速くする。
- (ヘ) エネルギーを加える：水田などを都市化した場合はポンプによる内水排除の必要性が増す。

（Ⅲ）都市環境の汚染

都市化による水・大気の汚染は注目されているが、水循環の過程を変化させる要素はあまり多くはない。ただ、水温変化、汚濁水面よりの蒸発の変化、水蒸気の凝結核の増加などである。

2. 水循環機構

水循環の過程と都市化要素の関連を表－1に示す。各項を追って説明しよう。

ⅰ) 水蒸気

都市化によるアルベード、比熱と熱容量・熱の発生・植生の変化・水と大気の汚染などが水蒸気の流れを変える。これらのうち高温化要素は飽和水蒸気圧を増加し、概して蒸発散を促進させる。

ⅱ) 降水

都市化によるアルベードの変化、熱の発生・水と大気の汚染などは降水の分布を変える。特に大気中の凝結核の増加は降水に影響を持つ。

ⅲ) 表流水

表－1 都市化の水文学的要素と水循環過程との関係

都市化の水文学的要素 \ 水循環過程		水蒸気	降水	表流水	地下水
(ⅰ) 水文気象学的要素	(イ)アルベード	○	○		
	(ロ)比熱熱容量	○			
	(ハ)熱の発生	○	○		
	(ニ)植生	○			
(ⅱ) 流出に関する要素	(イ)浸透能			○	○
	(ロ)浸透域			○	○
	(ハ)表面貯留			○	○
	(ニ)表面粗度			○	
	(ホ)地下水			○	○
	(ヘ)河道貯留			○	○
	(ト)河道粗度			○	
(ⅲ) 都市環境の汚染	(イ)エネルギーを加える			○	○
	(イ)水の汚染	○			
	(ロ)大気の汚染	○	○		

植生および1(II)流出に関する要素としてあげた全項目が関係する。都市化によりピーク流量の増大、洪水流出率（流出体積／総降雨量）の増大、流達時間の減少、低水流量の減少が生じる。

IV) 地下水

都市化による植生・浸透能・浸透域・表面貯留・地下水・エネルギーを加えるなどの影響は地下水を変化させる。植生を除外すればあとはすべて地下水を低下させる方向である。

3. 洪水の到達時間について

都市化された流域において河川計画をたてる場合の計画洪水流量の決定は、合理式で行なわれることが多い。この場合、洪水到達時間を決定することが必要である。

都市化した流域からの洪水到達時間は、自然流域でのものより短くなることが考えられる。自然状態の流域での洪水到達時間については、Linsley や Snyder⁶⁾、Chow⁷⁾、Kirpich⁸⁾ 等の公式があるが、都市流域の洪水到達時間については Anderson¹⁰⁾ の研究があげられる（表2）。

洪水到達時間は流域の形状に左右されることは勿論、降雨分布、降雨波形、流域の前期保湿度などによっても影響される。しかし、表面流は水流の運動法則に支配されるものであるので、斜面長や斜面勾配のような流域形状を代表する要素が洪水到達時間には支配的であると考えられる。表2に見られる諸公式もこの方向に沿ったものである。

表面流が水理学で常用されるマニング型の平均流速公式で運動するとし、水深を一定と仮定すると到達時間は $T_c = f(L/\sqrt{S})$ の形で表現されることになる。ここでは L は水流の流下径路長、 S は流下径路に沿う平均勾配である。ここでは、この考え方を流域全体にわたっての洪水流の到達時間に援用して検討することにする。

ここで採用した洪水の到達時間の実測値は降雨波形のピークから流出のピークまでの時間差であり L 、 S は表1のものと同じ量を表わす。図1は日本の諸河川で得られた資料をプロットしたものであって、洪水到達時間は各河川の実測資料を数個から十数個平均した値である。図1中では自然流域、開発途上の流域、都市流域、の三つに流域状態を分類して示してあるが、この分類の仕方は、流域地形図を見て決定したものであり、都市化指標を採りあげて分類したものではない。この曖昧さを除く意味で、表3に各河川の資料を掲載しておく。

表2 洪水到達時間についての経験式

発 表 者	公 式	摘 要
Linsley et. al.	$T_c = C \left(\frac{LL_c}{\sqrt{S}} \right)^n$	C, n は常数
Snyder	$T_c = C (LL_c)^{0.3}$	C は常数
Chow	$T_c = 0.005 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$	$L(m)$
Kirpich	$T_c = 0.00032 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$	$L(m)$
Anderson	$T_c = 0.0345 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.42}$	$L(m)$ 自然河川
"	$T_c = 0.0013 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.52}$	$L(m)$ 都市河川
中 安	$T_c = 0.27 L^{0.7}$	$L(km)$
東大愛知演習林	$T_c = 0.33 L^{0.63}$	$L(m)$

