

丘陵地都市流域の水質特性と水循環特性

Water Quality and Hydrological Cycle in an Urbanized Hilly Basin

平野晃章*・安藤義久**

By Teruaki HIRANO and Yosihisa ANDOU

Urbanization of basins leads not only to pollution by sewage but also to change of the characteristics of hydrological cycle and water quality of natural cyclic flow-components such as ground water flow and surface flow in the basins. Many studies were used to attend to the load of pollutant by sewage. But rare study attends to the load of ground water flow and surface flow.

The purpose of this paper is to describe the character of an urbanized river basin in hilly land, so then in this paper authors estimate the amount of discharge of dissolved chemical compounds, and explain the characteristics of hydrological cycle in the watershed.

Keyword: urbanized basin, hydrologic cycle, load of chemical compounds

1. はじめに

都市河川水は、人間活動による生活雑排水や工場廃水などの人為排水と、自然の水循環による洪水流出水や地下水流出水などの流出水との両方で構成されている。このうち、人為排水は、その河川水が流入する水域の汚濁負荷の原因としてこれまで多く注目されてきた。しかし、今後は下水道施設の整備が進みかつてのような圧倒的な汚濁は少なくなっていくものと考えられる。代わって、これまでバックグラウンド程度に考えられてきた洪水流出水や地下水流出水による負荷量が重要となってくる。

流域の都市化が河川に与える影響は、生活雑排水等による汚濁だけではなく流域における水循環特性や地下水の水質特性や洪水流出水の水質特性をも確実に変化させる。しかしながら、都市化が流域の水循環特性と流出水の水質特性とに与える影響を定量的に評価することに成功した研究は、非常に少ないと言える。

本研究では、近年急激に開発が進められた多摩丘陵の都市河川において、現況の水質特性と水循環特性とを実測値に基づき評価した。そして、水循環と水質変動に関する定量的なモデルを構築した。さらにそれを基に、溶存化学成分の流出負荷量を算定し、近隣の水質特性と流出負荷量と比較することで都市化が河川の性格に与える影響を半定量的に評価することを試みた。

* 正会員 工修 東京都建設局 第二再開発事務所 土木課
(〒135 東京都江東区白河 3-9-3)

** 正会員 工博 東京都立大学助教授 工学部土木工学科
(〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

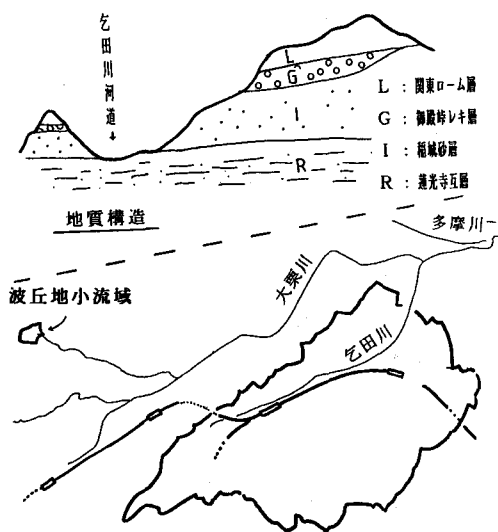


図-1 流域の概念図

2. 観測資料

2・1 対象流域

対象流域は東京都の西南部に位置する多摩ニュータウンを流れる乞田川の流域（流域面積13.5km²）である。この流域は近年まで森林域であったが昭和40年代の半ばころから開発がなされ都市化されてきた。現在開発は完了しており、流域全体が市街地となっている。土地利用の面積率は建物屋根・道路等が38.4%、公園・民家の間地50.8%、グラウンド・造成地が10%となっている。都市の排水設備としては、分流式下水道がほぼ100%完備されており汚濁は少ない。ただし、污水管と雨水管の誤接合などによって若干の人為排水が河川に流されている。

当流域の地質構造は上位層より順に、関東ローム層、御殿峠レキ層、稲城砂層、蓮光寺互層が堆積している。このうち、稲城砂層は層厚20メートルにもおよび、当地の地下水の主な帯水層と考えられている。また、最下層の蓮光寺互層と関東ローム層の下層部分である多摩ローム層とは難透水性の地層であり、帯水層基底を形成していると考えられる。

