

地下水位一定の土壌カラムからの蒸発に伴う 塩類動態の非定常解析

山本 太平*

Dynamic Analysis of Water and Salt in Soil Column under a Constant Ground Water Table

Tahei YAMAMOTO*

Summary

In order to analyze the mechanism of simultaneous movement of water and salts on water logging phenomena in arid land areas, a simulation model was designed and calculations were carried out using with a dune sand column and a sandy loam column under the conditions of a constant ground water table.

In the previous paper, the relationships between evaporation from soil surface and water movement in the soil columns were discussed for the unsteady state under the constant ground water table in which water contained no salts. This study summarizes the numerical results obtained under the conditions in which the ground water contains 500mg/l and 2,000mg/l of NaCl.

1. The $pF-\theta$ curve, the $K-\theta$ curve, the $D-\theta$ curve of soil and the $Ds-\bar{v}$ curve of NaCl were necessary as the main conditions for the simulation model.
2. The NaCl-profile, which represents a distribution-type of NaCl concentration calculated from the simulation model, approached the analytical results obtained in the steady state as the amount of evaporation increased over successive days.
3. The shape and rate of the NaCl-profile distributed in the soil column were mainly dependent upon the evaporation rate from the soil surface, the NaCl saturation concentration ratio at soil surface and the soil moisture content in the soil column.
4. The day in which evaporation occurred where the NaCl ratio C/C_i of soil surface showed the saturation concentration at the soil surface, were less in the dune sand than obtained in the sandy loam. So that, it was estimated that the crystal of NaCl was condensed more on the soil surface of the dune sand.

* 砂丘利用研究施設乾燥地農学情報解析室

* *Division of Arid Land Agricultural Information Analysis, Sand Dune Research Institute.*

ま え が き

乾燥地圃場において地下水位が高くその水質が塩類化している場合には、高温乾燥の条件下で土壌面蒸発が促進され、土壌面付近に塩類土壌が形成されやすい。このような土壌の塩類化はwater logging現象といわれ、従来大河川の河口域や湖沼域周辺の高地下水水位地帯で進行し、極端な農地の荒廃を生じている^{3,4)}。特に過去の歴史においては、人類文明の発祥地として繁栄し豊かな緑草地帯を築きながら、人為的な水管理や土壌管理の失敗によりこのような農地の荒廃が数多く発生した事例が指摘されている²⁾。また近年になっては、農地の集約的高度利用に伴ってこの種の塩類化圃場が増大している⁴⁾。

著者はこのような土壌塩類化に関して研究を進めている⁵⁻⁸⁾が、前報では砂丘砂とマサ土(砂壤土)の土壌カラムを地下水位一定条件下におき、土壌水の動態と土壌面蒸発の非定常過程について検討した⁸⁾。ここでは、同じ種類の土壌カラムを用い、地下水が塩水を有する場合の水と塩類の動態について、主に理論的な観点より非定常解析を試みた。

水と塩類の非定常解析

不飽和土壌中の深さ方向における水と塩類の動態は、一般に次の基本式によって表される¹⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial (\theta \cdot C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta \cdot D_s \bar{v}) \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial (vC)}{\partial z} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 θ : 土壌水分量 (cm^3/cm^3)、 t : 時間 (min)、 K : 不飽和透水係数 (cm/min)、 D : 拡散係数 (cm^2/min)、 C : 土壌中の塩類濃度 (mg/cm^3)、 D_s : 塩類の分散係数 (cm^2/min)、 $\bar{v} = v/\theta$: 間隙水速度 (cm/min)、 v : 水分フラックス (cm/min)、 z : 座標軸 (cm)、である。 $z = 0$ は地下水面であり水面より上向きを正とする。

Fig. 1 に示すような土壌モデルにおいて、土壌水の動態に関する境界条件と初期条件は次のように示される。

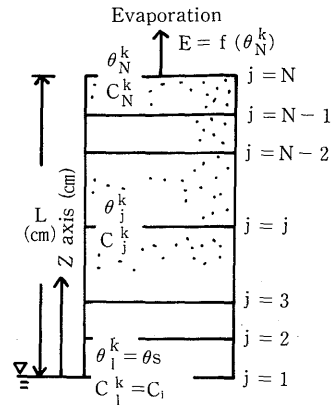


Fig. 1 Distribution of θ_j^k , C_j^k in soil column model under conditions of nonsteady state (θ_s : maximum water holding capacity of soil, C_i : Salts concentration of ground water, L : Height of soil column from water table, j : Space step, k : Time step, $(N-1)$: Soil segment number.

$$\theta = \theta_n, z > 0, t = 0 \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta = \theta_s, z = 0, t > 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$v = -D \frac{\partial \theta}{\partial z} - K = 0, z = L, T_1 \geq t > 0 \dots\dots(5)$$

$$E(\theta) = -D \frac{\partial \theta}{\partial z} - K, z = L, T_2 \geq t > T_1 \dots\dots(6)$$