L : 流域最遠点から観測地点までの主流路に沿ってはかった距離

L_c : 流域の重心に最も近い河道上の点からの観測地点までの距離

S : 観測地点の標高と流域の最遠点の標高との差を L で割った勾配

図1からも見られるとおり、一般に都市化が進行するにつれて、洪水到達時間が短くなる傾向があることが指摘される。図中には表2に示された公式のいくつかを示してあるが、Chowの式は自然流域の観測資料を良く代表しているが、Kirpich式では流域の都市化による到達時間の相違を表現することができないと思う。Anderson式はほぼ妥当な結果を与えるものと考えられるが、直線の勾配が緩やかであるため $L/\sqrt{S}$ の値が大になるにしたがって観測値との差が大きくなる。ここで採用した

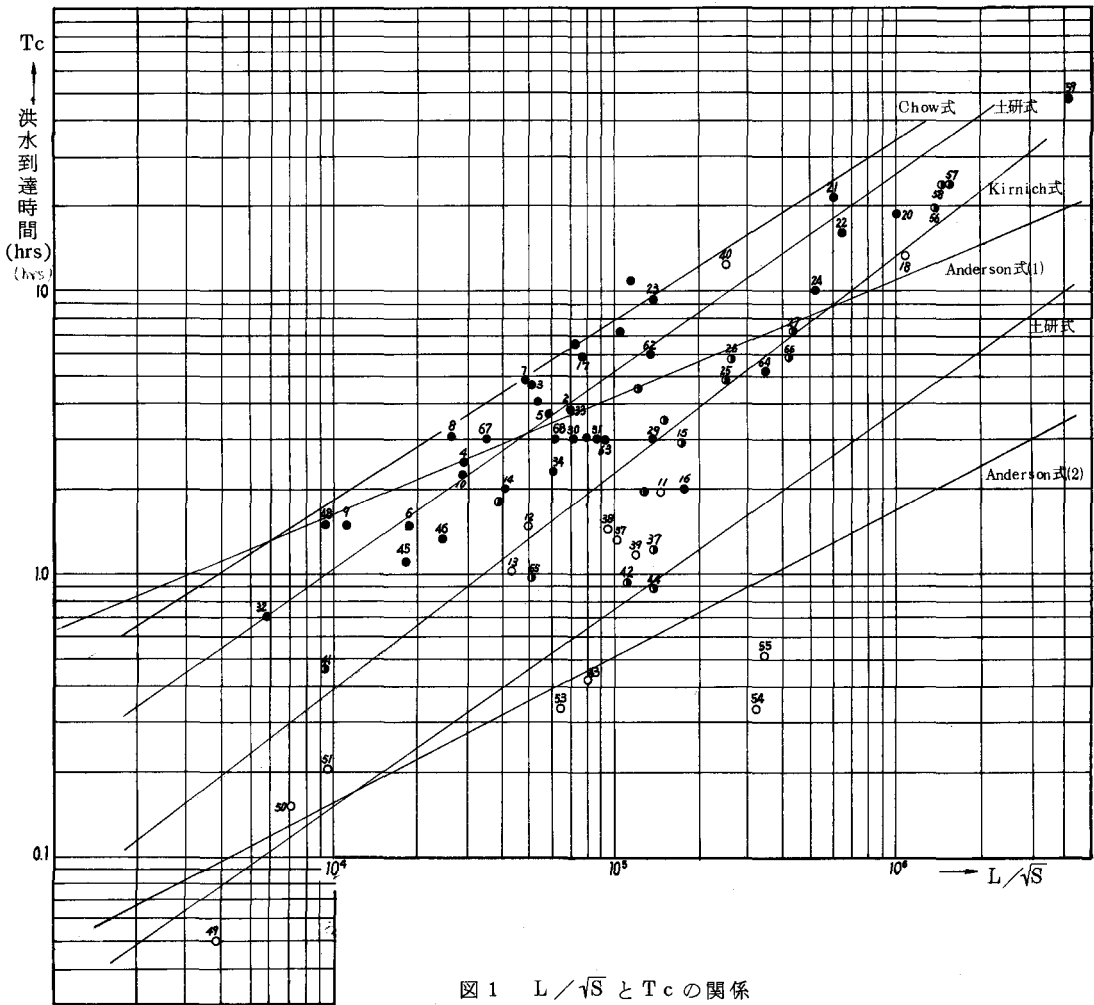


図1 $L/\sqrt{S}$ と T_c の関係

観測値は、流域面積が 0.1km^2 から 300km^2 程度のもので含んでいるが、流域面積の相違による $T_c \sim L/\sqrt{S}$ 関係の変化は認められない。また流域の地表状態が変化するにつれて、到達時間が自然流域のものから次第に都市流域のものに変化していくことが、図中の開発されつゝある流域からの資料によって示されている。図でもわかるとおり、プロットされた各観測値はかなりちらばっているが、筆者等は、都市流域と自然流域の到達時間を総括的に表現する経験式を求めた。

