

東川上流試験流域の水循環解析

ANALYSIS OF HYDROLOGICAL CYCLE IN THE AZUMA UPRIVER EXPERIMENTAL BASIN

安藤義久¹・藤村和正²・小澤佳代³・濱中哲彦⁴・綱川恭弘⁵

Yosihisa ANDO, Kazumasa FUJIMURA, Kayo OZAWA, Akihiko HAMANAKA
and Yasuhiro TSUNAKAWA

¹ フェロー 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

² 正会員 東京都立大学助手 大学院工学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

³ 東京都水道局 給水部西部建設事務所 (〒168-0063 東京都杉並区和泉3-8-10)

⁴ 東京都建設局 西多摩建設事務所 (〒198-0045 東京都青梅市青梅3-20-1)

⁵ 東京都立大学学生 工学部土木工学科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

Consciousness of the environment has raised in recent years. Many municipality corporations began conserving and reviving the ecological river front in urban areas which was deteriorated by urbanization. The first procedure for the river front conservation is to increase the ordinary water discharge of urban minor rivers, and the basic study for that is to clarify the hydrological cycle of such river basins.

The present paper analyses the hydrological cycle in terms of groundwater runoff, direct runoff and groundwater storage in the Azuma upriver basin during 76 days in 1996, using the daily hydrological model for an urban basin which was presented by Ando et. al. (1982). The simulation resulted in approximation to the observed runoff hydrograph and the groundwater storage which was derived from the measured groundwater level. This paper also predicts the runoff hydrograph in the same period using the same model on the supposition that houses infiltration facilities are set in this basin. This simulation demonstrated that the groundwater runoff was increased and the direct runoff was reduced, that effect on restoring the ordinary water discharge.

Key Words : Hydrological cycle, River front conservation, Groundwater runoff, Urban basin, Houses infiltration facilities

1. はじめに

今日、社会の環境への意識は高く、都市域においては潤いのある生活空間が望まれ、都市化により失われた水辺の再生が期待されている。既に、多くの自治体では都市中小河川を対象に水辺環境の保全に取り組んでおり、その基本的な対策は激減した平常時流量を復元させることであるが、対象流域の水循環機構を明らかにすることはその基礎研究として重要である。

本研究では、埼玉県南西部の所沢市街を含む現在でも都市化が進行している東川流域の水辺環境保全の取り組みとして、東川上流域を試験流域に設定し、安藤・高橋・有賀・金尾¹⁾が構築した都市流域を対象とする日単位の水循環モデルの適合性について検討し、本流域の水循環機構を究明することを第一の目的とする。本研究の新たな点は、民家の浅井戸を観測井として地下水位を観測し地下水貯留量につい

ても検討していること、また、堅固な流量観測堰が建設され低水時の流量観測精度が向上し、良好な実測値により水循環モデルの評価が可能になったことである。

本研究では、さらに、水辺環境の保全対策として当流域に雨水浸透枳の設置導入が推進された場合を想定し、本モデルを用いて地下水流出および地下水貯留量の変化に関するシミュレーションを行い、雨水浸透枍の有効性について検討することを第二の目的とする。

2. 対象流域の概要

(1) 対象流域の概要

東川流域は、関東ロームで形成される下末吉面の所沢台に位置し、埼玉県南西部の所沢市内に含まれる流域面積が18.1km²の都市流域であり、図-1にその概要図を示す。東川は、源流を狭山丘陵地内の狭

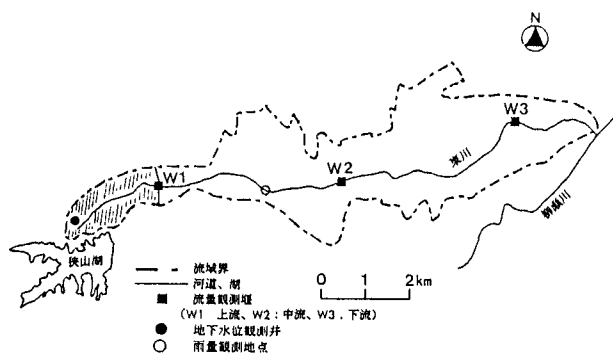


図-1 東川流域の概要図

山湖付近に発し、中流部付近で所沢市街地を貫流し、下流端で柳瀬川に合流している。上流、中流、下流の各1地点には流量観測堰が設置されている。本研究で対象とする流域は上流堰より上流の図-1に示す斜線部分であり、流域面積は1.89km²である。

