

II-466 不飽和土壌カラム内での温度勾配が非収着性物質の上方移動に及ぼす影響

京都大学 正員 堀田 尚哉
京都大学 正員 堀内 将人
京都大学 正員 井上 頼輝

1. はじめに

昭和50年に起きた東京都の六価クロム鉱滓事件以後、不飽和層における物質の上方移動に関する研究の必要性が高まり、このような現象に関わる種々の要因（粒径、毛管圧、蒸発、降雨、温度勾配、水分ヒステリシス、流路のヒステリシス、土壌と物質の反応のヒステリシス等）についてそれぞれに研究が進められ、物質の上方移動に関する知見が蓄積されてきた。しかし、上方移動のメカニズムや促進、抑制の効果が全て解明されたわけではない。本研究では物質の上方移動を加速する1つの要因として温度勾配に注目し、物質の上方移動の促進の様子を実験的に把握した。また、熱・水分同時移動方程式、物質移動方程式からなる数学モデルを構成し本実験系に適用してモデルの妥当性を評価した。ここでは、上に高く下に低い温度勾配が不飽和層中に形成される場合について報告する。

2. 実験方法

図1のような断熱を施したアクリル製カラムに、砂土（真密度 2.67g/cm^3 、有効径 0.51mm 、均等係数 2.0 ）を均一に充填する。カラム横の給水部より、塩素イオン原液（約、 3550mg/l ）を供給しカラム内に吸い上げさせ、設定水位を保ちつつ水分分布が定常に達するまで蒸発を抑えて放置する。蒸発開始と同時に赤外線ランプを点灯し、上に高く下に低い温度勾配を与える。ランプ高さを変え、異なった温度勾配を加えた実験及び等温条件下の蒸発実験を実施し比較対象とする。蒸発量は1日1回カラム全体の重量を測定し、重量差として求めた。同時に、設定水位になるように原液を給水する。蒸発量が約 10.0mm に達した時点でカラムを分解し、水分は炉乾法、塩素イオンは 0.01 規定の硝酸銀溶液で滴定し、水分分布と塩素イオン分布を測定する。

3. 実験結果

図2は、等温蒸発後の水分分布と塩素イオン量分布を示したもので、表面で水分が蒸発し表面にのみ物質の蓄積がみられる。図3は、温度勾配を弱く加えた場合の結果を示したもので、高さ 17cm 付近に飽和度 0.4 程度で高さ方向に水分変化の小さくなる部分ができ、その上層部の水分変化は大きい。蒸発率は等温の場合に比べ3倍程大きく、表面の塩素イオン量ピーク値も等温の場合に比べて大きくなり、物質の上方移動が促進されたと考えられる。図4は、温度勾配を強く加えた場合の結果を示したものでやはり、高さ 17cm 付近に飽和度 0.4 程度で高さ方向に水分変化の小さくなる部分が温度勾配が弱い場合よりも大きく現れ、その上層部の水分変化も更に大きくなる。表面に乾燥層が発達するため、蒸発率は温度勾配が弱い場合よりも小さく等温の場合よりもやや大きい程度である。塩素イオン量ピーク値を比べる限りでは、等温の場合と殆ど変わらないが蓄積部分は厚くなる。温度勾配により物質の上方移動は、ある程度促進されたと考えられる。

4. 数学モデル

不飽和層中の物質移動を予測する場合、物質の主たる輸送媒体が水であるため、液状水の流れ場を正確に把握する必要がある。本実験系は温度勾配下にあるため、Philip and de Vries の熱・水分同時移動理論を基礎理論¹として採用する。実験期間を通じて蒸発率は一定であり、水分分布、温度分布は共に鉛直一次元定常状態と仮定できるため、鉛直一次元定常状態の方程式を定式化する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{qh - \lambda K - C\ell(T - T_0)D_{tm} - \lambda q_m / \rho \ell}{\lambda D_{\theta\ell}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{qh - C\ell(T - T_0)q_m}{\lambda} \quad (2)$$

$$qv = -D_{tv} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

$$q_l = q_m - qv \quad (4)$$

$$qh = qhx - \int_0^z U(T - T_0) dz \quad (5)$$

$$L = L_0(C\ell - C_p)(T - T_0) \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_s - L_0 \rho \ell D_{tv} \quad (7)$$

