

9002 塩性土壌地帯の農業利用のための改良方法の開発に関する基礎的研究

中野 政詩(東京大学)

世界の乾燥地や半乾燥地に広く分布する塩性土壌地帯を農地や緑地として利用することは、食糧生産の遍在を解消するために、また地球環境の保全のためにも国際的に重要な課題であり、そのための土壌改良や灌漑排水施設、水の管理などの技術の確立が求められている。灌漑の可能な塩性土壌の農地では、地上部の塩分を過剰の灌漑水で洗い流して根群域の塩分濃度を低下させるリーチングが行なわれる。地下水が高い場合、これを低下させるために暗渠や排水溝が必要である。ところが地表面から灌漑水や降雨が与えられ、水と塩分が暗渠から排除される状況での土中の水の2次元流れと、これによる塩分の移動と除塩の進行形態についてほとんど分かっていない。

この研究では、下部に不透水層、側面に排水口のある均一なモデル土層(砂)を作り、これに上から散水を与えて表面に湛水のない飽和定常流をつくり、このもとで、はじめに土層の塩分濃度をある均一な値にしておき、供給水の濃度を瞬時のある低濃度の水にしたときの土中の塩分濃度と排水液の塩分濃度を測定した。同時に、水の移動はダルシー式、塩分の移動はこの水移動に基づき、移流分散式に従うとして、実験と同じ初期・境界条件で偏微分方程式の数値解で求めるプログラムを作り、水のポテンシャルとフラックス分布、土中の塩分濃度分布の時間変化、排水濃度の時間変化を計算で得た。水圧分布は実測と計算は極めてよく一致した。土中の塩分濃度の変化については、計算の数値分散が、実験の物理分散よりかなり大きかったものの、各点の濃度変化時刻は正しく予測できた。また、排水液の濃度変化は実験と計算が大変よく一致した。

この結果、除塩の進行形態が明らかになった。すなわち、はじめからある濃度の高い塩水と新たに加えられた水はかなり明瞭な境界を形成し、この境界線が上から下へに降下する。この境界線は、排水口の近くでは排水口に向かってへこんでいるが、排水口の深さ程度離れるとほぼ水平である。境界線が排水口下端の深さの半分を越える程まで来ると、へこみ部分が排水口に達し、新しい水の排水口からの流出が始まり、除塩の効率が急速に悪化する。この境界線の深さは、水分フラックスの鉛直成分がなくなりほぼ水平流に切り替わる位置である。この時点から境界線の降下速度は低下し、排水口の深さに達するにはかなりの時間と水量が必要である。したがって、排水口の深度を、除塩に必要な土層深度(除塩深度)において水分フラックスの鉛直成分が十分あることようにとることが望ましい。そのための排水口深度は、全層飽和の場合、除塩深度の2倍程である。

9002 塩性土地帯の農業利用のための改良方法の開発に関する基礎的研究

中野 政詩 (東京大学)

1. 研究目的

塩性土地帯は、乾燥地や半乾燥地あるいは大河川の河口デルタに広く分布している。これらの塩性土地帯は、現在のところ、適正な管理や利用に手段が見つからないまま放置されており、地球環境保全に向けて、また食料生産の遍在を解消するために、この地帯の緑化や農業利用の技術を確認することは国際的に重要な課題である。本研究は、塩性土地帯の緑化や農業利用を行なうための農地等における土壌改良と水の管理と制御方法の最適ありかたを土壌物理的、工学的手法で検討する基礎研究である。

乾燥地で、地下水が浅い場合、地表面からの蒸発と植物からの蒸散に伴う根の吸水は地下水から地表部に向かう上向きの水の移動を生じさせ、土壌水に解けた塩類が地上部に蓄積される。この塩分を排除するために、多量の水を上から与えて塩分を洗い流すリーチングが行なわれる。この水は排水溝や暗渠から圃場外に排水する必要がある。

このように地表に除塩のための灌水や降雨が与えられたときの土層中の、暗渠や排水溝に向かう水と塩分の流れは2次元の移動であるが、その形態についてこれまで明らかにされていない。本研究では、塩性土地帯におけるリーチングを想定した模型実験を行なって塩分移動を調べる。同時に、水と塩分の移動を予測するコンピュータプログラムを開発し、これによって土層中の塩濃度の変化を調べ、暗渠に向かう塩分の2次元の移動形態を明らかにし、除塩の効率と除塩の深度や暗渠の深さの関係を検討しようとしたものである。