東川流域の地下地質は、古多摩川の扇状地の砂礫層の上に風化帯の粘土層があり、その上に、浸透性、保水性に優れたローム層が堆積している。従って、台地上への降雨はローム層内の地下水の主要な涵養源であり、その地下水は粘土層の上面に沿ってゆっくり流れ、谷地等の斜面部で東川に湧水として流出している。東川はこの地下水による得水河川である。

表-1には1/5,000の地形図から読み取った東川上流試験流域の土地利用別面積率を示す。この地域は市街化調整区域であり、また、お茶の生産地でもあるため、宅地も存在するが茶畑等の畑が53.3%と大半を占めている。流域の浸透域面積率および不浸透域面積率を把握するためには、さらに、屋根の雨水の流出先を知る必要がある。本流域には既に雨水浸透枮が2,000基設置されており、これら雨水浸透枮に接続される雨樋の屋根は浸透域に含まれる。雨水浸透枮1基当たりの集水面積は、安藤・鍋山²⁾の国分寺試験流域の調査では約18m²であり、この値を代用して雨水浸透枮による浸透域面積率を算出すると約2%となる。また、現地において雨樋の接続先を調査したところ約4割の家屋がU字溝などの排水溝に接続していた。本流域の下水道の普及はごく一部であることから排水溝の流出先は東川と考えられ、排水溝に接続された屋根は不浸透域に含まれ、その面積率は4.1%と算出された。従って、不浸透域面

表-1 東川上流試験流域の土地利用別の面積率

土地利用	道路	屋根※	民家の 間地等	公園	畑	森林
面積率(%)	10.4	10.2	13.3	6.6	53.3	6.2

※屋根の雨水の流出先は、雨水浸透枮2%、排水溝4.1%、庭先4.1%である。

表-2 不浸透域と浸透域の面積率

土地利用	不浸透域	浸透域
面積率(%)	14.5	85.5

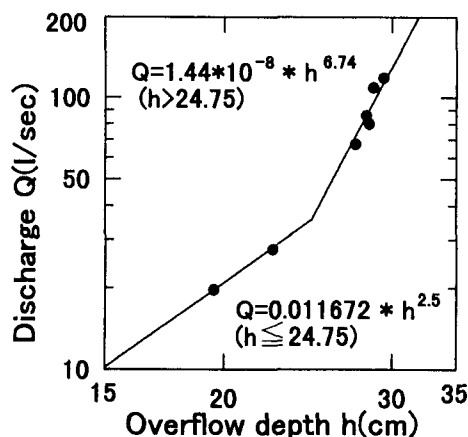


図-2 東川上流堰の水位流量曲線

積率は14.5%であり、残りが浸透域面積率で85.5%となる(表-2)。

(2) 水文観測体制

図-1の■印の上流、中流、下流の堰地点において10分毎の水位および電気伝導度を観測している。本研究では上流堰W1地点の水位データを対象とする。また、図-1の○印の東川鉄橋地点では雨量を観測しており、●印地点では民家の浅井戸において地下水位を観測している。

(3) 東川上流堰の水位流量曲線

東川上流堰の水位流量曲線を作成するため1996年9月から12月にかけて計8回の流量観測を行った。堰の構造は、兩岸がコンクリートで固定された幅3mの広幅矩形の鉄板であり、その中央部は直角三角形の切り欠きとなり、その部分は三角堰となる。流量観測の方法は、越流水深が三角堰の内部で小さい時は重量法、それ以外は川幅を小分割して電磁流速計を用いて平均流速を測定する流積法で行った。水位流量曲線は、越流水深が三角堰内部にあるときには三角堰の公式 $Q = Ch^{5/2}$ とし、定数Cの決定は流量Qと水位hの観測値を上式に代入して求めた。越流水深が三角堰の上縁端を越える場合は最小二乗法による近似式とした。1つの不良データを除き7データで作成した水位流量曲線を図-2に示す。この図より低水時の水位流量曲線の精度は良好であると言える。