ここで、 θ_n : 初期土壌水分量 (cm^3/cm^3)、 θ_s : 土壌の最大含水量 (cm^3/cm^3)、 L : 地下水面上の土壌カラム高 (cm)、 T_1 : 蒸発のない条件下において水の上方移動が定常状態に近似する時間 (min)、 $E(\theta)$: 土壌面蒸発量 (cm/min)、 T_2 : 土壌面蒸発時間 (min)、である。 E は水分量だけの従属関数として表わした。土壌水が T_1 時間以内で定常状態に近似した後、 $t = T_1$ から土壌面蒸発が始まる。また蒸発時間 T_2 が大きくなる場合は、蒸発日数 $Dy = T_2/1,440$ (day) で表わした。前報の結果から、 E が小さい場合または表層水分量が大きい場合には、比較的短時間後、土壌面蒸発量 E と上方水分フラックス v が定常状態になることが明らかになった⁸⁾。ここでは、このような E が小さい範囲について取り扱い、 E と v を一定とみ

なして塩類動態の解析を行った。

(1), (3), (4), (5)式によって、土壤カラム中における蒸発前の初期水分量分布を求めることができる。蒸発条件下の土壤水の動態は、(1), (3), (4), (6)式により求めることができる。これらの計算は、前報と同一の数値計算法を利用して行った⁸⁾。

次にFig. 1 に示した土壤モデルにおいて、塩類動態の境界条件と初期条件は次のように示される。

$$C = C_n, L \geq z \geq 0, T_2 \geq t \geq 0 \dots(7)$$

$$C = C_i, z = 0, t > 0 \dots\dots\dots(8)$$

$$vc = -Ds(\bar{v}) \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{E \cdot C}{\theta} = 0,$$

$$z = L, t > T_2 \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 C_n ：土壤中における初期塩類濃度 (mg/cm³)、 C_i ：地下水面における塩類濃度 (mg/cm³)、 vc ：塩類のフラックス (mg/cm²・min)、である。

土壤水と塩類の同時流において、塩類の動態は土壤水によって影響されるが、土壤水は塩類によって影響されないとみなした¹⁾。前述した水分動態の解法によって、土壤カラムの各深さにおける水分量と水分フラックスが求められるので、これらの式を(2), (7), (8), (9)式に代入し、水分量と同じ方法で塩類動態の解を求めた^{6,9)}。

結果および考察

1. 計算条件

1) 土壤の物理的性質

土壤の物理的性質のうち、本計算に主要な計算条件は、不飽和透水係数と土壤水分量の関係 ($K-\theta$ 曲線)、マトリック・ポテンシャルと土壤水分量の関係 ($\psi-\theta$ 曲線)、拡散係数と水分量の関係 ($D-\theta$ 曲線) および分散係数と間隙水速度の関係 ($Ds-\bar{v}$ 曲線) である。 $K-\theta$ 曲線、 $\psi-\theta$ 曲線、 $D-\theta$ 曲線は、前報⁸⁾ のFig. 2, Fig. 3 で示した砂丘砂およびマサ土の値を利用した。さらに土壤面付近の蒸発過程より、土壤カラム中の浸潤過程の方が主要な水分動態を表わすものと仮定し、前報と同様に給水過程の $\psi-\theta$ 曲線、 $D-\theta$ 曲線を用いた。また初期土壤水分量 θ_n と最大含水量 θ_s は、砂丘砂の場合0.02~0.08cm³/cm³、0.35cm³/cm³を、マサ土の場合0.06~0.15cm³/cm³、0.44cm³/cm³をそれぞれ用いた。

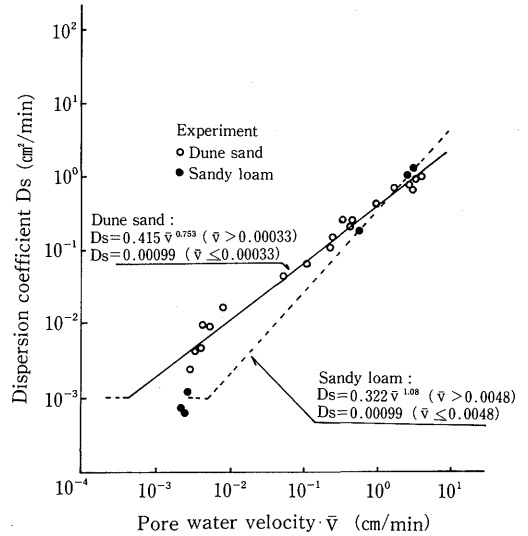


Fig. 2 Relationship between pore water velocity \bar{v} and dispersion coefficient D_s .

