都市開発に伴う流出の変化に関する研究

著者	木下 武雄
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	29
ページ	3-14
発行年	1972-03-31
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002656/

551.48:711

都市開発に伴う流出の変化に関する研究

木下武雄
建設省土木研究所

Change of Runoff Due to Urbanization

By
Takeo Kinosita
Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo

Abstract

The experimental basins for study on change of runoff due to urbanization had been established in 1968 in the Neyagawa area, the east of Osaka. As this area is quite flat, it was tilled as a rice-field area more than ten years ago. Factories and houses are rapidly replacing rice fields in recent several years. Since urbanization is promoted at random, a rice-field area turns to a town area, where a drainage system is not yet developed. Inundation on this area during a flood period becomes serious.

Three stream gauging stations and two rain gauging stations had been sited in this area. Observations of rainfall and runoff continued for three years. Based on the results of observations, several facts have been made clear. A peak discharge of a flood is reduced by a storage effect of a depression of a rice field. While a time of concentration of a flood from the urbanized basin is short, that of the half urbanized basin is relatively long. The runoff ratio is not clearly defined because the boundaries of such flat basins are not obvious.

The computational simulation is applied to confirm the causalities above-mentioned. Agreeable results are obtained. It makes clear other facts that urbanization increases a peak discharge of a flood while it decreases the duration of a flood, and an outlet form of a rice field has also an influence upon deformation of a flood hydrograph.

目　次

1. 都市化の水文学的意味 …… 4
1.1 都市化要素の分類 …… 4
1.2 水循環機構 …… 5
1.3 流域から見た都市化 …… 5
1.4 内水氾濫 …… 5
1.5 寝屋川流域の選定 …… 6
2. 本調査対象流域の都市化と水害 …… 6
2.1 本調査対象流域の踏査結果 …… 7
2.2 本調査対象流域の都市化による洪水流出の変化 …… 7
3. 現地観測とその結果 …… 7
3.1 現地観測 …… 7
3.2 観測結果 …… 8
3.3 観測結果のまとめ …… 10
4. 電算機による流出のシミュレーション …… 10
4.1 方針 …… 10
4.2 プログラム …… 11
4.3 計算結果の比較 …… 12
4.4 都市化シミュレーション …… 12
5. 結論 …… 14

まえがき

最近の都市開発によって引きおこされる災害のうち水害と風害について，農林省，気象庁，科学技術庁，建設省が協同して行なった研究である。土木研究所の分担は都市開発による流出の変化の研究で，大阪府寝屋川に試験流域を設け研究するよう指示された。

都市が膨脹して行くと，公共事業としての雨水排除工事のすまない所に，雨水排除不良のために湛水，浸水などの現象がおこる。特に高度成長を目ざすあまり，地価の安いところへ社会的な投資がなされ，もともと雨水排除不良の所へ都市が膨脹して行く傾向もみられる。土地の利用度の低い間は湛水浸水などがあっても，それらは具体的な問題を引きおこさないが，都市というように利用度が高くなると問題が大きくなる。さらに，農，山，漁村には自己防衛機能・自給自足態勢が備わっているが，都市というのはそれらが著しく乏し

い。

このような点の典型を我々は，大阪府寝屋川流域においてみることができる。

このような問題に対して　いろいろの接近方法があるが，現象論的に把握するために現地観測によるとすれば　多くの困難が伴うので，その手法的なことまで十分な予備調査をして後に本調査に移らねばならないが，時間的な制約もあって　必ずしも理想的にはそのようには運べず良好な進捗状況とはいえなかった。

1.　都市化の水文学的意味

都市化と一口に言ってもその実態は様々でありさらにそれが水文学的にどのように意味づけられるかは重要な問題である。対象とする試験流域が水文学的にみてどのような位置にあり，それからえられる結論をどのように一般論へ展開して行けばよいかを予め考えておかねばならない。

1.1　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：何を都市化の比熱・熱容量の変化としてとり上げるべきかはむずかしいので必ずしも明瞭な結論はえられないが，一口で言えば都市化は，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：都市はその機能を維持するために多くのエネルギーを消費する。暖房・輸送・工業生産などに用いられるエネルギーの大部分は熱となる。すなわち都市は熱の発生源である。これは水文気象学的にみて無視しえない量である。

(ニ)　植生：植物は降雨を遮断する。植物の蒸発散作用は水文気象学的に重要であるが，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。畑などで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たとえ建物・舗装等で覆わなくても（たとえば庭・間地など）浸透能の減小を来たすことは明らかである。

(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。

(ハ)　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その様相は複雑である。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。この地域は水田などの貯留効果が重要な役割を果していて　それについては２．２できらに詳しく述べる。

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。

(ニ)　表面粗度：自然状態では地表の凹凸，草木などにより表面を流下する水に対する粗度は大きいが，都市化すれば，住居，交通などのため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。

(ホ)　地下水：都市は生活用水，工業用水などの水の使用が盛んであるからその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盲暗渠などで地下水を積極的に排除することもある。浸透能・浸透面積の減小は地下水の供給を断つのでその面でも地下水の減少を引きおこす。

(ヘ)　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。

(ト)　河道粗度：上記(ヘ)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。

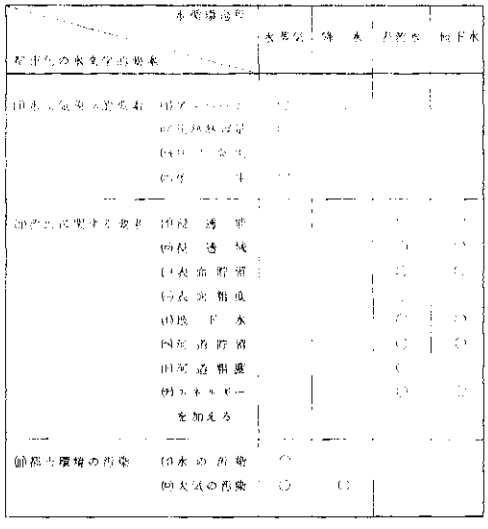
(チ)　エネルギーを加える：水田などを都市化した場合はポンプによる内水排除の必要性が増す。

