

地表面における熱収支を考慮した地表・地下水流動と熱輸送連成モデル Surface/Subsurface Water and Heat Flow Model with Energy Budgets on the Ground Surface

武馬 夏希*・竹内 潤一郎*・河地 利彦*

Natsuki Buma*, Jun-ichiro Takeuchi* and Toshihiko Kawachi*

1 はじめに

これまで、地下水と地表水、農業水利を含めた地域水環境を対象として、数理モデルを用いた研究を行ってきた。著者ら^[1](2009)は、非等温状況下における二次元地表流と三次元地下水流動の連成モデルを水田地帯に適用し、灌漑期における対象地域の地下水温度低下を再現することに成功している。しかしながら既往のモデルでは、地表面における潜熱・顕熱輸送の扱いに改善すべき点があった。

対象地域における水田や用排水路の水温には時間・空間的な変化が見られる。同時期の水田についても場所的な水温の差があることから、集水域である山地から扇状地や平地を経て湧出するという地域スケールでの地下水流動がそれら地表水温に影響を与えているのではないかと推察されてきた。

地表水温は水稻等の作物の生育に影響を与えるのみならず、地域全体の微気象環境を形成する要因ともなり、その把握や予測を行うことは重要な意味を持っているといえる。このような地域水温環境を把握するためには、地表・地下水の熱輸送を連成させたモデルを用いて諸季節間から年間に渡る時間スケールでの長期解析を行う必要がある。以上より本研究では、地表面における熱収支を考慮した地表・地下水および熱流れの数理モデルを開発することをその目的とする。モデルは長期に渡る解析を行うことが可能であることが求められる。

2 数理モデル

2.1 熱輸送

地表水および地下水における熱輸送の支配方程式には、次に示す熱の移流分散式を用いる。

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_w c_w \mathbf{u}T) - \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + Q_s \quad (1)$$

ここで、 C は熱容量、 T は温度、 λ は熱伝導率、 ρ_w と c_w は水の密度と比熱、 \mathbf{u} は地表流または地下水流動の支配方程式によって導かれる流速、 Q_s はソース項である。

2.2 地表流

地表流の支配方程式には、浅水流方程式に拡散波近似を施した次式を用いる^[2]。

$$\frac{\partial d^O}{\partial t} = -\nabla \cdot (-D \nabla h^O) + r - ET - q_1 \quad (2)$$

ここで、 d^O は水深、 h^O は水位、 r は有効降水量、 ET は蒸発散量、 q_1 は地下との水のやり取りを表わすソース・シンク項、 D は拡散係数である。

式(1)中における熱容量、熱伝導率、また流速には、それぞれ次の3式が代入される。

$$C^O = \rho_w c_w, \quad (3)$$

$$\lambda^O = \lambda_w, \quad (4)$$

$$\mathbf{u}^O = \frac{-D \nabla h^O}{d^O} \quad (5)$$

ここで、 λ_w は水の熱伝導率であり、また上付き添え字 O は地表流を意味する。

2.3 地下水流

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^{[3],[4]}を用いる。

$$\frac{\partial(\rho_w \phi S_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w S_w S_s \psi)}{\partial t} = -\nabla \cdot [-\rho_w K \nabla(\psi + \rho_r z)] \quad (6)$$

ここで、 ϕ は間隙率、 S_s は比貯留率、 K は透水係数、 ρ_r は基準温度の密度に対する水の相対密度である。

式(1)中における熱容量、熱伝導率、また流速には、それぞれ次の3式が代入される。

$$C^G = \rho_w c_w S_w \phi + \rho_s c_s (1 - \phi), \quad (7)$$

$$\lambda^G = \lambda_s + \frac{1}{2} \theta^{1/3}, \quad (8)$$

$$\mathbf{u}^G = -K \nabla(\psi + \rho_r z) \quad (9)$$

ここで ρ_s 、 c_s 、 λ_s はそれぞれ土粒子の密度、比熱、熱伝導率であり、 θ は体積含水率、また上付き添え字 G は地下水を意味する。

2.4 地表面における熱収支

地表面における放射収支および熱収支はそれぞれ次の2式であらわされる。

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + L \downarrow - L \uparrow, \quad (10)$$

$$R_n = H + lET + G \quad (11)$$

ここで R_n は純放射量、 R_s は雲量や樹冠による遮断を考慮した日射量、 α はアルベド、 $L \downarrow$ と $L \uparrow$ はそ

れぞれ下向きおよび上向き長波放射量, H は顕熱フラックス, l は水の蒸発潜熱, ET は蒸発散量, G は地中伝導熱フラックスである.

