

野川流域における水循環機構 に関する試験流域による研究

1 9 8 3 年

高 橋 裕
東京大学工学部教授

目

次

1. はじめに	1
2. 小金井試験流域の水循環機構	1
2-1 流域特性	1
2-2 水文観測体制	4
2-3 水循環機構の解析	5
2-4 まとめ	
3. 国分寺試験流域の水循環機構	7
3-1 流域特性	7
3-2 水文観測体制	8
3-3 水循環機構の解析	9
3-4 まとめ	12
4. むすび	12
参考文献	13
謝 辞	13

研 究 組 織

東京大学工学部 高 橋 裕 (代表研究者)

東京工業大学理学部 松 尾 禎 士

東京都土木技術研究所 和 泉 清

東京工業大学理学部 大 限 多加志

東京大学工学部 安 藤 義 久

1. はじめに

本調査・研究の目的は、多摩川支流の野川流域を対象にしてその水循環機構を試験流域を用いて解明することにある。具体的には、野川流域に大小2つの試験流域を設定し、詳細な水文観測と水質観測を実施し、得られたデータに基づき水循環機構を表わす水循環モデルを構築する。

本研究の対象流域は、野川流域内の小金井試験流域と国分寺試験流域の2流域である。小金井試験流域と国分寺試験流域の流域面積はそれぞれ19.3 km²と0.67 km²である。小金井試験流域では、流量観測所において同位体を含む水質項目の分析を行ない、家庭排水と地下水流出の分離を試みる。これをふまえて、日雨量と日流量を用いたタンク・モデルによる水循環機構の解析を行なう。

国分寺試験流域には雨量観測所と流量観測所だけでなく、流域内の4ヶ所に地下水位の観測所がある。この流域内で地下水の流動を把握し、これをふまえて日雨量と日流量および地下水位を含む水循環機構の解析を試みる。

2. 小金井試験流域の水循環機構

2-1 流域特性

(1) 小金井試験流域の概要

図2-1には、小金井試験流域の概要を示すが、この試験流域は武蔵野台地を東南に流下し多摩川に合流する野川の中上流部に相当し、流域面積は19.3 km²である。この流域は近年急激に都市化され、これが河川の汚濁を促進している。特に1960年頃から主に生活排水による水質汚濁が本格化している。図2-1をみると流域全体にわたって段丘崖が存在することがわかる。この段丘崖沿いに湧水が点在している。

(2) 平常時流出の成分の解析

1983年8月4、5日の無降雨日に中流部の小金井新橋(図2-1中の地点6)において、流量と水質の1.5時間毎の24時間観測を行なった。その結果を図2-2に示す。流量(Q)は、プロベラ式流速計により平均流速を求め、断面積との積により測定した。電気伝導度(EC)は、堀場製作所製導電率チェッカーU-7COND型を用いて採水試料について、実験室内で20℃において測定した。塩化物イオン濃度(Cl⁻)は、同じく実験室に持ち帰り、モル法により測定した。酸素同位体組成($\delta^{18}\text{O}$)は、CO₂平衡法により、同位体比をVG社製質量分析計MM602C型により測定、これを求めた。値は、国際標準であるV-SMOW標準水の¹⁸O/¹⁶O比からの十分偏差値(パーミル, ‰)である。

安藤ら¹⁾による、1982年7月22、23日の同じく野川の中流部二枚橋地点での流量と水質の3時間毎の24時間観測結果²⁾の解析と同一の手法で、汚水排水と地下水流出の2成分の分離を試みる。ここで、地下水流出の水質(時間によらず一定と仮定する)としては、表2-1に示す。1983年