塩類動態のパラメーターとしては、分散係数と間隙水速度の関係 ($Ds-\bar{v}$ 曲線) が必要になる。ここでは、塩類としてNaClを取り上げ、Fig. 2 に示す $Ds-\bar{v}$ 曲線を用いた。この $Ds-\bar{v}$ 曲線は、砂丘砂およびマサ土の土壤カラムにおいて、break through法⁶⁾ または土壤面蒸発実験法⁷⁾ によって作成されたものである。

2) 塩類濃度比と飽和塩類濃度比

土壤カラム中におけるNaCl濃度の単位は、地下水面のNaCl濃度 C_i に対する土壤溶液中のNaCl濃度 C の比 (C/C_i) で表わした。(8)式で示したように地下水面のNaCl濃度 C_i は一定であるが、ここではNaCl濃度が $C_i = 500\text{mg/l}^{10)}$ と $C_i = 2,000\text{mg/l}^{10)}$ の2種類の場合を対象として、それぞれ検討した。また(7)式に関連するが、初期塩類濃度比 C_n/C_i は1.0の場合をここで取り扱った。すなわち、蒸発前の土壤カラムは全層において地下水と同じNaCl濃度を有することになる。

次に、土壤面蒸発に伴って土壤カラム中にNaClが集積始めるが、特に蒸発面 (土壤面) 付近では地下水から上昇したNaClが土壤面に取り残されNaCl濃度が増大する。ここでは、このNaCl濃度が進行すると飽和状態になり結晶化が始まると考えた。この結

果結晶化したNaCl量は、土壤溶液中に含まれないとみなし、次の時間ステップの境界条件に加えずに計算を行った。すなわち、地表面におけるNaCl比C/Ciが飽和値以上の値を示す場合、境界条件として(9)式と一緒に次式を用いた。

$$C/Ci > Cmax, C/Ci = Cmax, \\ z = L, t > T_2 \dots\dots\dots(10)$$

Cmaxは地表面におけるNaCl濃度比C/Ciの飽和値である。NaClの飽和濃度が水温20°Cの場合26%であるので、地表面で結晶化が始まるCmaxの値は、Ci=500mg/lの場合520、Ci=2,000mg/lの場合130になる。

2. 砂丘砂における塩類動態

前述した数値計算法に基づき、砂丘砂のK-θ曲線、D-θ曲線、ψ-θ曲線を用いて、土壤カラム中の水分量とNaCl濃度比の分布を各種のL、Eの条件下において求めた。このうち、L=50cm、θn=0.08 cm³/cm³、E=1×10⁻⁵cm/min(1.44×10⁻²cm/day)の場合における水分量分布をFig. 3に、NaCl濃度比分布をFig. 4とFig. 5に示す。Fig. 4はCmax=130の場合

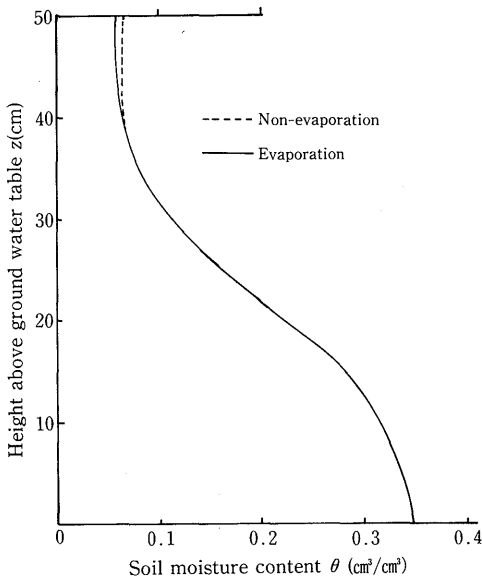


Fig. 3 Distribution of soil moisture content above ground water table under condition of a height of soil column L=50cm and evaporation rate E=1×10⁻⁵ cm/min from dune sand column.

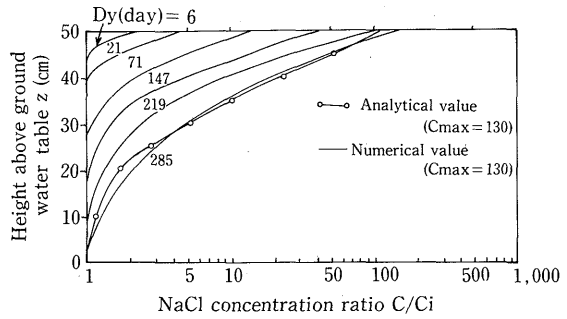


Fig. 4 Relationship between NaCl concentration ratio C/Ci and evaporation day Dy from dune sand column under conditions of NaCl saturation concentration ratio Cmax=130 and of evaporation rate E=1×10⁻⁵ cm/min.