2・2 試料と方法

観測地点は、東京都土木技術研究所により流量の継続的な計測がなされている乞田川車橋地点である。この地点において、まず、1992年の8月11日から翌日にかけて、1時間間隔で24時間観測を行った。河川水が人為排水の影響でどのような日周期変動をするのかを観測するのが目的であり（ただし観測中に9.0mmの降雨が生じてしまったため完全な日周期変動の調査とはならなかった）、測定項目は、水位（→流量）、電気伝導度、水温、溶存化学成分濃度（ Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 ）等である。その後、1992年9月23日より11月22日にかけて、水位（→流量）と電気伝導度について、現地に自記計測計を設置して、継続的なデータの採取を行い、溶存化学成分の濃度については月2回の間隔

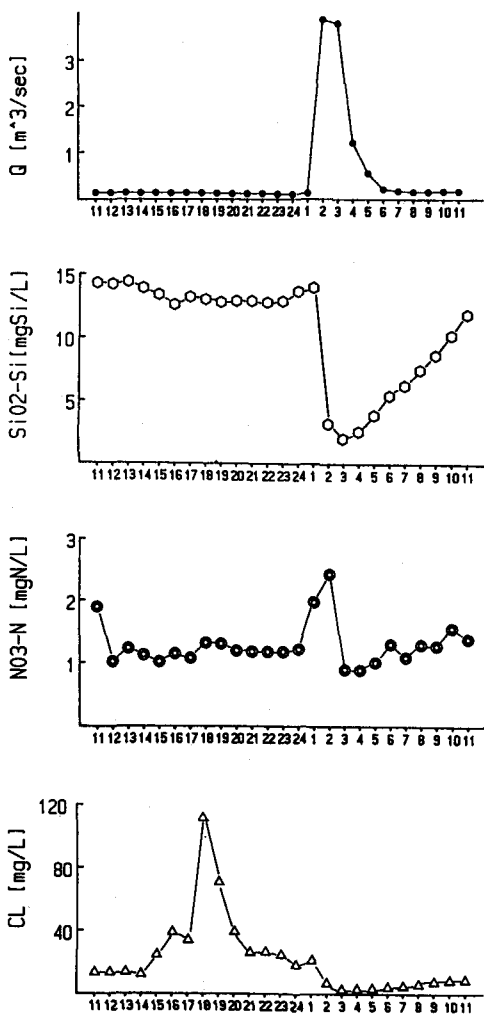


図-2 24時間観測の結果(8月11日-12日)

で調査を行い、経時的なデータの採取を行った。

3. 観測結果と考察

3. 1 24時間観測の結果

(a) 流量と水質の変動特性

図-2は、1992年の8月11日から翌日にかけて行った24時間観測の流量と水質に関する結果の一例である。これを見ると、18時において、 Cl^- の濃度の爆発的上昇が起こっている。これは、無機化学工場からの高濃度の廃水等の人間活動による影響と考えられ、 Na^+ 、 K^+ の濃度もこれと非常によく似た変動を示した（図は省略）。また洪水時の午前2時から4時にかけては、 Ca^{2+} 、 SiO_2 の濃度の低下が起こっており、洪水流出水による希釈効果が見られる（ Mg^{2+} も同様）。このことから、河川水の水質変動をもたらす主要因として洪水流出水と人為排水とを考え、そのそれぞれの水質の特徴を推定した。

(b) 各流出水の水質

この河川水を構成する各々の水質を分離抽出して行く手続きは、負荷量と流量のハイドログラフを基底流出から分離して、分離された負荷量を分離された流量で除す方法によった。その結果推定された各流出水の水質の特徴は表-1にまとめた。地下水流出水は SiO_2 、 Mg^{2+} の濃度が高く、洪水流出水はファーストフラッシュの効果により洪水立ち上がり部分で NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ の濃度が高いほかは他の水質項目は低濃度であり、人為排水は時間的に激しく水質変動したが全体的には Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ が高濃度であった。

3. 2 自記計測計による観測結果

(a) 流量と電気伝導度の特徴

図-6（+印で示されている）は、1992年9月23日から11月22日までの、流量と電気伝導度についての自記計測計による観測結果（1時間間隔のデータ）である。この期間の総流出量で、洪水流出量193mm、低水流出量121mmであり、洪水流出量が低水流出量より多い都市型の水循環をしていることがわかる。そのうち低水時について注目すると、流量に一日周期の周期的変動（周期的変動成分は総流出量で11.7mm）があり、都市からの人為排水の影響が見られる。電気伝導度は夕刻に半周期的に高い値となり人間活動による Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ の濃度の上昇がこれに対応していると思われる。また、洪水時と洪水終了後のしばらくの間は電気伝導度は低く保たれていることから、洪水流出水と早い地下水流出水による希釈効果が見られる。

