

蒸発量を考慮した灌漑水路周辺における塩分輸送解析

Model study on the transport and accumulation of salt near an irrigation canal

* ** *** **** *****

河野隆漠・細川土佐男・神野健二・R.T.RAJU・和田信一郎

By Takahiro KOUNO, Tosao HOSOAKAWA, Kenji JINNO,

R.T.RAJU and Sinichiro WADA

Water development projects induce changes in the water regime of the adjacent area, in particular, the water table in the vicinity of the project. This in its turn, induces changes in soil water regime and also influences the soil salinization. An experiment depicting an unsaturated zone adjacent to an irrigation canal of known water quality have been performed. A 2-dimensional numerical model based on FDM and with MOC for the solute distribution has been developed for simulation of the said process. The results are compared with the observations from the experiment.

Keywords: soil evaporation, irrigation canal, solute transport

1. はじめに

蒸発量が降水量よりも大きい乾燥あるいは半乾燥地域では、土壌の塩類集積が問題になっている¹⁾。原因の一つとして灌漑水路からの漏水によって周辺地下水位が上昇し、地下水中の塩類が地表面に移動して集積するため、農地が不毛化することが報告されている²⁾。これは地下水位と塩分濃度が適切に制御されていないためである。今日の塩類集積に関する研究は、集積を緩和させる様々な技術の開発や集積した塩類の除去方法の主眼がおかれている。一方、土壌中の塩類の輸送特性を明らかにするためには、蒸発が非常に重要な要因になることから、浅層地下水の蒸発メカニズムの解明を目指す研究も行われている。福原³⁾らは、浅層地下水を有する砂地盤からの蒸発モデルを構築し計算を行っている。湿潤地域を考えた場合でも、地下水位の高い場所で周囲から塩分濃度の高い水が侵入するような箇所では常に起こり得る問題といえる。細川⁴⁾は干潮河川からの塩水侵入について数値解析を行っている。また、離島の海岸近くに地下ダムを建設した場合においても、海からの塩水侵入に伴い、長期的には土壌の塩性化の発生が考えられる。そこで本稿では、塩分を含む河川もしくは灌漑水路からの塩水の侵入について室内実験と数値解析を行い、水路からの塩水侵入

*学生員 九州大学大学院工学研究科修士課程学生 ***正会員 九州大学工学部建設都市工学科教授

(〒812福岡市東区箱崎6-10-1)

****学生員 九州大学大学院工学研究科博士後期課程学生

正会員 九州産業大学工学部土木工学科助教授 **九州大学農学部農芸化学科助教授

(〒813福岡市東区松香台2-3-1)

現象を表すモデルの妥当性について検討を行った。

2. 実験の概要

2. 1 実験装置

実験装置の概略図を図-1に示している。左端の灌漑水路は地表から-20cmの所に河床を配置し、水深を5cmに保っている。一方、右端の排水路部分の水位は地表から-40cmの所に保ち、地下水が灌漑水路から排水路方向に流れるようにしている。実験で用いた土壌は、福岡県二日市の農場から採取した土壌を天日乾燥させた後、2mmメッシュのふるいを透過したものをしようしている。土壌を充填する部分は5列に分け、実験開始からの日時を変えて塩分濃度を測定できるようにした。土壌充填部分には鉛直方向の塩分濃度を測定するためステンレス製のカラムを埋め込んだ。その際、カラムの側面には無数の穴を空け、金網を張り付けてカラム自身が水の流れに影響を与えないようにした。カラムは水槽の右端から5cm離して1本目を配置し、残りのカラムを10cm間隔に1列につき7本立て、合計35本を据え付けた。

2. 2 実験方法

実験は、まず地下水の流れを定常状態にするために、10日間イオン交換水を流し続けた。排水口から出てくる水量がほぼ一定になったのを確認した後、イオン交換水を濃度170meq/lのNaCl溶液に切り替え、この時点を実験開始時間とした。NaCl溶液に切り替えた後、1、3、6、10、15日目にそれぞれの列から7本ずつ円筒カラムを抜き取っていき、各カラムをそれぞれ長さ5cmのセグメントに分け、セグメントごとに体積含水率および液相中の K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ の各イオン濃度を原子吸光法で測定した。