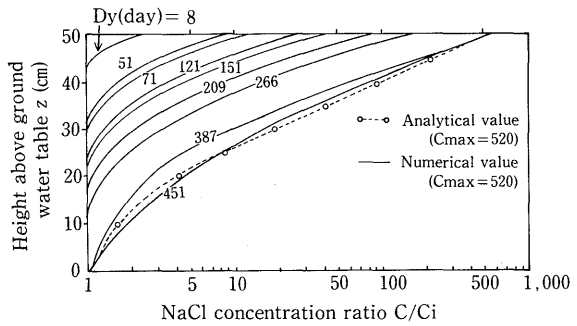


Fig. 5 Relationship between NaCl concentration ratio C/Ci and evaporation day Dy from dune sand column under conditions of NaCl saturation concentration ratio Cmax=520 and of evaporation rate E=1×10⁻⁵ cm/min.

であり、Fig. 5はCmax=520の場合である。

水分量分布は、地下水面からの水分フラックスとEが近似した定常状態におけるものである。Eが小さいので、蒸発開始前に比べて、地表面付近における水分量の減少が少なく、蒸発開始後2～3日後にはほぼ定常状態を示した。

蒸発開始前全層において1.0であったNaCl濃度比C/Ciは、蒸発日数に伴って増加している。特に土壌面に近い領域ほどC/Ci比が増大するが、土壌面からの深さに伴って供給溶液の濃度まで急減する一つの分布パターン(C/Ci比パターン)を形成している。また土壌面のC/Ci比がCmaxまで増加した後は、土

壤面より深い領域のC/Ci比が増加する傾向がみられた。

Cmax=520のC/Ciパターン (Fig. 5) は、地表面のC/Ci比が130より小さい蒸発日数においてCmax=130 (Fig. 4) の場合と同様なC/Ci比パターンを示す。C/Ci比が130より大きくなると、Cmax=130の場合のC/Ci比パターンを蒸発日数に伴って外挿した形で増加している。

Fig. 4, 5 には(2)式から導入されたNaCl濃度比の定常解析解を示している。この解析解は、(1)地下水表面から上昇した塩類は地表面に到達しそこで結晶化し土壌中のC/Ci比は増加することなく定常状態になっている、(2)土壌面付近の水分量 θ_{st} (cm³/cm³)が一定である、と仮定して求められたものであり、次式によって示される¹⁰⁾。

$$\ln \left(\frac{C_{max} - C_i}{C - C_i} \right) = \frac{E(L - z)}{D_s \cdot \theta_{st}} \dots\dots(11)$$

Fig. 4, 5 の解析解では、 $\theta_{st} = 0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $D_s = 9.9 \times 10^{-4} \text{ (cm}^2/\text{min)}$ を用いた。数値解は蒸発日数に伴って次第に定常解析解に近似している。数値解と解析解が土壌面より深い領域で若干異なっているのは、(1)解析解の条件で設定した θ_{st} の値は一定でなく土壌カラムの深い領域では増加していること、(2)解析解では地表面のC/Ci比がCmaxであり土壌中のC/Ci比の値が増加しないとしていること、等が考えられる。しかし両者は比較的良好に適合しているため、(1)~(9)式で設定した数値モデルの解は、蒸発日数が大きくなり土壌中の塩類動態が小さくなった定常状態において、(11)式の解析解によって表わすことができると考えられる。

次に、土壌面蒸発量Eが $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ ($2.16 \times 10^{-2} \text{ cm/day}$) の場合におけるC/Ci比分布の経日変化をFig. 6 に示す。この条件下においても、Fig. 4, 5 と同様なC/Ci比パターンが生じ、蒸発日数に伴って定常解析解 (θ_{st} と D_s の値はFig. 4, 5 と同じ) に近づいている。Eが小さいFig. 4, 5 場合に比べると、C/Ci比がCmaxに達する蒸発日数が短くなり、また土壌面から深さ方向への減少程度は小さくなっている。すなわち、地表面においてC/Ci比が飽和値に速く達し、NaClが結晶化し始めるので、土壌面蒸発量が多いほど地表面における結晶NaCl量が多くなる

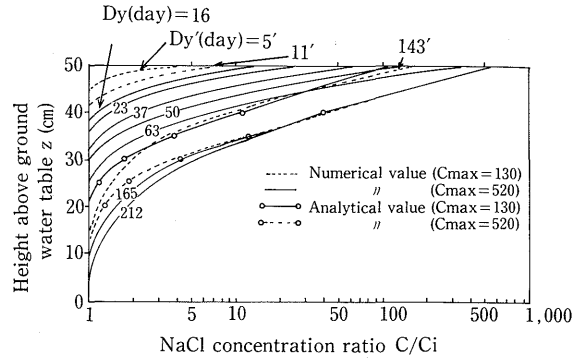


Fig. 6 Relationship between NaCl concentration ratio C/Ci and evaporation day Dy, Dy' from dune sand column under condition of NaCl saturation concentration ratio Cmax = 130, Cmax = 520 and of evaporation rate E = $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ (Dy', Dy Evaporation day at Cmax = 130, Cmax = 520, respectively).