(b) 各流出水の特徴

河川水を構成する流出水を、地下水流出水と早い地下水流出水と人為排水と洪水流出水とであると考えると、その各流出水の流量と電気伝導度の特性について考察した。

まず、低水時においては流量と電気伝導度に日周期変動が見られるが、図-3には負荷量が最も少ない時、即ち、人為廃水の影響が最も少ない午前8時近辺の負荷量と流量の相関図をしめした。低水時の負荷量は地下水流出水と人為排水とで構成されると考えると次式が成り立つ。

$$L\ell = Cg \times Qg + Ls \tag{1}$$

$L\ell$: 低水時負荷量
 Cg, Qg : 地下水流出水の水質、流量
 Ls : 人為排水の負荷量

図-3では $L-Q$ 関係は高い直線性があり切辺もほぼゼロである。このことから、この直線の傾きを Cg 即ち地下水流出水の伝導度の値であると推定した。

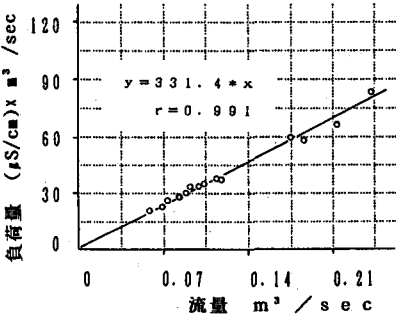


図-3 日最少負荷量・流量相関図

人為排水に関しては、一日最低の負荷量の時の値で流量と負荷量を分離し、日周期変動成分の平均値が求められた（図-4参照）。また、洪水流出と早い地下水流出との電気伝導度の値は、負荷量を低水負荷量から分離することで求めたが、ここでもファーストフラッシュの影響が見られた。ただし、平均的な値としては、対象期間内の4つの洪水の平均値で、洪水流出水の電気伝導度 $64.5\mu\text{S}/\text{cm}$ 、早い地下水流出水の電気伝導度 $227\mu\text{S}/\text{cm}$ が求められた。

4. モデルの構築と適用結果

4・1 水循環モデル

図-5には、本研究で構築した水循環モデルをタンクモデルで表記した^{1) 2)}。

まず、流域を現実の土地利用状況に応じて、雨が地下に浸透する浸透域と不浸透域とに分ける。不浸透域に降った雨は初期損失となる凹地貯留 2mm を満たした後、すべて洪水流出となる。浸透域に降った雨は、土壌水分不足量（圃場容水量 200mm に満たない水分量）を補った後、終期浸透速度（芝生地 $20.2\text{mm}/\text{hr}$ 、グラウンド $4.8\text{mm}/\text{hr}$ ）を越える雨量は Horton 型地表流として洪水流出水となり、浸透能以下の雨量は土壌水分タンクに浸透し蓄えられる。土壌水分タンクに蓄えられた水は圃場容水量を越える量だけが地下水帯へと流下し、地下水帯からは3段のタンク（早い地下水タンク、地下水タンク、遅い地下水タンク）を経て地下水流出水として流出する。蒸発散は凹地貯留と土壌水分タンクとから、ハーモンの蒸発散速度に従って起こると仮定した。

タンクの係数パラメータの同定は、観測データから図-4の日周期変動を差し引いたデータを用い、試行錯誤的に行った。また、最下段のタンクからは深層への漏水があると仮定し、3年間の降雨記録からシミュレートした長期の水収支が釣り合うようにタンクの底に穴を開けた。そして最後に、人為排水を足し合わせ都市流域の水循環モデルとした。