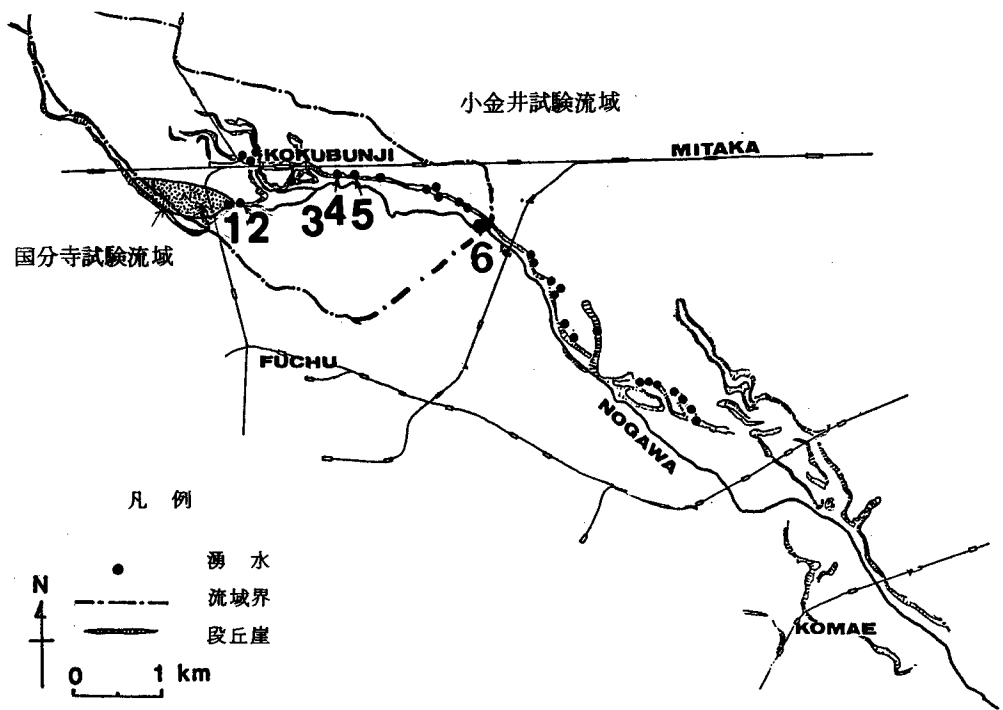


図 2-1 小金井試験流域の概要

8月4日の流域の湧水観測結果のうち、元町用水、東京経済大学、貫井神社の水質の流量割合による加重平均値を用いた。

汚水排水の水質が時間とともに変化しないという制約を満足し、かつ地下水流出分の流量が、この観測期間の最低流量 6.8 l/s 以下と求まるのは、ECと Cl^- を用いて得られる表2の場合のみである。酸素同位体比については、満足すべき結果を得ることはできなかった。求められた地下水流出量 $\sim 2.3 \text{ l/s}$ (1)は、安藤らの結果および、表2-1に示した湧出量と整合的である。

(3) 汚水排水の性格

前項で述べた1982, 1983両年の野川中流部における汚水排水と地下水流出の成分分離の解析から、深夜～早朝においての

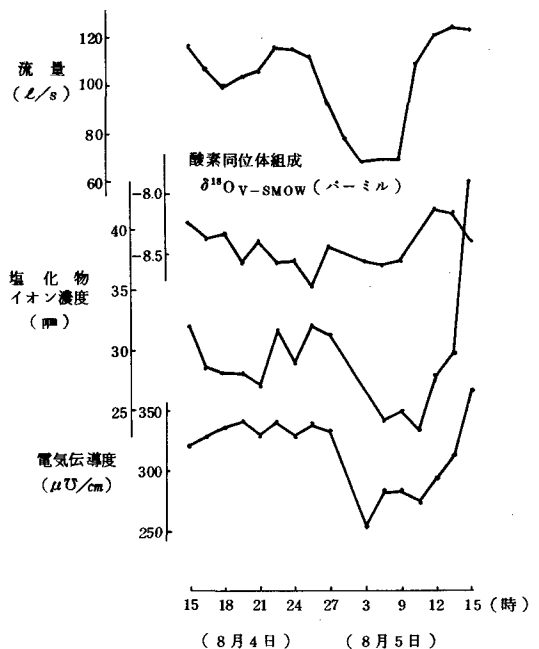


図 2-2 小金井新橋における24時間観測結果

み、汚水水質の時間変化が無いとみなせることが判明した。他の時間帯では、汚濁組成は刻々変動していることが当然に予想される。

今回の比較的密に採水を行なった24時間観測結果で注目すべきは、午前中の人間活動活発化に伴う増水時（種々の水質の生活排水が流入しはじめる時）における、河川水の同位体比挙動である。流量の増大にはほぼ同期して同位体比変化が観測され、これに遅れて汚濁成分指標（EC, Cl^- ）が増加する。すなわち、午前中の増水は水道水のような起源の異なる水が新たに河川に流入してくることによって起っていることが確認されるものの、その流入水に含まれる汚濁自身は、少し時間を経てから増加に転ずることを明瞭に示している。この傾向は、水素同位体比を観測した松尾²⁾の結果にも認められる。

表2-1 湧水の水質・湧出量の同時観測結果

No*	湧水名	水温 ($^{\circ}\text{C}$)	電気伝導度 EC ($\mu\text{V}/\text{cm}$) (於 20°C)	塩化物 イオン濃度 Cl^- (ppm)	酸素同位体	湧出量 Q (ℓ/s)
					組成 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (パーミル)	
1	国分寺万葉園	16.9	245	19.2	-8.53	8.5
2	真姿の池	16.0	229	15.9	-8.13	10.5
3	元町用水終端	22.0	233	17.1	-8.41	19.1
4	東京経済大学	16.1	272	20.7	-8.06	1.6
5	貫井神社	16.5	260	18.7	-8.07	2.3

3+4+5	(加重平均)	-	238	17.5	-8.58	23

*) 図2-1内、地点番号に対応。

表2-2 汚水排水と地下水流出の2成分の分離（解析結果）

解析に用いた 水質項目	求められた 地下水流出量 Qg	汚水水質	汚水流量	
			1時30分	3時00分
EC	21.8 ℓ/S	361 $\mu\text{V}/\text{cm}$	70.2 ℓ/S	89.2 ℓ/S
Cl^-	23.4 ℓ/S	35.9 ppm	68.6 ℓ/S	87.6 ℓ/S

