

流域の都市化に伴う野川の水収支の変化
An effect of Urbanization on the Water Balance for Nogawa

東京都建設局河川部 正 員 黒 羽 公 明
東京都土木技術研究所 正 員 和 泉 清

1. はじめに

都市域においては、流域の都市化現象に伴い少しずつ自然環境が姿を消すとともに、流出形態に変化がおこり、直接流出量の増加・流出時間の短縮など洪水流出の集中化による水害危険度の増大が、顕著となった。また、不透透域の増加などで基底流量が減少したり、雑排水の流入によって河川の水質は悪化していた。一方で近年は、河川環境の役割が、地域社会の中で重要となってきた。水と緑のある貴重なオープンスペースを、地域住民に親しみ・安らぎ・憩いとレクリエーション提供の場として、動植物の生息する自然的環境として、防災空間としての利用など河川のもつ機能に対する期待と要望は、多様化している。

従来より河川行政は、治水事業を最重点施策として進めているが、都市河川の水質浄化・親水護岸などさまざまな試みが行われるとともに、最近では総合的な治水対策として、地下浸透構造施設設置事業も行われ始めた。これは、下水道施設の普及によって雑排水の流入量が減少し、平常流量が減少した反面、浸透対策は地下水汲上げ規制と相まって、地下水が涵養され、将来維持用水として期待できる可能性もある。

このような都市河川に関する諸問題は、循環的・構造的でもあるので、都市化による流域へ与える影響を水収支の面から、総合的に検討する必要があると考えられる。本論文は、都内の一中小河川を対象に、長期流出解析を行うことで、流

域の都市化が水循環に与える影響を、検討しようとするものである。

2. 対象流域の概要

東京の地形は、沖積低地と関東山地の東端に広がる荒川と多摩川水系に囲まれた武蔵野台地とに、大別できる。武蔵野台地の表面は、関東ローム層におおわれ、ローム層をしみ通った水は、その下の武蔵野礫層の中に滞り、地表に露出した地点での湧水が、台地内中小河川水系の水源となっている。

多摩川の左支川の一つである野川は、国分寺市窓ヶ窪の姿見の池を源とし、立川段丘面上を国分寺崖線に沿って流れ、左岸側に続く武蔵野台地の各所からの湧水・支川を合せ、世田谷区玉川三丁目付近で多摩川に合流する。河川延長約17.1 km、流域面積約53.3 km²の1級河川である。野川流域は、全般的に地表の起伏が少なく、また東京都内でも比較的自然景観に恵まれているが、近年は都市化が進行している。

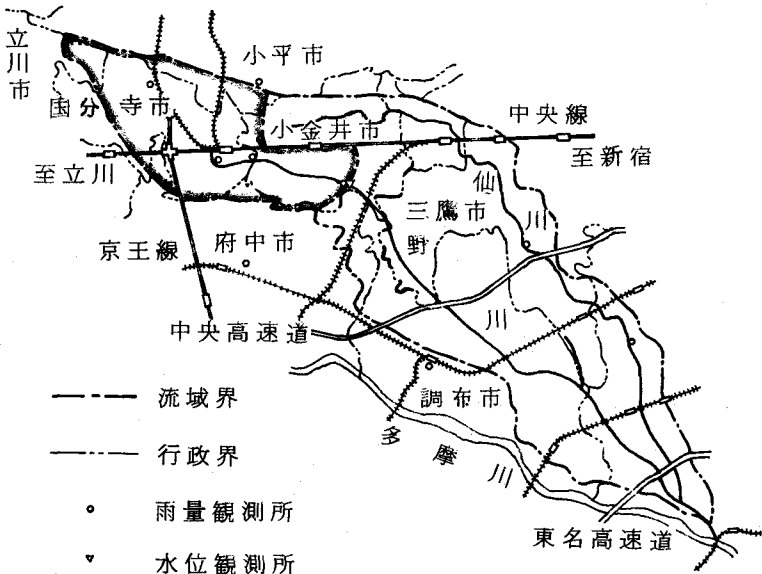


図-1 野川流域図

本論文は、野川流域のうちでも比較的都市化が進行していない上流部を対象とし、小金井市前原町にある小金井観測所よりも上流域 19.27 km²の調査結果である。当観測所は、1974年4月以来雨量および水位の観測を継続しているが、この5～6年間に受けた都市化の影響を比較するという意味で、1975年および1981年を解析対象年とした。野川流域概要を図-1に、流域諸元を表-1に示した。

