

台地の試験流域における地下水流動
を含む水循環解析

Analysis on Hydrological Process of Upland Experimental Basin

東京都立大学工学部 正 員 ○安藤 義久
東京大学工学部 正 員 高橋 裕
東京大学大学院 学生員 吉田 秀樹
東京大学大学院 学生員 石川比呂志

1 はじめに

近年のわが国における流域の水循環機構に関する研究としては、佐合・石崎[1]、安藤・虫明・高橋[2]、水谷・虫明[3]などの研究がある。これらの研究における地下水流出過程の取り扱いに着目すると、タンクモデルや地下水流出の貯留関数や応答関数を用いて地下水貯留量を含む形で地下水流出機構がモデル化されているが、地下水の流動を含むには至っていない。水循環や流出現象の物理機構の解明にあたっては地下水流動を含む形で地下水流出過程をモデル化した水循環モデルの作成とその実流域への適合性の検討が必要であると考えられる。そこで、本研究では筆者ら[4]が武蔵野台地に設定し予備的な解析を進めてきた国分寺試験流域を対象にして、無降雨期間において水理学的基本式に基づく地下水流動を含む地下水流出モデルを作成し、その適合性を示すとともに、この地下水流動・流出モデルに他の諸過程を合成した水循環モデルを作成し、その適合性を検討することを目的としている。

2 国分寺試験流域の概要

(1) 流域特性

(a) 位置

国分寺試験流域は、図1に示すように多摩川の支川の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沿いに点在する湧水群の中の一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。

(b) 地形

流域内の地形は、図2に示すように湧水付近の段丘崖を除けば非常に緩勾配の台地面であることがわかる。なお、流域面積は41.1haである。

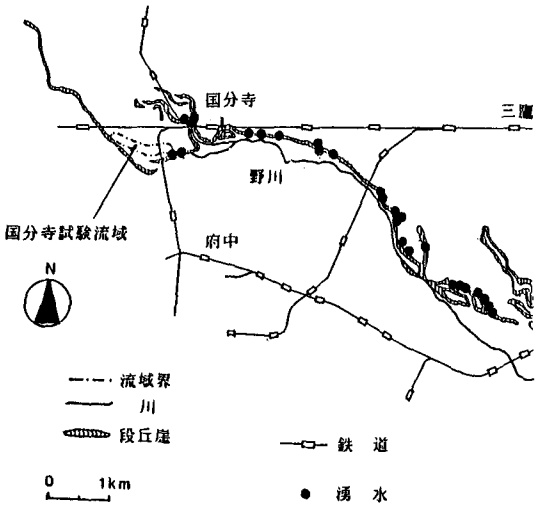


図1 国分寺試験流域の位置



図2 国分寺試験流域の地形

(c) 水文地質構造と地下水流域界

図3には、収集したボーリングの地質柱状図に基づいて図4中のX-X断面とY-Y断面について作成した地質断面図を示す。これを見ると、層厚1m程の表土の下に層厚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5m前後の砂レキ層が存在し、さらにその下位に不透水層と考えられる層厚2m程の固結粘土層が存在していることがわかる。図3の地質断面図などの資料により、国分寺試験流域の地下水流域界は図4中に示すように旧河道の形状であることが判明した。図4には、浅井戸の地下水位の同時観測結果から作成した1982年12月22日の地下水面図も示すが、これを見ると地下水面は西高東低であり、地下水が水深0.5-1mで西から東方向へ流動して湧水地点で流出していることがわかる。

(d) 地下水の涵養源

筆者ら5)は、国分寺試験流域の地下水の涵養源として、降水だけでなくいわゆる「吸い込み井戸」による生活排水の地下処理があり、その寄与率がかなり大きいことを指摘した。図5には流域内の吸い込み井戸の利用地域（下水道未普及地域）の分布と塩化物イオン濃度の分布を示すがこれを見ると吸い込み井戸利用地域の地下水の塩化物イオン濃度が高く上記の関係が確認される。

(2) 水文観測体制

水文観測施設の配置を図4に示すが、雨量・流量だけでなく6地点の地下水位が自記観測されている。観測施設は主に1982年10月-12月に設置され、週毎のデータ収集と維持管理が継続されている。

