

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 Groundwater-runoff Analysis in Small Experimental Basin

東京大学工学部土木工学科 正員 ○安藤義久
東京大学工学部土木工学科 正員 高橋 裕
株式会社 建設技術研究所 正員 田口隆男

1 はじめに

従来の地下水流出解析では、地下水流出量のみを解析対象とする場合には地下水流出量を時間の関数として表示する地下水流出の減水式（低減式）による解析が高木¹⁾や高橋・安藤・伊藤・伊藤²⁾などにより行なわれている。一方、近年、いくつかの試験流域において、地下水流出量だけでなく地下水位も同時に観測され、地下水貯留量も含む地下水流出解析が、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、それぞれ佐合・石崎³⁾、Ando, Musiake and Takahasi⁴⁾、および水谷・虫明⁵⁾などにより行なわれている。以上のように、従来の地下水流出解析に関する研究では、時間や地下水貯留量の関数として地下水流動を含まないモデルにより地下水流出解析を行なう方法がとられてきたが、本研究では筆者らが設定した台地の小試験流域において帯水層内の地下水流動を含むモデルにより地下水流出解析を行なうことを試みる。すなわち、本研究の目的は、ダルシー則の運動の式と連続の式といった水理学の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実流域への適用可能性を検討することにある。

2 国分寺試験流域の流域特性と水文観測体制

2-1 流域特性

(1) 位置

筆者らが東京都国分寺市の武蔵野台地に設定した小試験流域はその地名にちなんで「国分寺試験流域」と命名された。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する。この試験流域は、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（不圧地下水帯水層からの地下水流出）を対象とする流域である。

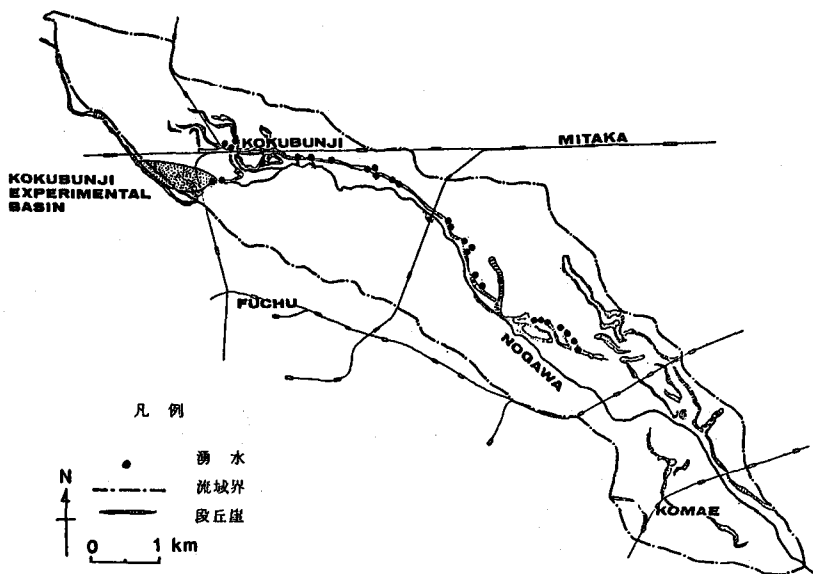


図1 国分寺試験流域の位置

(2) 地形

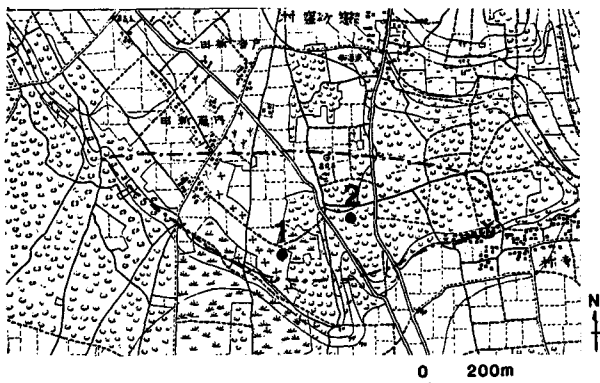
国分寺試験流域付近の地形は、図2に示すように、国分寺崖線と野川に侵蝕されてできた谷を除けば、ほとんど起伏のない台地面であり、北側の一段高い武蔵野面と南側の立川面とに分けられる。国分寺崖線は、国分寺市西部の西町では5 m程の高さの崖であるが東に向かうにつれて比高を大きくし、湧水地点付近にある武蔵国分寺では比高12 mにも達する。

(3) 地質

試験流域付近の地質は、細野⁶⁾及び細野⁷⁾の集めた図3に示すボーリングによる地質柱状図によると、層厚1 m程の表土の下に武蔵野面では層厚7～10 m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5～10 m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2 m程の粘土層が存在する。

