

乾燥地土壌中の塩移動モデル化に関する研究

山口大学大学院 学生会員 Aierken Younusi 山口大学大学院 学生会員 門藤真弘  
 山口大学大学院 正会員 関根雅彦 山口大学大学院 正会員 浮田正夫  
 山口大学大学院 正会員 今井剛 山口大学大学院 正会員 樋口隆哉

●はじめに

新疆ウイグル自治区のタリム川沖積平原は中国における乾燥地帯で塩害が深刻であり、これらの土壌の表層部には塩化ナトリウムを主要成分とした塩類の塩集積層で覆われ、無植生の平坦地である。このような地域では年降水量が 50～200mm で、内陸性気候のため地表面温度が高く、気温の年較差も 35℃以上と非常に大きい。又乾燥した条件下で土壌中の保留水分が少ないため、相対湿度或いは蒸発散量が非常に低い。塩害は気候条件と土壌の不飽和特性、地下水位、塩類移流・分散が複雑に絡み合っていることは知られているものの、乾燥地土壌での水分・熱および塩移動には不明点が残っており、この解明が望まれる。本研究は乾燥地における塩害を防止するための基礎的知見を得るために、乾燥条件下で塩分を含んだ地下水から蒸発及び降雨に伴う水・熱・塩移動によって表層部に起こる塩の集積過程を実験的に調べる。また液状水・水蒸気・熱・溶質移動モデルを提案し、実験結果との比較からその妥当性を検討する。

●蒸発及び散水に伴う塩移動に関する室内実験

実験装置はエアポンプ、乾燥タンク、ガラス製供試体カラム、マリオットタンクからなり、その組み立て配置図は Fig1 に示した。実験室内の温度を 25℃、相対湿度を 30%とし、C<sub>2-4</sub>, C<sub>0.5-5.5</sub>, C<sub>5.5-0.5</sub>, C<sub>2-4-3.5</sub>, C<sub>2-4-7</sub>, C<sub>2-4-14</sub>, C<sub>2-4-7(r)</sub>, C<sub>2-4-7(m)</sub>, C<sub>2-4-7(0)</sub>, C<sub>2-4-7(6)</sub>, C<sub>2-4-7(12)</sub>, C<sub>2-4-7(24)</sub>, C<sub>2-4-7(48)</sub>, C<sub>2-4-7(72)</sub> 及び C<sub>2-4-7(90)</sub> 計 15 本の供試体ガラスカラムを用いて実験を行った。供試体カラムは内径 5cm、高さ 6cm である。上記記号 C<sub>2-4-7(6)</sub> の C はカラムで、飽和層厚が 2cm、不飽和層厚が 4cm、降雨を模した散水量が 7cm<sup>3</sup>、またサンプリング時間が実験開始後 6hr であることを示して