(1) 浸透域面積率

浸透域面積を推定するのに使用した資料は、1971年度現在の土地利用状況調査結果、1975年・1979年国土地理院発行1/25,000地形図、航空測量による住宅地図である。地形図を6工種に分類し、交点法でそれぞれの比率を求める。同様に、住宅地図から工種別不浸透域率を、定めた。道路については、各年度の公道舗装率を利用した。

その結果、表2に示すように、不浸透域面積率は1975年を23.7%、1979年を29.3%と、推定できる。そこで、1981年の不浸透域面積率を、30.9%と推定した。

(2) 流域推定人口

この流域を工種別にみると、宅地（大部分が第1種住居専用地域）が多く、「昭和50年の東京都の昼間人口」によれば、昼間人口指数は、国分寺市の78.9から立川市の102.3までと、昼間人口と夜間人口に変動があり、また地域によっても差がある。しかしながら、流域全体に関わる人口動態調査は困難なので、住民登録人口をもって代表させることとした。以下の下水道普及人口などに対しても同じ考え方をする。

流域推定人口は、流域にかかる各市の町丁別人口ごとに算定し、町丁全部が流域に含まれていない場合は、住宅地図を参照しながら、面積比で人口を算定する。算定法は、対象年と翌年の1月1日現在人口を平均する方法を、採用した。

(3) 下水道整備面積・普及人口

対象流域は、流域下水道の北多摩1号と2号および野川処理区に含まれている。また対象流域内で下水道が整備された地区の大部分が、北多摩1号幹線に流入し、一部は野川幹線に流入しており、流域下水道の集水域と流域界は一致していない。

そこで対象流域内の下水道整備状況を把握するた

表-1 流域諸元

諸元	年	1975	1981
流域面積(km ²)		19.27	19.27
河道延長(km)		4.48	4.48
下水道未整備面積(km ²)		15.56	8.18
流域推定人口(人)		154,408	158,442
下水道未整備人口(人)		127,947	67,233
浸透域率(%)		76.3	69.1

表-2 工種および不浸透域率

工種	年	1975年		1979年	
		面積率	不浸透率	面積率	不浸透率
市街地		1.52	58.1	1.52	58.1
宅地		49.71	21.6	50.84	26.3
道路		12.11	87.7	13.60	100.0
学校		8.2	16.4	8.20	16.4
公園・緑地		5.92	2.2	5.84	2.2
田畑		22.54	0.0	20.00	0.0
不浸透域率limp		23.7		29.3	

め、流域下水道現況図および公共下水道普及状況調査をもとにして、流域内の下水道整備面積と人口を算出した。

3. 水文データ

(1) 日降雨量

水収支計算に使用した日降雨量は、主として小金井観測所で観測した資料である。周辺には、1975年当時4地点に雨量計が設置されていたが、1979年から1980年にかけて、小金井観測所の2～3km上流の2カ所に雨量計が設置され、観測密度が高くなった。

これらの観測点と小金井観測所の日降雨量の相関が良いこともあり、日降雨量データとしては、地点雨量で代表させることにした。また、雨量データに欠測が生じた場合のみ、周辺雨量観測所のデータを算術平均して、補充することとした。

日降雨量の観測期間は、対象年の1月1日から12月31日までで、その単位は当日午前零時までの24時間雨量とする。

(2) 日平均流出高(日流出高)

小金井観測所の1975年水位記録に対しては、1974年2月から1975年11月までに行った高水および低水流量観測から得られた次式を利用して、流量へ換算する。

$$Q = 17.71 (H - 45.37)^2 \quad \text{cor.} = 0.961$$

ここに、H : A.P.水位高 (m)

Q : 流量 (m³/sec)

1981年水位記録も同様に、1981年8月から1983年8月までの高水・低水観測から得られた

$$Q = 16.20 (H - 45.32)^2 \quad \text{cor.} = 0.994$$

を利用する。

日平均流出高の算定は、当日午前1時から24時までの毎正時における流量の相加平均値を、日平均流量とし、日平均流出高 q_r に換算した。

(3) 蒸発散量

長期流出解析では、対象期間の損失量の大部分と考えられている蒸発散量を、推算しなければならない。この蒸発散量を推定するHamonやThornthwaiteの式、またPenmanの方法などが提案されているが本論文では、1974年9月以降観測して得られたデータから求めた経験式を、利用することにした。