表3 洪水到達時間についての資料, N:自然流域, P:開発途上の流域, U:都市化流域

No	水系	河川	観測所	A	L	S	Tℓ	流域の 状態
1	十勝川	下音更上流		6.32	3.4	$\frac{1}{226}$	3	N
2		下流		10.74	4.6	$\frac{1}{230}$	4	N
3		中鹿追		9.80	5.2	$\frac{1}{98}$	4.7	N
4		北鹿追		2.88	3.9	$\frac{1}{57}$	2.5	N
5		ウオップ		33.20	12.0	$\frac{1}{25}$	3.7	N
6		シリクニ上流		10.20	6.3	$\frac{1}{8.6}$	1.5	N
7		下流		26.40	12.7	$\frac{1}{14.8}$	4.8	N
8		越中紋別		10.46	5.5	$\frac{1}{22.7}$	3.1	N
9		野塚		2.96	3.0	$\frac{1}{14.2}$	1.5	N
10		土幌上流		4.92	4.9	$\frac{1}{35}$	2.3	N
11	多摩川	平瀬川	上ノ橋	10.57	8.5	$\frac{1}{300}$	2.0	U
12			長沢	2.65	3.5	$\frac{1}{200}$	1.5	U
13			蔵敷	1.61	3.0	$\frac{1}{200}$	1.0	U
14	相模川	釜板川	宮前	1.84	3.5	$\frac{1}{100}$	2.0	N
15		永永池川	中河内	5.83	6.5	$\frac{1}{700}$	3.0	P
16	荒川	都幾川	唐子橋	161.4	32.8	$\frac{1}{110}$	5.2	N
17		中津川	中津川	151.1	14.3	$\frac{1}{30}$	5.8	N
18		芝川	八丁橋	65.0	22.0	$\frac{1}{2500}$	13.5	P
19	利根川	巴波川	中里	200.0	42.5	$\frac{1}{59}$	7.5	N
20		五行川	仙在	279.0	54.5	$\frac{1}{336}$	18.9	N
21		田川	大谷瀬	263.2	40.1	$\frac{1}{176}$	21.3	N
22		小野川	小野川	65.6	20.2	$\frac{1}{1000}$	16.0	N
23		園部川	小川	74.5	19.0	$\frac{1}{53}$	9.1	N
24		巴川	巴川	108.4	19.6	$\frac{1}{720}$	10.0	N
25	鶴見川	谷本川	千代橋	65.1	20.5	$\frac{1}{154}$	4.8	P
26		鶴見川	落合橋	99.2	22.1	$\frac{1}{139}$	5.8	P
27			綱島	177.6	30.5	$\frac{1}{198}$	7.2	P
28			末吉橋	223.2	34.5	$\frac{1}{208}$	8.3	P
29	旭川	砂川	瀬戸	93.4	17.5	$\frac{1}{52}$	3	N
30	太田川	太田川	立岩ダム	130.0	16.5	$\frac{1}{19}$	3	N
31		滝山川	王泊ダム	124.0	17.5	$\frac{1}{24}$	3	N
32			諸木	1.24	1.5	$\frac{1}{15}$	0.7	N
33	石狩川	輪厚川		23.96	11.0	$\frac{1}{40}$	3.7	N
34		音江別川		9.67	7.5	$\frac{1}{63}$	2.3	N
35	江の川	片岡川	信門橋	3.5	2.6	$\frac{1}{52}$	1.0	N
36		大土川	平和橋	19.0	8.75	$\frac{1}{21}$	2.0	N
37	荒川	新河岸川	柳瀬橋	18.1	9.4	$\frac{1}{120}$	1.3	P
38			昭和橋	6.9	7.2	$\frac{1}{170}$	1.6	U
39			柳原橋	23.5	13.1	$\frac{1}{110}$	1.2	U
40			新座大橋	29.1	14.9	$\frac{1}{230}$	10.3	U
41	大分川	一の瀬川	No.1	1.81	2.19	$\frac{1}{18}$	0.45	P
42	庄内川	植田川		17.90	6.87	$\frac{1}{235}$	0.9	P
43		山崎川		13.36	5.81	$\frac{1}{190}$	0.4	U
44		香流川		26.44	11.10	$\frac{1}{153}$	0.8	P
45	平城		山松No.1	1.92	2.0	$\frac{1}{81}$	1.1	N
46	New Town		渋谷No.2	2.56	2.7	$\frac{1}{82}$	1.3	N
47			渋谷No.3	1.91	1.9	$\frac{1}{73}$	1.0	N
48	筑川		釣取橋	6.37			1.5	N
49	千里						0.05	U
50	New Town						0.15	U
51							0.20	U
52	多摩川	大栗川	大栗川橋	14.67	7.0	$\frac{1}{100}$	1.7	N
53			千年	0.08	2.02	$\frac{1}{671}$	0.33	U
54		谷端川	下板橋	0.54	9.0	$\frac{1}{1250}$	0.33	U
55		桃園川	中野	0.46	9.3	$\frac{1}{1315}$	0.50	U
56	中川	綾瀬川	大門	5.0	25.0	$\frac{1}{3000}$	20	P
57		庄内古川	船渡橋	136.0	28.0	$\frac{1}{3000}$	24	P
58		元荒川	八幡橋	204.0	30.0	$\frac{1}{2500}$	24	P
59		中川本川	吉川	710.0	60.0	$\frac{1}{5000}$	28	N
60	荒川	石神井川	根付橋	47.98	34.4	$\frac{1}{500}$	1.5	U
61			上石神井	16.48	12.0	$\frac{1}{500}$	0.9	U
62	斐伊川	斐伊川	三成ダム	117.5	19.5	$\frac{1}{49}$	6.0	N
63		阿井川	阿井ダム	73.1	15.3	$\frac{1}{36}$	3.0	N
64	小瀬川	小瀬川	小瀬川ダム	135.0	25.7	$\frac{1}{48}$	2.0	N
65		渋田川	上流	7.2	5.0	$\frac{1}{100}$	1.0	P
66			下流	44.6	15.0	$\frac{1}{800}$	6.0	P
67	吉井川	小野田川	小瀬木	34.0	7.0	$\frac{1}{25}$	3.0	N
68		倉見川	黒木ダム	49.2	13.0	$\frac{1}{22}$	3.0	N