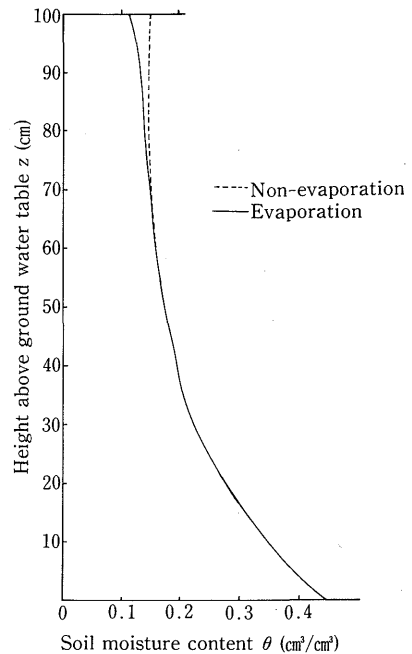


Fig. 7 Distribution of soil moisture content above ground water table under conditions of a height of soil column L = 100cm and of evaporation rate E = $2 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ from sandy soil column.

ことが推定される。

3. マサ土における塩類動態

砂丘砂の場合と同様にして、マサ土の土壌カラムにおける C/Ci 比分布の数値計算を行った。このうち、 $L=100\text{cm}$, $\theta n=0.16\text{cm}^3/\text{cm}^3$, $E=2 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{min}$ ($2.88 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{day}$) の条件下における水分量分布を Fig. 7 に、NaCl の C/Ci 比分布を Fig. 8 に示す。また Fig. 8 には、 $C_{\text{max}}=130$ および $C_{\text{max}}=520$ の C/Ci 比パターンと定常解析解 ($\theta_{\text{st}}=0.125\text{cm}^3/\text{cm}^3$, $D_s=9.9 \times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{min}$) を示している。

マサ土の水分量分布は土壌カラム全体において比較的高水分量を示している。マサ土の場合蒸発に伴う土壌面付近の水分減少量が、定常状態において砂丘砂の場合より大きくなる傾向を示した。

NaCl の濃度比分布は、 $C_{\text{max}}=130$ と $C_{\text{max}}=520$ において、砂丘砂の場合と同様な C/Ci 比パターンを示し、蒸発日数に伴って定常状態に近づいている。しかし、C/Ci 比の値は砂丘砂に比べて深さ方向での減少程度が小さく、深い領域でも比較的大きい。ま

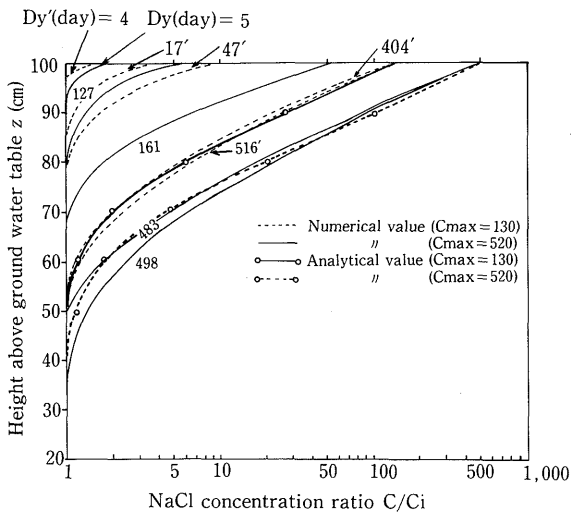


Fig. 8 Relationship between NaCl concentration ratio C/Ci and evaporation day Dy, Dy' from sandy loam column under conditions of NaCl saturation ratio $C_{\text{max}}=130$, $C_{\text{max}}=520$ and evaporation rate $E=2 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{min}$ from sandy loam column (Dy', Dy : Evaporation day at $C_{\text{max}}=130$, $C_{\text{max}}=520$, respectively).

た砂丘砂の場合より E が大きいにもかかわらず、C/Ci 比パターンの発達速度は全層において緩慢である。これは、塩類のフラックス $vc = -D_s \cdot \partial c / \partial z + E \cdot C / \theta$ において、砂丘砂の場合より、分散の項 $E \cdot C / \theta$ および D_s の値が小さいためと推定される。従ってマサ土の場合、地表面の C/Ci 比が飽和値に達し NaCl が結晶化し始める時間が遅れてくる。

4. 蒸発日数と塩類集積

砂丘砂の土壌カラムにおいて、土壌カラム高 L と土壌面蒸発量 E を二三変化させた場合の蒸発日数と NaCl 濃度比の関係を Table 1 に示す。ここで、表中の値は各蒸発日数における一つの C/Ci 比パターンから、地表面における C/Ci 比、深さ 10cm の C/Ci 比、土壌カラム中に保留される総 NaCl 比量 ($\int_0^L \theta(z) \cdot$

