多重成層土壌中における水と溶質の 2 次元連立移動の数値シミュレーション
Numerical Simulation for 2-Dimensional Coupled-Transfer of Water and Solute in Multi-Layered Soil

○ 菊池貴,* 登尾浩助,** 阿部芳彦*
○ Takashi Kikuchi,* Kosuke Noborio**, Yoshihiko Abe *

1． はじめに

近年、土壌物理に基づく土中の物質移動のモデル化が行われている。また、それに基づいたシミュレーション・コードも開発が行われており[1]、今後、 理論とシミュレーション、実測との突き合わせが必要になってくると考えられる。

本研究では最終的には 3 次元の水、溶質、熱の連立したシミュレーションの構築を目指す。しかし、これを一時に行うのは非常に困難であるため段階的に解決していく。そのため、実際の測定値と比較を行えるようなコードの開発を行い、段階ごとに評価をし、それに対して改良と拡張を施していく。

本研究では実測データとして盛岡市近郊の農場のデータを用いるため、農場の地形や地層も取り入れたコードを開発し、農場における水と溶質の移動の数値シミュレーションを行う。

これらの問題を解決していく上で、

- 2 次元の水と溶質の連立したモデル化
- 座標変換を用いた地形への適応
- 層と層の間の境界条件

これらの 3 つが必要になる。数値解法には座標変換を用いた上で差分法を用いる。

2． 2 次元の水と溶質の移動

水の移動と溶質の移動はお互いに密接に関連しているため、その相互に対する影響も取り入れたモデル化を行う必要がある。

2 次元の水移動の方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial\theta_L(x,z,t)}{\partial t}+\frac{\partial\theta_V(\theta_L)}{\partial t}=-\frac{\partial q_{w,x}(\theta_L,C)}{\partial x}-\frac{\partial q_{w,z}(\theta_L,C)}{\partial z}+Q_L(x,z)$$

Q_L は植生を考慮した根からの吸収を表す項である。ここで、水分フラックス q_w は溶質の濃度勾配による水の移動も考慮する。

2 次元の溶質移動の方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial(K_d\rho_b C)}{\partial t}+\frac{\partial C\theta_L}{\partial t}=-\frac{\partial q_{C,x}(\theta_L,C)}{\partial x}-\frac{\partial q_{C,z}(\theta_L,C)}{\partial z}+\lambda(\theta_L C+\rho_b K_d C)+Q_C(x,z)$$

Q_C は植生を考慮した根からの吸収項である。ここで、溶質フラックス q_C はマトリック・ポテンシャルによる溶質の移動も考慮する。

3． 座標変換による地形への適用

差分法を用いた解法を行う場合、対象を直交格子を用いて分割する必要がある。しかし、実際の解析対象は長方形である場合は稀である。そのため、座標変換を用いて物理面での

*岩手県立大学、**岩手大学、*Iwate Prefectural University, **Iwate University, 水分移動、溶質移動

格子点の座標を一般座標の格子点に写像させる。これにより、一般座標で計算を行い物理面における解を得ることが可能になる。座標変換を用いた地形への適用は地表面が隆起していたり、傾斜があったり、畝があるような土壌の場合においても有効である。これを用いることで、基本的にどのような形状の地形でも直交格子を用いた座標に変換が可能になる。

また､多重層の土壌を考えるとき次節で述べる層間の境界条件を考えなければならない。その際に層と層の境界が格子点上になければならないため、そのように調節する。

座標変換を行う際に物理面の座標は(x,z)面とし、一般座標は(ξ,ζ)面とする。また、x,zはそれぞれξ,ζの関数である。x,zに関する偏導関数はξ,ζに関する偏導関数に以下のように置き換えられる。

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\partial}{\partial x} \\ \dfrac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} = \frac{1}{J}\begin{pmatrix} -z_\zeta & z_\xi \\ x_\zeta & -x_\xi \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dfrac{\partial}{\partial \xi} \\ \dfrac{\partial}{\partial \zeta} \end{pmatrix}$$

$$J = x_\zeta z_\xi - x_\xi z_\zeta,\ x_\xi = \frac{\partial x}{\partial \xi},\quad x_\zeta = \frac{\partial x}{\partial \zeta},\quad z_\xi = \frac{\partial z}{\partial \xi},\quad z_\zeta = \frac{\partial z}{\partial \zeta}$$

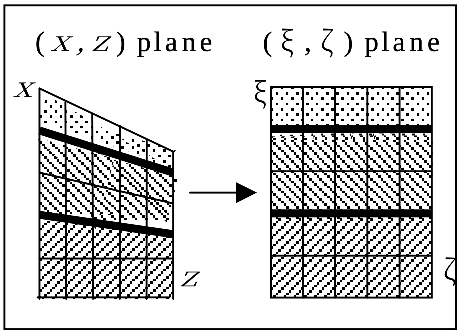

Fig.1.Change of variables

この座標変換を施した水移動の方程式と溶質移動の方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial t} + \frac{\partial \theta_V}{\partial t} = -\frac{1}{J}\left(z_\xi \frac{\partial q_{w,x}}{\partial \zeta} - z_\zeta \frac{\partial q_{w,x}}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{J}\left(x_\xi \frac{\partial q_{w,z}}{\partial \zeta} - x_\zeta \frac{\partial q_{w,z}}{\partial \xi} \right) + Q_L$$

$$\frac{\partial (K_d \rho_b C)}{\partial t} + \frac{\partial (C\theta_L)}{\partial t} = -\frac{1}{J}\left(z_\xi \frac{\partial q_{C,x}}{\partial \zeta} - z_\zeta \frac{\partial q_{C,x}}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{J}\left(x_\xi \frac{\partial q_{C,z}}{\partial \zeta} - x_\zeta \frac{\partial q_{C,z}}{\partial \xi} \right) + \lambda(\theta_L C + \rho_b K_d C) + Q_C$$

このように座標変換を施すことにより、いかなる形状のものも、(ξ,ζ)面で考えることができる。(ξ,ζ)面は直交格子を用いた座標であるため差分法が適用できる。

４． 多重層における層間の境界条件

$j = m$の点(z_m)が層と層の境界だとする。その際に境界を含む微小体積内の水と溶質の質量の保存を行う。また、層間の境界条件は

$$\psi_{(上)}(z = z_m) = \psi_{(下)}(z = z_m)$$

である。ここで添え字の(上)と(下)はそれぞれ上層と下層における物理量であることを示す。

これらから、水の質量を保存しかつ、上層と下層の境界においてマトリック・ポテンシャルが平衡するように定式化する。

５． 結果

結果に関しては紙面の都合上割愛し、発表の際に示す。

参 考 資 料　[1] Friedel, M.J. : Documentation and Verification of VST2D. Water-Resources Investigations Report 00-4105. U.S.Geological Survey(2001)