台地の試験流域における地下水流動を含む 水循環機構のモデル化とその応用

安藤義久*・長畑範明*

Hydrological Modelling including Groundwater Flow in an
Upland Experimental Basin and Its Application

Yosihisa ANDO Noriaki NAGAHATA

This study develops a hydrological model with a distributed groundwater flow component, such that it can predict daily groundwater levels and surface runoff in an upland experimental basin. Using this hydrological model, the authors predict hydrological changes when inhabitants do not use inverting wells. Furthermore, they make clear the effect of infiltration facilities quantitatively with the above hydrological model.

Key word: upland basin, groundwater flow, hydrological model, infiltration facility

本稿では、台地の試験流域を対象にして地下水流動を含む形で水循環機構のモデル化を行なっている。そして、この水循環モデルを用いて吸い込み井戸が使用されなくなった場合の水循環の変化を予測し、その対応策として地下浸透工法の効果を定量的に明らかにしている。

キーワード：台地流域，地下水流動，水循環モデル，雨水浸透施設

I. 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(1980)、安藤・虫明・高橋(1981)、水谷・虫明(1981)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。水循環過程の物理機構の解明に当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、本研究では安藤・高橋・田口(1984)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として、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第一の研究目的にしている。

さらに、上記の水循環モデルを用いて、公共下水道が流域内に完全に普及して「吸い込み井戸」による生活排水の地下処理が行われなくなった場合の湧水の流量と地下水位の変化を予測する。そして、最終的に、現状の水文環境を維持するための対策として「雨水地下浸透工法」を取り上げ、その有効性をシミュレーションにより明らかにすることを第二の研究目的としている。

なお、本稿は、主として安藤・高橋・吉田・石川(1986)の研究と安藤・長畑(1987)の研究をまとめ直したものであることを付記しておく。

*東京都立大学工学部
*Tokyo Metropolitan University

II. 国分寺試験流域の概要

1. 流域特性

1) 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。

2) 地形

流域内の地形は、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。なお、流域面積は41.1haである。

図-1 国分寺試験流域の位置

3) 水文地質構造と地下水流域界

図2には、収集したボーリングの地質柱状図に基づいて図3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1 m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の帯水層である層厚5 m前後の砂礫層が存在し、さらにその下位に不透水層と考えられる層厚2 m程の固結粘土層が存在していることがわかる。図2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3中に示すように旧河道の形状であることが判明した。図3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0.5~1 m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。

図-2 地質断面図

図-3 国分寺試験流域の概要

4) 地下水の涵養源

当試験流域の特徴として、下水道が未整備なため「吸い込み井戸」を地中に埋め、そこに生活排水を流し込み、直接砂礫層中に排水し処理するいわゆる「吸い込み井戸」と呼ばれる生活排水処理施設が、図3に示すように西部地区に多くみられる。流域の地下水の涵養源として雨水の他にこの「吸い込み井戸」による生活排水が涵養源として大きく寄与していることが、安藤・大隅・高橋・松尾(1983)により報告されている。

2. 水文観測体制

水文観測施設の配置を図3に示すが、雨量・流量だけでなくW-1～6の6地点の地下水位が自記観測された。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行なわれた。

III. 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 (1964)により図4に示す多角形領域を用いたモデルが提案された。その基本式は連続式とダルシー則により(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 $T_{i,b} = K_{i,b}$ ・

図—4 多角形領域分割

$m_{i,b}$ 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。

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

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。

$$\sum_i (h_i^j - h_b^j) \frac{B_{i,b} K_{i,b}}{L_{i,b}} \left(\frac{h_i^j + h_b^j}{2} - Z_{i,b} \right) = A_b S_b \frac{h_b^{j+1} - h_b^j}{\Delta t} - R_b^j \quad (3)$$

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

1) 対象期間

対象期間は、降雨による影響のほとんどない1982年と1983年の冬季の2つの期間とした。

2) 流域の多角形による分割

国分寺試験流域を図5に示すように地下水位の観

図—5 国分寺流域の多角形領域分割

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-1～6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。

3) 基本式

基本式としては前述の(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。

4) 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。

表一 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				108	0.15	
		229	390	68.80			125
2	71500				12	0.09	
		193	310	66.78			500
3	67600				0	0.05	
		300	200	66.13			400
4	54900				0	0.25	
		271	230	65.87			800
5	49800				3	0.25	
		243	180	64.88			600
6	51000				-7	0.20	
		164	190	63.86			2900
7	12100				0	—	

ここでは、降雨の影響のほとんどない期間を対象としているので、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_b 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6には、その結果を例示するが、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、地下水流出量の誤差は25%以内であり、十分な再現性が得られたといえる。

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。

図一6 地下水位と地下水流量の計算値と実測値の比較

図一7 不飽和帯の水循環モデル

IV. 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4に示すノード b の多角形領域において、図7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(1980)および安藤・虫明・高橋(1981)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7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 MS_b^{j+1} となる。

直接流出量に関しては、安藤・虫明(1980)および安藤・虫明・高橋(1981)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になると考える。

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するとした。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 ：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(1980)と安藤・虫明・高橋(1981)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 E_b^j は、Hamon式を用いて算定した日蒸発散量 E^j に蒸発散が生起する面積率(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、一雨ごとの総雨量と直接流

表2 各領域の定数とパラメータの値

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

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8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。

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

3. 適用結果と考察

上記の水循環モデルを1984年の1年間に適用した。図9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、地下水位の変動傾向は符合しており、流出量については総流出量の相対誤差が3.9%、日流量の相対誤差の平均値が15%であり、十分な再現性をもつといえる。