地表面または水面と大気との間における顕熱輸送量 H および蒸発散量 ET はバルク法によって次式のように計算される.

$$H = v c_p \rho_a C_H [T_S - T_a] \quad (12)$$

$$ET = v \beta \rho_a C_H [q_{sat}(T_S) - q] \quad (13)$$

ここで v は風速, c_p は空気の定圧比熱, ρ_a は空気密度, C_H は顕熱に対するバルク輸送係数, T_S は地表面または水面における温度, T_a は気温, β は蒸発効率, $q_{sat}(T_S)$ は温度 T_S における飽和比湿, q は空気中の比湿である.

式 (13) により求められる蒸発散量は, 地表水深 $d^0 > 0$ の時は式 (2) の ET に与えられ, $d^0 = 0$ の時は式 (6) に境界条件として与えられる. 一方, 式 (11) より, 地中熱フラックス G は $d^0 > 0$ の時は地表水温の移流分散式にソース項として与えられ, $d^0 = 0$ の時は地温の移流分散式に境界条件として与えられる.

3 対象地域

3.1 対象地域の概観

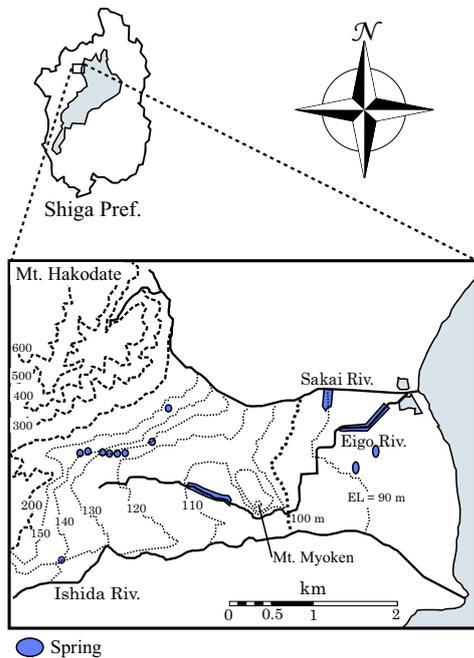
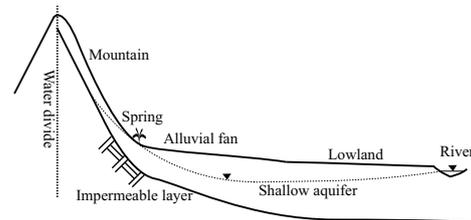


図 1: 対象地域
Figure 1: Study area

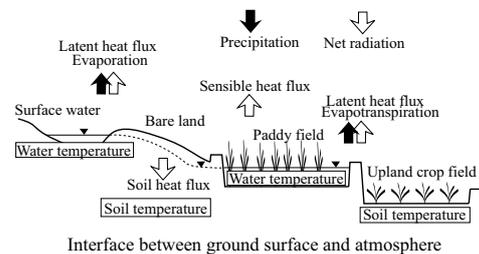
本研究の対象地域は, 滋賀県北西部に位置する高島市今津地域 (図 1) である. 今津地域は西部の山地から扇状地を経て低平地へと至る複合的な地形を有しており, 扇状地と低平地には水田が広く分布している. また地下水が豊富であり, 標高 130m 付近や扇端部である 90m 付近には湧水帯が存在する.

3.2 対象地域のモデル化

前節で述べたモデルは, 山地の分水嶺から低平地を流れる上郷川までを適用領域とする (図 2). 領域は鉛直二次元とし, 地表水および GL-10m 付近までの浅層地下水をその解析対象とする. 水田の湛水は地表水として表現され, 森林, 水田, 畑地, 裸地といった土地利用に応じて日射遮断量, アルベド α が定められる. また蒸発効率 β は土地利用に応じてだけでなく, 土壌が不飽和の際は土壌水分量に応じて異なる.



Vertical two-dimensional profile of mountain, alluvial fan and lowland



Interface between ground surface and atmosphere

図 2: モデル概念図
Figure 2: Schematic of the model

4 おわりに

地表面における熱収支を考慮した地表水・地下水の流動と熱輸送連成モデルについて述べた. モデルは地表流サブモデルと地下水流サブモデルからなり, それぞれにおいて水の流動および熱の輸送が計算される. また, 地表面においてはバルク法によって純放射が顕熱・潜熱および地中熱フラックスへと配分される. このモデルを, 山地・扇状地・低平地を含んだ農村地域に適用する. 適用領域は鉛直二次元とし, 地下水の解析は GL-10m 付近までの帯水層をその対象とする.

参考文献

- [1] 武馬夏希・竹内潤一郎・河地利彦 (2009) 農村地域における地表水・地下水の流動と熱輸送連成解析, 第 66 回農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集, 講演番号 1-02.
- [2] Giammarco, P. Di., Todini, E. and Lamberti P. (1996) A Conservative Finite Elements Approach to Overland Flow: The Control Volume Finite Element Formulation, *J. Hydrol.*, **175**:267-291.
- [3] Huyakorn, P.S. and Pinder, G.F. (1983) *Computational Method in Subsurface Flow*, Academic Press:99-141.
- [4] 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):1483-1496.