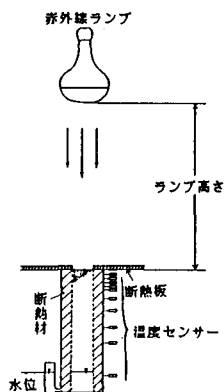


図1. 温度勾配条件下蒸発実験装置

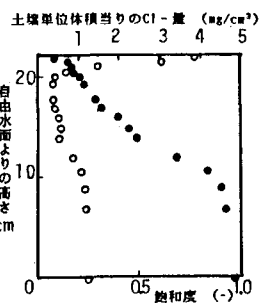


図2. 等温条件下蒸発実験の結果

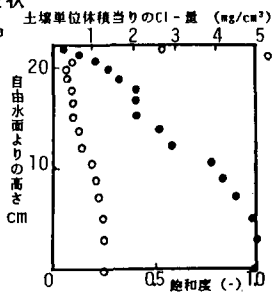


図3. 弱温度勾配条件下蒸発の結果

$$F = \frac{q_l}{\rho_l} C - D \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (8)$$

$$D = D_m \left| \frac{q_l}{\rho_l \partial l} \right| + D_d \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\partial l \partial} \{ F \} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\partial l \partial} \left\{ \frac{q_l}{\rho_l} C - \partial D \frac{\partial C}{\partial Z} \right\} \quad (11)$$

境界条件、初期条件

液状水フラックスの推定: $T=T_s, \theta = \theta_s$ at $Z=0$

物質分布の推定: $C=C_0$ at $t=0, 0 \leq Z \leq l; F=0$ $t>0$ at $Z=l; C=C_0$ $t>0$ at $Z=0$

$K, D, \theta, q_m, q_{hx}, \lambda^*$ には、実測値または実測値からの推定値を用いた。他のパラメータは文献値を用いた。まず、(1), (2)式により水分・温度分布を求め、同時に(3), (4)式により高さごとの液状水フラックスを計算した。

(8)式に代入して物質フラックスを求め、これと(10)式により物質分布を計算した。これらの計算にはSLCS-IVというシミュレーション言語を用いてプログラムし、数値計算を実施した。計算方法、手順は参考文献²に詳しい。

5. 実験結果と計算結果の比較

図5、図6は(1),(2)式を用いた温度分布、水分分布の計算結果を示しており、温度分布は実測値と良く一致している。水分分布のうち水分の蒸発、凝縮が繰り返される高さ17cm付近で特に実測値との適合性が悪いのは、モデルに水分ヒステリシスの効果が含まれていないためと考えらる。図7に塩素イオン量分布の計算結果を実線で示す。実測値と計算値は比較的良く一致する。図8は塩素イオン濃度分布の計算結果を実線で示したものであり、温度勾配下特有の間隙水中濃度ピーク下層に形成される濃度の減少(水蒸気の凝縮が原因と考えられる。)部分を計算結果は良く再現している。破線は等温状態($q_l = q_m$)を仮定して計算した結果であり、本研究で構成したモデル(温度勾配モデル)が有用なことがわかる。以上により、温度勾配モデル及びモデルの適用手順は妥当なものであると考えられる。

6. まとめ

上に高く下に低い温度勾配継続して加えることにより、塩素イオンの上方移動は促進された。温度勾配の影響を液状水フラックスに組み込んだ数学モデルにより、塩素イオン分布を予測したところ実測値と良い一致を示した。推定した液状水フラックスは実際の液状水フラックスを正しく評価していると考えられ、温度勾配下の表層付近では下方へ移動する水蒸気のみで上方移動する液状水が増加し、蒸発率よりも大きな液状水フラックスが生じていると考えられる。今後は、土壌との収脱着反応が存在する場合や、温度勾配が断続する場合について考察を深めたい。最後に、この研究を進めるにあたり多くの御助言を頂いた京都大学工学部衛生工学教室の森沢眞輔助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1、Philip J.R. and de Vries D.A.: "Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients" Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 38, pp222-232
- 2、畑田尚哉: "不飽和土壌カラム内での温度勾配が非収着性物質の鉛直上方移動に及ぼす影響", 京都大学修士学位論文, 1987