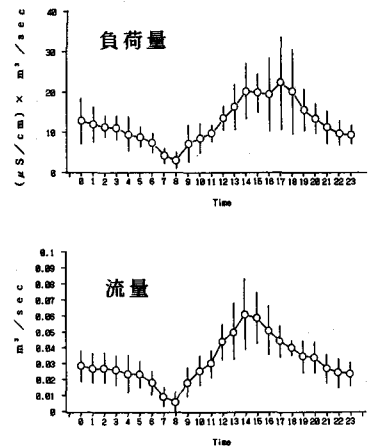


図-4 日周期変動成分

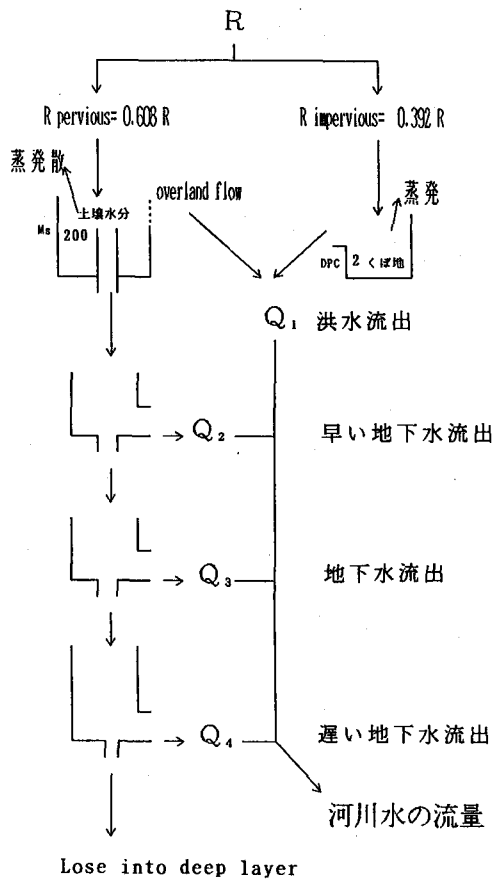


図-5 水循環モデルのタンクモデル表記

表-1 各流出水の水質推定値

水質項目(mg/L)		EC(μ S/cm)	Cl	SO ₄	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NE ₄ -N	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂ -Si
地下水流出水	240B.	400	14.9	53.1	1.22	.019	.005	15.9	3.01	35.3	12.1	13.6
	AUTO.	331	(12.3)	(43.9)	(1.01)	(.016)	(.005)	(13.2)	(2.49)	(29.2)	(10.0)	(13.6)
早い地下水流出水	240B.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	AUTO.	227	(8.46)	(30.1)	(.692)	(.011)	(.003)	(9.02)	(1.71)	(20.0)	(6.87)	(7.72)
洪水流出水	240B.	105	3.74	2.8	1.53	.062	.519	3.16	1.72	12.8	1.34	12.1
	AUTO.	64.5	(2.28)	(7.82)	(.935)	(.038)	(.317)	(1.93)	(1.05)	(7.82)	(.818)	(1.30)
人為排水	240B.	687	116	58.9	1.51	.030	.378	56.3	15.0	37.7	10.8	12.3
	AUTO.	*	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)

240B. ; 24時間観測による推定、 AUTO. ; 自記計測による推定、 * ; 日周期変動をしており一定値でない

4・2 水質変動モデル

水質変動モデルは上記の水循環モデルを基に、河川水を構成する各流出水の水質を設定し、その混合として河川水の水質を再現計算するものとした。各流出水の水質については、3・1 (b) および 3・2 (b) の項での推定より表1のように定めた。ここで、表1において、電気伝導度に関しては24時間観測の結果による推定値と自記計測計の観測結果による推定値とで異なった値が出てしまったが、自記計測計によるものの方が豊富なデータからの推定であるため、より妥当な推定値と考えられる。また、()内は溶存化学成分の濃度について、24時間観測の結果による推定値を自記計測計による電気伝導度の推定値との比率で補正した値である。再現計算には()内の値を用いた。なお、洪水流出水のファーストフラッシュの効果や地下水流出水の水質形成に対する先行降雨の影響等を無視し、常に一定値として与えてしまうことには問題があると考えたが、ここでは最も簡単な方法で水質の再現計算をするのにとどめた。

4. 3 モデルの適用結果

図-6に水循環モデルと水質変動モデルの適用結果を示した。これを見ると流量と電気伝導度の適合性は良いと言える。流量と電気伝導度(負荷量)の平均相対誤差は、それぞれ33%、31%であり、観測期間内の総量では、流量、負