3. 水質の24時間観測と人為排水の分離

(1) 水質の24時間観測

現在、東川上流域付近の下水道の普及はごく一部であり、河川水には人為排水が混入していると想定される。その裏付けとなる資料を得るため、1996年9月25日から26日にかけて上流、中流、下流の堰地点において水質の24時間観測を各地点3時間毎に行った。観測項目は、生物化学的酸素要求量(BOD)、溶存酸素(DO)、電気伝導度(EC)、pH、濁度(TURB)であり、図-3には上流堰での測定結果を示す。BODは25日19時から26日7時にかけて低い値を示し、日

中は比較的高い値を示している。溶存酸素もほぼ同様の傾向であるが、26日未明から朝にかけて低くなっている。逆にpHは26日の未明から朝にかけて若干高い値を示している。これらから夜間には人為排水の影響が少ないことが推察される。しかし、電気伝導度については深夜から朝にかけて幾分高めの値となり、人為排水の影響が現れる逆の傾向となっている。濁度については、25日20時に1mmの降雨が観測され、その影響で25日22時に高い数値が現れている。以上の水質調査の結果より、河川水は人為排水の影響を受けており、その日変化は未明から朝方にかけて小さくなる傾向があると推察される。

(2) 人為排水の分離

人為排水と地下水流出の分離には、水質と流量の

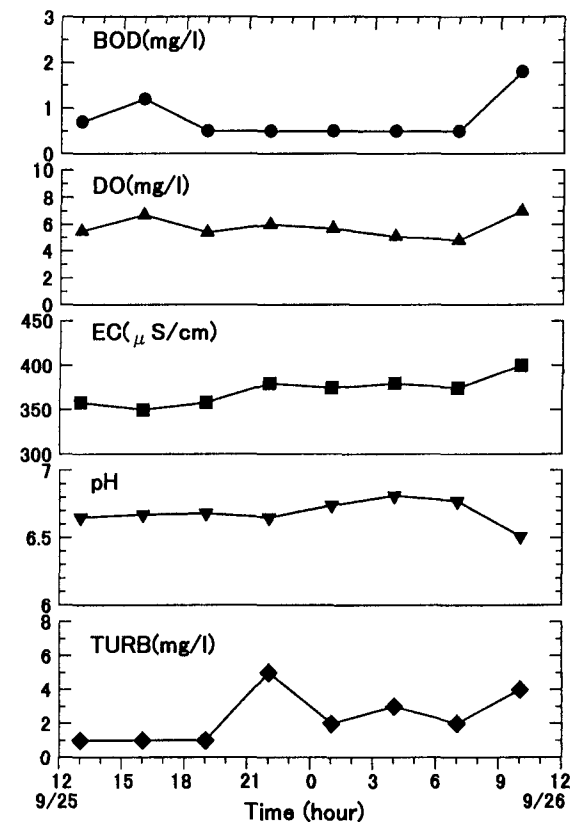


図-3 BOD、溶存酸素、電気伝導度、pH、濁度水質の24時間観測結果

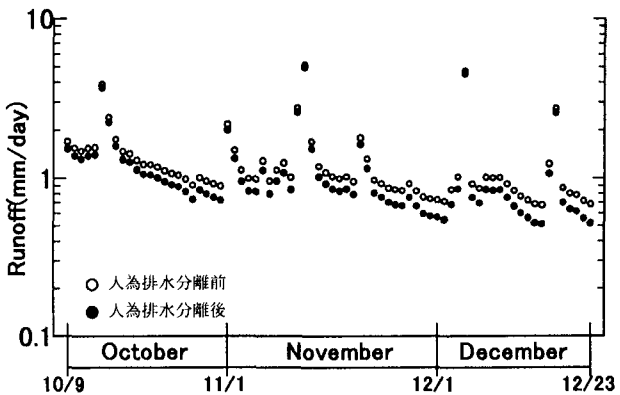


図-4 人為排水分離前と分離後のハイドログラフ

両方を考慮して行う方法が適当であるが、現段階ではその分離方法の検討が十分でないため、本研究では簡便的な手法として次のように分離した。無降雨期間の日周変化として早朝に最低流量が出現するのでそれを当日の地下水流出と見なし、最低流量を上回る流量を当日の人為排水とした。そして、対象期間内26日の無降雨日の平均値を求め実測流量から差し引く方法で分離した。人為排水量の平均値は0.165mm/dayとなり、図-4に人為排水分離前と分離後のハイドログラフを示すが明らかな違い見られる。