2. 研究方法

2. 1 モデル土層と流れの条件設定

暗渠や排水溝を付設した農地土層のモデルとして、深さ b に不透水層のある均一な土層に、水平距離 $2a$ の間隔で、深さ c ($c < b$) に暗渠（または排水溝）の水位がある配置を設定する。この土層に上から均一な灌漑水のフラックス F_L を与えたときの、定常流を考える。この流れのシステムでは、上から与えるフラックスがある値より大きいと、地表面の水圧はどこも正圧となって地表に湛水を生じる。フラックスがこれより小さいと地表面に負圧の領域が現われるであろう。地表面のサクシオンは、排水口直上で最も大きく、排水口から離れるほど小さくなるので、排水口から遠い位置ほど湛水が残る。さらにフラッ

クスをある値より小さくすると地表面水圧は全体が負圧となって湛水領域が消える。土中の流れに対する地表の境界条件は、このように供給フラックスに応じて、全面湛水条件、一部フラックス、一部湛水条件、全面フラックス条件、というように変化する。

実験では、地表面の全面が負圧の場合、すなわちフラックス境界条件となる場合を扱う。さらに、排水口直上のサクションが土の空気侵入サクションに到らず飽和のままで、土層の透水係数 k が全層で飽和透水係数になる場合を想定する。

2. 2 実験装置と手順

Fig. 1 のような大きさのアクリル製の水槽を作製し、これに豊浦標準砂を詰め、土壌槽の厚さは 4 cm である。排水口ストレーナは内側に砂を通さない薄いスクリーンを置き、その外側に荒目の金網を重ね、その外側に穴空きのアクリルで押さえたもので、通水抵抗は極めて小さく、ストレーナでの圧力損失は無視できる。土壌槽の側面には、水圧測定用の 12 本のテンショメータを取り付け、圧力変換器につながっている。また、土層内の塩分濃度を電気伝導度として測定するための自作の 4 極センサーを 6 点に設けた。この 4 極センサは Fig. 2 のような回路で、1 mHz の交流で基準抵抗との電圧比 $V1/V2$ を測定するものである。また排出口から大気圧中に出た排水液は、直後に塩分濃度測定管を通過し、電子天秤の上に置いた排水容器に落ちて流量が測定される。この溶液塩濃度の測定管はビニール管に 2 点のステンレス電極を付けたもので、4 極センサとともにデータロガー/コントローラ CR-7 (Campbell Scientific Inc.) の対応するモード (Instruction 5,9) によって測定した。降雨装置は、塩ビ管に注射針 19 本を 3 cm 間隔で取り付け、加えるヘッドで給水フラックスを調節できる。降雨装置は、濃度が C0 と C1 の異なる塩水のはいた 2 つのマリオット管につながっており、コックで切り替えられる。切り替え後、降雨装置内の溶液を、新たな濃度の溶液で短時間に洗い流せるようになっている。

土壌槽に濃度 C0 の NaCl 溶液をはって、このなかに標準砂を水中充填した。実験はまず、濃度 C0 を上から与えた定常流をつくり、ほぼ瞬間に給水を濃度 C1 に切り替える。この瞬間を $t = 0$ として、土層内と流出液の塩分濃度を測定した。ここで C0 は 0.05N、C1 は 0.01N とし、これに微量の殺菌剤を加えた。給水フラックス (FL) が 0.00338 cm/sec と 0.00143 cm/sec の 2 つの場合について実験をした。

2. 3 基礎式と境界条件

2.3.1 水移動

土中の駆動力は圧力勾配と重力であり、水分フラックスの水平方向成分 q_x と鉛直方向成分 q_z は透水係数 k を等方として、次のダルシー式で与えられる。

$$q_x = -k \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$q_z = -k \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + k \quad (2)$$

ここに p は水柱高さで表わした水の圧力、また、連続式は定常流なので、次式である。

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

これより、 p はラプラスの方程式を満たす。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

境界条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{地表面 (} z=0 \text{)} : \quad q_z &= -k \left(\frac{\partial p}{\partial z} - 1 \right) = FL && \text{供給フラックス一定} \\ \text{側面 (} x=0, x=a \text{)} &: \quad q_x = 0 && (5) \\ \text{底面 (} z=b \text{)} &: \quad q_z = 0 \\ \text{排水口 (} x=0, c < z < d' \text{)} &: \quad p = 0 \end{aligned}$$

d' は水の浸出点である。排水口上端で負圧が生じなければ（流量の多いとき）、 d' は排水口上端の深さ d に等しいが、排水口上部に負圧が生じるとき（流量の少ないときに起こる）、負圧発生部分はゼロフラックス（ x 方向）境界となる。この場合、数値計算に際して d' の位置を事前に与えることはできないので、適当な d' を与えて計算を繰り返し、水圧がゼロになる点を見つけた。