(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。

表－1　都市化の水文学的要素と水循環過程との関係



1.2　水循環機構

自然界において水は循環する。水循環の過程と都市化要素の関連は表－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，近年雷雨の発生回数が変ったとかいわれるが，あるいはこの影響かも知れない。

(iii)　表　流　水

植生および1，1(ii)流出に関する要素としてあげて全項目が関係する。

都市化によるピーク流量の増大，洪水流出率（流出体積／総降雨量）の増大，流達時間の減小低水流量の減小をひきおこす。

(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。

1.3　流域から見た都市化

都市がどのような流域条件のところで形成されるかは治水対策上重要な問題点である。都市化の影響を論じるとき，都市化が水文学的変化を引きおこしている地域を原因域，その水文学的変化の影響をこうむる地域を結果域と仮りに呼ぶと便利である。この原因域と結果域との相対的関係は2種である。

原因域と結果域とが別々の地区となっている場合（例えば多摩ニュータウンと多摩川下流域）および原因域と結果域とが混在する地区となっている場合（例えば東京江東デルタ地域）とである。

丘陵および水田地域の都市化を考えるとき丘陵域では前者（原因域と結果域が別々）の例が多く水田域では後者（原因域と結果域が混在）の例が多い。

丘陵について都市化による水文学的変化は前項に述べたような要因でつくされている。

水田域では前項の事実が若干異なる。水田においては内水氾濫と言われる水害がこれまでにも多く見られたが，ここが都市化すると，それによる水文学的変化は複雑である。

水田の都市化には一般に盛土をするが，これは水田からの地下水への供給を止める。盛土内に保水能を持たせることができるので見かけ上浸透能の増加となるなどの効果をもつ。水田が都市化されれば多くの地域で内水排除のためポンプ排水などを行なう。

これは局地的ではあるが，水循環の様相は著しく変る。

1.4　内水氾濫

一般に内水氾濫を外水位との関連で分類すると

(1)　外水位が高くなったための内水

(2)　外水位とは無関係の内水

内水氾濫をその水源で分類すると

(1)　直接の集水域として山地をもつ。

(2)　その場所へ降った雨による。

(3)　外水が逆流してくる。

内水氾濫は地盤沈下地帯に発生しやすい。場合によっては河川の勾配が逆になることもありうる。内水氾濫防止を目ざし地下水位を低下させるために地盤沈下が促進されるという面もあって地盤沈下と内水の関連は複雑である。

都市域の内水についてはほとんどの場合，都市

化による水害の研究と言つても多様性が著しいので，具体的な試験流域をとり上げたことはその一断面について研究するということになる。

1.5　寝屋川流域の選択

本研究のために選定された寝屋川流域は大阪市の東隣にあつて，生駒山脈と上町台地とに囲まれた低湿地である。

このような所でまず都市化による流出の変化を調べることは必ずしも適切とは言えない面もある。第1には原因域と被害域とが明瞭に区別されている場合はよいが，ここは原因域と結果域とが混在しているので調査しにくい。

第2には流域の都市化にともなう流出の変化を明らかにするためには，

(イ)　都市化としての定量的指標がはつきり測定されうること。　(ロ)　観測が十分な精度で行なわれることの2点が必要である。寝屋川流域内で我々は，このような条件に合つた場所を探した。

水位観測所を下流につけると潮汐，水門の影響が効くので，不適当であるし，上流につけると流域面積が小さくなつて好ましくない。生駒山系寄りの丘陵は住宅団地もあり，河川の勾配も適当であつて，水位観測所としては良好と思われたが結果的には諸般の情勢により，3流域を設けそれぞれに水位計を設置し，また流量観測を行ない，また，2雨量計を設置した。

3流域を選んだ理由は，都市化の影響を一つの流域で長期間の観測により明らかにして行く方法もあるが，時間的な制約のために数をふやして時間をへらす方法をとらざるを得なかつたためである。このうち橘波が大阪に最も近く都市化も最も進んでいて，馬洗橋は大阪に最も遠く都市化が最もおくれていて，庭窪はその中間という意味である。

流域面積と，自然域，都市化域の区別は表－2の通りである。ここに自然域，都市化域とは航空写真によつて判読される田畑・林など自然的な区域と造成中の土地も含めた宅地・工場・学校等の区域とを指す。

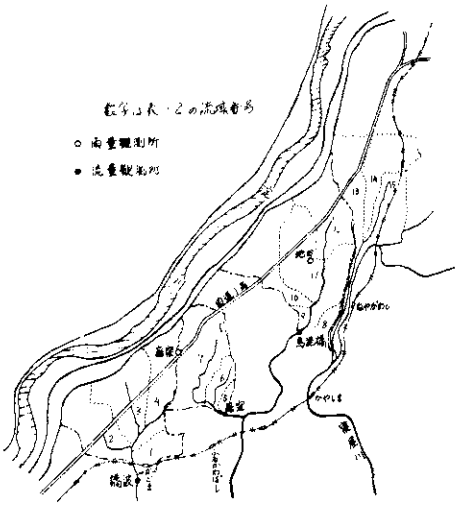
表－2　流域都市化率（図－1参照）

流域	地点	面積	自然域	都市化域	自然域率	都市化域率
橘波	1	0.656 km²	0.010 km²	0.646 km²	1.5 %	98.5 %
	2	0.981	0.097	0.884	10.4	89.6
	3	0.875	0.098	0.777	11.2	88.8
	4	1.059	0.218	0.841	20.6	79.4
	計	8.521	0.423	8.098	12.0	88.0
砂津	5	0.138	0.081	0.052	60.9	39.1
	6	0.257	0.112	0.145	43.6	56.4
	7	1.280	0.473	0.809	36.8	63.2
	計	1.570	0.664	1.006	39.8	60.2
馬洗橋	8	0.252	0.040	0.212	15.9	84.1
	9	0.292	0.037	0.255	12.7	87.3
	10	1.141	0.634	0.507	55.6	44.4
	11	0.976	0.846	0.130	86.5	13.5
	12	0.623	0.359	0.264	57.6	42.4
	計	8.284	1.416	1.868	43.1	56.9
	13	0.934	0.388	0.555	40.8	59.2
	14	0.611	0.117	0.494	19.1	80.9
	15	0.790	0.360	0.430	45.6	54.4