また、地下水から地表面までの距離の違いによる蒸発量の差異を調べるために蒸発量測定用の装置を別途用意した。装置は直径6.6cmの塩化ビニル製のカラムを6本用い、設定地下水面から地表面までの距離がそれぞれ5.0、10.0、20.0、30.0、40.0、50.0、60.0cmになるようにして、実験期間中、重量変化を電子天秤で測定した。

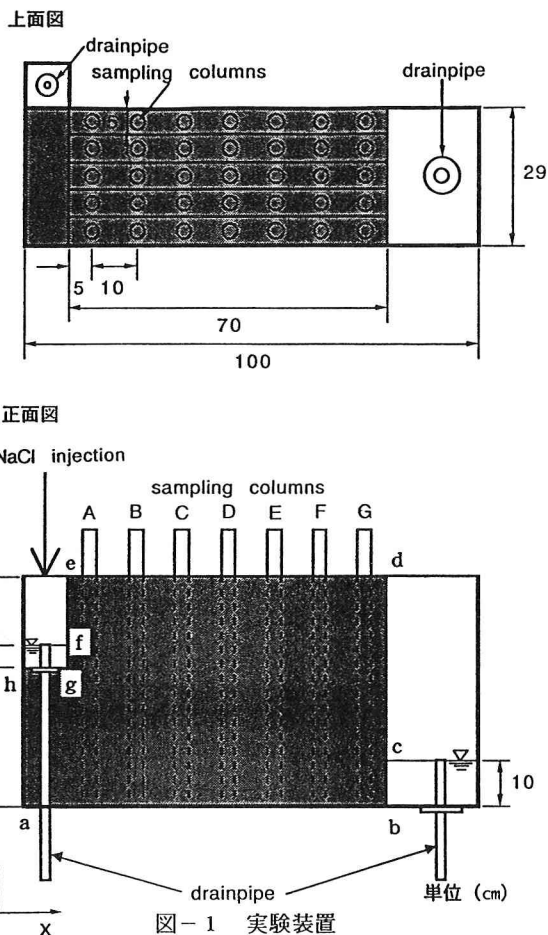


図-1 実験装置

3. 数値解析

3. 1 2次元飽和-不飽和浸透流および物質輸送に関する基礎式

2次元飽和-不飽和浸透領域における圧力水頭に関する基礎式は水平方向にx軸、鉛直方向にy軸を取ると次式で示される。

$$(C_w + \alpha_0 S) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k \left(\frac{\partial h}{\partial y} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここに t : 時間、 h : 圧力水頭、 k : 不飽和透水係数 (これは飽和透水係数に水分量で決まる不飽和透水係数比 k_r を乗じて得られる)、 C_w : 比水分容量、 S : 比貯留係数、 α_0 : ダミー変数 (飽和 ; 1、不飽和 ; 0) である。ここで、体積含水率 θ 、相対透水係数比 k_r 、比水分容量 C_w は Van Genuchten が提案した理

論式から求める⁵⁾。

一方、塩素イオン濃度に関する基礎式には、次式に示す2次元移流分散方程式を用いる。

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + \frac{\partial(v_x \theta C)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \theta C)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ここに、Cは単位体積中の土中水中の塩素イオン濃度を表す。また、 v_x 、 v_y はx方向およびy方向の実質流速で、ダルシー流速 u_x 、 u_y との間には $v_x = u_x / \theta$ 、 $v_y = u_y / \theta$ の関係がある。上式の体積含水率と分散係数の積 θD_{xx} 、 θD_{xy} 、 θD_{yx} 、 θD_{yy} は、HuyakornとPinderによれば帯水層の分散についての等方性を仮定し、流速依存型と分散係数の和で示される⁶⁾。