なお、標準砂の飽和透水係数 k は 0.24 cm/sec 、飽和の体積含水率は 0.35 である。

2.3.2 塩分移動

塩分の鉛直方向フラックス J_z と水平方向フラックス J_x は、水分フラックスによる移流と分散があるので、 D_z 、 D_x を各方向の分散係数、 θ を体積含水率として、次式となる。

$$J_z = q_z C - \theta D_z \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$J_x = q_x C - \theta D_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (7)$$

溶質の連続条件は、溶質濃度を C 、時間を t として

$$\theta \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = - \left(\frac{\partial J_z}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial J_x}{\partial x} \right) \quad (8)$$

D_x 、 D_z はそれぞれが J_x と J_z に比例する成分の和として与えられるが、数値計算では現実の分散を越える数値分散が生じるので、極力、分散を押さえるために、 $D_z = D_x = 0$ とした。

塩濃度に対する境界条件は $t > 0$ に対して

地表面 ($z = 0$) : $J_z = 0$

側面 ($x = 0, x = a$) : $J_x = 0$ ∂ (9)

排水部分 ($x = 0, c < z < d'$) : $J_x = C q_x$

初期条件は全領域で、 $t = 0$ にて $C = 1$ である。

2. 4 数値解法

まず、水分に関する(1)(2)(3)式を境界条件(5)のもとで、差分法で解いて、圧力分布 $p(x, z)$ を求める。つぎにこれから節点間の水分フラックスの x, z 成分 q_x, q_z を計算し、塩分に関する(6)(7)(8)式の差分近似式を解いて、時間ステップごとに濃度分布を計算した。そこでの差分スキームは水分フラックスの方向に後退差分、時間については陽解法である。すなわち、節点間のフラックスが上流側節点の濃度を下流に運搬するもので、 q_z は正領域と負の領域があるので、その符号に応じて節点の上下を判定した。時間差分については陰解法 (ADI法) も試みたが、計算時間が長くなる割に解の安定性が良くなかった。節点数は $25 \times 34 = 800$ で節点間隔は z 方向に $1 \sim 0.75$ cm、 x 方向に $2 \sim 3$ cm である。塩分移動を計算する時間ステップは 6 秒とした。

プログラムの開発にあたっては、大型計算機を使えない環境も考慮し、パソコンでも計算ができるようにするために特に配慮をした。この種の 2 次元問題の数値計算をパソコンで行なう上での最大の問題は、一つの配列変数の大きさが 1 セグメント 64 キロバイト (実数型の要素数で約 10000) に制約されることである。これによって連立方程式の係数行列の大きさが制約され、節点数が制約される (ここでは水移動の計算)。直接法で連立方程式を解く通常の方法では、バンド行列を用いても節点数 300 程度が限界である。ここでは反復法を用いることを前提に、係数行列の各行のゼロでない係数だけを 2 次元配列に格納し、各係数の列の位置を整数 2 次元行列 (ポインタ行列) で与える方法を採用した。この方法では 2000 近い節点をとることが可能である。また連立方程式の反復法での解法には、収束の速い共役傾斜法 (conjugate gradient method) を用いた。プログラムの記述言語は Turbo Pascal である。一回の計算に要する計算時間は、CPU が i80386 の機種で、水移動について約 5 分、塩分移動については時間ステップ 3000 まで (リアルタイム 5 時間) で約 20 分である。

3. 研究結果

3. 1 水のポテンシャルとフラックスの分布

Fig. 3 に、計算で求めたトータルポテンシャルと水圧の等高線を示す。実測した水圧は計算値とは、供給流束が大きい時も小さいときも、ほとんどの測定点で測定誤差の範囲 (± 0.3 cm) で一致していた。したがって、このポテンシャル分布は実験のポテンシャル分布をほぼ正確に表現していると言える。実験の給水フラックスでは地表面は負圧となり、

水圧は暗渠方向に低下し、暗渠直上の地表面で最小値をとる。この負圧は給水フラックス 0.00143cm/sec でも水柱高さ -18.5cm 程度であり、水分特性曲線上でなお十分に負圧飽和の領域である。Fig. 4にはポテンシャル分布から計算される土層内の水分フラックスベクトルの分布を示す。一つの図の中では、ベクトルの長さがフラックスの大きさの対数にほぼ比例する。土層内の水のフラックスは排水口の深さまでは下向き成分を持つがこれ以深ではほぼ水平流となる。排水口から遠い深部にはフラックスの極めて小さい「淀み」ができています。