2.　本調査対象流域の都市化と水害

本調査対象流域の位置はすでに述べた。北から西に淀川の強固な堤防で限られ，東は寝屋川の天井川河道で仕切られているため，いわゆる山水は，対象流域へはいつて来ない。しかも地盤はゆるく，北から南へ勾配を持つているので，河川（排水路）は，平均すれば1／2000程度の勾配を持ち，落差工さえみられる。このような平野に，住宅，工場がスプロール的に建つので，水害の原因域と結果域とが混在したタイプとなる。

対象流域一帯は，かつて水田，蓮田，それに貯水池とも湛水池とも言える未利用の沼，さらに，



図－1　流域概形

それらを直接的，間接的に結ぶ河川（排水路）によつて構成されていた。排水不良地帯である割には用水路も可成り整備されていた。国道1号線は，淀川左岸を少しはなれて，対象流域の谷頭部を切るように通つている。大阪市内から15 kmほどの近距離でもあり，対象流域の南側には京阪電鉄が通つているという交通の便もあつて，近年，急速に都市化が進行した。

2.1　本調査対象流域の踏査結果

踏査によつて対象流域の都市化を調べた。結果は次の通りである。

ⅰ）家屋（工場・住宅など）は，水田，蓮田等に５０ｃｍほどの盛土をして建てる。盛土には，生駒山脈に近いせいか，良質土を用いる例が多い。屋根などの排水の流末は，これと言つた処理をほどこしてない。家屋の建設の進行をみると，沼などは最後まで放置され，旧河道ぞいの自然堤防の上などは，早く都市化するようだが，はつきり，これと言つた傾向はない。盛土面の標高もまちまちである。

ⅱ）道路は大部分舗装されているが，農道を若干拡幅した程度の狭い道で，自動車の通行にも困難するような所が多い。大阪市に近い繁華街にはあるが，全体からみれば少ない。

ⅲ）排水路は，土地改良事業として水田等の排水を対象として徐々に進行して来た。古い名称を残す排水路も多く，コンクリート護岸など，立派な水路ができつつある。しかし，末端の排水路では，まだ自然のまゝ放置されている所も多く，河道整正も十分ではない。何度かくり返し現地調査をしたが，その度に流向のちがう末端水路もみられた。また，道路に組み伏せられてしまつた排水路も多く，ひどい例では，個人が勝手にふたをして，その上に住宅が建つているものもある。土俵１つで流路はいくらでも変えられ，２０ｃｍも水位が上がれば，たちまち商店へ水がはいつてしまうような，いじめられた水路も見られる。

ⅳ）排水ポンプは，農地を対象にしたものが若干あるが，十分とは言えない。下水道工事が目下進行中であり，その完成が期待されている。

2.2　本調査対象流域の都市化による洪水流出の変化

このような都市化が降雨の流出にどのような影響を及ぼすだろうか。

ⅰ）洪水流出率に対して，このような都市化がどのように影響するかは複雑である。盛土が５０ｃｍとして，有効空隙率を１０％とすると，この盛土層は５ｃｍの保水能力を有するので，一洪水としての流出率は減るかもしれない。しかし，屋根，舗装などの不滲透面積の増加は，洪水流出率を増加させる傾向にある。滲透量が水田から盛土に変つて増加し，屋根等によつて減少するという点を考慮しないと結論は出せない。

スプロール的な都市化は，しばしば水田を排水路のない溜り水の沼にしてしまう。これは洪水からみれば凹地貯留がふえたことに対応するので，これは洪水流出率を減らす傾向をもつ。

ⅱ）ピーク流量は，都市化によつて増加する。水田等は，あぜが１０ｃｍあれば１００㎜の雨水を湛水できるわけで，水田からの流出はきわめて偏平化された波形となつている。これが住宅・工場となれば，雨水は直ちに流出してくるわけで，ピーク流量は都市化によつて著しく増加する。盛土と水田とが混在している場合でも水田が貯水池の役割を果すが，これが少なくなることは，洪水波の低減効果が弱まる。

都市化の一面としての排水路の整備は，もし排水路がなかつたらゆつくり流下する雨水を早く下流へ導くので，当然ピーク流量の増加をもたらす。

ⅲ）流達時間は一般に都市化とともに短かくなる。(ⅰ)(ⅱ)で述べた通りの水田の湛水効果の減少，排水路による洪水疎通能力の増加などによるものである。

洪水が水害にまで発展する過程は，社会的，経済的要素が加わるので複雑であるが，本調査対象流域では，次のような内容を持つている。

(ⅰ)　家屋・工場の湛水：床下浸水が多いが，地形的に水のたまりやすい所，盛土の低い所，疎通能力の悪い水路の上流河岸などでは，床上浸水にまで及ぶことがある。

(ⅱ)　交通機関の杜絶：冠水等による。

以上，いずれも水位を指標にして論じられる水害である。都市化と一口に言つても，すべてが一様であるわけではなく，本調査対象流域においては，他に原因域があつて，過大な流出流量の流下に禍されるわけでもなく，外水位が高いための内水への逆流や，排水不良というわけでもない。流速による物的，人的被害が比較的少ないのが，この地域の被害の特徴である。