2-2 水文観測体制

小金井試験流域における水収支に使用した雨量ならびに水位（流量）記録は、図2-3に示す各地点において収録した観測結果である。

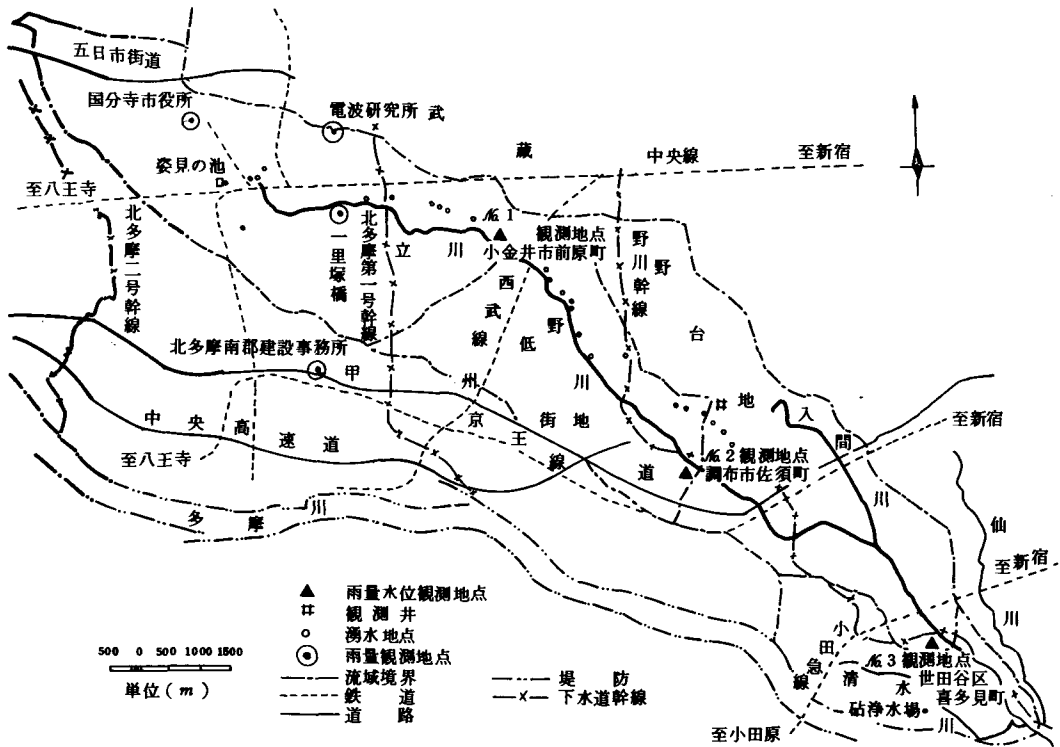


図2-3 小金井試験流域の水文観測地点

日降雨量については、図中に示されている小金井観測点、国分寺市役所、電波研究所、東京都北多摩南部建設事務所、一里塚橋の5地点における観測値の単純平均値をもって流域平均面積雨量とした。

対象期間は、1981年1月1日から同年12月31日までとし、当日午前零時までに記録された24時間降雨量をもって流出当日の対象降雨量とした。

また、日流出高については、小金井観測点において実施した低水流量観測ならびに高水流量観測結果と水位記録から作成した次の流量換算式を使用し、当日午前零時から24時間分の毎正時における水位の相加平均値をもって、日平均水位Hとして代用させ、日平均流量を得る。

さらに、日平均流出高に換算する。

$$Q = 14.11(H - 45.27)^2$$

$$q = 86.4 \times \bar{Q} / A$$

ここに、Q：流量 (m^3/sec)、H：A.P. 水位高 (m)、q：流出高 (mm/day)、

\bar{Q} ：日平均流量 (m^3/sec)、A：対象流域面積 (19.27 km^2)

つぎに、蒸発散量については、1975年当時、野川流域内の都立農業高校実習場で測定した記録と東京管区气象台での日蒸発散量や気温、日照時間などと比較させ、作成した経験式³⁾から推定した。

2-3 水循環機構のモデル化

試験流域内の水収支計算には、菅原正巳⁴⁾が提唱したタンクモデル法を使用する。

流域内の水循環を図2-4に示すような直列三段型のタンクによりモデル化する。

図中、 R は日降雨量、 X が各タンクの貯留高、 q が各タンク孔からの流出高、 S が浸透量、 α 、 β 、 γ が各タンク孔の乗数、 H が各タンク底から孔までの高さ、その他、 E が蒸発散量を表わしている。

野川流域に限らず、都内中小河川流域の水収支を考える場合、上水道の水源は、他流域からの導水か地下水に依存していること、上下水道施設の普及により漏水や地下水の取水という現象が生起すること、などを水循環の機構に取込む必要がある。

このモデルにより、1981年当時の年間水収支について推定した結果が、図2-5に示す小金井試験流域におけるハイドログラフである。

年間総雨量1,286.0mm、蒸発散量が843.4mm、総流出高は1,114.6mm、この内、雑排水量187.7mm、また、生活生産活動が停止状態

と推定される時間帯の最低流量を野川の固有流量とするその量は494.3mmと推定される。つぎに、1975年当時における状況と比較した場合、とくに著しいものは、下水道の普及に伴って、雑排水量が半減していることである。³⁾