4. 水循環モデルと対象流域への適用

本章では、安藤・高橋・有賀・金尾¹⁾が1982年、多摩丘陵の都市流域である乞田川流域において適用可能性を示した日単位の水循環モデルを東川上流試験流域に適用し、水循環の構成要素である直接流出、地下水流出、地下水貯留量について考察し、本モデルの適合性について検討する。対象期間は1996年10月9日から12月23日までの76日間である。

(1) 都市流域を対象とした日単位の水循環モデル
モデルの基本構造は、直接流出、浸透・地下水涵養、地下水流出から構成される。図-5にそのフロー図を示し、以下で簡単に説明する。

直接流出Dは、不浸透域 I_{imp} が生起領域となり表層損失量Lを越えた降雨に起因する。

浸透・地下水涵養は、安藤・虫明・高橋³⁾が考案したモデルを用い、降雨による浸透量Iは前ステップで計算された表層水分保留量 M_s に加わり、蒸発散Eを引いて対象領域の表層水分保留量 M_s' となる。蒸発散量EはHamon式により計算する。地下水涵養量Gは表層水分保留量 M_s が最小容水量 M_n を超過した値

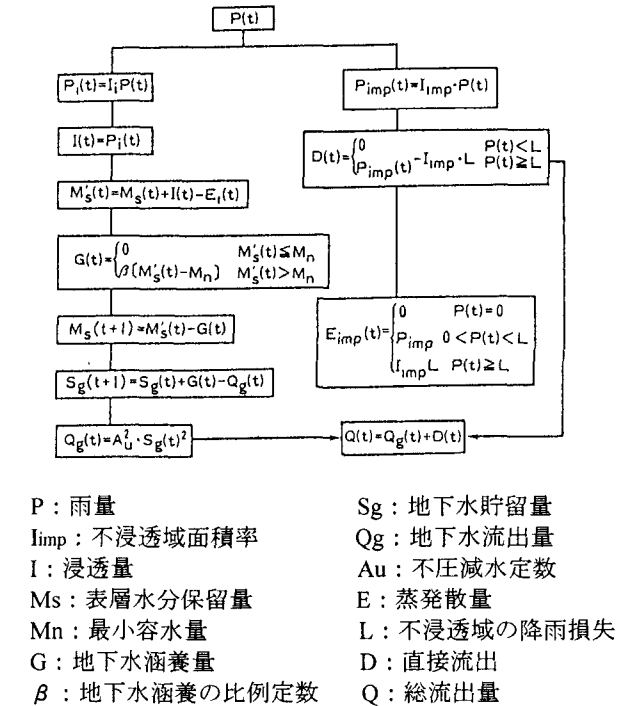


図-5 水循環モデルのフロー図

に比例定数 β を乗じて求められる。比例定数 β は安藤等¹⁾ が同じ関東ロームの多摩丘陵の乞田川流域で用いた値0.7を適用する。

不圧地下水の貯留関数はCoutagne⁴⁾ やDing⁵⁾ により提示されている次式を用いる。

$$Qg = Au^2 \cdot Sg^2 \tag{1}$$

ここに、 Qg ：地下水流出量、 Au ：不圧減水定数、 Sg ：地下水貯留量

(2) 直接流出

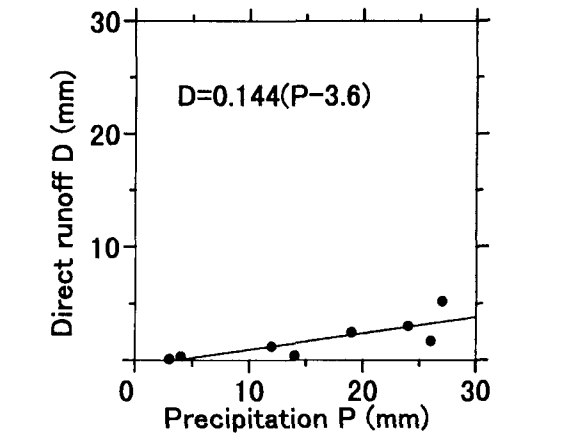
図－6には、対象期間内の9つの降雨の一雨雨量 P と直接流出量 D の相関図を示す。直線近似すると

