

II-12

蒸発に伴う溶質の蓄積とSoret効果

飛鳥建設（株） 正員 高野新吾
 福井大学工学部 正員 福原輝幸
 （株）石黒建設 松浦弘泰

1. はじめに 著者らは今までに蒸発に伴う物質の移動と蓄積に関して系統的に実験を行ってきた。その結果、濃縮現象は地表が毛管体内にある場合には地表付近で、乾燥帯が毛管帯上に存在する場合には毛管帯上縁で観察され、濃縮の速度は蒸発速度に依存することが判った。¹⁾ しかしながら、未解決の問題もたくさんあり、その中の2つについて本研究で取り上げることにした。一つは物質の輸送方程式では表し難い蒸発に伴う濃縮と蓄積、特に、乾燥帯に含まれる蓄積量をいかに評価するかである。もう一つは地表付近で起こる強温度、強濃度勾配により、Soret効果（温度勾配に起因する物質輸送効果）を考慮する必要があるかどうかである。特に、後者は物質輸送方程式に熱および水分輸送方程式を連成した Onsager 方程式を解かなければならないのか否かという点に結び付くために、解析上重要な検討事項である。

本研究は上述した点を考慮に入れて、蓄積の評価および Soret 効果について検討を行なった。

2. 実験装置と実験結果 実験装置の概要を図-1 に示す。実験には0.1×0.1×0.6mの直方体カラムを使用し、放熱ランプと地下水位を変えて溶質（塩）の濃度を求めた。地下水位は蒸発量に等しい塩水（0.5%）を補給することで一定に保たれた。濃度は所定の時間経過後、一定間隔で水平に切り取られた試料塊（豊浦標準砂）に対して、塩分濃度計（ソルメイト-100）を用いて測定され、水分量も別途測定された。温度計測には熱伝対が使用され、地表から約0.1m間隔で埋め込まれた。実験ケースおよび実験条件は表-1 に示す通りであり、4ケースとも最長10日間の蒸発実験を行なった。

3. 溶質の蓄積に関する検討 蓄積現象の説明のためには地下水位が低く地表温度の高いCase L-2が都合が良い。まず、温度Tおよび水分分布の経時変化を図-2と図-3に示す。特に、水分分布に注目すると、時間と共にZ=0.1m 付近の体積含水率θが増大することに気付く。これは蒸発により励起された液状水の上方移動によって、毛管フリンジが上昇したためと考えられる。図-4は濃度Cの鉛直方向分布の経時変化を表す。Cは次式で定義される。

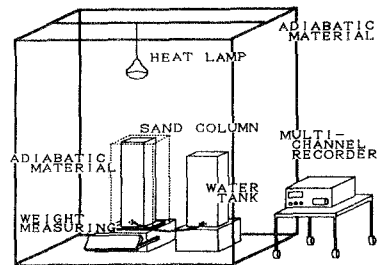


図-1 実験装置の概要

$C = S_g / (L_g + S_g) \times 100 (\%)$ (1) (S_g : 溶質重量, L_g : 溶媒重量) 同図より、毛管フリンジ付近で濃縮による濃度増大が認められる。通常、塩分は吸着を無視するために、式(1)に従う限り、たとえ蓄積が毛管フリンジ上の乾燥帯で起こっているとしても蓄積を識別することは難しい。なぜなら、蓄積量そのものおよび L_g もかなり微量になって、式(1)の分子・分母が共に相当小さくなるために、水分量のわずかな違

表-1 実験条件

	CASE H-1	CASE H-2	CASE L-1	CASE L-2
標準砂の密度×10 ⁻³ (kg/m ³)	2.642	2.642	2.642	2.642
NaCl濃度 (%)	0.5	0.5	0.5	0.5
実験継続時間 (Day)	1 - 10	1 - 10	10	1 - 10
地下水位 (m)	-0.15	-0.15	-0.50	-0.50
開隙率 (-)	0.398-0.401	0.398-0.408	0.406	0.398-0.404
蒸発量×10 ⁴ (m ³)	4.14	27.30	0.19	0.50
蒸発率×10 ⁷ (m/sec)	0.479	3.160	0.022	0.058
ランプ高さ (m)	0.47	0.30	0.47	0.30
気温 (℃)	17.5-18.0	17.0-18.0	17.0-18.0	17.0-19.0
湿度 (%)	75.0-80.0	75.0-78.0	75.0-80.0	75.0-80.8
初期温度 (℃)	14.4-16.4	15.1-16.7	15.0-16.0	15.0-16.8
地表温度 (℃)	30	60	30	60
地表付近温度 (℃)	24.5	47.4	27.0	56.0

