

水・熱循環解析モデルへの暗渠排水サブモデルの導入

Introduction of Underdrainage Submodel into Water and Heat Flow Model

○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および温度環境を対象として、数理モデルを用いた研究を行ってきた。著者ら^[1](2009b)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。また、地表面における熱収支を考慮した鉛直二次元モデルを用いて水・熱連成解析を行い、対象地域における年間の地温変化を計算した(著者ら^[2], 2010)。

本報告では、これまで開発してきた水・熱循環モデルに、新たに暗渠排水サブモデルを組み込んだものについて説明する。本研究は山地・扇状地・低平地を含んだ複合的な地形の農村地域をその対象としており、モデルの適応領域は当該地域を代表する鉛直二次元領域とする。

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、浅水方程式に拡散波近似を施した次式を用いる^[3]。

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

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_t 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^{[4],[5]}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 地表における熱収支

地表水が存在しない場合、地表面が受け取る熱 Q_G は次式で表わされる。

$$Q_G = (1 - a)R^{\downarrow} + \sigma T_A^4 - \sigma T_G^4 - H_G - lE_G \quad (10)$$

ここで、 R^{\downarrow} は下向き太陽放射、 T_A と T_G はそれぞれ気温および地表面温度、 σ はStefan-Boltzmann定数、 H は潜熱フラックス、 l は水の蒸発潜熱、 E は蒸発散量、 a はアルベドである。地表水が存在する場合、地表水が受け取る熱 Q_O および地表面が受け取る熱 Q_G は次の2式で表わされる。

$$Q_O = (1 - a)R^{\downarrow} + \sigma T_A^4 - 2\sigma T_O^4 + \sigma T_G^4 - H_O - lE_O - f_G \quad (11)$$

$$Q_G = f_G + \sigma T_O^4 - \sigma T_G^4 \quad (12)$$

ここで、 T_O は地表水温であり、また f_G は地表水の地下への浸透に伴う熱の輸送量である。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計算される。以上の熱収支をまとめると図1のようになる。

*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, 水溫

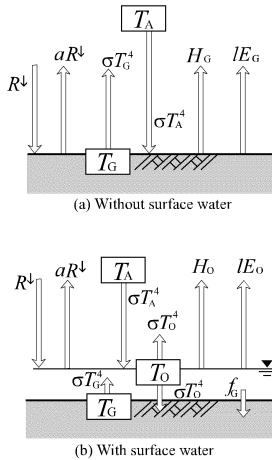


図 1: 地表面における熱収支概念図

Fig. 1: Energy budget on the ground surface

2.5 暗渠排水サブモデル

農地における暗渠排水サブモデルの概念図を図 2 に示す。ここで排水量は次式で表わされる。

$$q_d = \alpha_d K h_d \quad (13)$$

$$h_d = \max(0, h^G - z_d) \quad (14)$$

ここで、 q_d は暗渠により排水される単位幅流量、 z_d は暗渠の標高、また α_d はパラメータである。

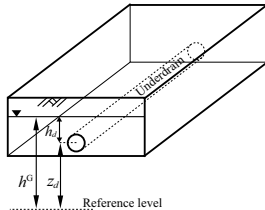


図 2: 暗渠排水サブモデル概念図

Fig. 2: Underdrainage submodel

3 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地域 (図 3) 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いる。

山地の分水嶺から低平地を流れる上郷川までの、図 3 中における A-A' 断面をモデルの適用領域とする。計算に用いるメッシュを図 4 に示す。なお、各要素の形状は図中では鉛直方向を 20 倍に強調して描いてある。

領域の底部は不透水・定温境界を設定する。山地では不透水層 (領域下端) までは浅く、扇状地から低平地にかけては地層の堆積を仮定し、徐々に領域を厚くする。領域左端は分水嶺でありゼロフラックスの境界とし、領域右端は河川であり地下水位については定圧、水温については定温境界とする。扇状地および低平地における地質構造は、著者ら [6] (2009a)

による既往の研究より粘土層と砂礫層の互層構造とする。

式 (13) によって表わされる q_d は、セル面積当たりの値として式 (6) の右辺より減ぜられる。暗渠排水が適用される範囲は、地表面標高 140m 以下の位置における、2 段目のセル (GL-80cm) である。

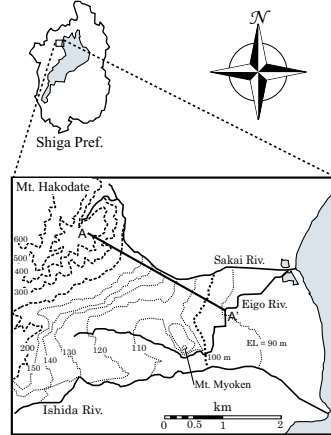


図 3: 対象地域

Fig. 3: Study area

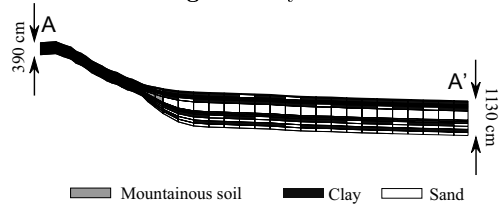


図 4: 計算メッシュ

Fig. 4: Computational mesh

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。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。また、暗渠排水サブモデルをこのモデルに導入する。暗渠排水量は地下水位と暗渠埋設標高との差によって計算され、地下水流モデルにおいて排水量がシンク項として扱われる。

参考文献

- [1] 武馬夏希・竹内潤一郎・河地利彦 (2009b); 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] 武馬夏希・竹内潤一郎・河地利彦 (2010); 第 67 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 1-05. [3] Giammarco, P. Di., Todini, E. and Lamberti P. (1996): *J. Hydrol.*, **175**:267-291. [4] Huyakorn, P.S. and Pinder, G.F. (1983) *Computational Method in Sub-surface Flow*, Academic Press:99-141. [5] Celia, M.A., Bouloutas, E.T. and Zarba, R.L. (1990): *Water Resour. Res.*, **26**(7):1483-1496. [6] 武馬夏希・竹内潤一郎・河地利彦 (2009a); 平成 21 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 講演番号 2-13,