

II-362

非定常法による塩分不飽和分散係数の算出

福井大学大学院 学生員 沈 飛

福井大学工学部 正会員 福原輝幸

福井大学大学院 学生員 高野保英

1. はじめに 砂漠緑化あるいは乾燥地農業の実施の際には、塩害の発生が懸念される。塩害の原因としては、農地への過剰な灌漑や水路からの漏水などによる地下水位の上昇、あるいは塩分濃度の高い地下水の使用が挙げられる。塩害は基本的に蒸発、乾燥下の土中の熱、水分および物質移動に伴って生じる。

従って塩害予測や防止のためには、不飽和砂層中の溶質移動メカニズムを解明する必要がある。塩害は主に不飽和域で生じるので、溶質の不飽和分散係数が重要な因子となる。周知の通り不飽和分散係数は一定でなく、粒径レイノルズ数の関数として表現される¹⁾。しかしながら、これまでの不飽和分散係数に関する研究では土壌の種類が異なり、実験の範囲も限られているために、不飽和分散係数には不明な点が多い。

そこで本研究では、豊浦標準砂による塩水を用いた室内蒸発実験を行い、蒸発量および塩分濃度の経時変化を基に、非定常法により不飽和分散係数を求める。

2. 非定常法による不飽和分散係数の決定 Fig.1は、蒸発に伴う砂層内塩分濃度 C の鉛直分布 $C(z)$ の経時変化を模式的に示したものである。定常な蒸発および水分分布における不飽和砂層中の溶質保存則は、次のように表される。

$$\rho_l \theta \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial (J_s)}{\partial z} \quad (1)$$

$$J_s = \rho_l \left[V \theta C - D_h \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad (2)$$

ここに、 ρ_l : 液状水密度、 θ : 体積含水率、 t : 時間、 z : 鉛直座標、 J_s : 溶質フラックス密度、 $V (=M_v/\rho_l \theta)$ 、 M_v : 蒸発フラックス密度、 D_h : 不飽和分散係数である。

要素 i について式(1)を離散化すると、次のようになる。

$$\rho_l \theta_i \frac{C_i^{k+1} - C_i^k}{\Delta t} = \frac{J_{s(i-1/2)} - J_{s(i+1/2)}}{\Delta z} \quad (3)$$

ここに、 i : 要素番号、 $i+1/2$: 要素の上面、 $i-1/2$: 要素の下面、 k : 時間ステップ、 Δt : 時間間隔、 Δz : 要素厚さである。式(3)より、要素 i の上面位置 $z = z_{i+1/2}$ における時間 t^k から t^{k+1} の平均体積含水率 $\theta_{i+1/2}^{k+1/2}$ に対する不飽和分散係数 $D_h(\theta_{i+1/2}^{k+1/2})$ は、次式で求められる。

$$D_h(\theta_{i+1/2}^{k+1/2}) = \frac{V_{(i+1/2)} \theta_{(i+1/2)} C_{(i+1/2)} - J_{s(i-1/2)}}{\theta_i (C_i^{k+1} - C_i^k) / \Delta z} \quad (4)$$

Fig.1に従う時、 D_h の計算は要素 $i=1$ から始まる。要素 $i=1$ の下面 $z = z_{1-1/2}$ では $\partial C / \partial z = 0$ であるから

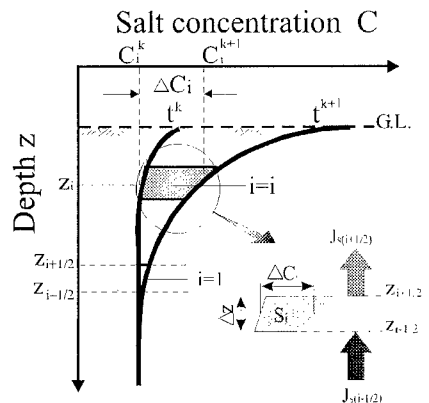


Fig.1 非定常法による不飽和分散係数決定の概念図

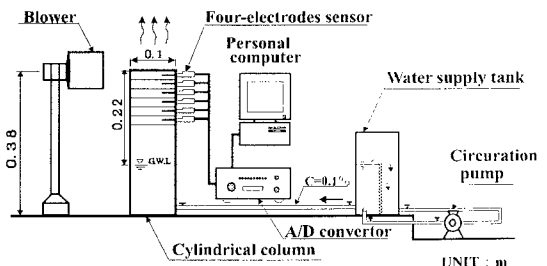


Fig.2 実験装置

キーワード: 4 極法塩分濃度センサー, 熱・水分・溶質移動, 不飽和分散係数

連絡先: 福井市文京 3-9-1

TEL: 0776-23-0500(内線 2809)

FAX: 0776-27-8745

ら、そこを通過する $J_{s(i-1/2)}$ は移流のみとなり、式(4)中、 D_h が唯一未知量となる。この D_h は、要素 $i=1$ の上面高さ $z = z_{1+1/2}$ において時間 t^k から t^{k+1} 間の時間平均 $\theta (= \theta_{1+1/2}^{k+1/2})$ に対する値となる。この計算プロセスを $i=1$ から順に上方へ向かって進めることで、 D_h と θ の関係が求まる。