記号 T : 温度($^{\circ}\text{C}$) Z : 鉛直軸下方正(cm) θ : 体積含水率(-) C : 塩素イオン濃度(mg/ml)
 q_h : 熱フラックス($\text{cal/cm}^2/\text{s}$) q_v : 水蒸気フラックス($\text{g/cm}^2/\text{s}$)
 q_l : 液状水フラックス($\text{g/cm}^2/\text{s}$) q_m : トータル水分フラックス{蒸発率}($\text{g/cm}^2/\text{s}$)
 F : 物質フラックス($\text{mg/cm}^2/\text{s}$) D : 分散係数(cm^2/s) D_d : 分子拡散係数(cm^2/s)
 D_m : 分散能(cm) D_t : 温度勾配水分分散係数($\text{cm}^2/\text{s}/^{\circ}\text{C}$) l : 蒸発面までの高さ(cm)
 D_{tv} : 温度勾配水蒸気分散係数($\text{cm}^2/\text{s}/^{\circ}\text{C}$) D_{θ} : 水分分散係数(cm^2/s)
 λ^* : 熱伝導率($\text{cal/cm/s}/^{\circ}\text{C}$) C_l : 液状水比熱($\text{cal/g}/^{\circ}\text{C}$) C_p : 水蒸気比熱($\text{cal/g}/^{\circ}\text{C}$)
 ρ_l : 液状水密度(g/cm^3) T_0 : 基準温度($^{\circ}\text{C}$) L_0 : 蒸発潜熱(cal/g) K : 透水係数(cm/s)
 U : 熱移動係数($\text{cal/cm}^3/\text{s}/^{\circ}\text{C}$) C_0 : 設定水位下の平均塩素イオン濃度(mg/ml)
 T_s, θ_s, q_{hx} : 設定水位の温度($^{\circ}\text{C}$)、含水率(-)、熱フラックス($\text{cal/cm}^2/\text{s}$)
 $\bigcirc$: 塩素イオン $\bullet$: 水分 $\bigcirc$: 温度 ———: 温度勾配モデル - - - - -: 等温モデル

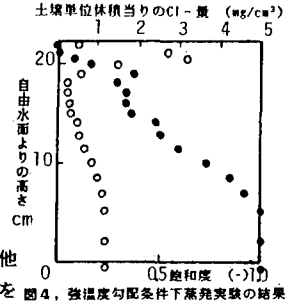


図4、強温度勾配条件下蒸発実験の結果

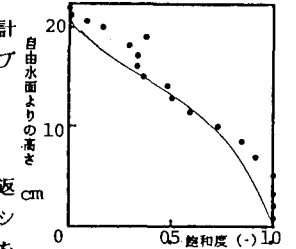


図5、強温度勾配条件下蒸発実験の水分実測値と予測値

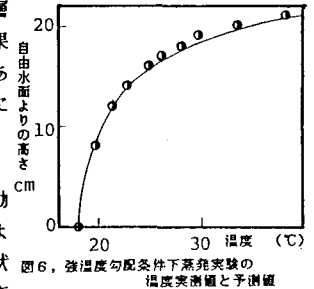


図6、強温度勾配条件下蒸発実験の温度実測値と予測値

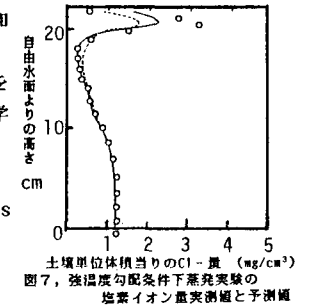


図7、強温度勾配条件下蒸発実験の塩素イオン量実測値と予測値

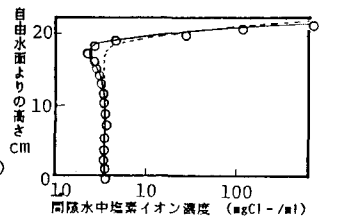


図8、強温度勾配条件下蒸発実験の塩素イオン濃度実測値と予測値