蒸発散量 E_D (mm/day) を、日平均気温 T_D と日照時間 S_D (hr) から、次式で推定する。

$$E_D = 0.34 \times S_D + 1.40 \quad (T_D \geq 20^\circ\text{C}, \text{cor.} = 0.83)$$

$$E_D = 0.25 \times S_D + 0.79 \quad (20^\circ\text{C} > T_D \geq 10^\circ\text{C}, \text{cor.} = 0.85)$$

$$E_D = 0.19 \times S_D + 0.45 \quad (10^\circ\text{C} > T_D, \text{cor.} = 0.71)$$

(4) 給排水量

生活・産業活動にともなった流域全体としての給排水収支を考えると、流域内外から供給された給水量は、最終的に下水処理場へ送水されるか河川に雑排水として排出されたり、一部は漏水など地下浸透をしていることになる。長期流出のハイドログラフ全波形予測に重点をおくには、低水流量の把握が重要である。野川の低水流量は、地下水流出量と雑排水量から構成されていることから、低水流量中に占める雑排水量を、推定することが必要である。

この雑排水の流入状況を見るため、無降雨日が少なくとも10日以上連続する期間を対象にして、この間の平均的な24時間の流出高変動パターンを、図-2に示した。午前6時から9時にかけて1975年は2.4, 1981年は1.4 mm/dayと、流出高は最少になる。流域的に給水された水量が排出されてくるまでの時間差として考慮すると、この時間帯は、流域内の生活・産業活動が休止した状態とみなせる。この時間帯の流出高を基底流出高として、流出高変動パターンから雑排水量を推定すると、1975年は

0.8 ~ 1.1 mm/day, 1981年は0.4 ~ 0.6 mm/day程度となった。

つぎに、対象流域に関係する5市の水道日給水量下水道排水区域図などの上下水道関連資料から、以下の方法で、雑排水量を推定することにした。基本的方針は、給水量と排水面積などの諸元は比較的容易に得られ確度も高いので、これらから容易に推定できるようにすることである。1人1日給水量は地域別に大差がないと考えると、給排水量は、地域内面積と人口集中度に関係することになる。

$$q_w = \frac{1}{A} \cdot \sum_{j=1}^n \left\{ (W_i + W_{si}) \times \frac{U_i}{G_i} \times f_{wi} \times \frac{P U_i}{P G_i} \right\}$$

q_w : 流域内の雑排水量高 (mm/day)

A : 流域面積 (km²)

W_i : 関連するi市の水道給水量 (m³/day)

