

山梨大学大学院 学生員 張 祥偉
山梨大学工学部 正会員 竹内邦良
山梨大学工学部 正会員 石平 博

1. 研究目的

河川からの取水量を推定するためには、河川・地下水間の水交換量の算定が必要である。地下水と河川水の水交換挙動のシミュレーションについては、これまでも研究例があるが、これらの多くは一層の帯水層を対象としたものである。しかしながら、多層帯水層と河川結合のシステムにおいては、河川と不圧地下水、不圧地下水と被圧地下水の間での水交換が著しいことから (Fig. 1. 参照)、その等間での水交換解析が必要となる。また、従来の河川からの取水量の推定には、1 年間の水収支を用いられてきたが、河川と地下水の交換量を計算する時間ステップは大きく、誤差も大きい。本研究では、山梨県甲府市における笛吹川と荒川に挟まれた盆地の河川と地下水を対象に、Kinematic Wave モデルと準三次元地下水結合モデルによる多層地下水と河川水の水交換解析を行い、笛吹川 10.8 km 区間の取水量を推定する。

2. 河川と多層地下水解析のモデル

2.1 準三次元地下水モデル

$$A. \text{ 不圧層: } T_1 \nabla^2 h + \frac{k'}{m'} (H - h) + w_1 + f(x, y) \cdot Q_g = S_1 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$B. \text{ 被圧層: } T_2 \nabla^2 H + \frac{k'}{m'} (h - H) + w_2 = S_2 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

ここに、 h 、 H : 不圧層、被圧層の地下水位、水頭、 T_1 、 T_2 : 不圧帯水層、被圧層の透水量係数、 S_1 、 S_2 : 不圧帯水層、被圧層貯留係数、 w_1 :

不圧層地下水の垂直方向の揚水量と涵養量の和、 w_2 : 圧層地下水の垂直方向の揚水量、 m' 、 k' : 難透水層

の厚さ、透水係数、 Q_g : 河川と地下の交換水量、 $f(x, y)$: 河川と地下水の結合節点の判定関数。 $(x, y) \in$ 河川と地下水の結合節点時、 $f(x, y) = 1$ 、 $(x, y) \notin$ 河川と地下水の結合節点時、 $f(x, y) = 0$ 。

2.2 河川水流れのモデル

非定常河川流れの Kinematic Wave 方程式は、次式に表される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = Q_d \quad (3) \quad Q = \alpha A^m \quad (4) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \alpha m A^{(m-1)} \frac{\partial A}{\partial x} = Q_d \quad (5)$$

ここに、 Q_d : 横流入、 x : 河川流れの方向に沿う距離、 A : 断面面積、 Q : x 方向に沿う河川流量、 $m=5/3$ 、 $\alpha = S_0^{3/2} / (nR^{2/3})$ 、 S_0 : 河床の勾配、 R : 潤辺の長さ、 n : Manning の粗度係数。

3. モデルの数値解析

1) 地下水モデルの解析は、三角形メッシュ有限差分法を用い、準三次元地下水モデルの離散化して解いた。差分法による河川水流れの解析を行った。横流入は

$$Q_{di} = Q_{Li} + Q_{ri} - Q_{si} \quad (6)$$

ここに、 Q_{di} : 横流入、 Q_{ri} 、 Q_{si} : 第 i 河川区間に河川流れ解析の時間ステップ Δt 内の河川と帯水層の交換水量、河川から取水量、 Q_{Li} : 支流流入量。

2) 長さ L_i の第 i 区間の河川と地下水の交換水量 Q_{ri} は次式のように計算できる。

$$Q_{ri} = \frac{q_{gi} + q_{gi+1}}{2} L_i \quad (7) \quad q_{gi} = \begin{cases} \frac{k_m}{D_i} R_i (h_i - z_i), & (h_i \geq H_m) \\ -\frac{k_m}{D_i} R_i (z_i - H_m), & (h_i < H_m) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 q_{gi} は第 i 節点での単位長さ当たりの交換水量、 k_m : 河川周辺透水層の透水係数、 D : 河床透水層の厚さ、 H_{mi} : 第 i 断面の河床透水層底面の高さ、 z_i : 河川水位。

キーワード: 取水量、準三次元地下水モデル、Kinematic Wave。

連絡先: 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-11-3

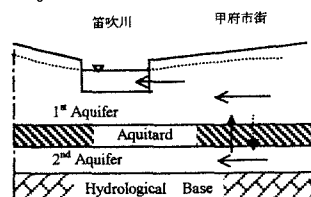


Fig. 1. Schematic plan of interaction between multi-aquifers and stream

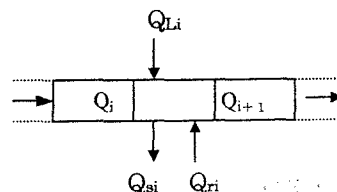


Fig. 2. Schematic stream routing model and definition of variables

3) 河川水位の変動は、地下水の変化より速い。河川解析の時間間隔 Δt_r は小さく、地下水解析の時間間隔 Δt_g は大きい、 Δt_r 時間内に、地下水位は変化しないと仮定することにより、 Δt_g 内の河川と地下水の交換量は次式から得られる。