(4) 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⁸⁾は、図4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4には、こうして作成した1982年12月22日の地下水面図を例示する。図4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して描かれており、北側の地下水流域界は、地下水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。1983年11月23日と1984年1月21日においても、浅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、地下水流域界を推定したところ、図4と同様な結果となった。従って、図4に示す地下水流域界は本研究の対象期間内は時間的に変化しないと考える。なお、図4によると、国分寺試験流域の流域面積は67 ha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。



(出典：明治15年測量，第1軍管地方迅速図「府中駅」)

図2 国分寺試験流域付近の地形（明治初期）

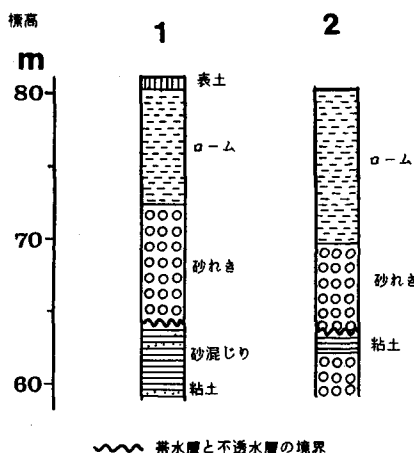


図3 国分寺試験流域付近の地質柱状図

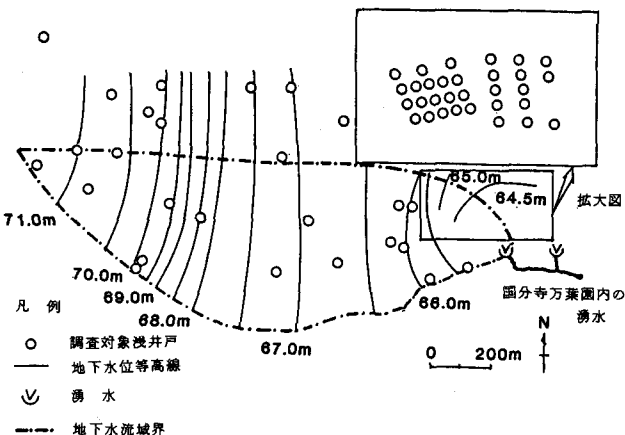


図4 国分寺試験流域付近の地下水面図と地下水流域界

(5) 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」(別名「逆さ井戸」)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が 水谷・虫明⁶⁾と吉田・小倉⁹⁾により指摘されている。筆者ら⁸⁾は、国分寺試験流域においても同様であることを、図5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。なお、図5をみると、吸込み井戸の利用地域は、下水道が未整備である試験流域内の西部に集中していることがわかる。

2-2 水文観測体制

国分寺試験流域における水文観測項目と方法を表1に示し、水文観測施設の配置を図6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に配置されている。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。

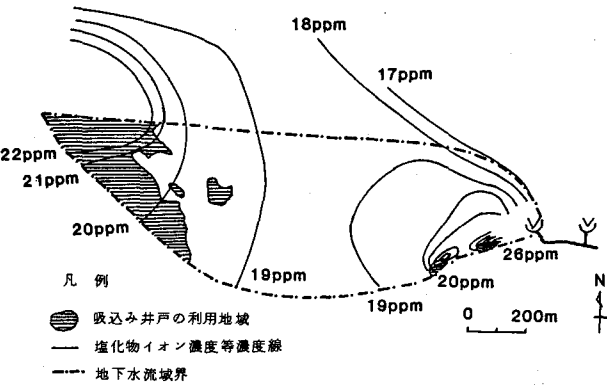


図5 国分寺試験流域付近の吸込み井戸の利用地域の分布と塩化物イオン濃度分布

表1 国分寺試験流域における水文観測項目と方法

地点	観測項目	方 法
R	雨 量	0.5 mm転倒マス型隔測自記雨量計
A	流 量	四角堰とリシャール式自記水位計
B	地下水位	地下水用過巻自記水位計
C	同 上	同 上
D	同 上	同 上
E	同 上	地下水用月巻長期自記水位計