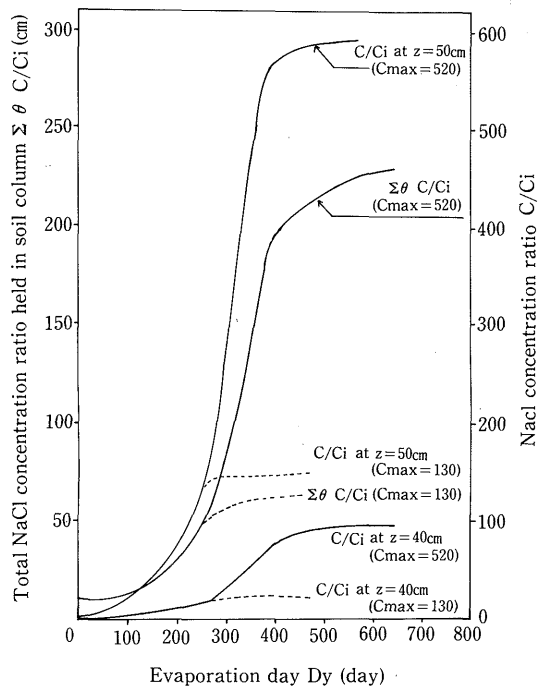


Fig. 9 Relationship between evaporation day Dy and total NaCl concentration ratio held with soil column of NaCl concentration ratio C/Ci under conditions of a height of soil column $L=50\text{cm}$ and evaporation rate $E=1 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{min}$ from dune sand column (C_{max} : NaCl saturation concentration ratio at soil surface, z : height from ground water table).

Table 1. Relationship between evaporation from soil surface and NaCl concentration profile in dune sand column

Computed condition (L, Cmax, E)	Evapo- ration day Dy	NaCl concentration ratio C/Ci			Total NaCl $\Sigma \theta$ C/Ci	Soil moisture content	
		at soil surface	at 2cm depth	at 10cm depth		at soil surface	Total $\Sigma \theta$ cm
L=10cm, Cmax=130	day					cm ³ /cm ³	cm
E=1×10 ⁻⁵ cm/min	205	1.4	1.3	1.2*	3.9	0.31	3.3
E=5×10 ⁻⁵ "	194	6.4	4.5	2.6*	9.8	"	"
E=1×10 ⁻⁴ "	78	98.0	45.1	20.8*	80.3	"	"
		103	140.8	67.6	23.2*	121.0	"
E=5×10 ⁻⁴ "	6	130.0	33.7	5.0*	65.6	"	"
L=30cm, Cmax=520	1	63.8	6.9	1.0	16.9	0.11	7.7
E=1×10 ⁻⁴ cm/min		2	548.8	59.6	1.0	90.5	"
L=50cm, Cmax=520	256	145.6	93.9	17.4	51.3	0.057	9.0
E=1×10 ⁻⁵ cm/min		384	557.0	359.3	70.8	180.0	"
E=1.5×10 ⁻⁵ "	47	137.9	62.12	3.7	29.8	0.055	"
		162	754.4	337.9	41.5	150.6	"
L=100cm, Cmax=520	51	112.2	49.2	3.6	23.0	0.036	11.4
E=1×10 ⁻⁵ cm/min		94	810.3	313.8	24.2	84.2	0.033

L : Soil column height, E : Evaporation from soil surface, Cmax : NaCl saturation concentration ratio at soil surface, $\Sigma \theta$ C/Ci : Total NaCl concentration ratio held in soil column $\int_0^L \theta C/Cidz$, $\Sigma \theta$: Total soil moisture content held in soil column $\int_0^L \theta dz$, * : NaCl concentration ratio at 5cm-depth.

C(z)/Cidz) の値を示した。また、地表面の C/Ci 比の値が Cmax 以上を示す場合、Cmax より大きい数値は結晶化する NaCl 比量に相当し、この量を含めた総 NaCl 比量を求めている。これらの結果のうち、L=50cm, E=1×10⁻⁵cm/min における土壌面 (z=50cm) の C/Ci 比、深さ 10cm (z=40cm) の C/Ci 比および総 NaCl 比量と蒸発日数との関係を Fig. 9 に示す。

砂丘砂の土壤カラムにおいては、L が同じ場合でも、E が増加すると地表面付近の C/Ci 比が急増する。また、L に伴って表層付近の水分量が大きく減少するので、C/Ci 比のパターンが異なってくる。例えば、L=10cm で E=1×10⁻⁴cm/min の小さい場合、C/Ci が飽和値 130 に達するのに蒸発日数 100 日以上要するが、L=100cm においては E が更に小さく 1×10⁻⁵cm/min で飽和値 130 に達するのは、蒸発日数が 50~60 日で可能であった。Fig. 9 から明らかなように、飽和値