3. 2 計算条件と境界条件

表-1は解析に用いた計算条件を示している。計算方法は圧力水頭に関する基礎式には陰形式の差分法であるガウス・ザイデル法を用いた。また、時間ステップでの反復計算は、SOR法(加速緩和法)により行い、反復計算は1ステップ前の圧力水頭との差の絶対値が収束判定基準よりも小さくなるまで繰り返した。一方、塩分濃度に関する基礎式には粒子移動法(特性曲線法)を用いた。土壌の飽和透水係数には室内飽和透水試験により、また土壌水分特性は土注法により求めた。図-2に土壌水分特性の実測値とVan Genuchtenの理論式から求めた計算値を示している。表-2に圧力水頭および塩分濃度に関する境界条件を示している。ここに J_x 、 J_y はx、y方向の塩分輸送フラックスであり、表中のa~hは図-1中のa~hに対応している。

表-1 土壌特性値と計算条件

x方向の差分格子間隔 Δx (cm)	0.5
y方向の差分格子間隔 Δy (cm)	0.5
SOR法の緩和係数 ω	1.1
SOR法の収束判定基準 ε	1.0×10^{-5}
飽和透水係数 k_{sat} (cm/s)	1.0×10^{-3}
分子拡散係数 D_m (cm ² /s)	1.0×10^{-5}
飽和体積含水率 θ_s	0.52
残留体積含水率 θ_r	0.02
Van Genuchtenの n^* パラメータ α	0.036
Van Genuchtenの n^* パラメータ m	0.657
Van Genuchtenの n^* パラメータ n	2.915

4. 結果と考察

4. 1 蒸発量について

図-3に前述の塩化ビニルのカラムを用いて測定した蒸発量の結果を示している。この図から、地下水面と地表面との距離が近いほど蒸発量が大きくなっていることが分かる。このような蒸発量の違いは土壌中の水分量の違いによって生じていると考えられる。そこで

実測蒸発量と地下水面までの距離を与えて、1次元不飽和浸透流の数値計算を実行し、地表面(0~1cm区間)の土壌水分率を求め、実測蒸発量との関係をプロットした。図-4に結果を示す。なお、蒸発量については最大蒸発量で除すことで、また、体積含水率については残留体積含水率を差し引いたものを有効空隙率で除して無次元化している。蒸発量と体積含水率との関係については、多くの論文で様々なモデル化が試みられているが、本実験ではほぼ2次曲線で近似できた。

4. 2 水分分布

2次元浸透層の表面での水分量の違いによる浸透層内の水分分布への影響を調べるため、蒸発フラックスを与える境界に蒸発速度の平均値(5.2×10^{-7} cm/sec)を与える場合と、蒸発量を場所によって変化させる場合について計算を行った。後者の場合、繰り返し数値計算による地表面での水分率に対応する蒸発量を図-4から与えている。計算結果をそれぞれ図-5と図-6に示す。両図の矢印は境界条件として与える蒸発強度を表している。飽和帯およびその近傍の高い体積含水率をもつ不飽和帯では両者の相違は見られないもの

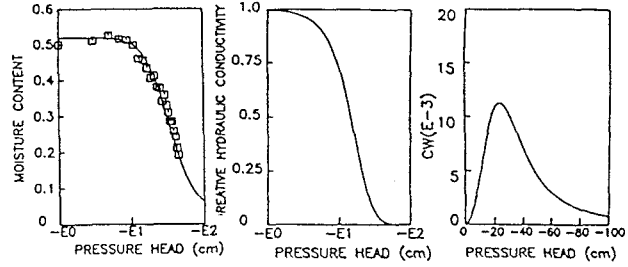


図-2 不飽和特性曲線

表-2 境界条件

境界	圧力水頭	塩分濃度
ab	不透水性境界 $-k\left(\frac{\partial h}{\partial y}+1\right)=0$	不透水性境界 $\frac{\partial C}{\partial y}=0$
bc	静水圧境界 $h_b=h_l-y$	$\frac{\partial C}{\partial x}=0$
cd	蒸発フラックス $E_{VAP}=-k\frac{\partial h}{\partial x}$	濃度フラックス $J_A=0$
de	蒸発フラックス $E_{VAP}=-k\left(\frac{\partial h}{\partial y}+1\right)$	濃度フラックス $J_y=0$
ef	蒸発フラックス $E_{VAP}=-k\frac{\partial h}{\partial x}$	濃度フラックス $J_A=0$
fg	静水圧境界 $h_b=h_l-y$	$u \geq 0 \quad C=100\%$ $u < 0 \quad \frac{\partial C}{\partial x}=0$
gh	静水圧境界 $h_b=h_l-y$	$v < 0 \quad C=100\%$ $v \geq 0 \quad \frac{\partial C}{\partial y}=0$
ha	静水圧境界 $h_b=h_l-y$	不透水性境界 $\frac{\partial C}{\partial x}=0$