W_{si} : 関連するi市の水道以外の水源使用水量

G_i : 関連するi市の行政面積

U_i : 関連するi市の流域内下水道未整備面積

f_{wi} : 関連するi市の有効水道給水率

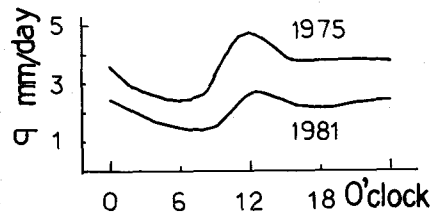


図-2 日流出高変動パターン

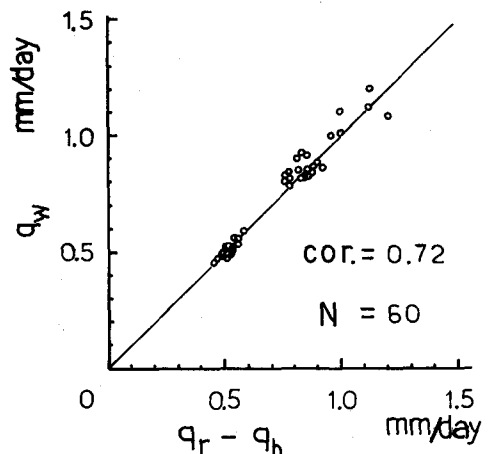


図-3 推定雑排水量との相関

PGi : Gi 内の住民登録人口

PUi : Ui 内の住民登録人口

無降雨日が連続する期間について、この式で推定した日平均雑排水量と、日流量と最小流出高から算出した雑排水量との関係を、図-3に示す。

4. 解析手法

直列三段タンクモデルを、解析モデルとして採用する。各タンクで計算された流出量の総和に、推定雑排水量を加えたものを、計算日流出高 q_c とした。

(1) 各定数の推定

最近是最適化手法を採用して各定数を決定する方法も検討されているが、減衰率や既存モデルから推定する方法が一般的である。本論文では、第一段の流出乗数を以下の考え方で推定した。10分単位の降雨流出の統計的相関性を調べると、最大相互相関は遅れ時間80分で現われ、1日以上を周期成分では線型性が良くなっていた。そこで、無降雨日が連続した後の日降雨量と日流出高は、良い対応をすると考え、降雨量をそのまま貯留高と見なし、流出乗数と位置高を流出高から推定することにした。対象年について、 $R - E_D$ と q_r の関係を図-4に示す。

連続無降雨日数と最小流出高の関係を、図-5に示す。この図の減衰率から、第二段以下の各定数を推定することにした。

(2) 相関係数

欠測日を除いた観測日数に対し、実測流出高 q_r と計算流出高 q_c の相関計算を行う。判断基準としては0.9以上を目標とした。

(3) 水収支条件

観測日数に対する q_r と q_c の差の総和を、水収支条件とし、 $\Delta \epsilon = 0.01$ 以下を目標とした。

$$\Delta \epsilon = \sum_{j=1}^N (q_r(j) - q_c(j)) / \sum_{j=1}^N q_r(j)$$

(4) 二乗誤差平均

$$Er = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \{ (q_c(j) - q_r(j))^2 / q_r(j) \} \quad (\text{mm/day})$$

モデルの適合性を判断する上で、この二乗誤差平均を採用した。対象年の実測資料自体、どの程度変動幅があり二乗誤差を含むかを、以下で評価してみた。水位高に $\pm 1 \text{ cm}$ の読取り誤差がある場合、両年とも $\Delta Er = 0.03$ 程度の二乗誤差となる。また低水流出部の年間最頻流出高に対し比較的多い流出高との差を調べると、1975年は $+0.88 \sim -0.51 \text{ mm/day}$ 、

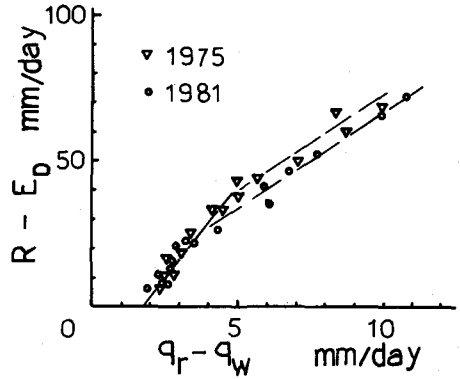


図-4 日有効降雨量と日流出高の関係

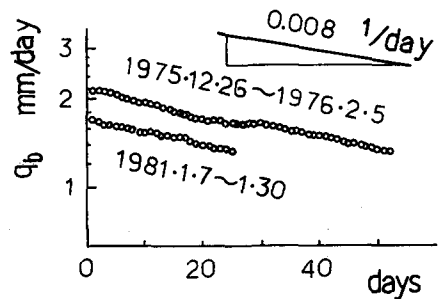


図-5 基底流出高の減衰状態

1981年は $+0.24 \sim -0.43 \text{ mm/day}$ の幅があり、その割合もそれぞれ約30~5%と25~35%ある。したがって単純に計算しても、二乗誤差平均は、1975年は $Er = 0.1 \text{ mm/day}$ 、1981年は $Er = 0.05 \text{ mm/day}$ 前後となるので、これらを目標とした。

5. 結果と考察

両年とも10個の洪水記録から減衰率を求めると、両年ともほぼ0.84~0.78であった。初期値として、第一段の下流出乗数を0.08、上を0.02、浸透乗数を0.75 1/dayと与え、計算を開始し、目標とした相関係数・水収支条件・二乗誤差平均の値を、満足するように試行した。