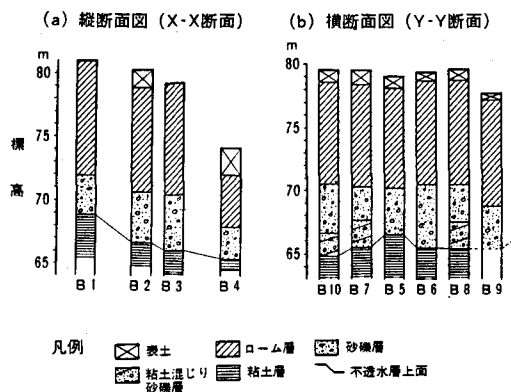


図3 地質断面図

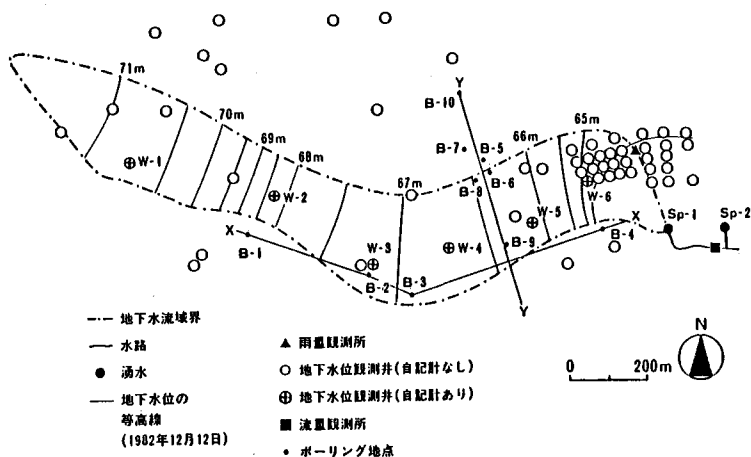


図4 国分寺試験流域の概要

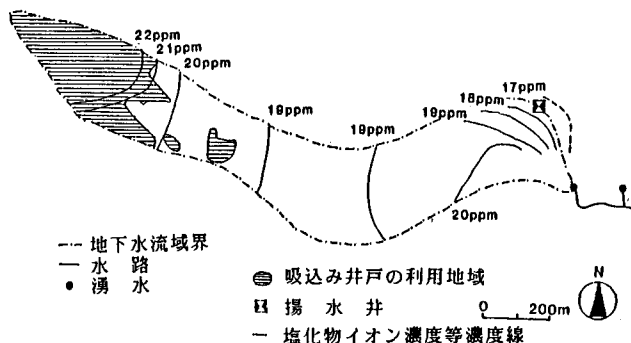


図5 吸い込み井戸の利用地域の分布と塩化物イオン濃度分布

3 地下水流動を含む地下水流出解析

(1) 不圧地下水の流動モデル

地下水の流動モデルとして, Tyson and Weber [6] により図6に示す多角形領域を用いたモデルが提案されている。その基本式は連続式とダルシー則による(1)式で表わされる。

$$\sum_i (h_i - h_b) \frac{B_{i,b} T_{i,b}}{L_{i,b}} = A_b S_b \frac{dh_b}{dt} + A_b Q_b \quad (1)$$

ここで, h_i : ノード i の地下水位の標高, h_b : ノード b の地下水位の標高, $B_{i,b}$: i 領域と b 領域との境界幅, $T_{i,b}$: i と b の中間点の透水量係数, $L_{i,b}$: i と b の距離, A_b : b の領域の面積, S_b : b 領域の貯留係数, Q_b : b 領域の単位時間内の単位面積当たりの揚水量, である。

このモデルは(1)式の中で透水量係数 $T_{i,b} = K_{i,b} m_{i,b}$ を用いており, 帯水層厚 $m_{i,b}$ を時間的に一定としているので, このモデルは本質的に被圧地下水のためのモデルといえる。