3.　現地観測とその結果

3.1　現地観測

現地には水位計と雨量計を設置した。

雨量計は２台とも転倒ます形（0.5㎜　転倒）で，設置位置は

①寝屋川市立寝屋川第２中学校校門南の芝生の

表－３　観測設備一覧

雨量観測所			
観測所名	観測位置	器械	代表する流域
庭窪	守口市庭窪中学校鉄筋コンクリト校舎屋上	１カ月巻転倒ます雨量計（最小0.5mm）	橋本・庭窪
池田	寝屋川市寝屋川第２中学校　正門南側	同上	馬洗橋

水位流量観測所					
観測所名	水路名	位置	水路状況	測定項目	流域面積
橋波	両三荘	守口市・橋波東	改修ずみ	水位　流量	3.52Km²
庭窪	庭窪	守口市・門真市境	下流に床止め	水位　流量	1.67
馬洗橋	古川（九箇荘）	寝屋川市高柳の南	改修ずみ・感潮・下流の堰の影響をうける	水位・水面勾配・流量	3.28
				水位はすべて触針計	航空写真による

中，池田と命名，

②守口市立庭窪中学校鉄筋校舎屋上，庭窪と命名。

の２ヶ所である。両者は設置条件として必ずしも好ましいわけではないが，学校というのは何かにつけて便利なのでここで観測をした。

水位計は３台とも触針計を用いた。設置位置は

①橋波：守口市橋波の西三荘水路，門真駅より南へ３００m

②庭窪：守口市，門真市の境，庭窪排水路，古川橋北へ６００m

③馬洗橋：寝屋川市池田の九箇荘水路（古川），萱島駅の北１．２km

の３ヶ所である。いずれも道路わきであり，水路形状は整つた所であるので，観察には便利である。選定については，１．４で述べた通りで，都市化の３段階を考えたわけである。この流域設定に対して雨量観測としては庭窪流域と橋波流域の上流流域界付近に庭窪雨量観測所を設け，馬洗橋流域の中央付近に池田雨量観測所を設けた。

設置状況は写真の通りである。

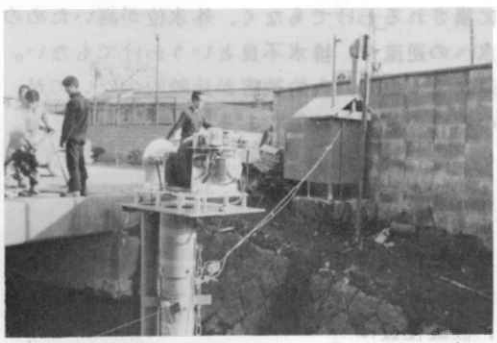


写真１　触針水位計ヘッド庭窪観測所

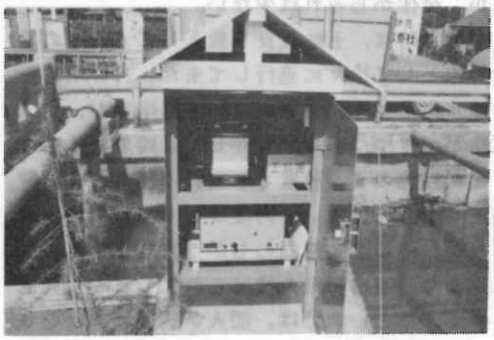


写真２　触針水位計制御記録部　橋波観測所

古川は下流水位の変動が効いて，常時水位が

古川は下流水位の変動が効いて，常時水位が振動するため洪水の立ち上がり部の観測がしにくい。そのため馬洗橋においては触針水位計を２台設置して水面勾配を測れるようにした。また水位計位置においては流量観測を行なつて，水位より流量を算出できるようにしたが，河道工事や水位計の改造で，完全な水位流量曲線は作成されなかつた。

3.2　観測結果

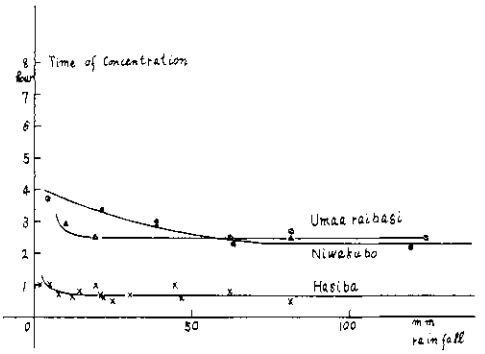
(1)　雨量観測の結果

庭窪と池田とはほゞ同じ傾向を示している。細部にわたると，若干のちがいはみられるが，降雨波形は庭窪の方が時間的に３０分ぐらい早めである。

(2)　洪水波の到達時間

降雨のピークから流出のピークまでの時間を洪水の到達時間と呼ぶ。これは，流域斜面を伝つて

流れる雨水が河道に流入するまでの時間と主要河道を洪水が流下してくる時間との和であると考えられる。これは流出量（又は雨量）の大小によつて変化をするであろうか。図－2は横軸に雨量をとり縦軸に到達時間をとりその傾向をあらわしている。これによると雨量は，50㎜程度以上になると，ほぼ一定の値に落ちつくことがわかる。



図－2　流達時間と雨量との関係

橋波では1時間弱，庭窪，馬洗橋では2.5時間という傾向がうかがえる。

橋波流域は都市化の程度が進んでいて水路網も完備しているので大体の傾向としてはうなずけるが，庭窪流域が小さいにもかかわらず，2.5時間というのは，おそらく，田面の貯留効果がきいているためと思われる。田面貯留が大きく効いて河道の流下時間が極めて短かいと解釈すれば，馬洗橋流域の2.5時間も，橋波流域の1時弱という到達時間も統一的に説明できるかも知れない。この解釈については4の電算シミュレーションによつても確かめる。