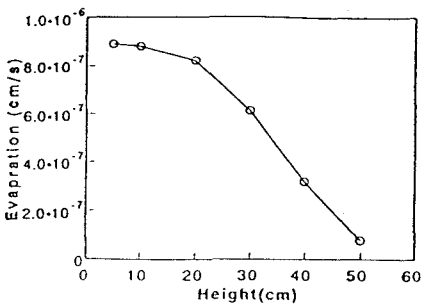


図-3 地下水面からの距離と蒸発量の関係

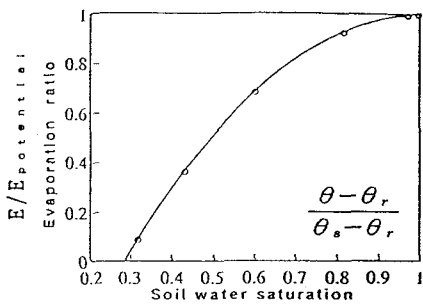


図-4 表面水分量と蒸発量の関係

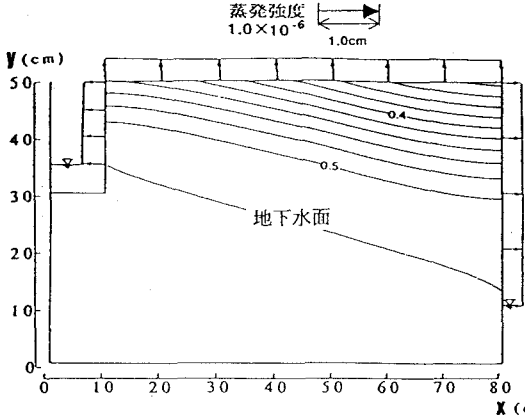


図-5 蒸発量一定の場合 (15日後)

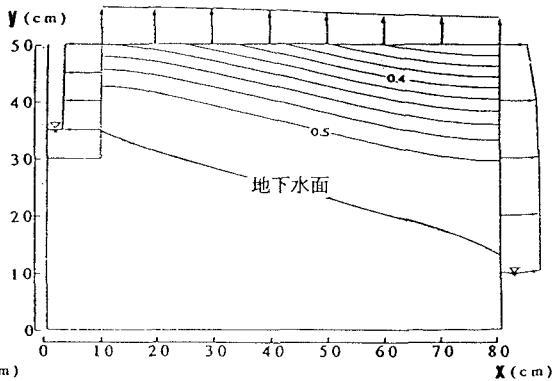


図-6 場所によって変化させた場合 (15日後)

の、水路から70~80cm離れた地表面付近においては、水分率に多少違いが認められる。図-7にはNaCl溶液を流してから15日後の水分分布を示している。数値計算と同様に水路から離れるにつれて水分量が減少する分布が観測されたが、一定蒸発量を与えた場合と場所によって蒸発量を変化させた場合とで、どちらが実測値を再現しているかは明確ではないが、本手法によって土壌水分率に応じた蒸発量を与えるアルゴリズムは妥当であると考えられる。