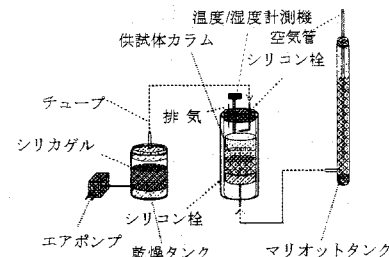


Fig1 カラム組み立て配

Table1 実験条件 C: glass beads column

| item                      | unit              | 乾燥定常条件                                                         | 散水量の異なる条件                                                       | 散水強度の異なる条件                                    | 散水後の経時変化                                    |
|---------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                           |                   | C <sub>2-4</sub> , C <sub>0.5-5.5</sub> , C <sub>5.5-0.5</sub> | C <sub>2-4-3.5</sub> , C <sub>2-4-7</sub> , C <sub>2-4-14</sub> | C <sub>2-4-7(r)</sub> , C <sub>2-4-7(m)</sub> | C <sub>2-4-7(0)~C<sub>2-4-7(90)</sub></sub> |
| duration or sampling time | hr                | 60                                                             | 72                                                              | 72                                            | 0,6,12,24,48,72,90                          |
| groundwater level         | cm                | 4,5,5,0,5                                                      | 4                                                               | 4                                             | 4                                           |
| porosity                  | %                 | 38.5                                                           | 38.5                                                            | 38.5                                          | 38.5                                        |
| glass beads size          | mm                | 1                                                              | 1                                                               | 1                                             | 1                                           |
| dry bulk density          | g/cm <sup>3</sup> | 1.54                                                           | 1.54                                                            | 1.54                                          | 1.54                                        |
| air temperature           | ℃                 | 25                                                             | 25                                                              | 25                                            | 25                                          |
| relation humidity         | %                 | 30                                                             | 30                                                              | 30                                            | 30                                          |
| groundwater concentration | ppm               | 5000                                                           | 5000                                                            | 5000                                          | 5000                                        |
| watering quantity         | cm <sup>3</sup>   |                                                                | 3.5,7,0,14                                                      | 7                                             | 7                                           |
| watering period           | min               |                                                                | 1,2,4                                                           | 2,3                                           | 2                                           |

一定水位を保つよう給水する。上部にはエアポンプから出される空気がシリカゲルを介して乾燥されながら送気される。実験条件は Table1 に示す。Fig1 に示すように、供試体カラムに供試ガラスビーズを充填密度になるように均一に詰め、またマリオットタンクと供試体カラムの接続用コックの開閉によって給水を制御する。マリオットタンクは、視認できるようにあらかじめ食紅（赤色）で着色した濃度 5000ppm の NaCl 溶液を満たしてから上部栓で密閉する。供試体カラムに給水を開始して 24 時間後の時点を実験開始とする。所定サンプリング時間の時、マリオットタンクと供試体カラムの接続をコックによって絶ち、押し上げ棒で供試体カラム下部栓を押し上げ、供試体をカラム上部から 0.5cm 区間ごとに分取し、取り出した供試体を炉乾燥法により体積含水率を求め、1:5 希釈法により電気伝導度 EC を測定し、カラム深さ毎の各区間に含まれる塩分を測定した。

## ●モデル

本研究に用いたモデルは、多孔媒体中の液状水、水蒸気、熱、蒸発及び溶質移動の流れを予測する理論を改良したものである。基礎式はTable2に示した。解析の初期・境界条件は、上述の実験条件に合わせ、時間ステップ0.01sec、要素長さ0.1cmで、ルンゲクッタ法にて計算した。

## ●実験結果及び考察

Fig2は不飽和層の初期含水率が絶乾、含塩量がゼロの条件、一定の地下水位、60hrs 保った後の単位体積当りの塩分量分布を示す。不飽和層厚 0.5cm の場合、蒸発に伴い地表付近の含塩量が上昇したことがわかる。不飽和層厚 4cm と 5.5cm では地表含塩量が殆ど見られない。Fig3は乾燥—散水—乾燥の操作に伴う蒸発による三日後の下層からの塩上昇変化を示す。一定散水強度で、散水量が少ない(3.5cm<sup>3</sup>:乾燥層間隙の 1/8 量)時塩集積が見られず、中量(7cm<sup>3</sup>:乾燥層間隙の 1/4 量)散水では地表塩集積が顕著に現れた。また散水量多い(14cm<sup>3</sup>:乾燥層間隙の 1/2 量)場合、中量散水量よりも散水後の塩の集積が少ない。Fig4は散水強度が異なる場合の三日後の含塩量分布である。散水強度が大きい方の塩集積が進行する傾向が明瞭である。Fig5は含塩量鉛直分布の散水後の経時変化を示す。散水 12 時間後から実測値と計算値とも、その表層の含塩量は著しく増大することがわかった。