しかし、年間総雨量に相違があるが、1975年当時70mm程度の地下水への涵養が考えられていたが、現在、地下水への涵養量は極めて少ない。

下水道幹線(北多摩排水)、小金井分水路、鉄道、その他都市施設等の構築による地下水流向の変化、道路や家屋の増設に伴う地被状況の変化などによる雨水浸透量の減少が考えられる。流域の都市化による野川の水循環機構の変化は著しい。

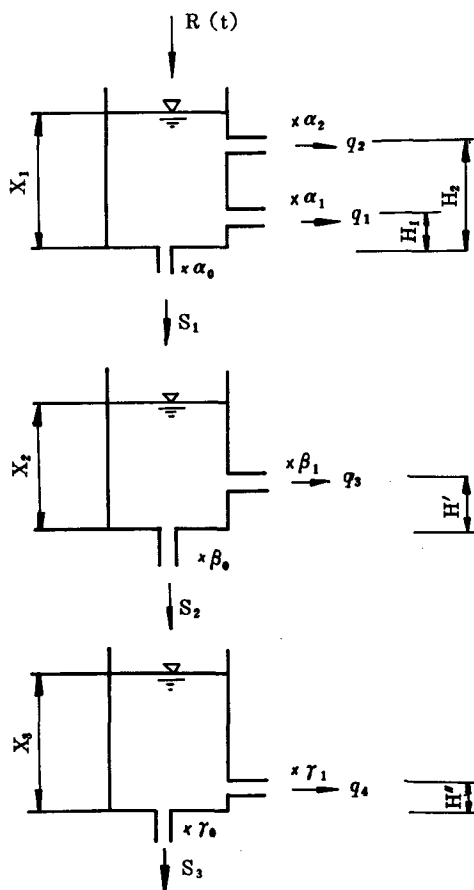


図2-4 直列3段のタンクモデル

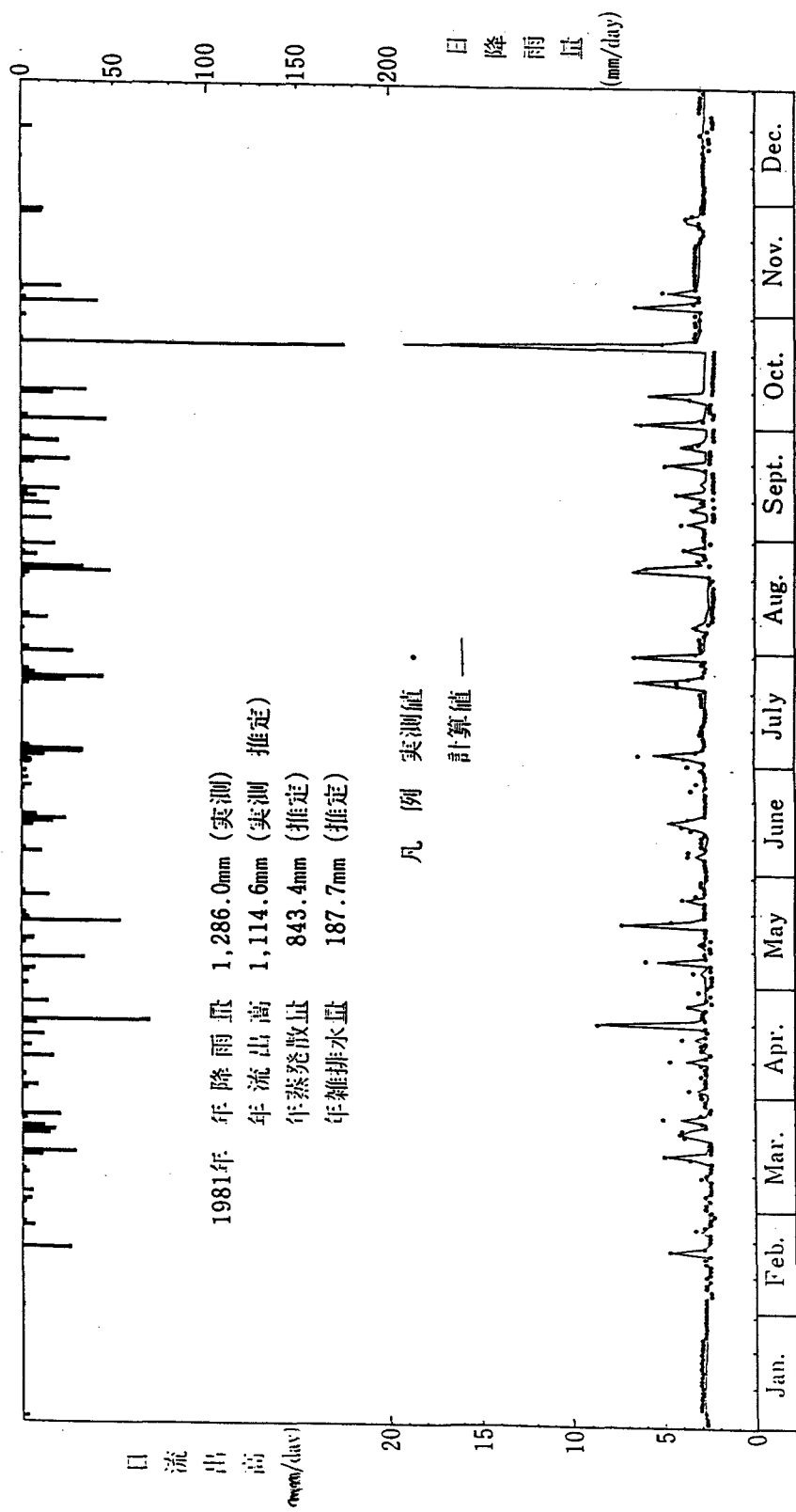


図2-5 小金井試験流域のハイドログラフの実測値と計算値の比較

3. 国分寺試験流域の水循環機構

3-1 流域特性

(1) 位置および地形

国分寺試験流域は、野川の上流部に位置し、武蔵野段丘面と立川段丘面との段丘崖（国分寺崖線）沿いに点在する湧水群の中の1つである国分寺万葉園内の湧水を対象とする流域である。国分寺試験流域付近の地形は、図3-1に示すように、国分寺崖線と野川に浸蝕されてできた谷を除けばほとんど起伏のない台地面であり、北側の一段高い武蔵野面と南側の立川面とに分けられる。

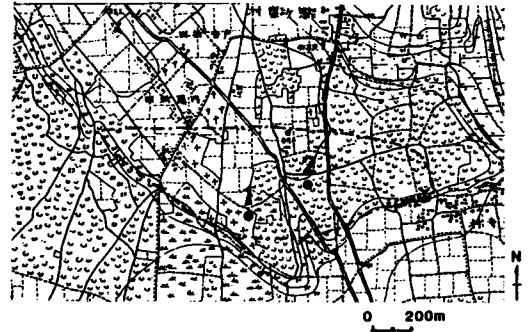


図3-1 国分寺試験流域付近の地形（明治初期）

(2) 地質

試験流域付近の地質は、⁵⁾細野の集めた図3-2に示すボーリングによる地質柱状図によると、層厚1m程の表土の下に武蔵野面では層厚7~10mのローム層があり、その下位に不圧地下水帯水層である層厚5~10mの段丘砂礫層が存在する。そして、その下位に不透水層と考えられる層厚2m程の粘土層が存在する。

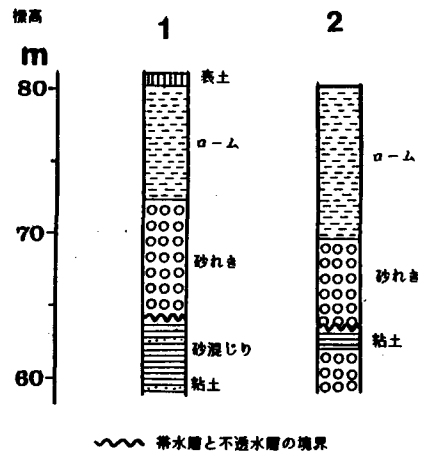