3. 2 塩分の濃度変化

Fig. 5に6点で測定した塩分濃度の実験値と計算値の時間変化を示す。塩分濃度は初期濃度を1、供給水濃度を0とした相対値である。濃度が急変する時点が、新たに加えられた水の前線が通過するときである。実験の方が濃度変化が急であるのは、数値計算では、実際の物理的分散を上回る数値分散が生じているためである。実験では、新しい水と古い塩水の境界（前線）がより鮮明になっているはずであるが、この前線の中心の通過時刻は数値計算で正しく予測できている。排水液濃度の時間変化（Fig. 6）については、実験と計算は極めてよく一致している。ところで、Fig. 5, Fig. 6の濃度変化のグラフは、供給水のフラックス FL が異なっても、横軸を積算給水深にとると、ほとんど一致する。すなわち、土層中の塩濃度分布は、ほとんど加えられた積算水量だけで決まり、給水フラックスの大きさによらない。

Fig. 7は、積算給水深が5, 10, 20 cmになる3つの時点における土中塩濃度の濃度等高線である。濃度の境界が降下する様子がよくわかる。濃度境界（前線）は、排水口直上では暗渠に向かう鉛直成分による「へこみ」をもっているが、排水口から排水口の深さ程度離れると、ほとんど水平である。境界の降下は、「へこみ」が排水口に到達した後、遅くなり、排水口の深さに降下した後、停滞し、徐々に消滅に向かう。

4. 考察

4. 1 相似則

(1)式と境界条件(5)を満たす解は、境界条件の幾何学的相似に対して流れの力学的相似が成立する。この場合、移流による塩分移動に対しても相似が成立する。したがってここでの実験と計算の結果はスケールによらないと考えてよい。長さのスケールファクタ α に対して、透水係数を不変とすると、フラックスは不変で、時間と圧力は α 倍される。ただし、この相似則が成立するのは飽和流であるためで不飽和流ではこの相似則は成立しない。

4. 2 移流と分散

水に溶けた塩の物理的分散は分散係数で表わされるが、通常これは水分流速に比例し、

この比例係数はDispersivity（ λ ）と呼ばれる。別の実験で豊浦標準砂の飽和状態の λ を求めたところ、約 $\lambda = 0.5 \text{ cm}$ であった。一方、連続量である濃度を節点で離散化する数値計算では、濃度勾配の差分近似が拡散項と同等の効果を生み（数値分散）、この拡散係数は流速と節点間隔の積に比例することが知られている。つまり λ を節点間距離で置き換えた物理分散と同等の分散効果が数値解に含まれるのである。ここでの計算の節点間隔は鉛直方向に1 cm、水平方向に2～3 cmなので数値分散は実験の物理分散の3～5倍だと考えられる。数値分散を避けるシミュレーション手法がないわけではない（粒子追跡法）が、差分法や有限要素法で安定した解を得るためには一般に避けられない。しかし、本研究におけるような塩分移動では、分散（拡散項）は必ずしも重要ではない。土中の塩分分布は水の流れ、すなわち移流によってほとんど決まるので、水のフラックスを正しく予測することが重要なのである。排水液濃度の低下曲線は、土中の溶質分散によって支配されているというよりも、むしろ異なる流線に乗ってきた濃度の異なる塩水が、排水口とその近くで混合された結果であるからである。

4. 3 除塩の進行形態と除塩の効率

排水液濃度（Fig. 6）は供給水深4 cmまで初期塩水濃度であるが、その後、急速に低下する。排水液濃度の低下は、新しい水の流出を意味し、除塩効率の低下を意味する。実験では供給水深4～5 cmまでは除塩効率は良好だと言えるが、この水深を水分量（間隙率0.35）で除した深さは、排水口下端のおよそ1/2である。つまり、除塩効率が高いのは、この深さまでである。

濃度分布からみると、はじめからある濃度の高い塩水と新たに加えられた水はかなり明瞭な境界を形成し、この境界線が上から下へに降下する形で除塩は進行する。この境界線は、排水口の近くでは排水口に向かってへこんでいるが、排水口の深さ程度離れるとほぼ水平である。境界線が排水口下端の深さの半分を越える程まで来ると、へこみ部分が排水口に達し、新しい水の排水口からの流出が始まり、除塩の効率が急速に悪化する。この境界線の深さは、水分フラックスの鉛直成分がなくなりほぼ水平流に切り替わる位置である。この時点から境界線の降下速度は低下し、排水口の深さに達するにはかなりの時間と水量が必要である。したがって、排水口の深度を、除塩に必要な土層深度（除塩深度）において水分フラックスの鉛直成分が十分あることようにとることが望ましい。そのための排水口深度は、全層飽和の場合、除塩深度の2倍程である。