が 520 から 130 (供給水の NaCl 濃度が 500mg/l から 2,000mg/l) になると、地表面において飽和値に達する日数が当然少なくなる。

次に、マサ土の土壤カラムにおいて二三の L, E 条件下で各蒸発日数と地表面の C/Ci 比、深さ 10cm の C/Ci 比および総 NaCl 比量との関係を Table 2 に、またこのうち、L=100cm, E=2×10⁻⁵cm/min における地表面 (z=100cm) の C/Ci 比、深さ 10cm (z=90cm) の C/Ci 比および総 NaCl 比量と蒸発日数との関係を Fig. 10 に示す。マサ土においては、表層水分量が大きくなるので、同じ L の砂丘砂の場合より定常蒸発量が大きい。しかし前述したように、水分量が大きいと C/Ci の増加速度が低下するので、砂丘砂の場合より飽和値に達する日数が長くなっている。E=2×10⁻⁵cm/min の場合、L=50cm では 900 日程度でも飽和値がみられなかったが、L=100cm では Cmax=130 の場合 300 日程度、Cmax=520 の場合 400 日程度要

Table 2. Relationship between evaporation from soil surface and NaCl concentration profile in sandy loam column

Computed condition (L, Cmax, E)	Evapo- ration day Dy	NaCl concentration ratio C/Ci			Total NaCl $\Sigma \theta C/Ci$	Soil moisture content	
		at soil surface	at 2cm depth	at 10cm depth		at soil surface	Total $\Sigma \theta$
L=40cm, Cmax=130 E=2.5×10 ⁻⁴ cm/min	day					cm ³ /cm ³	cm
E=3×10 ⁻⁴ "	{ 1	4,088	5.0	1.0	413.1	0.19	11.5
	{ 9	4,707	13.1	"	480.3	"	"
E=3×10 ⁻⁴ "	{ 1	4,648	3.2	"	462.7	"	"
	{ 9	4,965	7.2	"	497.8	"	"
L=50cm, Cmax=130 E=1×10 ⁻⁵ cm/min	{ 155	2.4	2.1	1.5	15.9	0.18	13.5
E=1.5×10 ⁻⁵ "	{ 185	2.5	2.3	1.6	16.3	"	"
	{ 154	3.6	3.0	1.7	17.3	"	"
E=2×10 ⁻⁵ "	{ 152	5.4	4.3	2.0	19.1	"	"
	{ 899	30.3	23.9	9.7	61.7	"	"
L=100cm, Cmax=130 E=1×10 ⁻⁵ cm/min	{ 54	2.5	2.1	1.4	22.7	0.13	20.8
E=2×10 ⁻⁵ "	{ 145	3.7	3.2	1.9	24.2	"	"
	{ 170	59.0	38.3	7.7	53.7	0.11	20.6
E=3×10 ⁻⁵ "	{ 401	149.5	96.9	25.8	121.4	"	"
	{ 30	115.1	39.6	2.0	45.2	0.09	20.4
L=150cm, Cmax=520 E=0.8×10 ⁻⁵ cm/min	{ 146	6.0	4.5	2.8	33.6	0.10	26.7
E=1.0×10 ⁻⁵ "	{ 990	70.3	51.4	28.4	98.5	0.09	"
	{ 63	4.8	3.4	1.7	32.3	0.01	26.9
E=1.0×10 ⁻⁵ "	{ 215	63.9	31.7	10.3	53.1	0.06	26.3

L : Soil column height, E : Evaporation from soil surface, Cmax : NaCl saturation concentration ratio at soil surface, $\Sigma \theta C/Ci$: Total NaCl concentration ratio held in soil column $\int_0^L \theta Cdz/Ci$, $\Sigma \theta$: Total soil moisture content held in soil column $\int_0^L \theta dz$, * : NaCl concentration ratio at 5cm-depth.

した。L=150cmでEが0.8×10⁻⁵cm/minの場合には蒸発日数990日でも飽和値がみられず地表面のC/Ci比が70程度の低い値を示している。

摘 要

本研究は、乾燥地のwater logging現象における土壌水の動態と塩類の集積機構の解明を目的としている。前報では、砂丘砂とマサ土（砂壤土）の土壌カラムを地下水位一定の条件下におき、土壌カラムからの蒸発と地下水面上の土壌水の動態について基礎的検討を行った。本報では、地下水がNaClを有する条件下で、前報と同じ種類の土壌カラムを対象として数値モデルを設定し、主に数値計算法を用いて、

地下水面上の土壌中におけるNaClの動態解析を行った。

1. 計算条件として砂丘砂とマサ土のK- θ 曲線、D- θ 曲線、NaClのDs- θ 曲線を主に用いた。また地下水のNaCl濃度は、500mg/lと2,000mg/lの場合を対象とした。

2. 砂丘砂およびマサ土において、NaCl濃度は地表面において増大し土壌面から深さに伴い急減する分布パターンを示した。また蒸発日数に伴って、地表面のNaCl濃度が飽和値に達した後、NaCl濃度分布は定常解析解に近似する傾向を示した。