(3)　洪水流出率

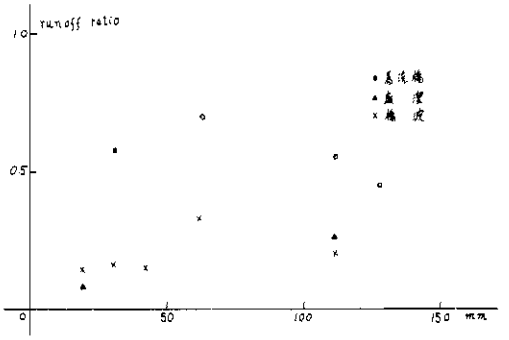
流出率には洪水の体積についての流出率，ラショナル式的な流出率（係数），長期にわたる体積の流出率などがある。これらの値も雨量強度，前期降雨などに左右されるし，観測の精度も相当高くないと結論的なことは言えない。

流出率をこのような水田，蓮田などの多い流域で測つて論じるのは必ずしも適当でないが，雨量との関係でまとめたものを図－3に示す。橋波流域は意外に流出率が小さい。これに関して観測の誤差として，

(イ)流域界の決定（見落した水路，流量増加時の他流域への越流等）

(ロ)流量観測（水位流量曲線の外挿など）

が考えられるが，水田・蓮田などではその他にも2.2に述べたような都市化による流量減の効果も考えられるかも知れない。この点についても4で電算シミュレーションを行なつているので，その結果の傾向を参照されたいが，浸透モデルについては未解決な点が多い。



図－3　基底流量までの流出率と雨量との関係

馬洗橋流域においては，可成りの流出率を観測している。ここも，流域界については問題があり，流域面積が実際にはもう少し広いのではないかと思われるふしもあり，この数値をもつて結論的には言えないが，全体的には妥当な数値である。

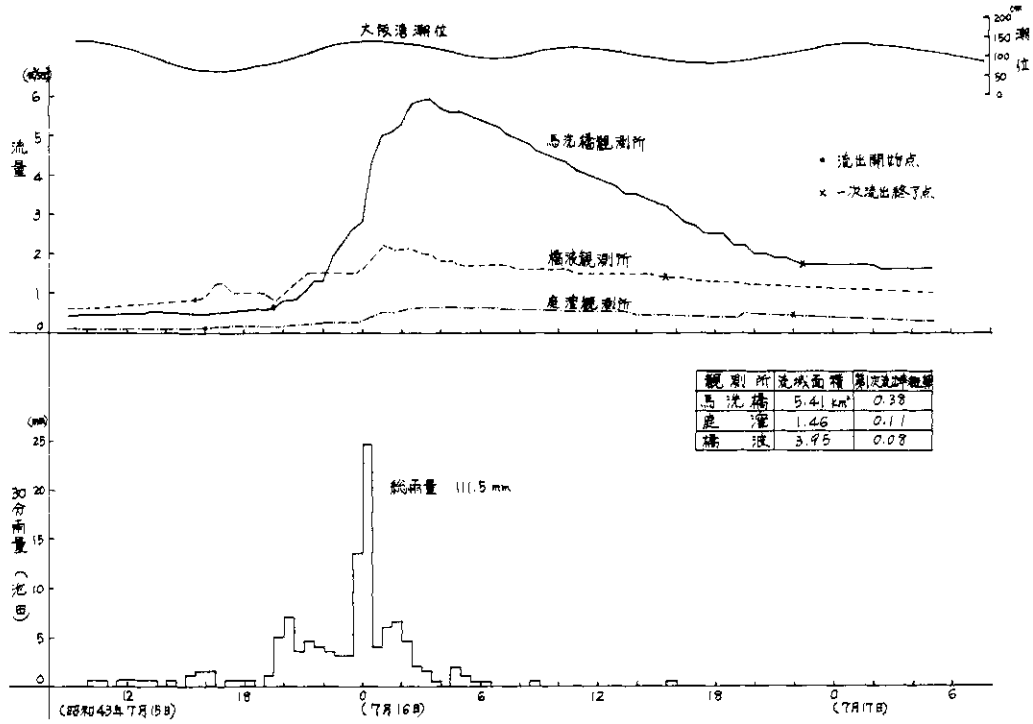
なお，この流域においてもピークの雨量とピーク流出量との比は大へん小さく，この流域では水田などの貯留効果のよく効いていることがわかる。

従つてこのような流域の都市化後の流出状態を推定するには既存の流出モデルにおいて，係数のみを適当に調整すればすむものではなく，流出の現象の1つ1つの要素をとり入れた総合的なモデルが必要となるのである。

(4)　洪水の立ち上がりと減衰

橋波流域では水路網が行きわたつているせいか，洪水の立ち上がりが早く，洪水波形は降雨の変動にもよく追従している。庭窪流域・馬洗橋流域は前にも述べたように貯留効果が効いているので雨量の変動に対する流出波形の応答は鈍い。たゞし馬洗橋，庭窪の両流域は立ち上がりも可成り早いので，貯留効果に影響されない流出成分も考える必要があるかも知れない。

減衰の曲線も貯留効果を反映してか，極めてゆつくりしていて，主たる降雨が終了してから20時間もの間流出が続いている。



図－４　洪水流出の一例（寝屋川流域）

3.3　観測結果のまとめ

本調査対象流域は，２で述べたような都市化の形態をたどつている。単純な表現を許してもらえば，ここでは都市化は盛土による水田，蓮田などの貯留効果の減小と言うことができる。つまり1.1で述べた一般の都市化のうちでも特殊な形態に類するものであつて，たとえば多摩ニュータウン等の丘陵地の開発による都市化とは著しく異つた形をしている。