4.3 塩素イオン濃度の数値計算

測定した陽イオンの合計の当量濃度を塩素イオン濃度に等しいとして塩素イオン濃度を算定した。数値計

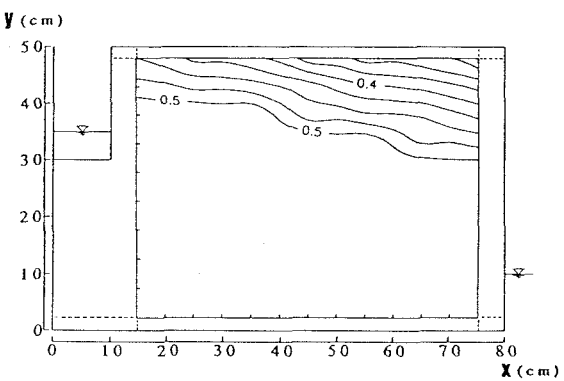
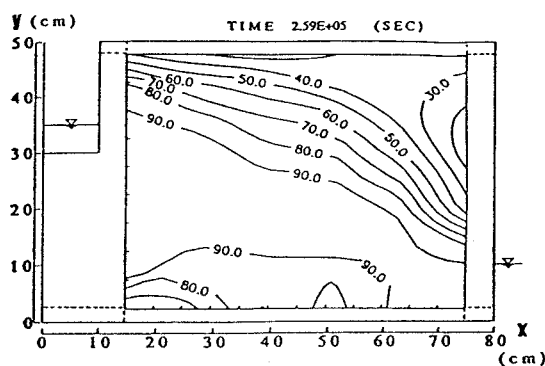
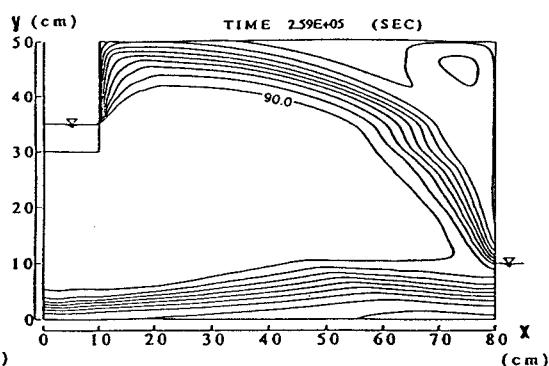


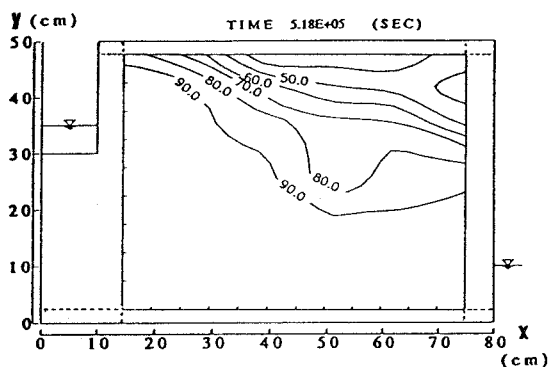
図-7 実測水分量 (15日後)



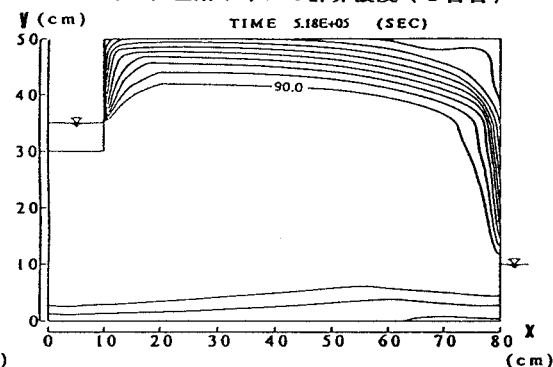
(a) 塩素イオンの実測濃度 (3日目)



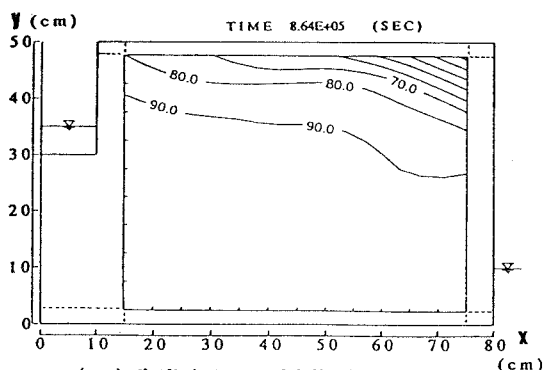
(a) 塩素イオンの計算濃度 (3日目)