その結果として得られた初期貯留高・流出乗数などのタンク定数は、表-3のとおりである。これらの値で計算した日流出高ハイドログラフを、図-6、7に示した。

1975年の場合、年降雨量は1439.0 mmで、水位の延欠測日数22日を除いた343日分の実流出高

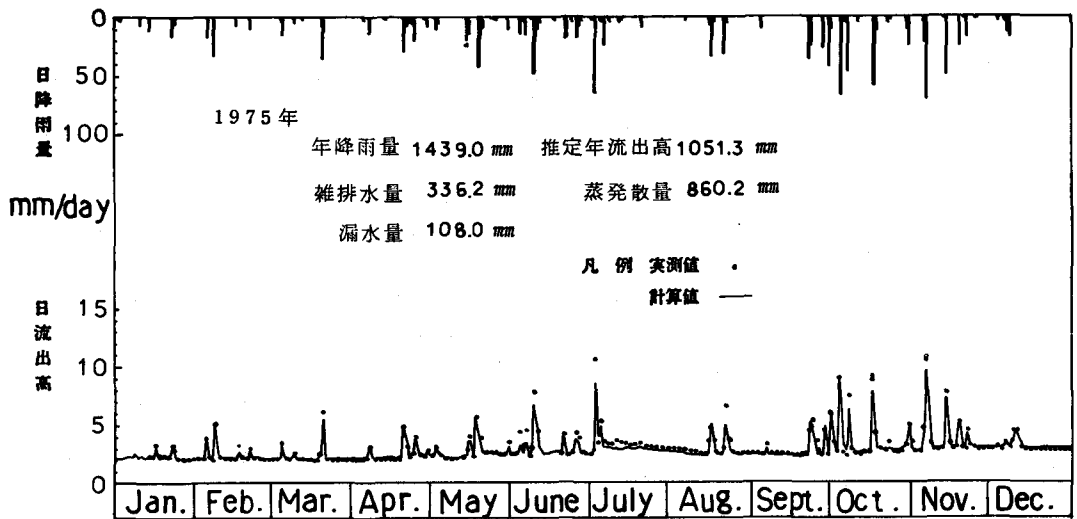


図-6 小金井地点のハイドログラフ (1975年)

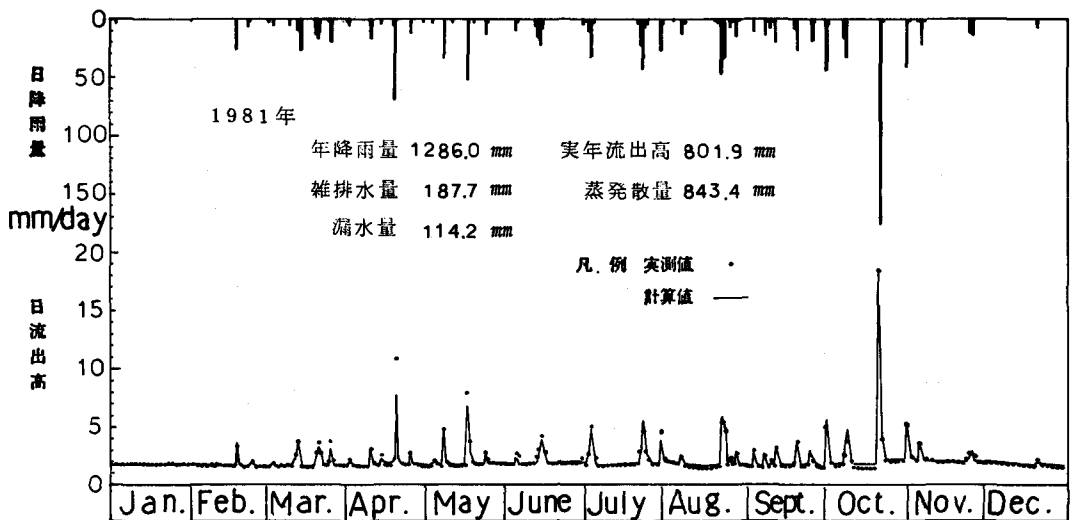


図-7 小金井地点のハイドログラフ (1981年)