$$D = 0.144 (P - 3.6) \tag{2}$$

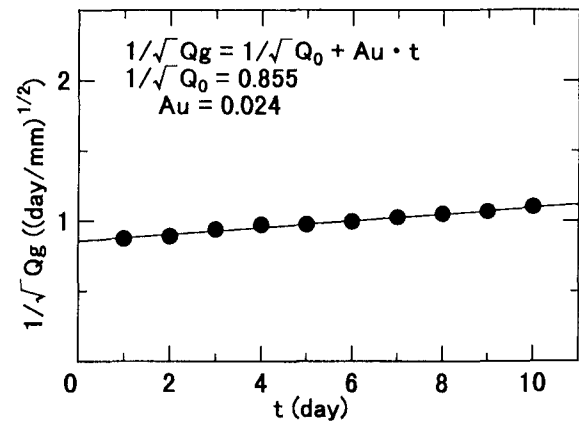
と表され、この式は、山口・松原・山守⁶⁾ が都市流域の直接流出 D (mm) を不浸透域面積率 I_{imp} 、雨量 P (mm)、不浸透域の降雨損失 L (mm) で表した次式

$$D = I_{imp} (P - L) \tag{3}$$

を表す。式(2)の不浸透域面積率 I_{imp} の値0.144は地形図より読み取った値14.5% (表－2) と一致した値と言える。一方、不浸透域の降雨損失 L は3.6mmと算定された。実際、この数値が正しいかもしれないが、本研究の対象期間は長くはないため、また、安



図－6 一雨雨量 P と直接流出量 D の相関図



図－7 無降雨期間 (1996. 10. 17-26) の地下水流出に関する時間 t と $1/\sqrt{Qg}$ の相関図

藤等³⁾ や山口等⁶⁾ の研究では不浸透域の降雨損失として2mmという値を示しており、3.6mmとは大きな差ではないため本研究でも2mmを適用する。

(3) 地下水流出

地下水流出の特性は無降雨期間のハイドログラフの減水部分に現れ、そのパラメータとして減水定数は重要である。本流域の地下水はローム層内の不圧地下水であるため、本研究では式(4)の不圧減水式を用いる。この式の理論的誘導はWerner and Sundquist⁷⁾、Roche⁸⁾ および高木⁹⁾ 等により行われており、安藤等¹⁾ が不圧減水定数 Au をパラメータとして用いている。なお、不圧地下水の貯留関数の式(1)から次式への誘導はCoutagne⁴⁾ が行っている。

$$Qg = \frac{Q_0}{(1 + Au\sqrt{Q_0 \cdot t})^2} \tag{4}$$

ここに、 Q_0 ：初期流量、 t ：時間 (日)

無降雨期間10月17日から26日の10日間の河川流出を、式(4)を変形した式(5)の時間 t と地下水流出に関する $1/\sqrt{Qg}$ の関係式で直線近似して不圧減水定数 Au を決定する。図－7がその相関図であり、直線の傾きが不圧減水定数 Au であり、0.024と求まった。