図3-2 国分寺試験流域付近の地質柱状図

(3) 地下水流域界と地下水の流動特性

国分寺試験流域の湧水（地下水流出）に寄与する地下水流域の流域界を推定するために、筆者らは¹⁾図3-3中に示す60の民家の浅井戸を選定し、井戸の上端の標高を水準測量により求めるとともに、冬季の3回にわたり井戸の地下水位の同時観測を行なって地下

水面図を作成した。図3-3には、こうして作成した地下水面図を例示する。図3-3において、南側の地下水流域界はほぼ国分寺崖線に一致すると描かれており、北側の地下水流域界は地下水位の等高線に直交する地下水流線を考慮することにより推定されている。なお、図3-3によると、国分寺試験流域の流域面積は67haに相当し、地下水位は西高東低であり、地下水は西から東へ流動し

て湧水として流出していることがわかる。

(4) 地下水の涵養源

武蔵野台地においては、不圧地下水への涵養源として降水だけでなく、いわゆる「吸込み井戸」による生活排水の地下処理があり、その寄与率が大いことが水谷・虫明⁶⁾と吉田・小倉⁷⁾により指摘されている。筆者らは、¹⁾国分寺試験流域においても同様であることを図3-4に示す現地調査により調べた吸込み井戸の利用地域の分布と塩化物イオン濃度の分布により指摘した。

3-2 水文観測体制

国分寺試験流域における水文観測施設の配置を図3-5に示す。雨量計は流域東端のR地点に設置されており、流量はA地点で四角堰と自記水位計により観測されている。地下水位は、B, C, D, E地点の民家の浅井戸に自記地下水位計が設置されており、試験流域の中央の地下水の流線に沿うよう配置されている。なお、観測施設は、1982年10月~12月に設置され、週毎のデータ収集と観測器機の維持管理が継続されている。