そこで, 筆者らは, 多角形領域を用いた不圧地下水の流動モデルとして, 連続式とダルシー則による次の基本式を用いる。

$$\sum_i (h_i - h_b) \frac{B_{i,b} K_{i,b} (h_i + h_b)}{L_{i,b}} - Z_{i,b} = A_b S_b \frac{dh_b}{dt} - R_b \quad (2)$$

ここで, $K_{i,b}$: i と b の中間点の透水係数, $Z_{i,b}$: i 領域と b 領域の境界の帯水層下端の標高, R_b : b 領域の単位時間内の涵養量, である。

(2) 式を差分表示すると次のようになる。

$$\sum_i (h_i^j - h_b^j) \frac{B_{i,b} K_{i,b} (h_i^j + h_b^j)}{L_{i,b}} - Z_{i,b} = A_b S_b \frac{h_b^{j+1} - h_b^j}{\Delta t} - R_b^j \quad (3)$$

ここで, j は時間ステップを表わす。(3) 式は境界条件と初期条件が与えられれば陽解法で解くことができる。

(2) 不圧地下水流動モデルの国分寺試験流域への適用

(a) 対象期間

対象期間は, 降雨による影響のほとんどない1982

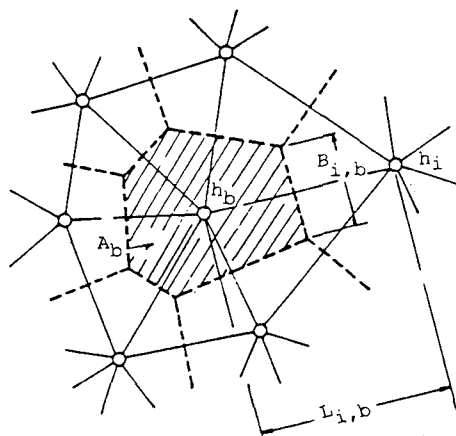


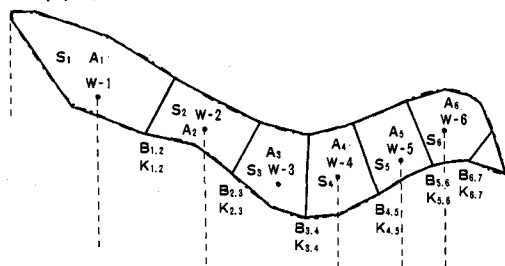
図6 多角形領域分割

年と1983年の冬季の2つの期間とした。

(b) 流域の多角形領域による分割

国分寺試験流域を図7に示すように地下水位の観測所をノードとする7つの多角形領域に分割する。各領域の地下水位の変化はW-1 からW-6 までの地下水位の変化で代表させる。第7領域については, 湧水地点近傍の地下水位で代表させ, しかもその地下水位は時間的に一定と仮定する。

(a) 平面図



(b) 断面図

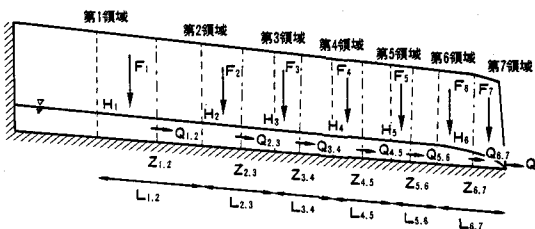


図7 国分寺流域の多角形領域分割

(c) 基本式

基本式としては前述した(2)式を用い、実際の計算に当たっては(3)式の差分式を用いる。計算時間単位は日単位とする。

(d) モデルの適用結果と考察

モデルの適用に当たっては、表1に示すように、各領域の面積、領域の境界幅、ノード(井戸)間の距離、帯水層下端の標高、涵養量と揚水量を設定した。ここでは、降雨の影響のほとんどない期間を対象期間としているので、地下水の涵養量としては前述した吸い込み井戸による生活排水の地下処理が定常的にあり、地下水の揚水量としては風呂屋による揚水が定常的にある。したがって、(3)式における涵養量 R_p は各領域とも一定値 F だけである。