$$\frac{1}{\sqrt{Qg}} = \frac{1}{\sqrt{Q_0}} + Au \cdot t \tag{5}$$

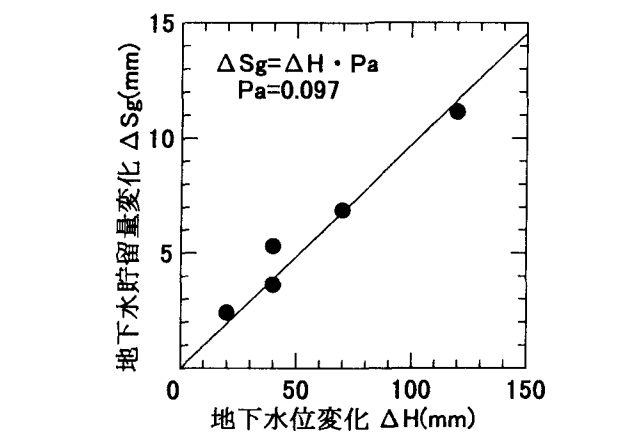
(4) 地下水貯留量

地下水貯留量 Sg は次式で表される。

$$Sg = H \cdot Pa \tag{6}$$

ここに、 H ：地下水位、 Pa ：有効空隙率

無降雨期間内の地下水貯留量の変化 ΔSg は、その期間の河川流出の総量 ΣQg である。有効空隙率 Pa を求めるため、対象期間内の5つの無降雨期間について、地下水貯留量の変化 ΔSg と観測井の地下水位の変化 ΔH の相関図を図－8に示し直線近似した。その結果、有効空隙率 Pa は0.097となり、この数値は関



図－8 地下水貯留量変化 ΔSg と地下水位変化 ΔH

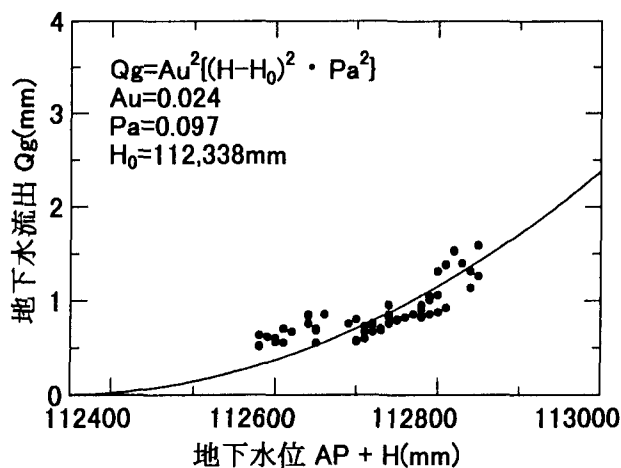


図-9 東川上流試験流域における地下水流出と地下水位の相関図

東ロームの値として適当であると言える。

次に、地下水位 H を地下水流出が0となる基準地下水位 H_0 を用いて式(6)を表し、式(1)に代入すると次式になる。

$$Q_g = Au^2 \left\{ (H - H_0)^2 \cdot Pa^2 \right\} \quad (7)$$

図-9は河川流出に直接流出が含まれる16日分のデータを除いた60日分の地下水流出と地下水位の観測値の相関図である。曲線はこの相関関係について式(7)を近似したもので、基準地下水位 H_0 は $AP + 112,338\text{m}$ となった。図-9より、本流域において式(1)の貯留関数式の妥当性が示されている。

(5) 解析結果と考察

表-3には解析で用いた各パラメータを示す。

図-10の中段に地下水貯留量の実測値と計算値を示す。地下水貯留量の実測値は地下水位観測値と基準地下水位 H_0 を用いて式(6)から算出した。地下水貯留量の計算値の初期値は観測1日目の河川流出量を式(1)に代入して求め、その値は51.6mmである。この図から、地下水貯留量の計算値と実測値は誤差があるものの、減水曲線の傾きはほぼ再現されている。誤差の原因としては、連続した降雨に対して地下水貯留量の増加が計算値は実測値より大きく現れるためであるが、その理由については今後の検討が必要と言える。

