

# 疑似アダプティブ FVM を用いた地表水-地下水連成型流域モデルの開発 Surface-subsurface-coupled Watershed Model Using Quasi-adaptive Unstructured FVM

○竹内 潤一郎・河地 利彦・武馬 夏希

○Junichiro Takeuchi, Toshihiko Kawachi, and Natsuki Buma

## 1 はじめに

これまでに、物理モデルに基づいて地表水と地下水の流動を連成させた流域モデルがいくつも提案されている [1]-[5]. それらの中で、河川の扱いについて着目すると、2次元地表流として河川流を扱ったもの [1],[2],[5] と2次元地表流とは別に一次元開水路流れとして扱ったもの [3],[4] に分けられる. VanderKwaakら (2001) [2] が対象とした R-5 流域のような緩やかな傾斜の流域においては、河川流とその周囲の地表流出を分けずにモデル化することが可能であるが、日本のような比較的急な山地の谷筋における溪流や低平地の田園地帯における地下水排水を兼ねる排水路を有する流域をモデル化する際には、それらの流れを1次元開水路流として扱った方が都合がよい. また、一般に差分法では流域境界や河川、農地等の土地利用境界に適したメッシュを作成することが困難であり、有限要素法 (FEM) では、湛水の有無によって地表面の境界条件を変化させる必要がある点や、河川に隣接する節点の取り方や地下水との流入・流出量の評価に注意が必要な点から、本研究では、有限体積法 (FVM) を用いて離散化を行う. FVM を用いた本モデルでは、代表点をセルの中心におくことにより、湛水時もフラックス境界 (ノイマン境界) として扱うことができ、河川水位と隣接するセルの地下水位の差から流入・流出を評価し、さらに係数を導入することにより暗渠排水の効果も容易に表わすことができる [6].

ここでは、滋賀県の北西部に位置する境川流域の上流部に開発したモデルを適用し、降雨-流出応答や流出寄与域の変動の様子を示すことにより、本モデルの有効性の検証を行う.

## 2 流域モデル

本モデルでは、図1に示すような様々な水文過程を、三次元飽和-不飽和地下水流モデル、水平二次元地表流モデル、一次元開水路流モデルの3つのモデルを用いて表す. 三次元飽和-不飽和地下水流モデルには、水と空隙の圧縮率を考慮した Richards 式を支配式として用い、水平二次元地表流モデルと一次元開水路流モデルには拡散波近似式を用いる. 各モデルは、図2に示すように互いに接しており、モデル間の水のやり取りは境界条件やソース項として与え

られ、その値は水位差に応じて決まる.

斜面における飽和側方流と地表流は、水深の変化を無視できると仮定すると、それぞれ斜面勾配とその2分の1乗に比例することから、本モデルでは、斜面勾配の大きさに基づいたアダプティブメッシュを使用する. すなわち、標高の  $H_1$  セミノルムを用いて初期メッシュを評価し、 $h$  法によりアダプティブメッシュを作成する.