各領域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、解析対象期間内の6地点の地下水位と地下水流出量について日単位で再現計算を行なう。計算値と実測値の比較を行ない、十分な再現性をもつまで有効空隙率と透水係数を仮定しなおし、繰り返し計算を行なった。図4には、その結果を示すが、2つの対象期間のいずれについても、6地点の地下水位の実測値と計算値の誤差は10cm以下であり、地下水流出量の実測値と計算値の誤差は25%以下であり、十分な再現性が得られたといえる。

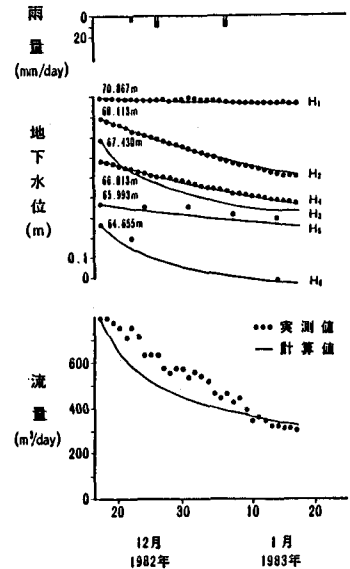
また、こうして同定された有効空隙率と透水係数の値を表1に示すが、有効空隙率は0.05-0.25であり、透水係数は125-2900m/dayであり、これらの値は砂レキ層として妥当な値といえる。なお、国分寺試験流域の雨量観測所の近傍に位置する揚水井戸において揚水試験を行ない、観測井の地下水位の変化をJacob[7]と安藤[8]により示された不圧地下水の揚水井のまわりの非平衡式を用いて解析したところ、透水係数については2800m/dayという値を得た。これは、表1に示す第6,7領域間の透水係数2900m/dayとほぼ一致する値であり、前述の解析結果の妥当性を裏付けている。

以上のことから、多角形領域分割を用いた水理学的基本式に基づく物理的モデルによる地下水流動を含む地下水流出解析の国分寺試験流域への適合性が示されたといえる。

表1 定数とパラメーターの値

	面積 A (m^2)	領域幅 B (m)	井戸間距離 L (m)	帯水層下端 の標高 Z (m)	涵養量+ 揚水量 F (m^3/day)	有効空隙率 S	透水係数 K (m/day)
領域1	116100	229	390	68.80	108	0.15	125
2	71500	193	310	66.78	12	0.09	500
3	67600	300	200	66.13	0	0.05	400
4	54900	271	230	65.87	0	0.25	800
5	49800	243	180	64.88	3	0.25	600
6	51000	164	190	63.86	-7	0.20	2900
7	12100				0	—	

(a)



(b)

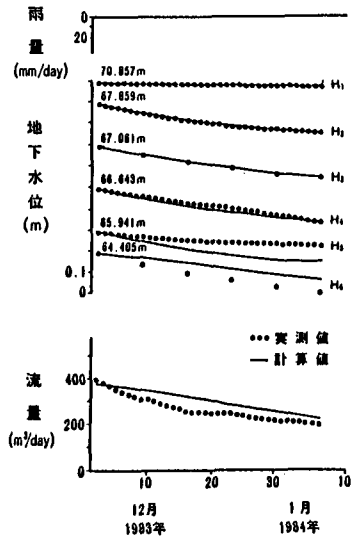


図8 地下水位と地下水流出量の計算値と実測値の比較

4 地下水流動を含む水循環解析

(1) 地下水流動を含む水循環モデル

地下水流動・流出モデルに降雨による浸透，地下水涵養，および直接流出の諸過程のモデルを合成した水循環モデルを作成する。これは，図6に示すノードbの多角形領域において，図9に示すように不飽和帯における鉛直方向の雨水の挙動を組み入れることに相当するとともに，基本式(2)式と差分式(3)式において涵養量 R_b として雨水による地下水涵養量 G_b をも考慮することに相当する。ここでは，安藤・虫明9]および安藤・虫明・高橋2]が考案した地下水涵養モデルと同じモデルを用いる。すなわち，図9に示すように，時間ステップjにおけるb領域への雨水の浸透量 I_b^j は表層の水分保留量 M_b^j に加わり， MS_b^j がb領域の最小容水量 MN_b より少ない時には地下水涵養が行なわれず， MN_b より多い時にはその超過保留分に比例した地下水涵養が行なわれる。この地下水涵養の比例定数を β_b で表わす。表層の水分保留量 MS_b^j から地下水涵養量 G_b^j と蒸発散量 E_b^j が差し引かれて次の時間ステップの表層の水分保留量 M_b^{j+1} となる。直接流出量に関しては，安藤・虫明9]および安藤・虫明・高橋2]が指摘したように流域内の飽和域と不浸透域への降雨が直接流出となると考える。