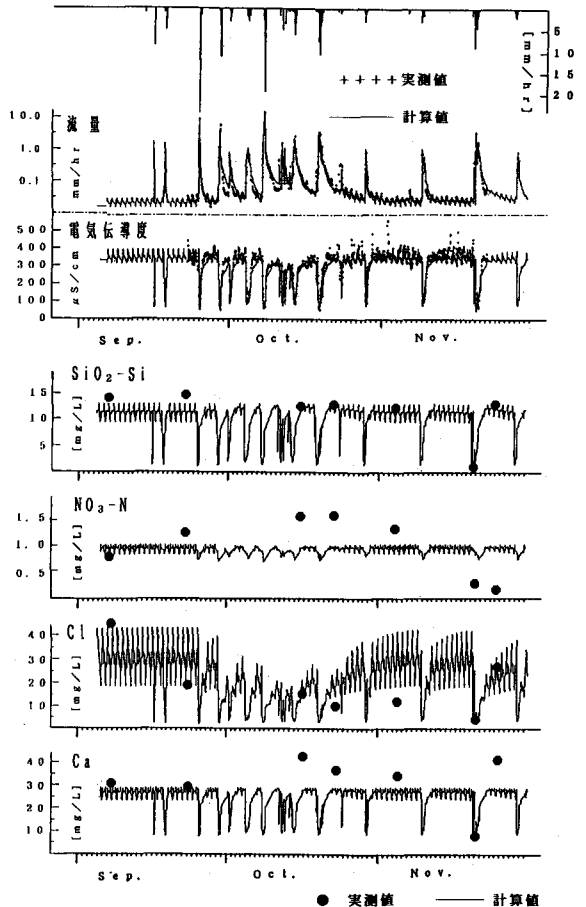


図-6 モデルの適用結果

荷量とも計算値と実測値とでほとんど差はない。一方、溶存化学成分の濃度については、 SiO_2 ではよい再現性が得られたものの、それ以外の化学成分の濃度の再現性はよくなかった。そのうち、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} の濃度は比較的よい適合性が得られたが、地下水流出量の多い時に計算値が過小評価となる傾向が見られた。 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ については、人為排水によるランダムな変動幅が大きいため、適合性の良否を評価することが難しいが、地下水流出量の多いときに計算値のほうが過大評価となる傾向が見られる。このことから、地下水流出水、特に早い地下水流出水の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} の濃度について過小に、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ の濃度について過大に見積もっていたことが考えられる。また、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ の濃度については、再現性が特に悪かった。これは、これらの成分が、生物活動などによって気象条件、先行降雨の条件に伴い複雑に変化するためと思われる。本研究ではこれらの要因についてモデルに組み込んでいないことの欠落と言える。

6. まとめ

都市河川の特性を定量的に評価するため、流域における水循環と河川水の水質変動とをモデル化した結果、以下のようであった。

水循環特性については、流域の土地利用条件と若干の試行錯誤とを用いて、水循環モデルを構築し、河川水流量の再現計算を行ったところ、よい結果を得た。このことから、従来からいわれているように都市流域での水循環特性は土地利用条件に大きく依存していることが確認できた。

水質変動特性については、河川水、地下水流出水、早い地下水流出水、洪水流出水、人為排水とから構成されるものと仮定し、それぞれの流出水の水質の混合として河川水水質の再現計算を行った。その結果は、電気伝導度と SiO_2 の濃度ではよい再現性が得られたが、それ以外の水質項目はよい再現性が得られなかった。これは、溶存化学成分の濃度は、生物活動等の要因により複雑に変化するためと考えられた。

また流域からの流出負荷量については、1980年の降雨記録を基に再現計算を行い、その結果を表-2に示した。ただし、人為廃水による負荷量はこれに含まれていない。また、比較対象として近隣の自然流域である波丘地流域のデータをものせてある³⁾。これを見ると、 Cl^- の流出負荷量は自然流域（波丘地）と都市流域（乞田川流域）とでほとんど変わらない。しかし、波丘地流域の雨量で乞田川流域の雨量を補正すれば、乞田川流域からの Cl^- の流出量の方が若干多くなる。このことは、 Cl^- が人間活動の影響を反映する水質項目と言われている事と一致している。 NO_3^- については、逆に自然流域からの流出負荷量の方が多いと推算された。

このことから、都市化されると NO_3^- の流出負荷量はむしろ減少するのとも考えられる。しかし、これを結論するには、 NO_3^- の濃度形成に及ぼす生物活動の要因、両流域の地質構造の違いによる影響等々について緻密な現場観測による更なる検討を待たなければならない。

都市河川の性格としては、土地利用条件により洪水流出量が増加すること、人間活動の影響で流量と水質ともに日周期変動をしていること、都市化によって Cl^- の流出負荷量が増加すること等がわかった。

表-2 1980年の年間流出量・流出負荷量

	波丘地 ³⁾	乞田川 [※]
降水量 [mm/ year]	1698	1530
流出量 [mm/ year]	910	776
Cl^- [kg/ km ²]	4468	4321
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ [kg/ km ²]	2400	710

※ 人為排水によるものは含まれていない。

参考文献

1) 安藤義久・虫明克臣・高橋 裕：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，pp197~208，1986
2) 菅原正己：流出解析法，共立出版，1972
3) 小倉紀雄・石野 哲・長井 潔・丹下 勲：多摩丘陵における表面流出水中の窒素化合物の挙動，陸水学雑誌，vol. 47, No. 1, 1986