都市化によつて流出がどのように変るかは重要な課題であるが，ここに水田などの貯留効果の減小と水路網の完備という２面で把えれば，著しい誤を侵さないですむだろう。

4.　電算機による流出のシュミレーション

4.1　方　針

前節で述べたような都市化とその流出に及ぼす影響を電算機によるシミュレーションで行なう。方針は次のように立てる。

(1)　インプットとしては，雨量の時間分布を与える。

(2)　流域は，都市化域（盛土部），自然域（水田部），排水路に分ける。

(3)　都市化域に降つた雨は，その上に貯留され，タンクモデル的に言えばタンク１段で孔１つの流出とする。ユニットハイドログラフ的に言えば，指数低減の流出である。浸透量は一定値で，表面貯留から差し引き表面貯留が０となれば，浸透も０となる。

(4)　自然域は，都市化域からの流出を全面的に受け入れ，直接降雨も貯留される。排水路との間には，一定高のあぜが存在する。あぜには，四角堰形の切り欠きがついている。水田の水位があぜを越えれば，全面越流となる。

(5)　水路は幅広い長方形水路と仮定する。排水は，この水路のみから出るとする。流れはマニングの等流とする。

(6)　自然域の水位と，排水路の水位とが近づけば，水位の高い方から低い方へ潜り堰となつて流出する。あぜより排水位が上がれば，自然域も排水路も同じ水位になる（湛水氾濫）とする。

方針の意味づけ

(1)　不定流追跡として考えれば，このような都市化域・自然域・排水路の３つの部分のみとする考えは不十分である。しかし，面積要素が小さくなるので，大まかにこの３つの部分とした。都市化域の面積率の増加で都市化の進みを表わした。

対象流域内の微地形による局部的氾濫などは考慮せず，全体的な傾向をみるにとどめた。

(2) 都市化域に降つた雨が自然域へ流れ込むまでには一つの変換系が必要である。この変換系には１孔のタンクモデル，換言すれば指数関数形のユニツトハイドログラフを用いた。他の変換系でもよいが，おくれがあらわれる最も単純な変換系としてこれを採用した。都市化域も滲透域，不滲透域に分けて，それぞれに滲透モデルを用いるのが正しいが，ここでは一まとめにして貯留量から一定の滲透量を差し引いた。

(3) 自然域は都市化域とあぜとで囲まれた水田等を意味していて，排水路の河床よりは高く，都市化域よりは低い。都市化域から流出して来た雨水と，直接降つた雨水とによつて水位は上昇する。都市化域は，スプロール的にできるため，都市化域から自然域へ流入するための水路のようなものは考えない。排水路（河川）との間は，あぜで分けられているが，あぜには切り欠きがあつて，切り欠きは，あぜの長さに対し一定の比率で存在するとする。実際は，小さい支川（幅１mほど）に落ちた水が，順々に集つて，幹線排水路に入るのであるが，計算の便宜上，自然域から四角堰を通して排水路へ落ちるとした。

(4) 排水路は幅と長さと深さ（自然域の面と河床との差）をパラメーターとする長方形水路で，流れはマニングの等流とした。水路の長くなることは水路が流域の奥まで達することを示し，あぜの切り欠きも水路長に比例して増すので，自然域の排水は促進される。

4.2 プログラム

Fortranによるプログラム要部は次の通りである。使われている文字の意味と次の計算例で与えられた数値を示す。

(1) 都市化域からの流出計算

```
      DO50  I=1, IEND
      DO51  J=1, JEND
      Q=FA*H **FD
      H=HR+(R(I)-Q-FINFIL)*FE
      IF(H)  121, 121, 120
121   H=0.0
120   HR(I, J)=H
 51   QR(I, J)=Q
 50   CONTINUE
```

ここで，ＩＥＮＤ：降雨継続時間を含めた計算時間，２４時間，ＪＥＮＤ：△ｔ秒刻みで計算をするので，１時間の中に幾つの△ｔがはいるかの回数，Ｑ：流出高㎜／時，ＦＡ：タンクモデルの孔の係数，0.8・1／時間，半減期は0.87時間，ＦＤ：線形モデルであるためこの例では１，Ｒ(Ｉ)：時間雨量，ＦＩＮＦＩＬ：最終滲透能5㎜／時，ＦＥ：係数で△ｔ／３６００に等しい。

(2) 自然域と排水路よりの流出計算

```
      DO53  I=1, IEND
      RAIN=R(I) *FE
      DO54  J=1, JEND
      QS=FB*(HS-GS)**1.6667
      HX=HP-GP
      HY=HS-GP
      IF(HY)  101, 101, 102
102   IF(HS-GC)  103, 103, 104
103   IF(HP-HS)  105, 105, 106
105   QP=-FC*HY*SQRT(HY-HX*
      HX/HY)
      GOTO  108
106   QP=FC*HX*SQRT(HX-HY*H
      Y/HX)
      GOTO  107
101   QP=FC*HX*SQRT(HX)
107   IF(HP-GC)  108, 108, 110
110   QP=QP+FCD*(HP-GC)*SQR
      T(HP-GC)
108   HP=HP+(QR(I, J)*AZ-QP)*FF
      +RAIN
      HS=HS+(QP-QS)*FG+RAIN
      GOTO  109
104   QP=0.0
      HS=(HP*AP+HS*AS+(QR(I, J)
      *AZ-QS)*DT/10000000.0)/(AP
      +AS)+RAIN
      HP=HS
109   PRINT
 54   CONTINUE
 53   CONTINUE
```

ここでRAIN：時間雨量の単位を変えて△ｔ秒の間に降つた雨量をｍで表わす。ＦＥは，そのための換算係数，ＱＳ：排水路流量㎥／Ｓ，ＨＳ：排水路水位，ＧＳ：排水路河床高　ＦＢ：マニングの等流則の係数$\frac{1}{n}\ i^{\frac{1}{2}}\ B$，　$n=0.025$，$i=$