(2) 国分寺試験流域へのモデルの適用

浸透量については，浸透域への降雨は全量が浸透すると考え，不浸透域の中でもトイを下水管に接続せずに庭に出している部分については浸透とした。すなわち，

$$I_b^j = (U_b + \alpha_b V_b) \cdot P_b^j \quad (7)$$

ここで， U_b ：b領域の浸透域面積率， V_b ：b領域の不浸透域面積率， α_b ：屋根からのトイを庭に出している屋根の不浸透域の中の面積比率， P_b^j ：時間ステップjにおけるb領域への降雨量，である。表2には各領域のU，V， α の値を示す。各領域の最小容水量MNの値は，安藤・虫明9]と安藤・虫明・高橋2]が多摩丘陵で得た200mmという値を用いる。地下水涵養の定数 β は，各領域の地下水位の再現計算結果が実測値とあうように同定し，表2に示す値を得た。各領域の蒸発散量は，Hamon式を用いて算定した日蒸発散量 E^j に蒸発散が生じうる面積率（浸透域面積率）を乗じて推定した。

$$E_b^j = U_b \cdot E^j \quad (8)$$

直接流出に関しては，図10に示す一雨ごとの総雨量と直接流出量との相関から，河道付近の不浸透域と飽和域と考えられる直接流出の生起領域 $A_d = 4123\text{m}^2$ から直接流

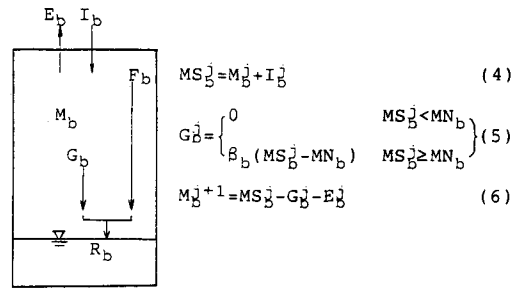


図9 不飽和帯の水循環モデル

表2 各領域の定数とパラメーターの値

領域	U	V	α	β
1	0.59	0.41	0.29	1.0
2	0.63	0.37	0.20	0.3
3	0.66	0.34	0.47	0.1
4	0.63	0.37	0.38	0.9
5	0.58	0.42	0.14	0.8
6	0.72	0.28	0.43	0.7
7	0.93	0.07	1.00	0.8

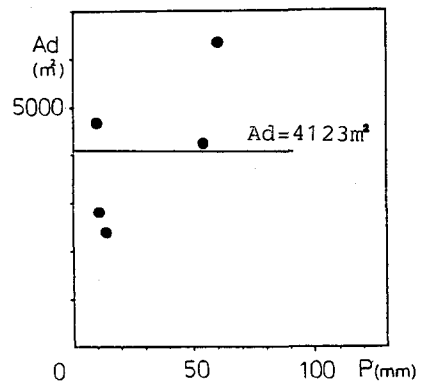


図10 一雨雨量と直接流出寄与域の面積

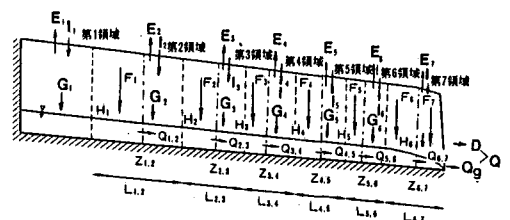


図11 国分寺試験流域の水循環モデル模式図

出 D^j が生起すると考えた。

$$D^j = A_d / A \cdot P^j \quad (9)$$

総流出量 Q^j は、図 1 1 に示すように地下水流出量 Q_g^j と直接流出量 D^j の和として求まる。

$$Q^j = Q_g^j + D^j \quad (10)$$

(b) 適用結果と考察

上記のモデルを 1984 年 3 月 23 日 - 10 月 31 日の 220 日間に適用した。図 1 2 には、6 地点の地下水位と流出量の計算値と実測値の比較を示すが、地下水位の誤差は 15cm 以内であり、流出量については総流出量の相対誤差が 6.3%、日流量の相対誤差の平均値が 14.3% であり、十分な再現性をもつといえる。