図-10下段には流出ハイドログラフの実測値と計

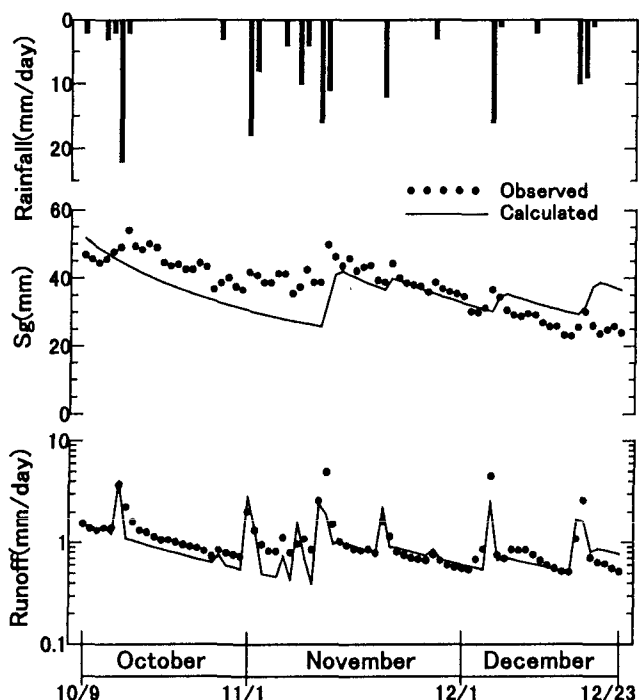


図-10 地下水貯留量および流出ハイドログラフの実測値と計算値

算値を示す。この図より、11月中旬くらいまで若干ズレているが、その後はほぼ良好に再現されている。

5. 雨水浸透柵導入の有効性についての検討

(1) 雨水浸透柵の導入のシミュレーション

東川上流試験流域は浸透域が多く、東川の平常時流量を維持するための地下水涵養域として重要である。この地域には雨水浸透事業が実施されており、既に雨水浸透柵が約2,000基設置されている。今後も雨水浸透柵の設置が推進された場合、平常時流量がどれほど増加するか、地下水流出および地下水貯留量に対する影響を見るため、前述の水循環モデルによりシミュレーションを行う。その方法は、現在、流域面積の4.1%に当たる屋根の雨樋は排水溝等に接続され、雨水は東川に直接流出しているが、この屋根面積を雨水浸透柵による集水面積と考える。つまり、不浸透域面積率を道路面積率のみの10.4%、浸透域面積率を残りの89.6%として水循環解析を行い、地下水貯留量および地下水流出の変化について検討する。

本流域の浸透能力を把握するため、流域内3地点において定水位法により直径80cmの雨水浸透柵の浸透実験を行っており、その結果を表-4に示す¹⁰⁾。地形、地質等により終期浸透量は大きく異なっている。終期浸透量を安藤等²⁾の示した雨水浸透柵1基当たりの集水面積 18m^2 で除し終期浸透能に換算すると、その値は 17.6mm/h から 222.3mm/h の範囲で平均は 110.9mm/h である。最低値の粘性土の場合でも浸透能は 17.6mm/h であり、ロームにおいてはかなり高い値を示しており、本流域の浸透能力が高いことが示されている。

表-3 解析で用いた各パラメータの値

名 称	記号	値
不浸透域面積率	I_{imp}	0.145
不浸透域の降雨損失	L (mm)	2.0
蒸発散面積率	α	0.794
地下水涵養の比例定数	β	0.7
不圧減水定数	Au	0.024
最小溶水量	Mn (mm)	172
表層水分保留量初期値	$Ms(1)$ (mm)	140
地下水貯留量の初期値	$Sg(1)$ (mm)	51.6

(2) 雨水浸透樹の有効性

図-11には、地下水貯留量および流出ハイドログラフについて雨水浸透樹の導入を想定したシミュレーション結果と雨水浸透樹を考慮していない現状のモデル計算値の比較を示す。地下水貯留量および地下水流出量とも雨水浸透樹の導入による変化は、11月上旬頃まではほとんどないが、11月上旬から中旬の降雨に対して、それ以降の増加が明確に現れている。表-5には対象期間内の地下水流出量と直接流出量の総量およびその増減を示す。浸透域面積率を4.1%増加させただけであるが、地下水流出の増加は8.0%と効果的に現れており、雨水浸透樹の地下水流出に対する有効性が示されている。なお、直接流出についても付記として、表-5に示すように流出量が減少し、雨水浸透樹の有効性が示されている。

表-4 東川流域の雨水浸透樹の浸透実験

No.	地形	地質	湛水深 (m)	終期浸透 量(m ³ /h)	終期浸透 能(mm/h)
1	台地	ローム	1.0	4.002	222.3
2	台地	表土	0.86	1.668	92.7
3	盛土	粘性土	1.0	0.317	17.6
平均	—	—	—		110.9