V. 下水道の普及に伴う水循環の変化の予測

適合性が確かめられた上記の水循環モデルによ

図8 国分寺試験流域の水循環モデル模式図

図9 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

図-10 「吸い込み井戸」不使用時の湧水流出量と地下水位

り、将来、下水道が当該試験流域に完備され、吸い込み井戸が使用されなくなると仮定した場合のシミュレーションを行なう。シミュレーションにおいては、先の水循環モデルで定常的に行なわれたとした吸い込み井戸による人工地下水涵養量 F を 0 とした。結果を図10に示す。これによると、地下水位および流量が大幅に低下することが判明した。特に湧水の流出量については大幅に減少し、年流出量については現状の70%に減少する。また、渇水期においては最大減少時で130m³/dayの日流量であったものが20m³/dayにまで減少すると予測される。この20m³/dayという流量は水路の維持流量に満たない流量であり、対象の国分寺万葉園内の湧水が人々に親しまれ、「日本名水百選」に選ばれていることを考えると憂うべき事態であるといえる。

VI. 雨水地下浸透工法による対策

湧水の流出量の減少の対策として雨水地下浸透工法を取り上げる。雨水地下浸透工法は、不浸透域の雨水を雨水地下浸透施設により地中に涵養するもので、雨水地下浸透施設としては、雨水浸透マス、地下浸透トレンチ、透水性舗装などがあげられる。

図11に示す当該試験流域の不浸透域である屋根および道路の地域の雨水を雨水地下浸透施設により地下に浸透させたと仮定した場合のシミュレーションを実行する。そのため、前述した水循環モデルに次の

図-11 国分寺試験流域の不浸透域

表-3 湧水の年総流量と現状の比較

	道路雨水浸透工法率			
	割合	0%	50%	100%
	0%	0.70	0.88	1.04
	50%	0.91	1.09	1.29
屋根雨水浸透工法率	100%	1.15	1.35	1.55

※ 但し、現状の湧水の流量を1とする。

図-12 屋根雨水を100%地下に浸透させた時の湧水流出量と地下水位

部分を組み入れる。 b 領域の道路および屋根の不浸透域のうち道路不浸透域面積率を V_s 、屋根不浸透域面積率を V_r とし、雨水浸透工法を施す地域の割合をそれぞれ K_s (%), K_r (%) とする。これによって補正された補正道路不浸透域面積率 V_s^* と補正屋根不浸透域面積率 V_r^* は次式となる。

$$V_s^* = (100 - K_s) / 100 \times V_s \quad (11)$$

$$V_r^* = (100 - K_r) / 100 \times V_r \quad (12)$$

また、 b 領域の不浸透域面積率 V_b は次式によって求められる。

$$V_b = V_s^* + V_r^* \quad (13)$$

VII. 雨水地下浸透工法の有効性

シミュレーションの結果、次のことが判明した。湧水の年流出量については表3に示すように、道路、屋根それぞれ50%、もしくは各100%の割合で雨水地下浸透工法を施せば現状の年流出量を確保することが可能であること、さらに両方全域に雨水地下浸透工法を施せば現状の1.5倍に湧水の流出量が増加することが判明した。また、地下水位についても第1、2領域を除いては上記の割合で雨水浸透工法を施すことで現状を維持できることが判明した。また、雨水地下浸透施設による降雨水によって地下水涵養を補っているため、降雨の有無による地下水位および湧水の流出量の変化が大きくなる傾向がみられる。なお、図12には屋根の雨水を100%雨水地下浸透施設によって地下浸透させた場合の流出量と地下水位を示す。

VIII. 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) 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。
- (2) 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。
- (3) 上記の水循環モデルを用いてシミュレーションを行なった結果、同試験流域に下水道が整備され、試験流域内の吸い込み井戸が使用されなくなると仮定した場合、地下水位が低下し、湧水の流出量が大幅に減少することが予測された。
- (4) (3)の対策として、流域内の不浸透域に雨水地下浸透工法を施工したと仮定した場合、その有効性

が確かめられ、現状の地下水位と湧水の流出量を保全するための雨水地下浸透工法の施工割合を推定することができた。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、終始ご指導を賜った芝浦工業大学（東京大学名誉教授）の高橋裕先生には心から感謝の意を表します。また、本研究に御協力いただいた当時東京大学土木工学科学生の田口隆男氏、吉田秀樹氏、石川比呂志氏、および国分寺市役所の関係各位と住民の方々には深く感謝の意を表します。なお、本研究を進めるに当たり、とうきゅう環境浄化財団と文部省科学研究費の補助をいただいたことを記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 安藤義久・虫明功臣(1980): 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.
- 2) 安藤義久・虫明功臣・高橋裕(1981): 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.
- 3) 安藤義久・大隅多加志・高橋裕・松尾禎士(1983): 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.
- 4) 安藤義久・高橋裕・田口隆男(1984): 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.
- 5) 安藤義久・高橋裕・吉田秀樹・石川比呂志(1986): 台地の試験流域における地下水流動を含む水循環解析, 第30回水理講演会論文集, pp.127~132.
- 6) 安藤義久・長畑範明(1987): 台地の湧水の保全に関する研究, 第3回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp. 565~570.
- 7) 水谷淳・虫明功臣(1981): 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.
- 8) 佐合純造・石崎勝義(1980): 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.
- 9) Tyson, H.N. and Weber, E.M. (1964): Groundwater management of the nation's future computer simulation of groundwater basins, Proc. of ASCE, HY4, pp. 59~76.

(1988・9・24受付, 1988・10・11受理)

安藤

長畑

安藤義久

昭和52年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。

昭和54年 同博士課程中退。

東京大学工学部土木工学科の教務職員，助手，講師を経て，昭和60年より東京都立大学土木工学科講師。工学博士。

長畑範明

昭和62年 東京都立大学工学部土木工学科卒業
東京都立大学工学部土木工学科助手