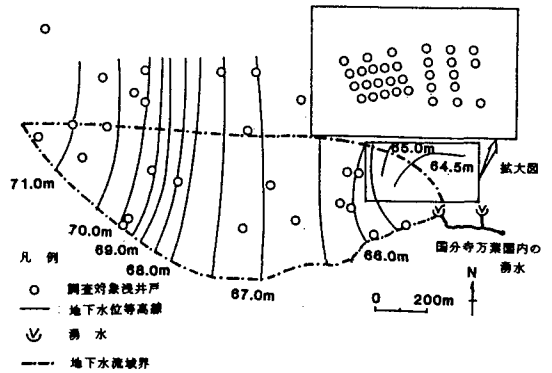


図3-3 国分寺試験流域付近の地下水面図と地下水流境界

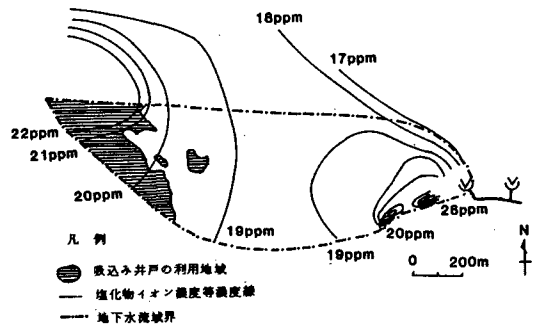


図3-4 国分寺試験流域付近の吸込み井戸の利用地域の分布と塩化物イオン濃度分布

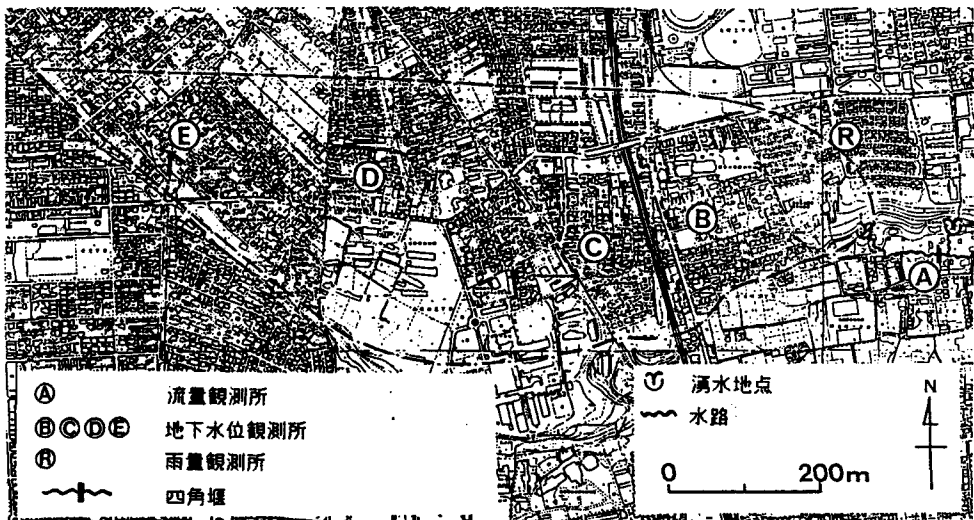


図3-5 国分寺試験流域における水文観測施設の配置

3-3 水循環機構の解析

(1) 解析対象の水文データ

図3-6には、国分寺試験流域において冬季の39日間に観測された日雨量，地下水位，湧水の日流量を示す。観測期間内に数回の降雨があるが日雨量で10mm以下であり，地下水位や流量にはほとんど影響していないと考えられる。なお，図3-6において地下水位は標高で表示されており，B地点の地下水位は良好な記録が得られなかったので図示されていない。

(2) 解析の前提条件

第1の前提条件は，解析対象期間中の少量の降雨は地下水に涵養されないということである。

第2の前提条件は，不圧地下水帯水層から深部への漏水は無視しうる量であるということである。

第3の前提条件は，地下水流域界を通しての地下水の流出入がないことである。

第4の前提条件として，生活排水の吸込み井戸からの地下水への涵養量を推定しておく。吸込み井戸からの地下水への涵養量を推定するに当たっては，1世帯1日当りの使用水量の平均値 $0.60\text{ m}^3/\text{日}$ に筆者らが聞き込み調査によって調べた吸込み井戸利用世帯数を乗ずることによって求める。なお，吸込み井戸からの毎日の地下水への涵養量は解析対象期間中は一定であると仮定する。

