

耕区スケールメッシュを用いた地表・地下水流の完全連成型モデル A Fully Coupled Surface and Subsurface Flow Model with Field-plot-scale Resolution

○武馬 夏希*・竹内 潤一郎*・河地 利彦*

○Natsuki Buma, Jun-ichiro Takeuchi and Toshihiko Kawachi

1 緒論

適切な水資源利用や流域管理のあり方を考える際には、その地域における水環境の特性を把握することが不可欠である。地域水環境の解析や予測には、実際の物理法則に基づいた数理モデルを用いることが有用といえる。

これまで、滋賀県北西部に位置する日置前扇状地を対象地域として地下水の観測を行ってきた。ボーリング調査地点において、砂礫層と粘土層が交互にあらわれたため、対象地域は互層構造を有しているのではないかと推察される。しかしながら、観測井戸における地下水位や水温の挙動より、下層の帯水層への地表面からの浸透が推察され、難透水層である粘土層の分布は全面的なものではなく、空隙や分断を含んだ複雑なものであるとも考えられる。

すなわち、対象地域における水環境には三次元的な地質の分布が大きな役割を果たしているといえる。またこの地下水位や降雨に対する応答には季節変化が見られ、当該地域が水田地帯であることを考慮すると、灌漑期・非灌漑期の水分状態の変化が影響を与えているのではないかと考察される。

以上より本研究では、水田の湛水状況を表現するための耕区スケールメッシュを用い、水平二次元の地表流モデルと三次元の地下水流モデルを連成させて当該地域における水環境を再現することをその目的とする。

2 数理モデル

2.1 二次元地表流

二次元地表流の支配方程式には、De Saint Venant 式に拡散波近似を施した次式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla H) + r - e - q_t \quad (1)$$

ここで、 h は水深、 H は水位、 r は有効降水量、 e は蒸発量、 q_t は地下との水のやり取りを表わすソース・シンク項である。また D は拡散係数であり、

$$D = \frac{h^{5/3}}{n_M \left[\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/4}} \quad (2)$$

と表される。ここで、 n_M は Manning の粗度係数である。

2.2 三次元地下水流

三次元地下水流の支配方程式には、圧力水頭 ψ と飽和度 S_w を未知変数とした次のような Mixed-form Richards 式^{[1],[2]}を用いる。

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + S_w S_s \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\nabla \cdot [-K \nabla (\psi + z)] \quad (3)$$

また、

$$S_s = \rho_w g (\beta_s + \phi \beta_w) \quad (4)$$

である。ここで、 ϕ は空隙率、 S_s は比貯留率、 K ($\equiv K_s k_r(\psi)$) は透水係数 (K_s は飽和透水係数、 k_r は相対透水係数)、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 β_s と β_w はそれぞれ土と水の圧縮率である。また ψ と k_r の関係には van Genuchten-Mualem 型のモデル^{[3],[4]}を用いる。

2.3 モデルの連成

上記 2 モデル間の相互作用は、ソース・シンク項と境界条件によって表現される。地下への水の浸透および地下からの湧出は、二次元地表流モデルの式 (1) におけるソース・シンク項と、三次元地下水流モデルにおける地表面の境界条件を用いて表され、地表流モデルにおける水位と地下水流モデルにおける地表の全水頭の、2 つの水頭差に応じて水のやりとりが行われるとする。

以上の式について、空間方向を要素ベースの有限体積法により離散化する。また時間方向については差分法を用いて離散化し求解する。

3 モデルの適用

3.1 対象地域のモデル化

本研究の対象地域は、滋賀県北西部に位置する高島市今津町の日置前扇状地 (図 1) であり、モデルの適用領域は、日置前扇状地のうち上郷川と境川に南北を挟まれた部分である。計算に用いるメッシュを図 2 に示す。

分水嶺と河川・湧水帯をそれぞれ不透水境界と定水位境界として領域の範囲を設定したのち、人工衛星写真より水田の耕区を判断し要素分割を行う。また 50 m メッシュのデジタル標高データを用いて地表面の傾斜を作成し、同一耕区内においては標高を一定とする。

二次元地表流モデルでは、異なる耕区間では水のやり取りは生じない。三次元地下水流モデルでは、領域は鉛直方向に 11 の段に分割され、最下段の底面は不透水境界を設定する。

*京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University
キーワード: 地下水, 数値計算, 扇状地