表-5 現状と雨水浸透樹導入後の地下水流出量と直接流出量の変化

	地下水流出量	直接流出量
現 状	56.4 mm	17.2 mm
雨水樹導入後	60.9 mm	12.4 mm
増 減	8.0%増	27.9%減

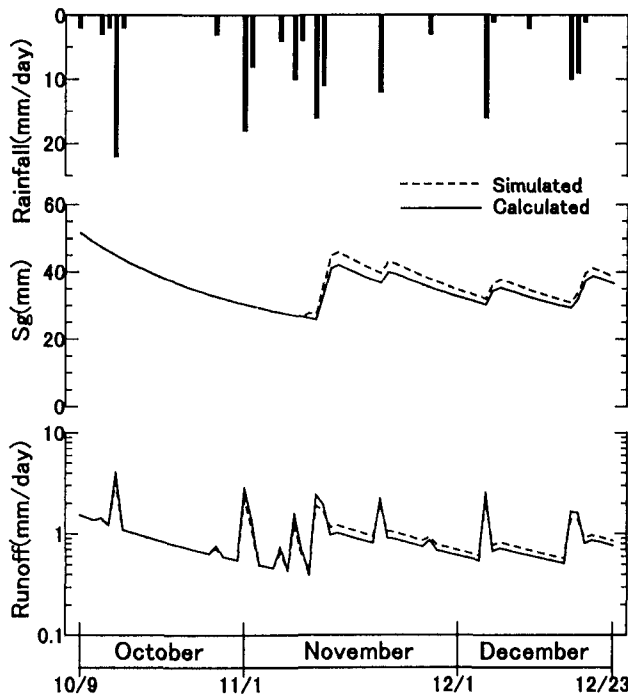


図-11 雨水浸透樹を導入した場合の地下水貯留量のハイドログラフのシミュレーション結果

6. 結論

本研究により、東川上流試験流域の水循環機構を究明するため、安藤等¹⁾の示した都市流域を対象とする日単位の水循環モデルの適合性について、流出量のみならず地下水貯留量も含めて検討した。その結果、本モデルによる流出量の再現性は良好に示された。一方、地下水貯留量については、減水曲線の傾きはほぼ再現されているものの、連続した降雨に対する地下水貯留量の増加が再現されていないので、この点は今後の検討課題と言える。

また、雨水浸透樹の設置導入を推進したことを想定し、雨水浸透樹による浸透域面積率を4.1%増加させたシミュレーションを本モデルにより行った。その結果、地下水貯留量および地下水流出量は増加し、雨水浸透樹の有効性が平常時流量の復元に対して示された。

謝辞：本研究は、埼玉県新河岸川総合治水事務所、(社)雨水貯留浸透技術協会および三井共同建設コンサルタント(株)の関係各位の協力を得て行われた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安藤義久・高橋 裕・有賀 茂・金尾健司：丘陵地の中小河川流域の水循環機構と都市化によるその変化、第26回水理講演会論文集、pp.251-260、1982。
- 2) 安藤義久・鍋山 隆：各戸における雨水浸透樹による地下浸透効果に関する水文統計的考察、水工学論文集第34巻、pp.25-30、1990。
- 3) 安藤義久・虫明功臣・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、pp.197-208、1981。
- 4) A. Coutagne : Les Variations de Débit en Période Non Influencée par les Précipitations, La Houille Blanche, pp.3-23, Sep. - Oct., 1948.
- 5) Ding, J. Y. : Discussion of "Inflow hydrographs from large unconfined aquifers", Proc. ASCE, 90. (IR1), 1966.
- 6) 山口高志・松原重昭・山守 隆：都市流出調査 - 降雨損失機構の検討 -、土木技術資料、Vol.13、No.10、pp.483-487、1970。
- 7) Werner, P. W., and Sundquist, K. J. : On the Groundwater Recession Curve for Large Watersheds, Publ. No.33, IAHS, pp.202-212, 1951.
- 8) Roche, M. : Hydrologie de Surface, Gauthier-Villars, pp.267-275, 1963.
- 9) 高木不折：低水流出の低減特性に関する研究、土木学会論文報告集、第128号、pp.1-11、1966。
- 10) 埼玉県新河岸川総合治水事務所・三井共同建設コンサルタント(株)：流域貯留浸透工事（浸透能力評価検討業務）合併 総合治水流域対策調査工事報告書、pp.1-12、1996。

(1997. 9. 30受付)