5. 今後の課題

暗渠に向かう水と塩分の2次元流をさらに一般的に検討するために、以下の課題が残された。

- 1) ここでは地表面に降雨や散水の様な均一な水分フラックスが与えられる場合を扱ったが、このフラックスを大きくしてゆくと、表面に湛水が生じる。全層が飽和で湛水があると、浸透フラックスは暗渠の直上で著しく大きくなるが、このときの塩分移動も調べる必要がある。
- 2) 不透水層が深いときの流れを検討する必要がある。
- 3) ここでは土層全体が飽和している場合のみを扱い、地下水面上に不飽和流が生じる場合を扱わなかった。不飽和流が形成される場合、相似率は成立しないので、実物スケールでのシミュレーションによる検討が必要である。

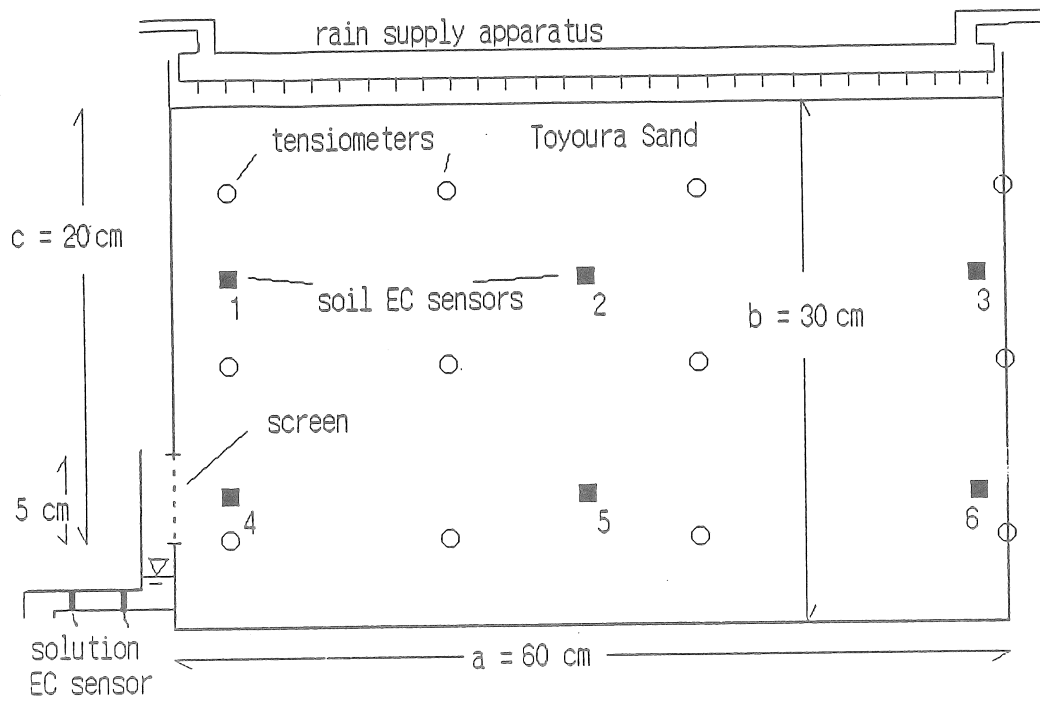


Fig.1 Experimental apparatus

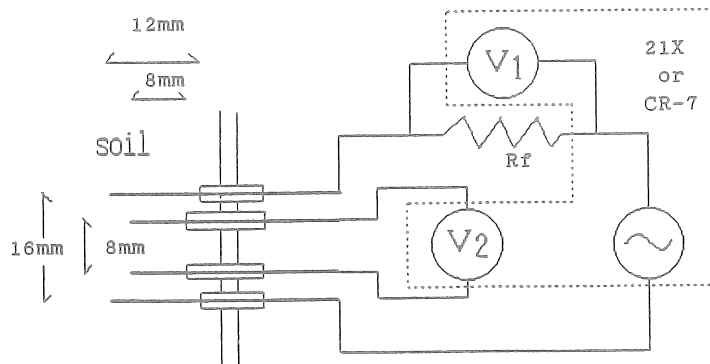