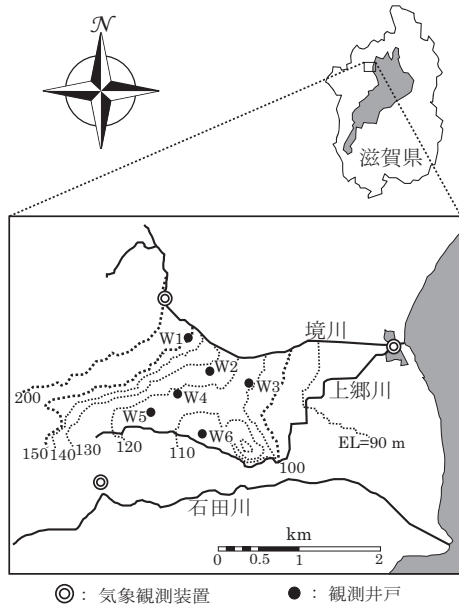


図 1: 対象地域
Figure 1: Study area

3.2 計算結果および考察

3.2.1 初期条件

地表流モデルの初期条件は領域全体にわたって水深を 0 cm とする。

地下水流モデルの初期条件を図 2 に示す。初期条件は、領域全体にわたって圧力水頭が均一な状態から長時間計算し、定常状態となったものを用いる。

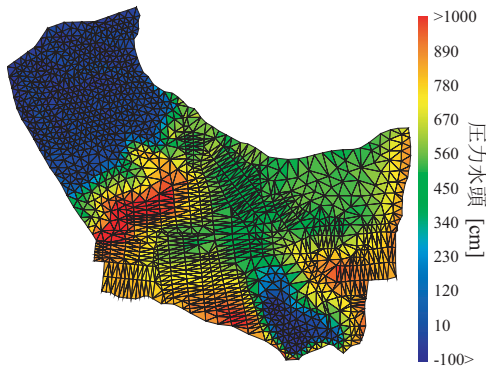


図 2: 要素分割平面図および最下段の初期条件
Figure 2: Computational mesh and the initial condition of the lowest level

図 2 中において圧力水頭が高くなっている地点では、実際の対象地域においても湧水の存在が確認されており、この初期条件は対象地域の地下水環境を定性的に再現できていると思われる。

3.2.2 田面からの灌漑用水の浸透

水田地帯の地表水で湛水状態を表現し、また 2007 年 4 月後半において観測された降雨・蒸発散を与える。

地質構造については、粘土層が扇状地の全面に途切れなく分布している構造（成層的）と、粘土層に途切れている部分のある構造（非成層的）の 2 条件についてそれぞれシミュレーションを行う。

三次元地下水流の計算結果を図 3 および 4 に示す。山地の谷筋を雨水が流下していく現象が確認される。

ただし、成層的地質構造（図 3）においては、扇央～扇端にかけて地下水状況の変化は見られない。一方、非成層的地質構造（図 4）においては、粘土層の空隙からの灌漑水の浸透が確認される。

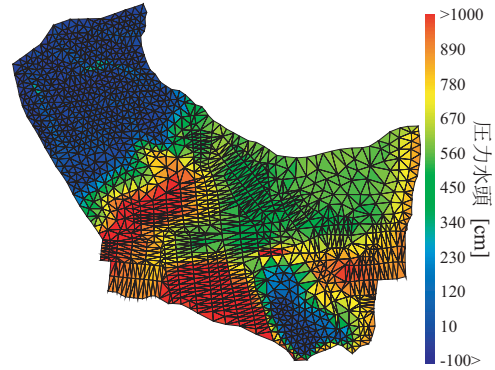


図 3: 成層的地質構造における湛水開始 4 日後の最下段
Figure 3: Computational results in the lowest level of the layered structure 4 days after irrigation starts

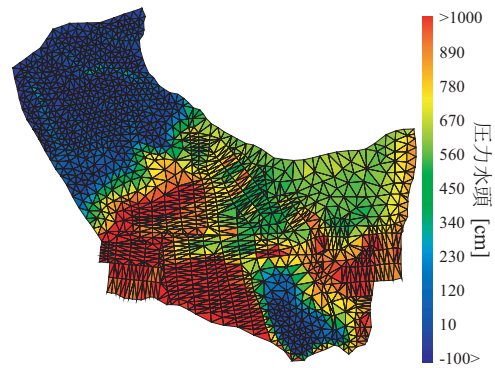


図 4: 非成層的地質構造における湛水開始 4 日後の最下段
Figure 4: Computational results in the lowest level of the non-layered structure 4 days after irrigation starts

4 結論

対象地域である扇状地の地域水環境を再現することを目的として、水田の耕区スケールのメッシュを有する地表流・地下水流の完全連成型モデルを用いて数値解析を行った。

得られた結果は実際の扇状地の水環境を定性的に再現できていると思われ、対象地域において扇央～扇端部では難透水層の分布が部分的であることが示唆された。

参考文献

- [1]Huyakorn, P.S. and Pinder, G.F.(1983): *Computational Method in Subsurface Flow*, Academic Press, pp.99-141.
- [2]Celia, M.A., Bouloutas, E.T. and Zarba, R.L.(1990): A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation, *Water Resour. Res.*, **26**(7), pp.1483-1496.
- [3]van Genuchten, M.T.(1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, pp.892-898.
- [4]Mualem, Y.(1976): A New Model for Prediction the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resour. Res.*, **12**(3), pp.513-522.