## ●まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。①乾燥蒸発に伴う表層での塩の集積は、地下水からの毛管上昇の影響が大きいと考えられる。地下水面が浅いほど塩分集積しやすい傾向が見られる。②飽和浸透係数の約 2.4%程度の弱い散水強度とその後の蒸発に伴う表層の塩類集積は、散水量が少ないと見られず、中散水量のとき顕著に現れるが、散水量が増えると遅くなる傾向がある。③散水強度により表層での塩類集積は、強度の大きいほうの進行が早くなる。④中量散水より 12 時間後顕著に表面塩集積が見られ、その後の 24 時間、48 時間、72 時間及び 90 時間の時点では次第に増大した。⑤本研究で提案したモデルによる含塩量の計算結果は、いずれも概ね実験結果を再現しており、予測がある程度可能となった。引き続き、高温乾燥条件、細粒化土壌及び温度差による蒸発凝縮の影響の定量的評価、また室内実験結果をフィールドに応用することが今後の課題である。乾燥タリム川沖積平原のような乾燥地帯とその周辺での水塩収支の実態を解明するには、個々の場の特性を踏まえた研究が不可欠である。

Table2 basic equation of salt

|                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Darcy flux ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \text{ or } \text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ):                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| liquid phase                                                                                                                                                                                                                                                  | $q_w = -\rho_w K \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_w K$                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| vapor phase                                                                                                                                                                                                                                                   | $q_v = -D_v \frac{\partial}{\partial z} \left[ \epsilon - \theta \left( \tau_1 \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_{\text{sat}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} + \tau_2 \frac{\rho_{\text{sat}}}{\rho_w T} \frac{\partial p}{\partial z} - \tau_3 \rho_{\text{sat}} \nu \frac{\partial C_s}{\partial z} \right) \right]$ |
| heat phase                                                                                                                                                                                                                                                    | $q_h = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} + c_w (T - T_0) q_w + c_v (T - T_0) q_v$                                                                                                                                                                                                                                              |
| solute phase                                                                                                                                                                                                                                                  | $q_s = -\theta D_s \frac{\partial C_s}{\partial z} + q_w C_s$                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| conservation equation:                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| liquid                                                                                                                                                                                                                                                        | $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w} \left( -\frac{\partial q_w}{\partial z} - E_v \right)$                                                                                                                                                                                                                         |
| vapor                                                                                                                                                                                                                                                         | $\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon - \theta} \left( -\frac{\partial q_v}{\partial z} + E_v \right)$                                                                                                                                                                                                              |
| heat energy                                                                                                                                                                                                                                                   | $\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{C} \left( \frac{\partial q_h}{\partial z} + Q_{\text{net}} + LE_v \right)$                                                                                                                                                                                                                 |
| solute phase                                                                                                                                                                                                                                                  | $\frac{\partial C_s}{\partial t} = \alpha (C_{s, \text{max}} - C_s) - \frac{1}{\theta} \frac{\partial q_s}{\partial z}$                                                                                                                                                                                                               |
| water characteristic curve:                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $\theta = \begin{cases} 0.001 + \frac{0.384}{\{1 + (-0.262 P)^{0.5}\}^{3.5}} & P < 0 \\ 0.385 & P \geq 0 \end{cases}$ $k = \begin{cases} 0.125 \left[ \frac{1 - (-0.262 P)^{0.5}}{1 + (-0.262 P)^{0.5}} \right]^{10} & P < 0 \\ 0.125 & P \geq 0 \end{cases}$ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| nomenclature:                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $k$ :                                                                                                                                                                                                                                                         | permeability of liquid ( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $p$ :                                                                                                                                                                                                                                                         | Matric potential (cm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $\rho_w$ :                                                                                                                                                                                                                                                    | liquid density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $z$ :                                                                                                                                                                                                                                                         | vertical space coordinate (cm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| $t$ :                                                                                                                                                                                                                                                         | time (sec)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| $D_v$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | Diff. of vapor in air ( $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| $\rho_{\text{sat}}$ :                                                                                                                                                                                                                                         | saturated vapor density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $h_v$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | relative humidity (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $T$ :                                                                                                                                                                                                                                                         | absolute temperature (K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $\nu$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | osmotic pressure coefficient (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ :                                                                                                                                                                                                                                    | bending rate (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $\gamma$ :                                                                                                                                                                                                                                                    | mass flow factor (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $\epsilon - \theta$ :                                                                                                                                                                                                                                         | vapor phase rate (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $\epsilon$ :                                                                                                                                                                                                                                                  | porosity (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $\theta$ :                                                                                                                                                                                                                                                    | volumetric water content ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $C_s$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | solute concentration ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $\lambda_s$ :                                                                                                                                                                                                                                                 | apparent thermal conductivity of soil ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                         |
| $c_w$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | specific heat of soil water ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $c_v$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | specific heat of soil vapor (air) ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                              |
| $T_0$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | standard temperature (K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $D_s$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | dispersion coefficient of solute in soil ( $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $E_v$ :                                                                                                                                                                                                                                                       | amount of inside evaporation in soil ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                        |
| $\rho_v$ :                                                                                                                                                                                                                                                    | water vapor density in soil ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $C$ :                                                                                                                                                                                                                                                         | heat capacity of soil ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )                                                                                                                                                                                                                                                         |
| $Q_{\text{net}}$ :                                                                                                                                                                                                                                            | sensible heat flux ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $LE_v$ :                                                                                                                                                                                                                                                      | latent heat flux in soil ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $\alpha$ :                                                                                                                                                                                                                                                    | condition factor (-)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $C_{s, \text{max}}$ :                                                                                                                                                                                                                                         | saturated solution concentration ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                                                                                                                                                                                                                                                  |