Fig.2 4 Probe Soil Electric Conductivity Sensor

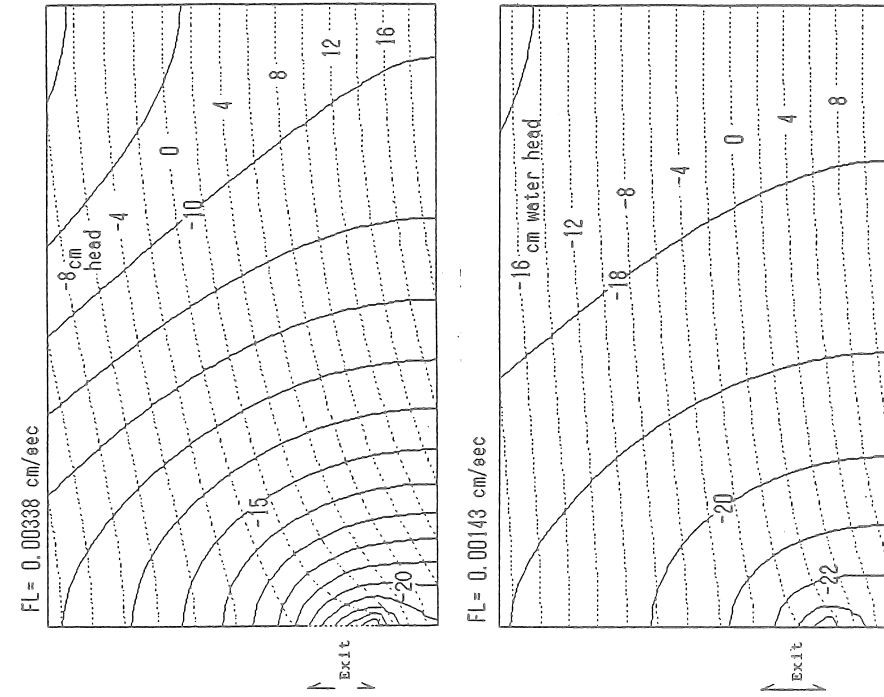


Fig.3 Potential contour. Solid lines are total potential in which gravitational potential is measured from surface. Dotted lines are pressure.

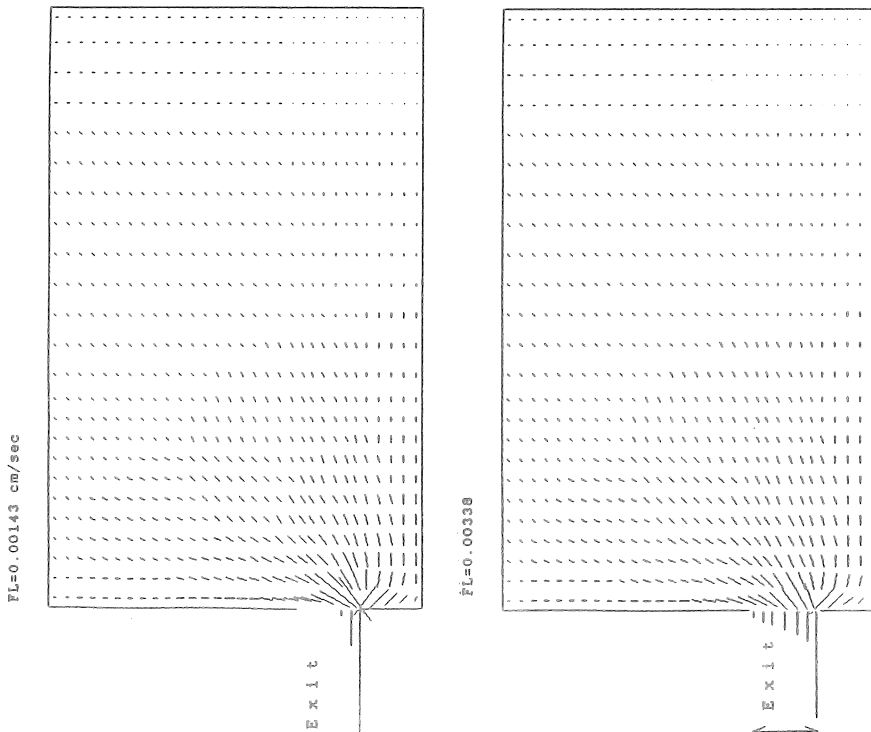


Fig.4 Water flux vector. The length of each vector is approximately proportional to the logarithmic magnitude of the flux.