いでも濃度 C は大きく変わる。
すなわち、低水分量での C は実験精度に大きく依存する。しかし現実には蓄積量が問題となるから、 C に代わる別の表示が必要となる。そのための一つの評価法として次式が考えられる。
 $S = S_g/W$ (2) (W : 試料重量)
 S は溶質重量比と呼ぶことにする。図-5 は S の鉛直分布の経時変化である。 S は地表に向かって減少することが判る。(一方地表が毛管体内にあると、 S は地表に向かって増大する。) 図中矢印で示す位置 $Z = -6\text{cm}$ で10日後に蓄積が認められる。ただし塩分量としてはかなり小さい。

4. Soret効果に関する検討

Soret 効果を考慮した蒸発過程の物質輸送方程式は、次のようになる。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} [D_h \theta (\frac{\partial C}{\partial Z} - S_k C \frac{\partial \theta}{\partial Z})] - U \frac{\partial C}{\partial Z} + CE \quad (3)$$

θ と T の時間変化率が無視できるとされる時点(蒸発開始後3日)の $C(Z)$ を初期値として、式(3)をCrank-Nicolson法により差分計算した。Soret効果については、funicular状態の水分量で考える必要があるから、CASE H-2について解析を試みた。その結果が図-6であり、10日後でもSoret効果は無視しえる程度に小さい。ただし、 S_k の値は実際には求め難いため、GrootとMazur²⁾に従って $10^{-5} \sim 10^{-3}$ の範囲で採用された。式(3)中の U は蒸発速度を用い、蒸発率 E と分散係数 D_h は佐藤らの理論¹⁾と実験³⁾から、それぞれ決定された。

5. 結論 常温下の蒸発では Soret効果は無視できることが判った。しかしながら蒸発と深く関係する蓄積の評価はなお問題を含んでおり、今後実験を重ねていく予定である。最後に本研究は平成元年度科研費(課題番号: 01750501)の補助を受けた。改めて謝意を表します。

参考文献

- (1) K. Sato, T. Fukuhara and S. Bories, Dynamic Analysis of Heat Mass and Solute Transfer due to Evaporation from Soil Surface, Heat Transfer, 1990
- (2) S.R.de Groot and P. Mazur, Non-Equilibrium Thermodynamics, Dover Publication, 1962
- (3) K. Sato, Y. Sasaki and T. Fukuhara, Experimental Study on Diffusion and Dispersion Coefficients of Solute in Unsaturated Flow, 5th A.P.D, Seoul, 1986

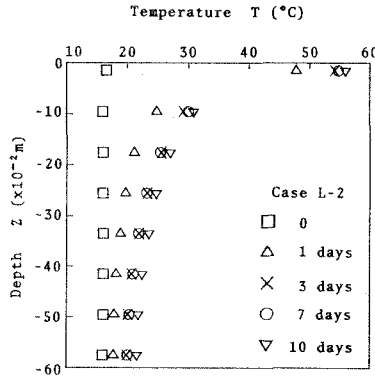


図-2 温度分布

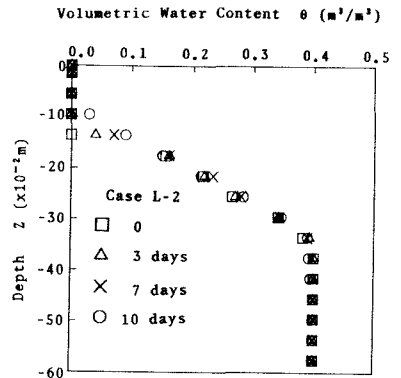


図-3 水分分布

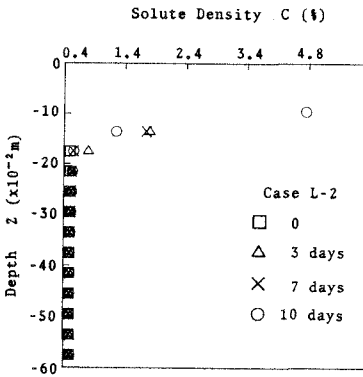


図-4 濃度分布

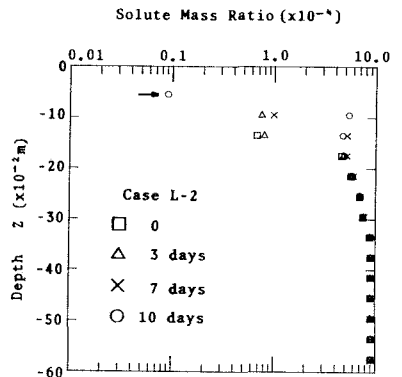


図-5 溶質重量比分布

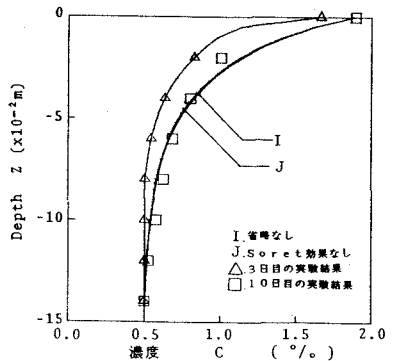


図-6 Soret効果の検討 ($S_k = 1 \times 10^{-3}$)