

河川水と地下水の相互作用を考慮した扇状地河川の水収支評価

名城大学理工学部 正 員 原田 守博
 名城大学大学院 学生員 ○ 山田 達也
 名城大学理工学部 林 陽介

1. はじめに

扇状地のように透水性の高い地域を河川が流れる場合、河川水が地下へ伏流するため河道流量が減少し、水質や生態系・景観などに悪影響が及ぶことがある。また、河道流況や地下水状態は灌漑や地下水揚水などの人為的作用による影響も受ける。したがって、扇状地における河川環境を保全するには、周辺地下水との水交換を考慮しつつ維持流量を評価する必要がある。本研究は滋賀県の野洲川を対象として、周辺地下水が低水流況に及ぼす影響を考察するとともに、扇状地における河川水と地下水の水収支を評価したものである。

2. 野洲川扇状地における河川水-地下水結合モデルの構築

(1) 対象地域の概要：野洲川は湖東平野に扇状地を形成しつつ琵琶湖に流入する流域面積 387km² の一級河川である。扇頂部には自然越流型の堰があり、頭首工で農業用水が取水されるため、とくに灌漑期において河道の流量が減少する。さらに、地盤の透水性が高いために河川水が河床から地下へ伏流しやすく、流水がすべて伏没して河道の一部が枯渇する区間が生じ、「水無し川」となる場合もある。そのため、野洲川の低水流況は周辺地下水との水交換によって影響を受けているものと考えられる。

(2) 河道の低水流況と地下水位の現地観測：扇頂部から河口までの約 14km 区間に、図-1 に示す 6 箇所の流量観測地点を設定し、4 回にわたって低水流況の同日観測を行った。測定にはプロペラ式微流速計を用い流量の測定精度は 4 % 程度である。一方、地下水位については、13 箇所の浅層地下水観測井による日水位データを解析に用いた。

(3) 河川水と地下水の相互作用の解析手法：河川水と地下水との水交換を考慮して河道の流量変化および地下水位の空間分布を求めることにより、河川水と地下水の相互作用に伴う河道の低水流況の再現を試みた。本題は河川水と地下水の連成問題であるため、解析を行う際には両者の支配方程式を同時に解く必要がある。

上流端からの流下距離 s における河道流量 $Q(s)$ は、河道の上流端流量を Q_0 、帯水層への伏流強度を $q^*(s)$ とすると、連続式(1)によって表される。ただし、 $q^*(s)$ は河川水が帯水層へ浸入する場合を正とする。河道水深 $h(s)$ は、Manning による等流近似式(2)に $Q(s)$ を代入することにより求められる。一方、地下水位分布 $\phi(x, y)$ は Dupuit の仮定に基づく二次元定常地下水方程式(3)によって解かれる。河川水と地下水の水交換に相当する伏流強度 $q^*(s)$ を、河床下の地下水位 $\phi(s)$ 、河道水深 $h(s)$ 、河床高 $z_r(s)$ をもとに式(4)から求めることにすれば、式(1)(2)によって河道流量と水深が、式(3)によって地下水位分布が更新される。更新された $h(s)$ と $\phi(x, y)$ を用いて $q^*(s)$ の計算を反復させることにより、相互作用の結果としての河道流況と地下水状態が確定する。

(4) 解析領域と境界条件：図-1 は解析領域の平面図である。扇頂部から扇央部にかけては都市化が進み、不透水域が拡大している。一方、扇端部において水田域や裸地が広く分布しており、

$$Q(s) = Q_0 - \int_0^s q^*(s) ds \quad (1)$$

$$h(s) = \left(\frac{nQ(s)}{BI^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(x, y) H(x, y) \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K(x, y) H(x, y) \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} \right\} + r(x, y) = 0 \quad (3)$$

$$q^*(s) = \frac{k}{d} \{ h(s) + z_r(s) - \phi(s) \} B \quad (4)$$

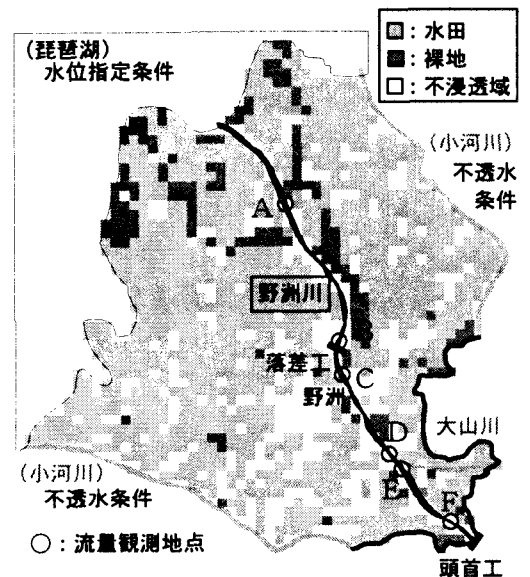


図-1 野洲川扇状地

地下へ涵養しやすい状況にある。本解析では対象領域を $250\text{m} \times 250\text{m}$ の差分格子に分割した。帯水層の境界条件として、山地および小河川に接する境界で不透水条件、琵琶湖に接する境界で水位指定条件を用いた。帯水層は等方均質層とし、透水係数 K は $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ および $2.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ の2通りを与えて計算した。地下水涵養量は土地利用を考慮して、浸透域（水田・裸地）で 0.5 mm/day を与えた。揚水量は実測データを与えた。河道については、河床の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、河道幅 $B=20\text{m}$ 、Manning の粗度係数 $n=0.05$ とした。