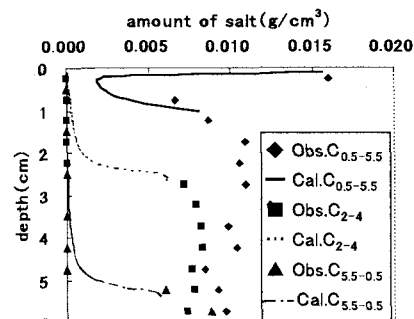


Fig2 乾燥定常条件の含塩量分布

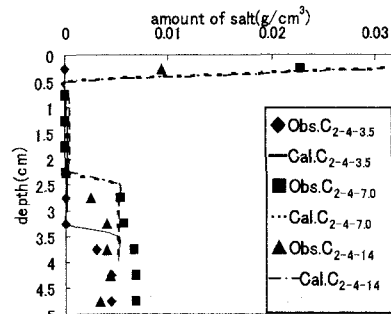


Fig3 散水量の異なる条件下での含塩量分布

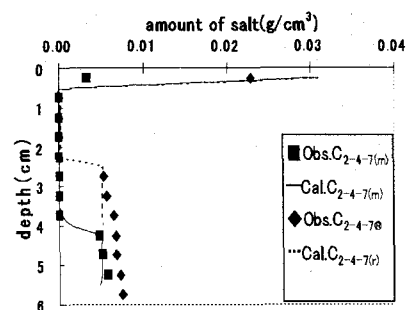


Fig4 散水強度の異なる条件下での含塩量分布

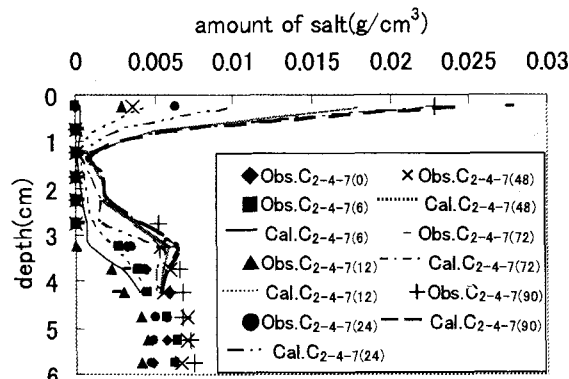


Fig5 散水後含塩量の経時変化