3. NaCl濃度分布の形状と形成速度は、土壌面蒸発量、土壌カラム高（土壌水分量）、地表面の飽和値、

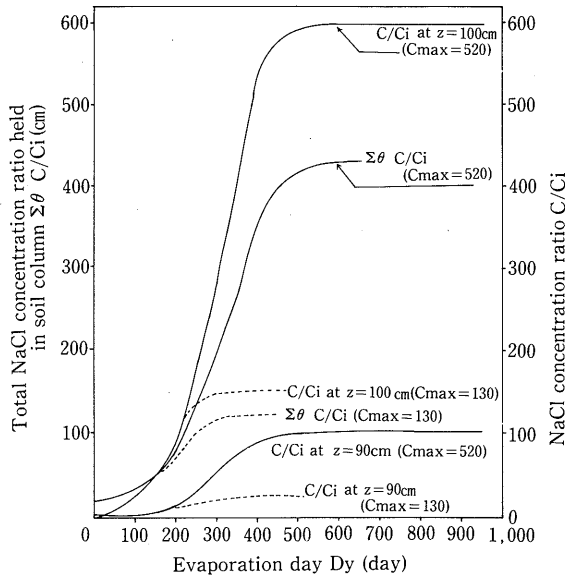


Fig. 10 Relationship between evaporation day D_y and total NaCl concentration ratio C/C_i under conditions of a height of soil column $L=100\text{cm}$ and evaporation rate $E=2 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ from sandy loam column (C_{max} : NaCl saturation concentration ratio at soil surface, z : height from ground water table).

土性等によって大きく左右された。

4. 砂丘砂とマサ土のNaCl濃度分布と土壌面蒸発量の関係を検討した結果、マサ土より砂丘砂の場合が早く飽和値に達し、地表面にNaClの結晶量が多く生ずることが推定された。

あ と が き

乾燥地の高地下水位地帯の作物圃場条件下では、地下水面上の塩類集積量が主に地下水位の高さ、地下水の塩類濃度、土壌面蒸発量、および植物の蒸散量に左右されることが考えられる。前述したように、地下水面より水が上昇移動する場合移動速度に伴って塩類の動態が生ずるが、土壌面付近では水の消費が行われるので塩類だけがとり残されることになる。この結果土壌中の塩類濃度分布は、土壌面付近で著しく大きくなり深さに伴って急減する一つの塩類濃度プロファイル型を形成する。また、蒸発日数に伴っ

て土壌面付近の塩類濃度が飽和値以上になると、塩類が結晶化し塩類の結晶が集積しはじめることが本研究からも推測された。

一方、地下水面上におけるこのような塩類濃度プロファイル型のもとでは、塩類濃度勾配によって土壌面から深さ方向に塩類の下方移動が生じる。すなわち高塩類濃度域が土壌面から深さ方向に発達し、ひいては地下水の塩類化を増加させることが考えられる。これらの要因を考慮して、塩類動態の数値モデルを設定することも必要である。

ここでは、water logging現象の解明に必要な数多くの要因のうち二三の限られた条件下で数値モデルを設定し、シミュレーション手法を適用した。今後、圃場条件に近い要因をできるだけ考慮して数値モデルを構成すると同時に、圃場実験データを収集して計算結果の評価を行うことが重要な課題である。

引用文献

- 1) Bresler, E. 1975. Two-dimensional transport of solutes during nonsteady infiltration from a trickle source. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 604-613.
- 2) 長智男・矢野友久・神近牧男・松本聡・山本太平. 1977. 中近東乾燥地域の農業開発にともなうカンガイ方式と水管理に関する調査研究(1). 鳥取大学砂丘研究施設.
- 3) Horst Klengel. 1980. 古代バビロニアの歴史—ハンムラビ王とその社会—, 江上波夫・五味亮訳・山川出版: 14-24.
- 4) 神近牧男・山本太平. 1986. 中国毛鳥素砂漠における自然環境について—二, 三の気象・土壌特性—. 鳥取大学砂丘研究所報告. 25: 27-35.
- 5) 山本太平. 1981. 地下水位一定条件下の土壌カラム中における土壌水と塩類の動態解析. ペトロジスト. 25(2): 65-73.
- 6) 山本太平. 1983. ドリップ灌漑法による水管理—植生条件下における土壌塩類動態の一次元解析—, 乾燥地域における農地の塩分の挙動と水管理. 科学研究費試験研究成果報告書(小谷佳人): 48-62.
- 7) 山本太平・小谷佳人. 1983. 高温乾燥条件下に

- おける土壌面蒸発—地下水位一定条件下の土壌カラムに関して—。昭和58年度農業土木学会講演要旨。：158—159。
- 8) 山本太平。1986。地下水位一定の土壌カラムにおける上方浸潤と土壌面蒸発の非定常解析。鳥取大学砂丘研究所報告25：19—26。
- 9) 山本太平・田中明。1987。点滴法による植生条件下における土壌塩類動態の一次元解析。農土論集127：165—173。
- 10) 田中明・山本太平。1987。地下水位一定の土壌カラムからの蒸発に伴う水と塩の動態。農土論集（投稿中）。