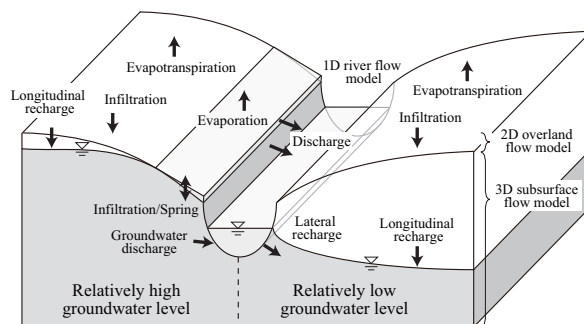


図1: 流域モデルの概要  
Fig.1: Schematic of watershed model

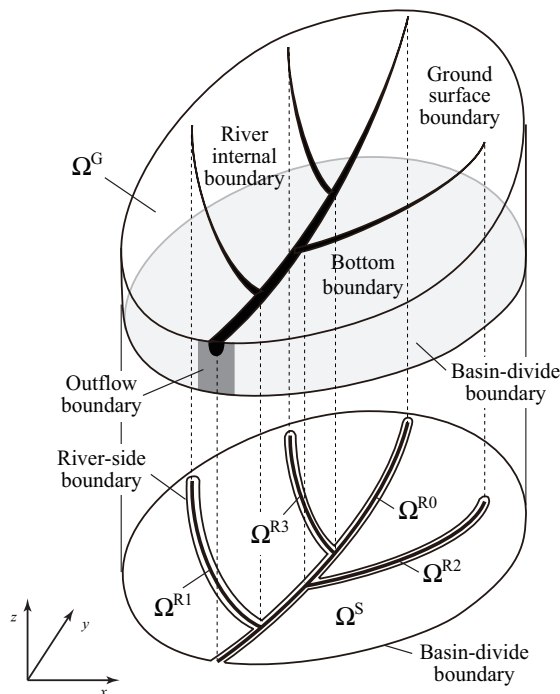


図2: 流域モデルの領域と境界  
Fig.2: Domains and boundaries of watershed model

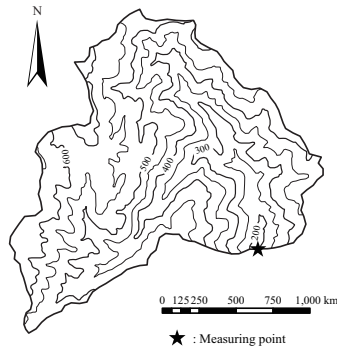


図3: 対象領域  
Fig.3: Objective area

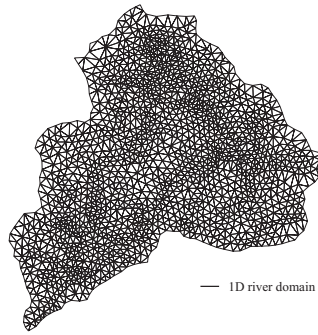


図4: 計算メッシュ  
Fig.4: Computational mesh

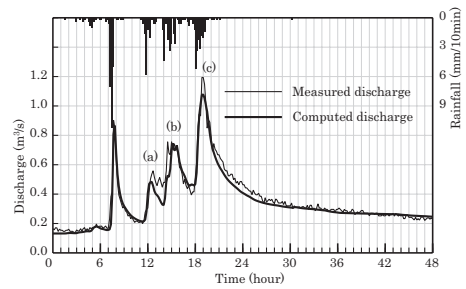


図5: ハイドログラフ ('05/08/12 12:00)  
Fig.5: Hydrograph ('05/08/12 12:00)

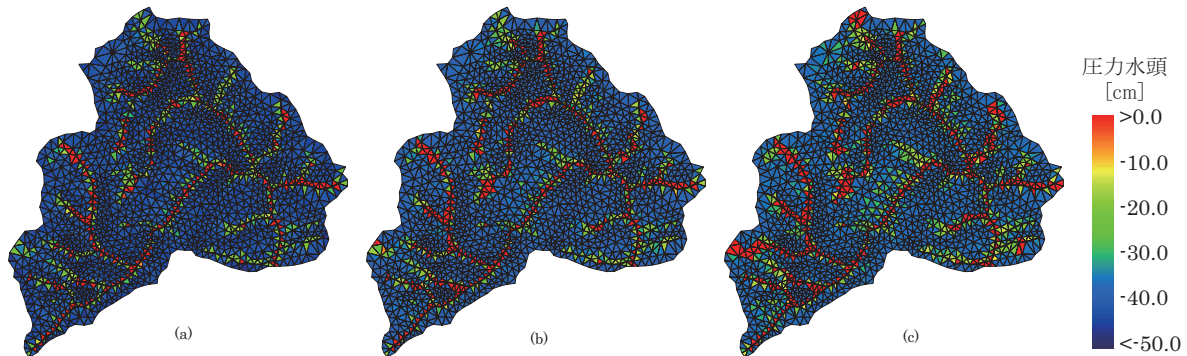


図6: ピーク時の地表面の圧力水頭  
Fig.6: Pressure heads of ground surface

### 3 適用例

上述の流域モデルを、滋賀県の北西部に位置する境川の上流部に適用する。図3から推測されるように、対象領域には多くの谷筋があり、一時河川と恒常河川が存在している。図4に示すように、この領域を勾配に応じた大きさの三角形メッシュで分割し、また、一次元開水路流域は一時河川も含めてすべての谷筋を通るように作成する。三次元飽和-不飽和地下水モデルの土壌厚は1.25mで、A層、B層、C層を想定し、真下が示した土壌水分特性[7]を有するものとする。圧力水頭と体積含水率、不飽和透水係数の関係は、van Genuchten-Mualemモデルを用いる。また、底面は不透水性岩盤と仮定する。蒸発散は対象流域の流出部で観測した各種気象データを用いて、Penman-Monteith法で推定する。

2005年8月12日12:00から3日間の気象データを用い、計算と実測ハイドログラフが一致するように、各層の飽和透水係数と二次元地表流モデルのマニング粗度係数について、その物理的な意味を考慮しながら試行錯誤的に値を求めた。計算の結果得られたハイドログラフを図5に示す。この降雨イベントでは、あわせて89.2mmの降雨が観測され、流出率は28.1%であった。この降雨イベントによって生じた4つのピークについて、ピーク流量とその遞減ともによく再現できていることが示される。また、

図6には2から4番目(a, b, c)のピーク時における計算で得られた地表面の圧力水頭の分布を示す。一次元河川領域の周囲に存在する赤色で示された部分が地表面まで飽和に達している部分で、流出寄与域に該当しており、2次元地表流モデルにおいては飽和地表流が発生している。また、流出寄与域の拡大につれて、一時河川においては河川流の発生する領域が上流側まで伸びている。

### 4 まとめ

FVMを用いて地表流と地下水流を連成した流域モデルを開発した。境界や河川・水路、土地利用境界に適合する三角形メッシュにより空間分割を行い、標高の勾配に基づいてメッシュの大きさを調節するアダプティブメッシュを使用した。本モデルを用いた流出解析により、ハイドログラフを精度よく再現でき、かつ流出寄与域の拡大・縮小も表すことができることを示した。

**参考文献** [1] 登坂博行ら (1996): 地下水学会誌, 38(4), pp.253-267. [2] VanderKwaak, J.E. and Loague, K. (2001): *Water Resour. Res.*, 37(4), pp.999-1013. [3] Pandey, S. and Huyakorn, P.S. (2004): *Adv. Water Resour.*, 27, pp.361-382. [4] Qu, Y. and Duffy, C.J. (2007): *Water Resour. Res.*, 43, W08419. [5] Jones, J.P. et al. (2008): *Water Resour. Res.*, 44, W03407. [6] Takeuchi, J. et al. (2009): *Paddy Water Environ.*, 7, pp.33-43. [7] 塚本良則 (1992): 森林水文学, 文永堂出版, pp.34-35.