1／2000，B＝8m，HP：自然域の水位，GP：自然域の地面の高さ，そこを四角堰の刃の高さとする。GP−GS＝2m　GC：あぜの高さ，GP−GS＝2.15m，QP：あぜより落ちる流量㎥／S　FC：切り欠きを堰としたときの越流係数（幅も含む），FCD：切り欠き部を除きあぜよりの全面越流の係数（幅も含む），式105は排水路の水位が高く，潜り堰で自然域へ水が浸入する場合　式106は自然域の水位が高く，潜り堰で排水路へ水が出る場合，式101は完全越流で排水路へ水が出る場合，式110は，あぜの上から越流する量も加えた式，式108以下は連続の式，AZ：QR（I，J）がmm／hであるため㎥／sec に直す係数，FF：△t秒の間の自然域の流出入量を水位変化に換算する係数，FG：△t秒の間の排水路の流出入量を水位変化に換算する係数，AP：自然域面積，AS：排水路面積，式104以下は，排水路水位があぜより高くなった時の湛水状態の連続の式

4.3　計算結果の比較

1969年6月25日の洪水を利用して検証計算を行つた。結果は図−5に示す。

雨量は池田観測所，流量は馬洗橋観測所の値である。河道長は1500m，都市化面積率50％（表−2によれば56.9％）の場合と比較した。

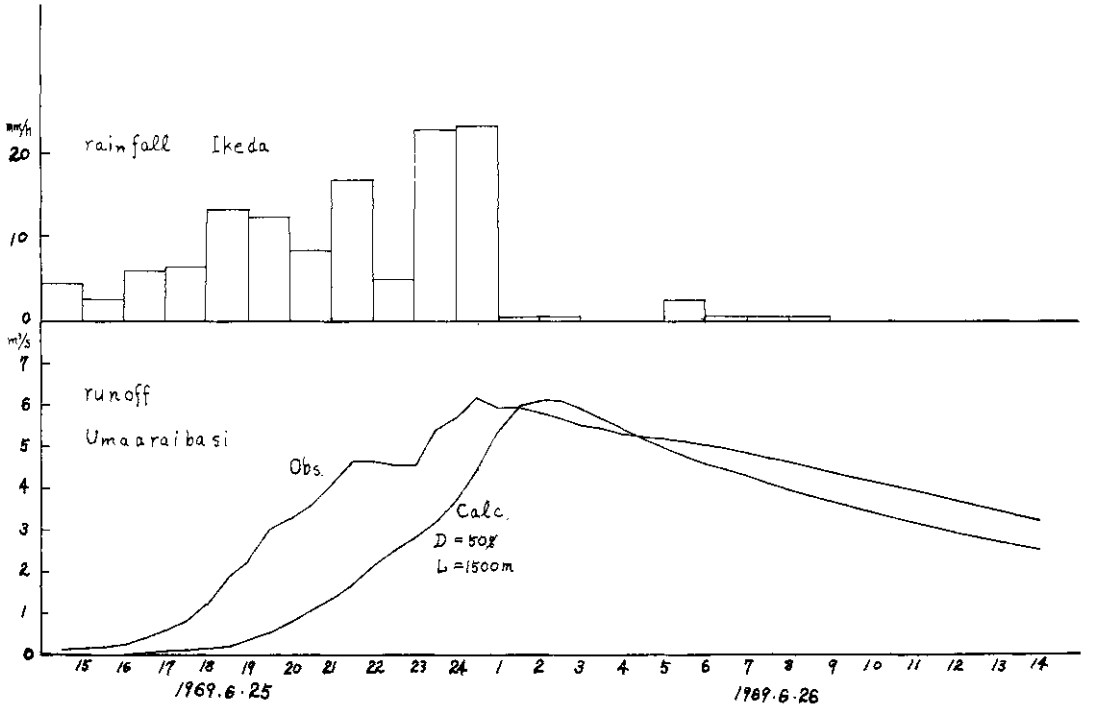
ピーク流量は，ほぼよく一致しているが，立ち上がりは実測値の方が早い。この差は実際には前期降雨があり，また，水田などがすでに湛水している状態から洪水がはじまつているのを，計算上では自然域には水がない状態から始めている等の影響と，実際には都市化域から小水路を伝わつて，早期に流出があるものを計算上はすべて自然域（水田）へ流入してからあらためて河道へはいるとしたための差と考えられる。

低減部についてみると計算値は実測値より若干の早く指数関数的に減小しているが，傾向はよく一致している。流出体積は計算値は実測値を下まわつているが，本グラフ終端で流域内にはまだ洪水低減部の流出として18万㎥（総流出量の4割）が残つている。