3. 現地観測結果に対する解析モデルの再現性

現地観測を実施した 2002 年 9 月 3 日（非灌漑期）の状況を想定した地下水位と河道流量の解析結果について観測値との適合性を検討する。図-2 は計算された地下水位の空間分布を示したものである。河道水位と地下水位に水位差が生じるため、上流部では河川水が地下へ伏流し、下流部では地下水が河道へ湧出している。図-3 は、図-2 中の地下水位観測井（●印）における地下水位の観測値と解析結果を比較したものである。この図より、解析結果は観測値から推定される領域内での地下水状態を概ね再現できていると考えられる。

図-4 は、河道の流量変化を比較したものである。図中の▲印は図-1 に示す A～F の6地点での流量観測値、破線および実線は解析結果である。解析結果は上流部において観測値から推測される流量変化に近い傾向を示しているが、下流部では流量の増加傾向が見られた。また、破線と実線を比較すると、帯水層の透水係数 K を大きくした場合には上流部から中流部までの流量変化に大きな差が見られた。したがって、解析結果の精度を高めるためには、帯水層の水理特性を詳細に検討する必要がある。

図-5 は、上記のパラメータや解析結果をもとに、領域内における水収支量を計算したものである。ここで、琵琶湖への流出量を推定値として与えることにより、すべての水収支量の合計がゼロとなるようにした。図を見ると、帯水層の透水性を高くした場合にはとくに河川水の伏流量が大きく増加し、それによって地下水が琵琶湖へ流出する量も増加するという結果が示された。

4. おわりに

野洲川扇状地における水収支や河川の低水流況について、現地観測と数値解析の両面から検討した。ここで提示した河川水と地下水の相互作用モデルは実現象に対する一定の再現性を確認したが、精度を高めるためには扇状地の地下構造や、地下水涵養機構等についての情報をもとに水理定数や境界条件を十分に検討する必要がある。今後、河川の景観や水質、魚類をはじめとする水棲生物の生息環境といった、河川環境を保全するために必要となる環境維持流量の評価・設定を行う予定である。

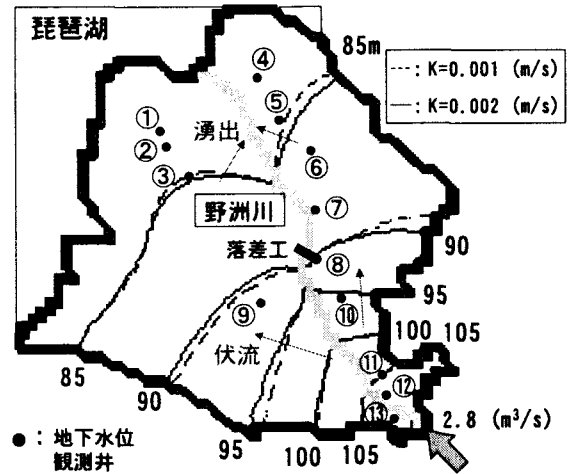


図-2 地下水位の空間分布

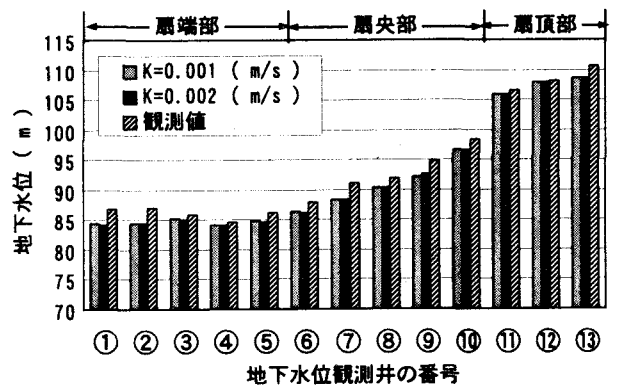


図-3 地下水状態の再現性

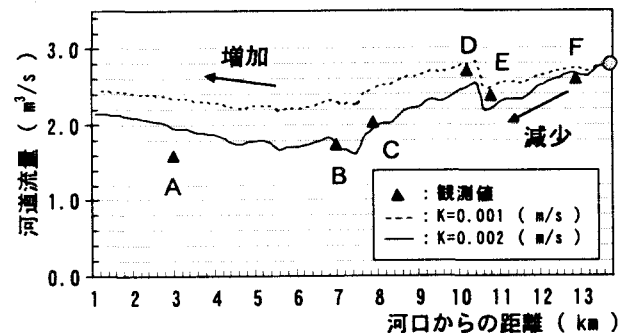


図-4 河道の流量変化

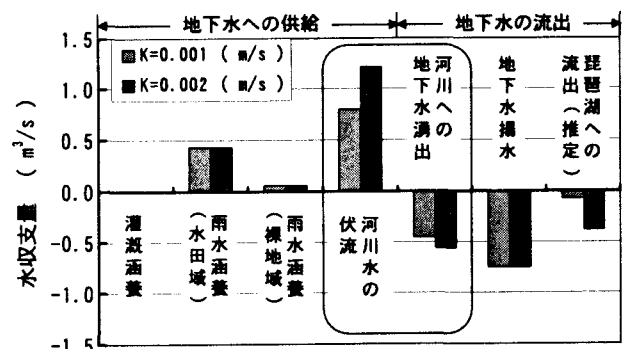


図-5 河川水と地下水の水収支量の計算結果