(3) 解析方法

1) 流域のモデル化

流域のモデル化に当たっては，まず図3-7に示すように地下水位の観測所である

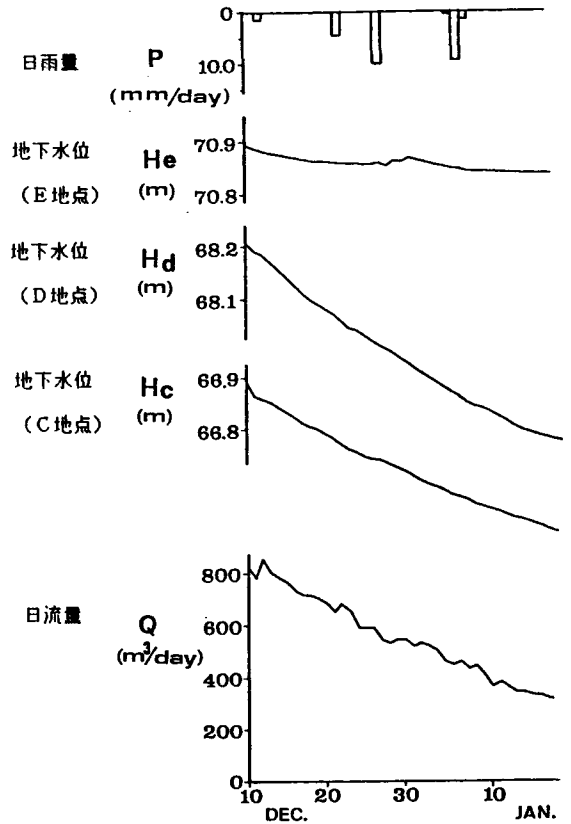


図3-6 国分寺試験流域における水文観測結果

(a) 平面図

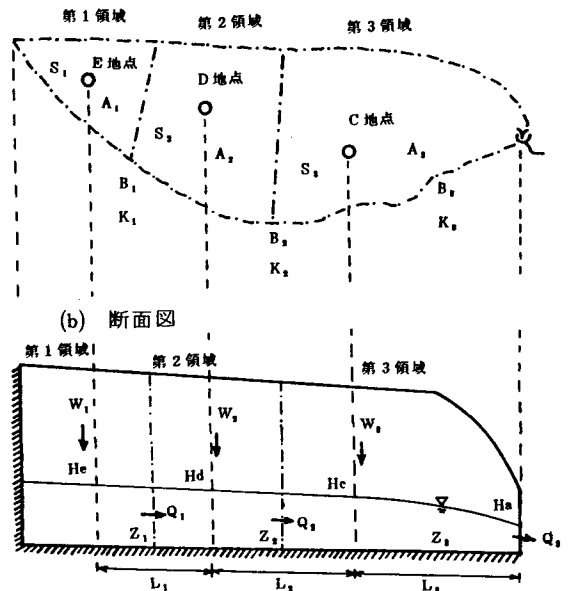


図3-7 国分寺試験流域のモデル化

C, D, E地点を中心とする3領域に流域を分割する。そして、E地点が代表する領域を第1領域、D地点が代表する領域を第2領域、C地点が代表する領域を第3領域とする。解析の際には、各領域の地下水位の変化は、それぞれC, D, E地点の地下水位変化で代表させる。また、各領域間の水の移動を考える時には、その断面は長方形と近似して計算を行なう。

2) 基本式

基本式としては、上述の3領域に関する連続の式とダルシー則による運動の式を用いる。日単位の時間*i*のときの*Q*の値を*Q(i)*というように表示すると、各領域についての連続の式は次のようにかける。

$$W_1 - Q_1(i) = A_1 \cdot S_1 (H_e(i+1) - H_e(i)) \dots\dots\dots ①$$

$$W_2 - Q_2(i) + Q_1(i) = A_2 \cdot S_2 (H_d(i+1) - H_d(i)) \dots\dots\dots ②$$

$$W_3 - Q_3(i) + Q_2(i) = A_3 \cdot S_3 (H_c(i+1) - H_c(i)) \dots\dots\dots ③$$

ここで、変数と定数の名称は表3-1に示す通りである。

運動の式としてダルシー則を適用するに当り、動水勾配は隣り合う領域を代表する2地点の井戸の地下水位の差を距離で割ったものを近似的に用いることにすると、運動の式は次のようにかける。

$$Q_1(i) = K_1 \cdot \frac{H_e(i) - H_d(i)}{L_1} \cdot B_1 \left\{ \frac{H_e(i) + H_d(i)}{2} - Z_1 \right\} \dots\dots\dots ④$$

$$Q_2(i) = K_2 \cdot \frac{H_d(i) - H_c(i)}{L_2} \cdot B_2 \left\{ \frac{H_d(i) + H_c(i)}{2} - Z_2 \right\} \dots\dots\dots ⑤$$

$$Q_3(i) = K_3 \cdot \frac{H_c(i) - H_a}{L_3} \cdot B_3 \left\{ \frac{H_c(i) + H_a}{2} - Z_3 \right\} \dots\dots\dots ⑥$$

ここでも変数と定数の名称は表3-1に示す通りであるが、⑥式中の*H_a*は湧水地点の仮想地下水位であり、実測の地下水流出量*Q*とC地点の実測の地下水位*H_c*との2次回帰分析により推定した。

表3-1 国分寺試験流域の変数と定数の名称

A	各領域の面積
B	領域境界における流域幅
H	地下水位
L	井戸間距離
Q	領域間の水の移動量および流出量
W	生活排水の吸込み井戸からの涵養量
Z	領域境界における帯水層下端の標高
K	透水係数
S	有効空隙率

3) 解析のフロー

解析のフローは、3地点の地下水位に初期値を与え、有効空隙率と透水係数を仮定して①～⑥式に表3-2に示す定数の値を代入して、解析対象期間内の3地点の地下水位 H_c , H_d , H_e と地下水流出量 Q_3 について日単位で再現計算を行なう。そして、計算値と実測値の比較を行ない、再現性が不十分であれば有効空隙率と透水係数を仮定し直し、十分な再現性をもつまで繰り返し計算を行なう。