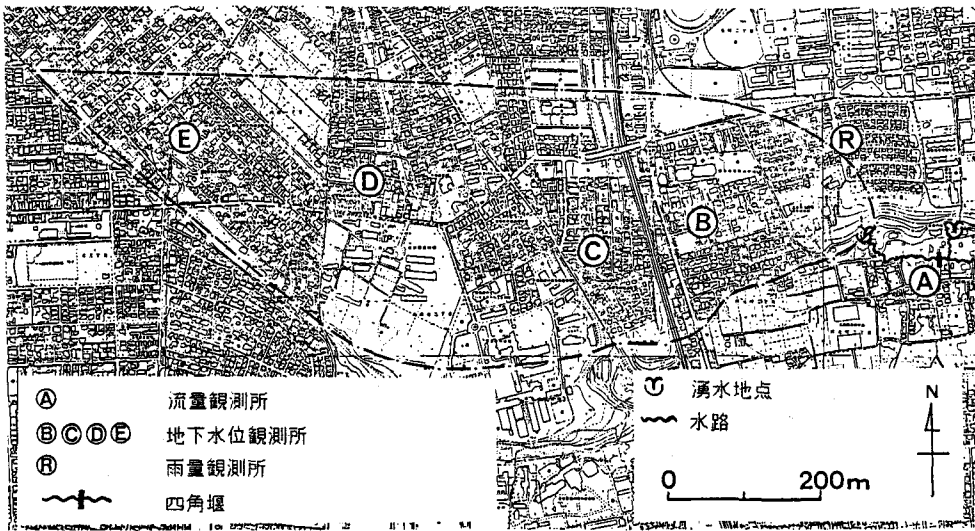


図6 国分寺試験流域における水文観測施設の配置

3 国分寺試験流域における地下水流動を含む

地下水流出解析

3-1 解析対象とする水文データ

図7には、国分寺試験流域において1982年12月10日から1983年1月17日までの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。従って、流量は地下水流出量と考えられる。なお、図7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。図7をみると、観測期間中に地下水位も流量も単調に減水していることがわかる。

3-2 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。すなわち、対象期間には無降雨日が続くので、10mm以下の降雨は土湿不足を補うのに消費されると考える。

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。国分寺試験流域においては、図3に示すように不圧地下水の帯水層である砂礫層の下に不透水性の粘土層が連続的に存在するので深部への漏水は無視しうると考える。なお、粘土層上面は試験流域内で東南方向に1/450の勾配で傾斜している。

第3の前提条件は、地下水流域界を通しての地下水の流入がないことである。これについては、地下水面図に基づき地下水流域界を推定したので、妥当な前提条件と考えられる。

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。表2には、筆者らが調査した流域内の吸込み井戸利用世帯の構成人数と月当りの使用水量と1人1日当りの使用水量を示す。この表によると、1人1日当りの使用水量の平均値は0.18m³/人・日であり、1世帯1日当りの使用水量の平均値は0.60m³/日である。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、上記の1世帯1日当りの使用水量の平均値0.60m³/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には一定であると仮定する。

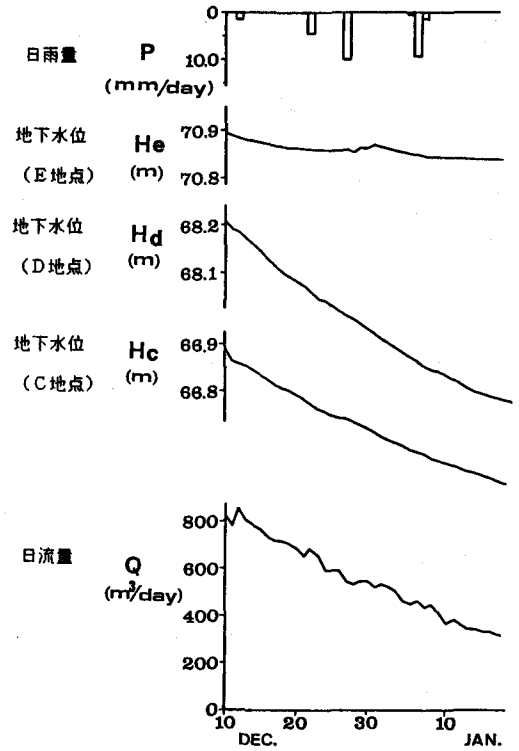


図7 国分寺試験流域における水文観測結果

表2 吸込み井戸利用世帯の使用水量

No	構成人数 (人)	月当り使用水量 (m ³ /月)	1人1日当り使用 水量 (m ³ /人・日)
1	4	19	0.16
2	5	25	0.17
3	4	37	0.31
4	6	44	0.24
5	2	11	0.18
6	3	13	0.14
7	3	8	0.09
8	3	11	0.12
9	3	10	0.11
10	1	8	0.27
11	4	25	0.21
12	4	16	0.13
13	3	16	0.18
14	2	10	0.17
平均値	3.4	18	0.18

3-3 解析方法

(1) 流域のモデル化

流域のモデル化に当っては、まず、図8に示すように地下水位の観測所である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。各領域の境界は、隣合う地点を通る地下水の流線の垂直2等分線により求められる。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領域のそれぞれ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。

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

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

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

ここで、変数と定数の名称は表3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たり、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。