以上のことから、無降雨期における地下水流動・流出モデルに降雨による浸透、地下水涵養、直接流出の諸過程のモデルを合成した水循環モデルを作成し、その当該試験流域への適合性が十分であることを示せた。

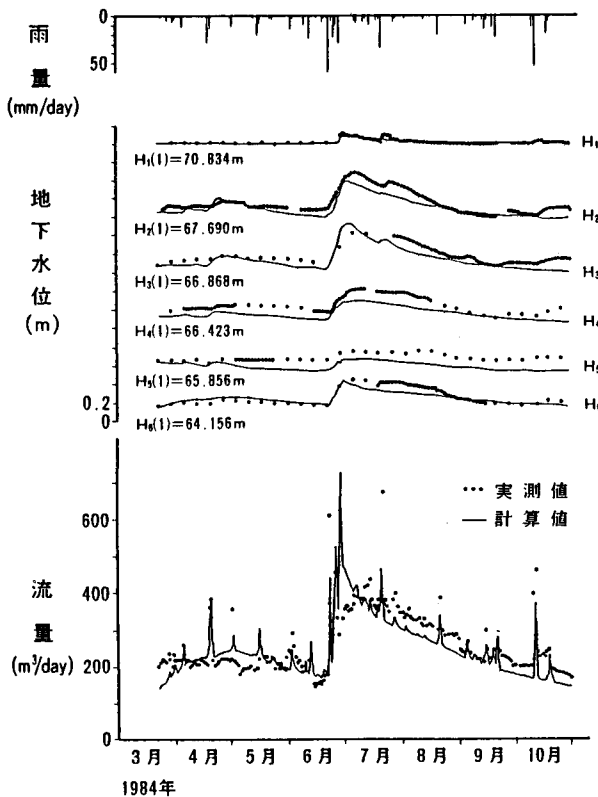


図 1 2 水循環モデルによる地下水位と流出量の計算値と実測値の比較

5 結論

本研究により得られた主な成果は次の通りである。

- (1) 地質柱状図などの資料により、国分寺試験流域の地下水流域界を明らかにすることができた。
- (2) 多角形領域分割を用いた水理学的基本式に基づく物理的モデルにより不圧地下水の流動を含む地下水流出モデルを作成し、その国分寺試験流域への適合性が示された。
- (3) 地下水流動・流出モデルに降雨による浸透、地下水涵養、直接流出の諸過程のモデルを合成した水循環モデルを作成し、その国分寺試験流域への適合性が十分であることが示された。

参考文献

- 1] 佐合純造・石崎勝義：地下水を含めた現地観測と水循環機構について，第24回水理講演会論文集，pp.79-84,1980.
- 2] 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.
- 3] 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.
- 4] 安藤義久・高橋裕・田口隆男：台地の小試験流域における地下水流動を含む地下水流出解析，第28回水理講演会論文集，pp.515-520,1984.
- 5] 安藤義久・大隅多加志・高橋裕・松尾清士：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，第11回環境問題シンポジウム講演論文集，pp.15-20,1983.
- 6] H.N.Tyson and E.M.Weber:Ground-water management for the nation's future computer simulation of ground-water basins, Proc. of ASCE, HY4, pp.59-76,1964.
- 7] C.E.Jacob: Determining the permeability of water-table aquifers, U.S.Geological Survey Water Supply Paper, 1536-1, pp.245-271,1963.
- 8] 安藤義久：不圧地下水における井戸揚水の非平衡理論に関する研究，日本地下水学会誌，第20巻第3号，pp.15-24,1978.
- 9] 安藤義久・虫明功臣：丘陵地の自然状態の小試験流域における水循環機構，第24回水理講演会論文集，pp.71-78,1980.