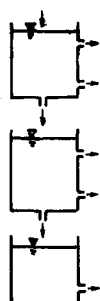
997.91 mm に対し、計算流出高は 994.28 mm となり、その差は、 $+3.63 \text{ mm}$ ($\Delta \varepsilon = 3.6 \times 10^{-3}$) であった。相関係数は 0.907, $Er = 0.0968 \text{ mm/day}$ であり、このモデルで得た推定年流出高は 1051.31 mm となった。また、第一段タンクから 119.7 mm, 第二段タンクは 136.4 mm, 第三段タンクは 458.9 mm の年流出高を与える。

1981 年の場合は、年降雨量 1286.0 mm で、水位の

欠測はなく、実年流出高 801.92 mm に対し、モデルでは 801.25 mm で、その差は $+0.67 \text{ mm}$ ($\Delta \varepsilon = 8.4 \times 10^{-4}$) 相関係数は 0.952, $Er = 0.0569 \text{ mm/day}$ である。第一段タンクからは 103.5 mm, 第二段タンクは 80.4 mm, 第三段タンクは 429.7 mm の年流出高を与える。

流域水収支に与える都市化の影響は、表-3に示すように、第一段タンクの流出孔位置高が 40 mm から 20 mm に変化し、表面流出成分の増加と流出時間の短

表-3 タンク定数結果



計 算 年 タンク	1975 (小金井)				1981 (小金井)			
	初 期 貯留高 mm	流 出 孔		浸透孔 乗 数 1/day	初 期 貯留高 mm	流 出 孔		浸透孔 乗 数 1/day
		高 さ mm	乗 数 1/day			高 さ mm	乗 数 1/day	
第 一 段	0	40	0.015	0.74	0	20	0.015	0.74
		1	0.08			1	0.08	
第 二 段	160	20	0.002	0.006	150	27	0.001	0.006
		4	0.001			4	0.001	
第 三 段	1710	3	0.00079	—	1600	3	0.00079	—

縮現象を顕著に示す結果となった。第二段タンクの初期貯留高は160 mmから150 mmに、上方の流出乗数は0.002から0.001 1/dayに減少しかつ位置高が20 mmから27 mmへ高くなった。これは、第二段タンクからの中間流出成分が流出しにくくなったことを、意味する。第三段タンクの初期貯留高が1710 mmから1600 mmに減少しただけで、地下水流出機構に変化はなかった。

第一・二段タンクからの流出の変化を、1975年1981年それぞれについて、流出高と年降雨量との比で表わしてみる。第一段タンクでは、0.08から0.15に増加し、第二段タンクでは0.10から0.06に減少した。この変化からも、流域の都市化が表面流出高の増加と中間流出高の減少を、もたらしたことがうかがえる。また低水流出高の減少は、大部分が下水道整備による流入雑排水量の減少のためであり、基底流出高の減少は、わずかである。

つぎに、1975年の水収支計算をすると、流域への流入分は年降雨量 1439.0 mm、雑排水量 336.2 mm、漏水量 108.0 mmであり、流域からの流出分は年流出高 1051.3 mm、蒸発散量 860.2 mmであるから、約30 mmの損失となる。年平均30 mm程度の損失があるとみなすと、1975年から1981年までに約150 mmの損失があることになる。タンクの初期貯留高の和は、1975年が1870 mm、1981年が1750 mmであることから、その差は120 mmとなる。したがって、約30 mm程度の差があるが、都市化による水収支の損失量として妥当なものと思われる。

当初は第一段タンクの流出乗数の増加と浸透乗数の減少も予想したが、そのような結果とはならなかった。不浸透域率が7%程度増加しただけでは、浸透乗数の減少などは明らかにならないとも考えられるので、今後より都市化が進行した場合に対し、この点を調べる必要があると考えている。

参 考 文 献

- 1) 東京都：都市計画概要．1982，298-303
- 2) 米田・和泉・渡辺・土屋・国分：都市河川の水収支に関する研究（その2）．昭和50．都土木技研年報．1976，113-124
- 3) 黒羽公明：降雨・流出の相関に関する研究 - 野川流域を対象として - ．昭52．都土木技研年報．1978，143-148
- 4) 和泉・黒羽：流域の都市化に伴う水収支の変化について（その1）．昭58．都土木技研年報．1983，85-94
- 5) 和泉・米田：不浸透域率と流出率．昭53．都土木技研年報．1979，179-184