3. 実験概要 塩分濃縮実験は、環境条件および地下水位の異なる2種類について行う。両実験とも、高さ 0.38m のアクリル製円筒カラムに豊浦標準砂（平均粒径 $d=0.2\text{mm}$ ）を間隙率 0.4 で充填し、下方より塩分濃度 0.1% の NaCl 溶液を供給する。CASE-1の実験ではカラムを温度 45°C で一定なインキュベータに設置し、蒸発を促進させる。また、CASE-2ではカラムを温度 28°C で一定な恒温恒湿室に設置し、蒸発を促進させるために、送風機で砂層表面に風を送る。紙面の都合上、ここではCASE-2の実験装置の概要をFig.2に示す。

蒸発量は重量計により、塩分濃度は6本の4極法塩分濃度センサーにより連続的に測定される。実験は 22日間に渡って行われ、終了時にサンプリング法により体積含水率の鉛直分布が測定される。なお、地下水位はCASE-1では地表面下 0.2m ($z=-0.2\text{m}$)、CASE-2では地表面下 0.22m ($z=-0.22\text{m}$) に設定され、実験期間中一定に保たれる。

4. 実験結果および考察 Fig.3は、CASE-1およびCASE-2の体積含水率の鉛直分布を示す。地下水位が一定であるため、体積含水率は時間的に変化しない。地表面付近 ($z=-0.013\text{m}$) は湿潤 ($\theta=0.24$) していることから、蒸発は地表面から生じると考えられる。なお、今回の実験では両ケースとも M_v は実験期間中一定であり、CASE-1では $M_v=2.63 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ 、CASE-2では $M_v=1.86 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ となる。

Fig.4およびFig.5は、CASE-1およびCASE-2の $C(z)$ の経時変化であり、 $C(z)$ は1週間毎に示される。地表面蒸発のために塩分濃縮は砂層表面に集中することが判る。

次に、両ケースの無次元不飽和分散係数 D_h/D_d (D_d : 分子拡散係数) とレイノルズ数 $R_e (=Vd/\nu, \nu$: 動粘性係数) の関係を、Fig.6に示す。 D_d の値は $3.5 \times 10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$ である。 D_h は R_e に比例して大きくなり、 D_h/D_d と R_e の関係は、次式で与えられる。

$$\frac{D_h}{D_d} = 2.14 \times 10^{-5} R_e^{1.28} \quad (5)$$

5. 結論 本研究では、豊浦標準砂を充填したカラムを用いて蒸発下の塩分濃縮過程について検討し、不飽和分散係数を非定常法により求め、その特性を調べた。その結果、不飽和分散係数はレイノルズ数の 1.28乗に比例することが示された。今後は、長期間にわたる塩害シミュレーションと塩害対策を検討する。

参考文献 1) K. Sato, Y. Sasaki and T. Fukuhara : Experimental Study on Diffusion and Dispersion Coefficients of Solute in Unsaturated Flow, Proc. 5th A. P. D. of I.A.H.R., Korea, Vol.4, pp.317-336, 1986.

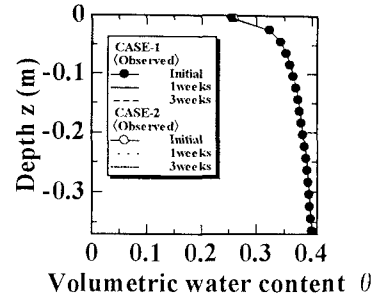


Fig.3 体積含水率の鉛直分布

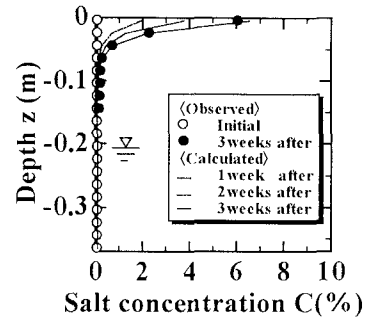


Fig.4 塩分濃度鉛直分布 (CASE-1)

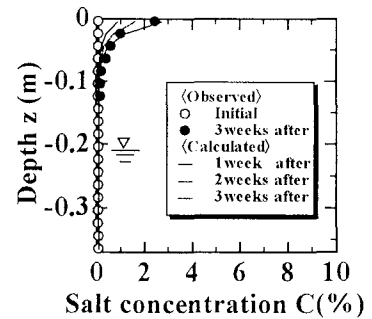
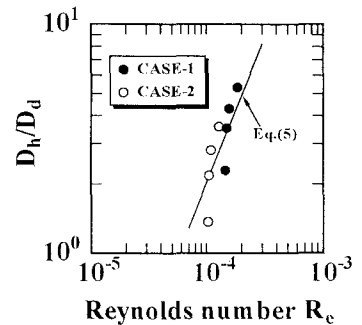


Fig.5 塩分濃度鉛直分布 (CASE-2)


 Fig.6 D_h/D_d と R_e の関係