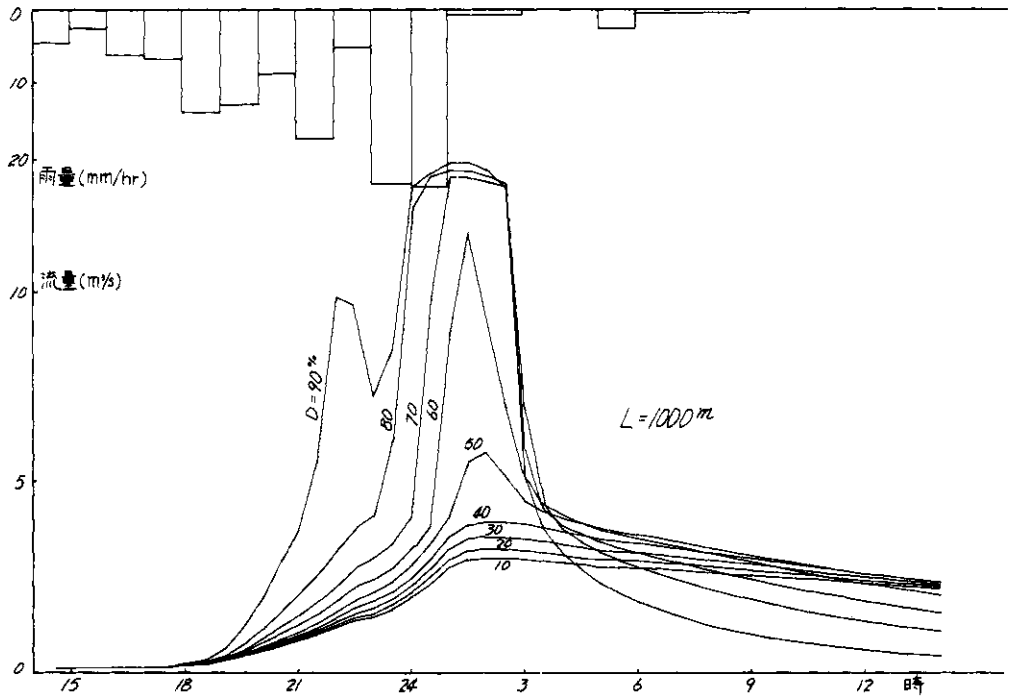
4.4　都市化のシュミレーション

以上のように馬洗橋流域の流出を電算のシミュレーションが成功したので，このプログラムと係数とを用いて，自然状態，都市化状態の再現をはかつた。

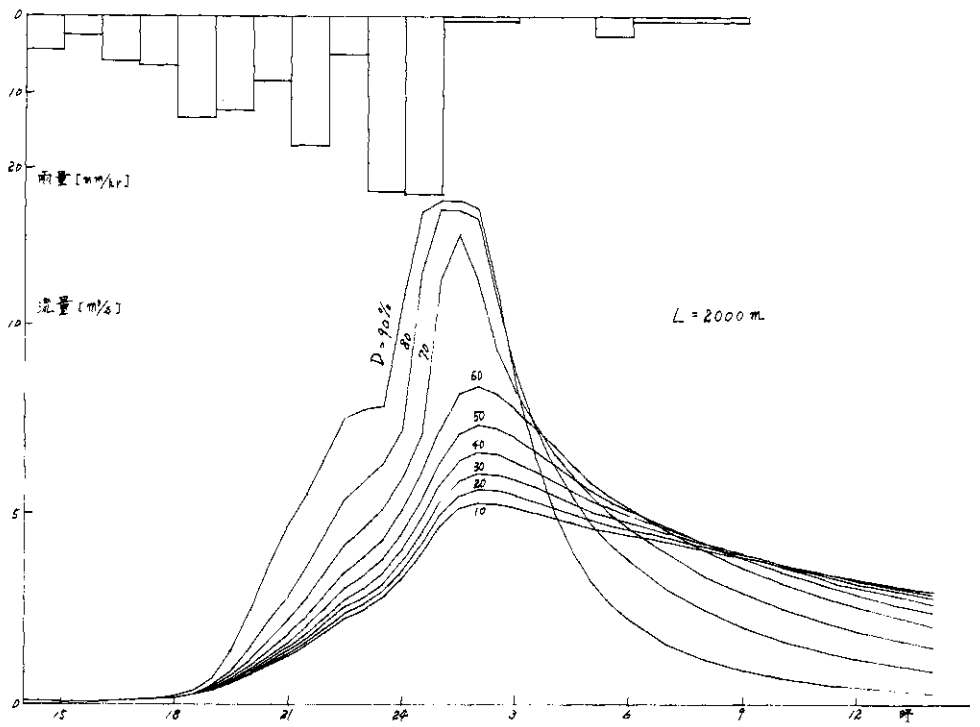
流域内の都市化域の面積率Dを10％〜90％



図−5　電算シミュレーション検証



図－6　都市化シミュレーション（排水路長1000m）



図－7　都市化シミュレーション（排水路長2000m）

にまで変更した場合，排水路長Ｌを１０００m，２０００m　とした場合とのハイドログラフを図－６，図－７に示す。

(i)　都市化率が約５０％までは流出はあまり急激に変化しない。これは水田の貯留機能が，水田が全面積の半分あれば著しくは減らないことを示している。しかし，半分を越えると流出のピーク部が高くなる。これは水田の出口だけでなく，水田のうねを越えて河川へ流れ込む分がふえるからである。

(ii)　ピーク流量は都市化率８０～９０％で頭打ちになる。これは河川水位が高くなつて水田水位と同じになり広域の湛水のため，流量が著しくは増さないためである。計算上のこのような状態は実際現象的には一面の湛水を意味し水害へ発展して行く典型的な形を示している。

(iii)　都市化が進むと流出波形は降雨波形に敏感に影響されることになる。図－６，Ｄ＝９０％の場合はその例である。しかし，都市化のうち排水路整備が末端まで行きわたれば流出のシミュレーションは小排水路，側溝を含めた，もう少しちがつたプログラムで行なわねばならない。

(iv)　このプログラムで排水路が長くなることは現象面では河道貯留がふえることと，あぜにある四角堰の数が多くなつたことすなわち，水田から水を出しやすくすることを意味する。前者は洪水ピークを低め，後者は高める傾向にある。

この計算例では，都市化が進んでいると河道貯留の影響が効いているようで排水路長１０００m　図－６の方が高めであるが，自然状態に近いとその逆に排水路長１０００m　の方が低い。

以上は，検証に用いた流域条件と洪水の降雨とを用いての結論なので，これを完全な一般化の結論とは言えない。計画論とむすびつけるためには浸透モデル，流域分類などに細かい配慮と降雨パターンの検討が必要である。

5. 結　論

土木研究所は１９６８年より３年にわたつて，都市化による流出の変化を明らかにするため大阪府寝屋川流域で雨量と流量の観測を行なつて来た。またこれと同時に流域の都市化状態，特に水路網と都市化の変化とを調査して来た。

えられた洪水流出ハイドログラフを解析し，また電算機でシミュレーションを行なつた結果，水田などの貯留効果が洪水のピーク流量などには大へん重要なことが明らかになつた。このような都市化をして行く低湿地帯では，水田などの貯留効果の減小に見合うように計画的に排水路網を末端まで整備させねばならないことがわかつた。