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

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

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

ここでも変数と定数の名称は表3に示す通りであるが、⑥式中のHa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Hcとの2次回帰分析により推定した。

(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4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Hc、Hd、Heと地下水流出量Q₃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

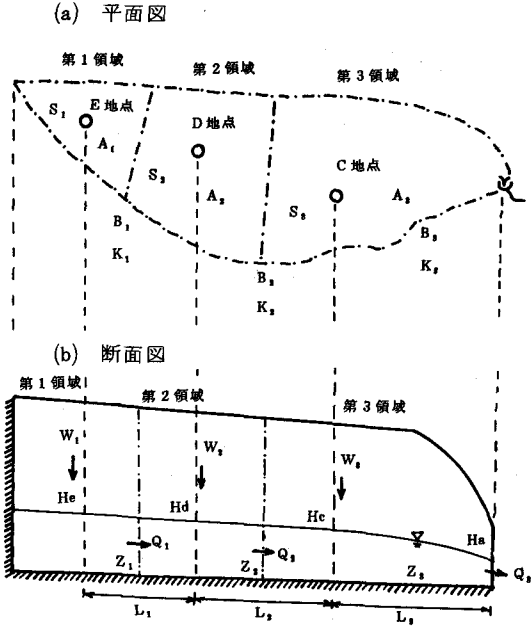


図8 国分寺試験流域のモデル化

表3 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

表4 国分寺試験流域における定数の値

$A_1 = 155500 \text{ m}^2$	$A_2 = 176000 \text{ m}^2$	$A_3 = 338500 \text{ m}^2$
$B_1 = 450 \text{ m}$	$B_2 = 550 \text{ m}$	$B_3 = 400 \text{ m}$
$L_1 = 390 \text{ m}$	$L_2 = 470 \text{ m}$	$L_3 = 550 \text{ m}$
$W_1 = 120 \text{ m}^3/\text{日}$	$W_2 = 12 \text{ m}^3/\text{日}$	$W_3 = 6 \text{ m}^3/\text{日}$
$Z_1 = 63.83 \text{ m}$	$Z_2 = 63.32 \text{ m}$	$Z_3 = 62.57 \text{ m}$

表5 同定された有効空隙率と透水係数の値

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

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て計算を行なう。

3-4 解析結果と考察

図9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誤差が2cm以内、地下水流出量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5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⁹⁾や水谷・虫明⁸⁾の得た値と類似の値であり、妥当な結果といえる。

4 結 論

本研究では、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の基本式に基づく物理的モデルにより、渇水期の流域内の複数地点の地下水位と地下水流出量の両方を解析し、良好な再現計算結果を得ることができた。すなわち、水理学の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実流域への適用可能性が示せたといえる。

謝・辞

本研究を進めるに当たり、御協力を賜りました東京工業大学理学部化学科の松尾禎士教授と大隅多加志助手、並びに地質資料を提供して下さいた自治省消防研究所の細野義純博士には深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 高橋裕・安藤義久・伊藤孝・伊藤和央：山地河川の低水流出の減水特性に関する研究，土木学会論文報告集 第337号，PP.75~82，1983.
- 3) 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.
- 4) Y.Ando, K.Musiake and Y.Takahasi: Modelling of hydrologic processes in a small natural hillslope basin, based on the synthesis of partial hydrological relationships, Journal of Hydrology, 64, PP.311~337, 1983.
- 5) 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.
- 6) 細野義純：武蔵野台地の不圧地下水，「日本の水収支」，古今書院，PP.174~188，1978.
- 7) 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，消防研究所技術資料 第3号，1970.
- 8) 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，第11回環境問題シンポジウム講演論文集，PP.15~20，1983.
- 9) 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.
- 10) 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.

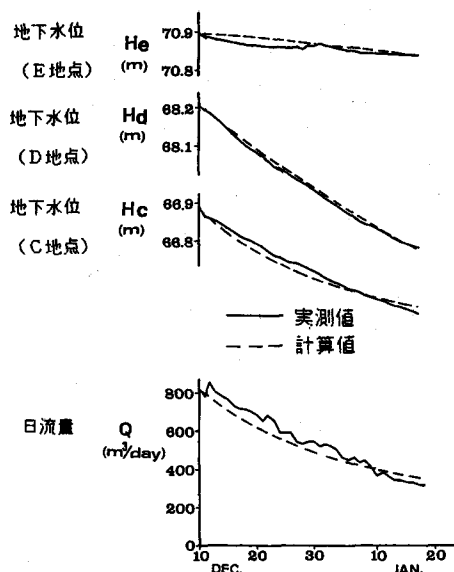


図9 国分寺試験流域における地下水位と地下水流出量のモデルによる計算値と実測値