No	水 系	河 川	観測所	A	L	S	Tℓ	
	利根川	黒部川	睦 橋	22.6	5.3	$\frac{1}{189}$	6.5	N
		小野川	協力橋	14.2	5.0	$\frac{1}{500}$	10.7	N
		清明川	塙	19.5	6.2	$\frac{1}{282}$	7.0	N
	多摩川	大栗川	報恩橋	42.6	14.0	$\frac{1}{79}$	2.0	P
	天神川	小鴨川	小鴨4号 ダム	37.4	11.5	0.080	2.5	N

No	水 系	河 川	観測所	A	L	S	Tℓ	
	鶴見川	早瀬川	崖ノ大橋	26.3	12.5	$\frac{1}{141}$	3.5	P
		矢上川	一本橋	31.2	9.6	$\frac{1}{154}$	4.5	P
		鳥山川	鳥 山	8.2	4.2	$\frac{1}{76}$	1.8	P
	斐伊川	朝酌川	ガラガラ橋	21.5	5.8	0.0121	4.0	N
	高梁川	未政川	有 井	6.5	5.0	0.0040	2.5	N

都 市 流 域 $T_c = 2.40 \times 10^{-4} (\ell / \sqrt{S})^{0.7}$

自 然 流 域 $T_c = 1.67 \times 10^{-3} (\ell / \sqrt{S})^{0.7}$

洪水流出がマニング型の運動法則に従うものであり、水深一定と仮定すると、 $L/\sqrt{S}$ の指数は1になると考えられるが、筆者等の経験式では0.7位であって、1より小さい。都市流域と自然流域のものについて、この指数を等しくとったのは、流域が都市化することによってLもSも変化するが、これらの影響よりもむしろ表面流の流下速度がある割合で増加することによる影響の方が大であると推定したからであって、厳密な意味はない。

4. あとがき

多数の河川の洪水資料によって、洪水到達時間と洪水の低減特性を、流域特性との関連から検討してみた。今後さらに実測資料を増し、上述の諸関係を整理するつもりである。最後に建設省の各地建の流出試験地担当者の方々の御援助に謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 木下武雄，都市化による流出の変化，土木技術資料，9-9，1968
- (2) 水越三郎，尊田継明，都市域からの洪水流出計算，土木技術資料，8-9，1967
- (3) 木下武雄，都市開発に伴う流出の変化に関する研究，防災科学技術総合研究報告，第29号，1972
- (4) 木下武雄，内水地域に盛土をして都市化した場合の流出の変化，土木学会年講，1972
- (5) 建設省における流出試験地，土木研究所資料第781号，1972
- (6) Hydrology for Engineers
- (7) Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology.
- (8) Kirpich, Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Eng. Vol.10, No.6, 1940
- (9) 金子良，上村春美，平地河川の流出特性に関する実証的研究，農業土木試験場報告第8号
- (10) D.G. Anderson Effects of Urban development on floods in Northern Virginia USGS, Water Supply Paper 2001-C, 1970