$$Q_{gi} = \sum_g Q_{ri} \quad (g = \Delta t_g / \Delta t_r) \quad (9)$$

4. 取水量の推定

取水量推定の流れは以下のとおりである。a) 各結合節点での実測河川水位より、式(8)、(9)を用いて、交換量を計算し、準三次元地下水モデル(1)(2)による地下水位計算結果と実測地下水位が合うようにパラメータを試行錯誤的に変化させ同定する。b) 同定したパラメータを利用し、式(6)、(7)より、 Δt_g 時間内の河川からの取水量 Q_{Ei} は、式(10)から計算される。

$$Q_{Ei} = \sum_g Q_{si} \quad (10)$$

5. モデルの適用

解析領域は笛吹川と荒川に挟まれた面積約 63.8 km^2 の区域である。笛吹川と荒川の合流点から笛吹橋までの 10.8 km の河川水と帯水層の水交換解析を行った。今回は、計算領域を75要素に分割し、節点数は51となった(Fig.3参照)。また、モデルの入力として、上層根、石和での河川水位の時系列、7つの点の同時流量観測値(そのうち、平等川、濁川、浅川の同時流量が含まれている)を用いた。

5.1 パラメータの選択及び同定

A. 降雨による涵養量：非市街地 1 km^2 当たりの地表面からの涵養量は降水量の0.17倍とした。B. 揚水量：昭和60年度山梨県総合水需給計画策定調査図面集から読み取った。C. 水理定数の同定： $\Delta t_g = 10 \text{ d}$ 、 $\Delta t_r = 1 \text{ h}$ で、昭和60年2月～昭和61年12月期間に3つの観測点の実測値を利用し、パラメータを同定した。E. 荒川の水位の経時変化を与えるのは困難であるので、平成2年1月の水位を一定水位として与えた。F. 山腹側の境界を流量が既知として取り扱い、昭和60年2月の地下水位勾配¹⁾に基づき、ダルシー法則を用いて計算した。

5.2 解析結果

本研究では、河川追跡時間ステップは1時間、地下水解析時間ステップは10日を採用した。

(1) Fig. 4. は平成2年1月～12月の石和観測井での不圧地下水位の実測値と計算値を示すものである。三つの観測点での計算水位の平方根平均二乗誤差の和は 0.63 m であり、地下水位は比較的よい精度で再現できている。

(2) 河川流れの解析には、短い時間ステップを選ぶ必要がある。特に、洪水期には、河川水位の激しい変化に伴い、河川と帯水層の交換水量の変動も大きい(Fig. 5. 参照)。

(3) Fig. 6. より、平成2年の解析領域における帯水層から笛吹川への年平均補給水量は $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、全甲府盆地不圧層から河川への年平均流出水量($3.36 \text{ m}^3/\text{s}$, 1991)の7.7%、甲府南流域における河川への年平均流出量 $0.63 \text{ m}^3/\text{s}$ の41%を占めていることを分かった。

(4) 対象区間においては、河川から $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$ の年平均取水量を推定した。この結果(Fig. 7.)、4月～10月の灌漑期の平均取水量 $1.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 、4～7月の平均取水量は $1.65 \text{ m}^3/\text{s}$ で、全灌漑期間の1.3倍となった。

6. おわりに

今回は、多層地下水・河川の結合モデルを用いて、河川から取水量の推定を行なった。今後の方針として、取水量の増加が地下水位、地盤沈下に及ぼす影響を解析する予定である。

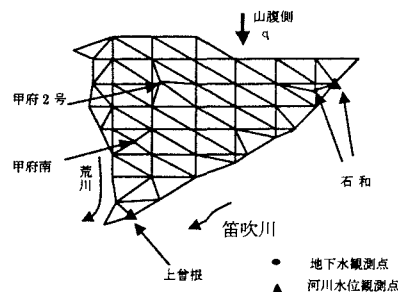


Fig. 3. Net of triangular elements for the area between Ara River and Fuefuki River

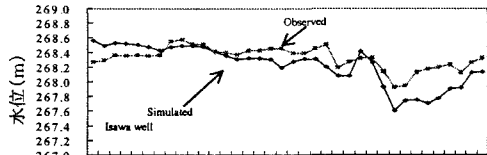


Fig. 4. Observed and Simulated water level for phreatic aquifer

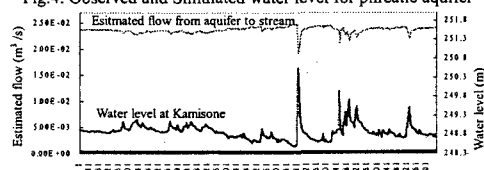


Fig. 5. Stream water level and estimated flow from phreatic aquifer to 0.98km reach at Kamisone (H2.1-12, $\Delta t_r = 1 \text{ h}$)

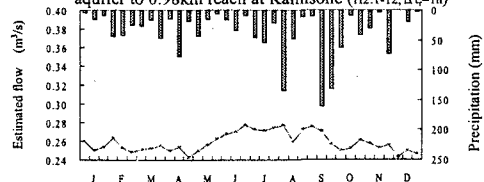


Fig. 6. Estimated flow from phreatic aquifer to Fuefuki River ($\Delta t_r = 10 \text{ d}$)

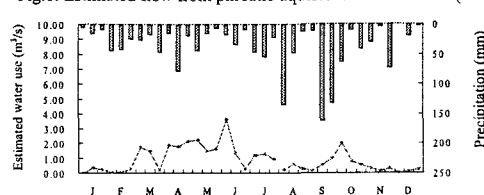


Fig. 7. Estimated water use extraction from Fuefuki River within 10.8km reach