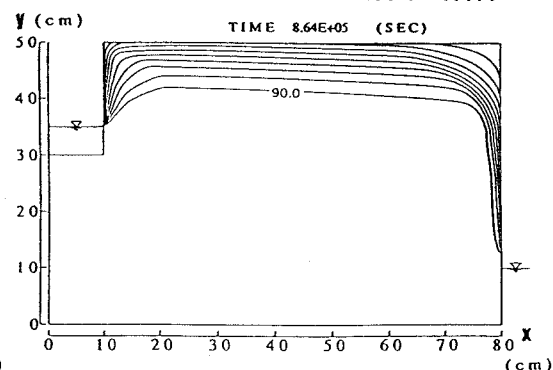
(b) 塩素イオンの実測濃度 (6日目)



(b) 塩素イオンの計算濃度 (6日目)



(c) 塩素イオンの実測濃度 (10日目)



(c) 塩素イオンの計算濃度 (10日目)

図-8 塩素イオンの実測濃度の経時変化

図-9 塩素イオンの計算濃度の経時変化

算においては、蒸発強度を与える境界条件には場所によって変化させて計算を実行した。実測の塩素イオン濃度および数値計算による塩素イオン濃度の分布の経時変化をそれぞれ図-8(a)~(c)および図-9(a)~(c)に示す。両図の等高線値は水路に投入した塩素イオン濃度(170meq/l)で除し、%表示で10~90%まで10%刻みで示している。実験では排水路上縁部には他の地点に比べ塩類がイオン交換水による洗脱を受けずに残っていた。

数値計算でもこの初期状態を与えた。両図に示す通り、水路周辺からの塩素イオンの高濃度領域が時間の経過と共に次第に右側の排水路部分に向かって拡大していく。また定常状態で既に形成された地下水面から、毛細管現象によって地下水中の塩素イオンが上昇移動する。しかしながら、地表面での蒸発強度が小さいためか、15日後経過後でも地表面での塩素イオンの集積は見られない。試料の粒径分布から求めた縦方向分散定数の値は小さかったためか、分散の幅が狭い。地下水面付近の流速が縦、横方向の分散定数については検討が必要であるが、計算結果は実測濃度分布を定性的には再現している。

5. 結び

本論では地表面上での水分分布を考慮した毛管水の移動モデルについて検討した。今回の実験では場所によって蒸発強度が大きく異なるような状況ではなかったが、蒸発量の分布が顕著な場合には、蒸発量を一定とした取り扱いでは、塩類の集積が表現できないものと考えられる。

塩素イオンの輸送に関しては、時間の経過と共に地表面への塩分の輸送が見られ、実測と同じ傾向を示した。特に地下水面と地表面との距離が大きくなる実験装置上縁での塩素イオン濃度が、水路近傍のそれとは異なっており、計算結果で得られた傾向は実験と一致している。以上得られた結果を要約すると、

- 1) 図-4のように蒸発強度と地表面付近の水分量の関係から、蒸発量の分布をモデル中の組み込むことができる。
- 2) 実際の問題への適用の可能性が確かめられた。

今後は陽イオン交換反応を考慮した数値計算および現地のデータを用いて解析を行い、更に研究を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究を進めるにあたり、九州産業大学細川研究室の皆様には、御協力を賜りました。厚く御礼を申し上げます。また九州大学農学部池田元輝先生には実験を行うにあたって試料を提供くださりました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 松本聰：土壌の塩集積と砂漠化、土と基礎、第42巻、第1号、pp. 19-24、1994
- 2) 荻野芳彦・村島和男：インダス川流域の塩類化による砂漠化と防止技術、農業土木学会誌、第61号、pp. 1007-1008、1992
- 3) 福原輝幸・佐藤邦明・馬場富夫：砂層カラム内の水蒸気移動と蒸発メカニズム、水工学論文集、第136集、pp. 453-458、1992
- 4) 細川土佐男：地下密度流の流動および分散現象の解析と淡水の有効取水に関する基礎的研究、九州大学学位論文、1992
- 5) Van Genuchten, M.T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci.Soc.Am.J., Vol. 44, pp. 892-898、1980
- 6) Huyakorn, P.S.and G.F.Pinder: Computational method in subsurface flow, Academic Press, pp. 186-187、1983