表3-2 国分寺試験流域における定数の値

$A_1 = 155,500 \text{ m}^2$	$A_2 = 176,000 \text{ m}^2$	$A_3 = 338,500 \text{ m}^2$
$B_1 = 450 \text{ m}$	$B_2 = 550 \text{ m}$	$B_3 = 400 \text{ m}$
$L_1 = 390 \text{ m}$	$L_2 = 470 \text{ m}$	$L_3 = 550 \text{ m}$
$W_1 = 120 \text{ m}^3/\text{日}$	$W_2 = 12 \text{ m}^3/\text{日}$	$W_3 = 6 \text{ m}^3/\text{日}$
$Z_1 = 63.83 \text{ m}$	$Z_2 = 63.32 \text{ m}$	$Z_3 = 62.57 \text{ m}$

4) 解析結果と考察

図3-10には、3地点の地下水位と地下水流出量のモデルによる計算値と実測値の比較を示すが、地下水位については総流出量の相対誤差が5.8%，日流出量の相対誤差の平均値が9.5%であり、良好な再現性をもつといえる。また、表3-3に示す同定された有効空隙率と透水係数をみると、有効空隙率については平田⁸⁾や水谷・虫⁶⁾明の得た値と類似の値であり、妥当な結果といえる。

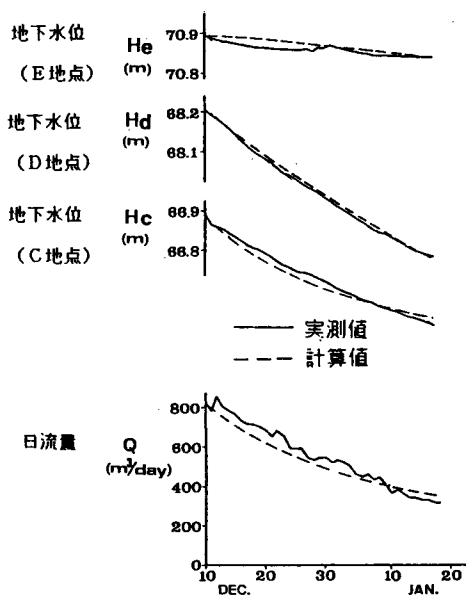


図3-10 国分寺試験流域における地下水位と地下水流出量のモデルによる計算値と実測値

表 3 - 3 同定された有効空隙率と透水係数の値

$S_1 = 0.07$	$S_2 = 0.08$	$S_3 = 0.11$
$K_1 = 7.41 \text{ m/日}$	$K_2 = 47.3 \text{ m/日}$	$K_3 = 609 \text{ m/日}$

3 - 4 ま と め

ここでは、筆者らが台地に設置した国分寺試験流域の流域特性を明らかにするとともに、連続の式とダルシー則による運動の式といった水理学的基本式に基づく物理的な水循環モデルの実流域への適用可能性を示せたといえる。

4. む す び

本調査研究で得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 小金井試験流域においては、タンク・モデルにより水循環機構の解析が可能であることが明らかにされた。
- (2) 国分寺試験流域においては、水理学的基本式にもとづく物理的なモデルにより水循環機構の解析ができることが示された。

参 考 文 献

- 1) 安藤義久・大隅多加志・高橋 裕・松尾禎士：都市河川の環境維持流量としての地下水流出の形態と涵養源に関する研究 -野川における事例的研究-, 土木学会, 第11回環境問題シンポジウム講演論文集, PP.15~20, 1983.
- 2) 松尾禎士：多摩川流域の都市河川の地下水流出の涵養源に関する同位体水文学的研究. 1982年度とうきゅう環境浄化財団助成研究.
- 3) 和泉 清・黒羽公明：流域の都市化に伴う水収支の変化について(その1), 東京都土木技術年報, PP.85~94, 1983.
- 4) 菅原正己：流出解析法, 共立出版, 1972.
- 5) 細野義純：武蔵野台地における帯水層の性状に関する調査資料 第3号, 1970.
- 6) 水谷 淳・虫明功臣：武蔵野台地における水循環機構に関する研究, 第25回水理講演会論文集, PP.153~160, 1981.
- 7) 吉田和広・小倉紀雄：野川湧水中の硝酸塩濃度とその起源, 地球化学12, PP.41~51, 1978.
- 8) 平田重夫：本郷台・白山における不圧地下水の涵養機構, 地理学評論 44-1, PP.14~46, 1971.

謝 辞

本研究を進めるに当り、武蔵野台地の地質と地下水に関して御教示賜りました自治省消防研究所の細野義純博士に深謝の意を表します。本研究の現地調査に協力していただいた東京大学ならびに東京工業大学の院生・学生諸氏に感謝いたします。また、調査の目的を理解され、協力を惜しまれなかった調査域内の浅井戸所有者の方々に御礼申し上げます。なお、本研究は、田口隆男氏(当時東京大学工学部土木工学科学生、現在建設技術研究所勤務)の積極的な取り組みに負うところが大きいことを記して謝意を表する次第であります。