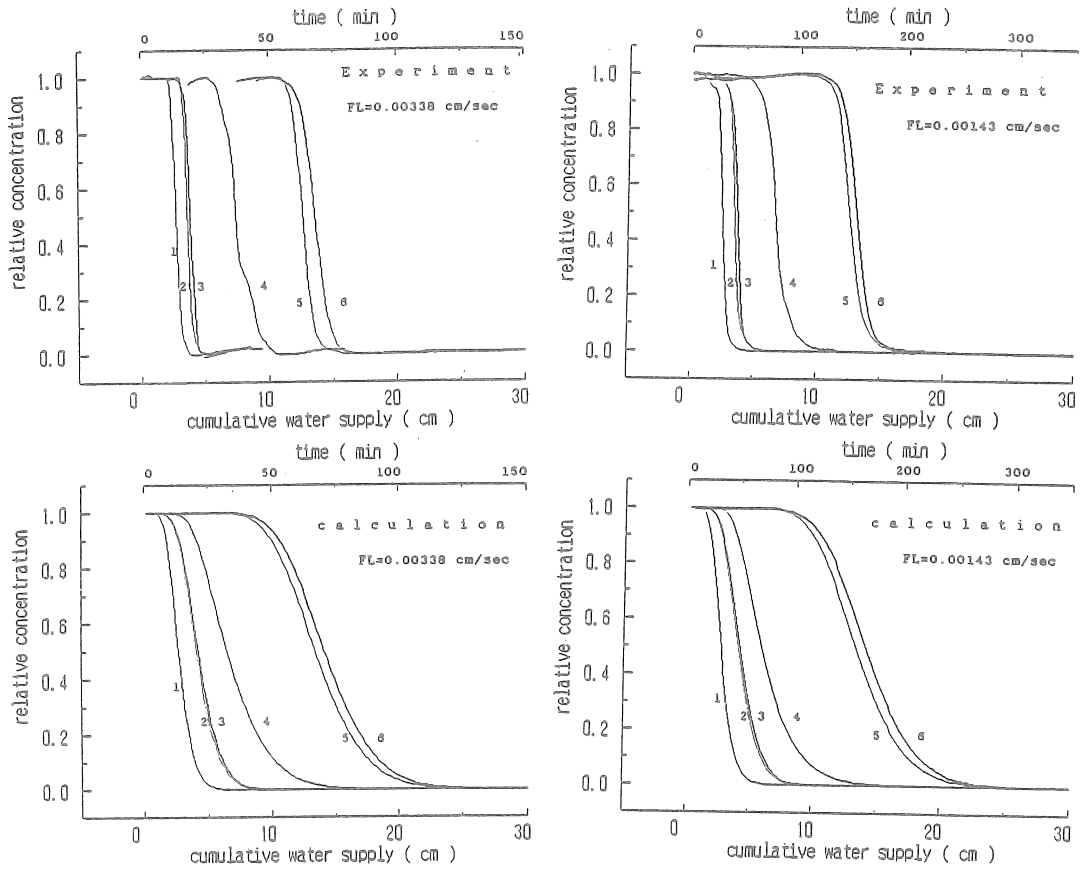


Fig.5 Change in salt concentrations in soil with time

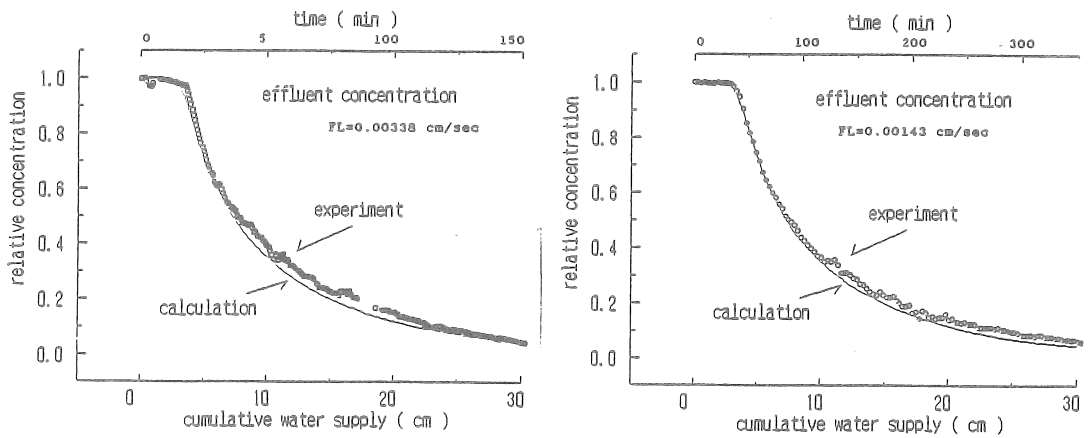


Fig.6 Change in effluent concentration with time

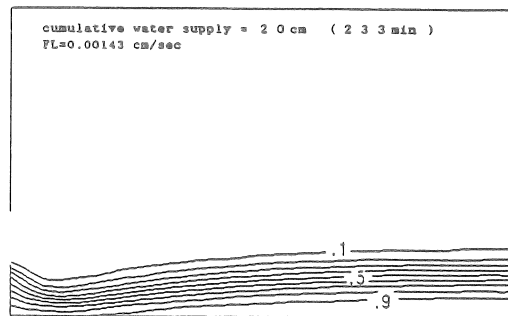
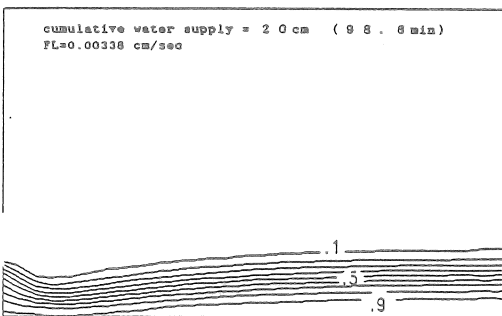
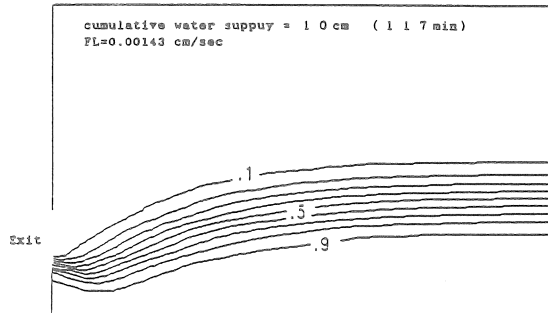
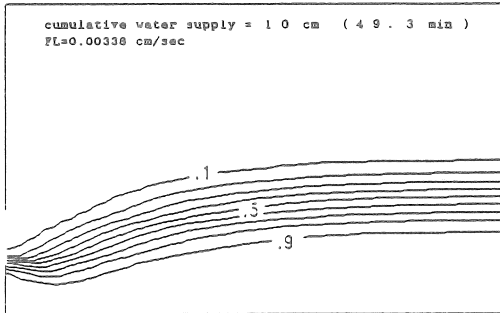
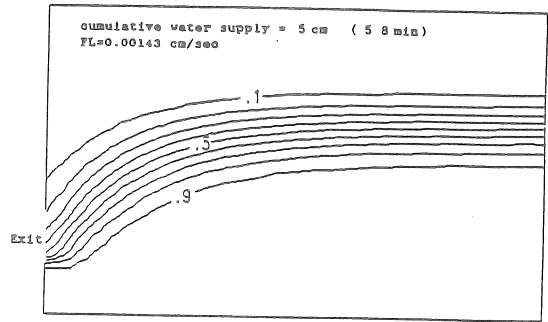
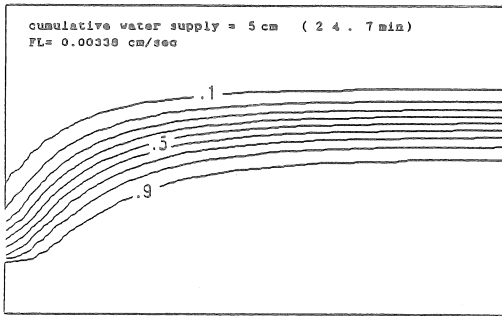


Fig.7 Concentration contour in soil. Intervals are 0.1 of relative concentration.

Basic Study for Improving Saline Soil Area into Agricultural Land.

Masashi Nakano, Tuyoshi Miyazaki, Sho Shiozawa, Nobuo Toride
The University of Tokyo, Faculty of Agriculture

Summary

Saline soil extends widely in arid and semi-arid area in the world, where agricultural land use is difficult. Therefore, it is required to develop the way to improve saline soil land into agricultural field. In typical saline soil fields, the upward moving soil water from groundwater or deeper unsaturated layer to the surface transports dissolved salts with it and leave them in the root zone. In order for planting, the accumulated salt should be washed out by applying excess water and the salt containing water should be removed by arranging drain. The two dimensional flow of water and salt toward drain was examined in this study.

A model soil layer with a drain in it was made for experiments, of which bottom was impermeable. Saturated steady water flows were established by applying salty water on the surface uniformly at constant rates. The soil was initially saturated by solution of concentration C_0 , and the concentration of applying water was suddenly switched into a different concentration of C_1 . Salt concentrations in the soil layer and effluent concentration were measured afterwards. On the other hand, computer programs for calculating water flow and salt movement with it were made. The observed and the calculated water pressures showed excellent agreement. The calculation could predict well the time at which the concentrations change, while the numerical dispersion was fairly larger than the actual physical dispersion. The calculated effluent concentration also indicates good agreement with observed one.

As results, the reaching proceeds in the way that the old water and the fresh water form a clear boundary, which is almost horizontal except for near the drain where it dips toward the drain, moving downward. When the boundary reaches at about half depth of the drain where water flux becomes horizontal, drainage of fresh water occurs, and downward velocity of the boundary and reaching efficiency fall down. Therefore, it is desired that the depth of the drain should be arranged enough for the bottom of the required reaching layer to have vertical water flux component. This depth of the drain is about twice of the thickness of the reaching layer in case soil is saturated over all.