

地表付近の不飽和帯における溶質の鉛直移動に関する研究

Study on Vertical Migration of Solute in Unsaturated Zone near Soil Surface

埼玉大学工学部 佐藤邦明 K. Sato

福井大学工学部 福原輝幸 T. Fukuhara

埼玉大学工学部○宗像雅広 M. Munakata

” 佐瀬浩一 K. Sase

1 はじめに

太陽ふく射や風による地表付近の土層表面からの蒸発現象は水文諸過程の中でも基本的に重要なものの一つである。これは地上の水文気象現象と浅層の地下水の接点におけるものであり、浅い地表近傍の土じょう帯、不飽和帯からふく射熱や風で水分が鉛直上方に毛管流動、いわゆる不飽和浸透流によって移動して蒸発するものである。この種の現象の特色は蒸発に伴って土層中の水分が移動するのみならず、蒸発熱や伝導を含む伝熱現象と表裏一体となっている点にある。この点は、Philip & de Vries,¹⁾ de Vries,²⁾ らの理論に端を発して、いく人かの著者によって研究が進められた。^{3),4),5),6)}しかし、最近になって地表下の浅い地層で蒸発に伴い地下水中の溶質、汚染源が濃縮・蓄積される問題が土じょう汚染、低レベル放射性廃棄物の浅層処分等に関与して注目されるに至っている。この問題は本質的に熱を伴う不飽和浸透流による溶質移行に帰す。これらに関する研究成果の蓄積は少ないが、井上⁷⁾らによるものが注目される。

本研究はこの事に着目して風と熱によって砂層カラム中を溶質がどのように蓄積されるか実験的に検討したものであり、de Vriesの理論を中心に解析も試みた。今回の研究を通して十分とはいえないまでも基本的にいくつか興味のもてる結果を得たのでまとめて報告するものである。

2 実験装置と実験の方法

蒸発による地下水溶質の毛管流動濃縮プロセスを実験的に知るため、図-1に示すような実験装置を用いた。実験的に計測したい項目は、(1)地表風量、風速と温度、(2)砂層カラム内の温度、含水率、及び溶質濃度の各分布と経時変化、(3)蒸発量、である。従って、実験装置は図-1中の名称に対応して、直径0.25 m、長さ1.8 mの透明風洞の一方に加温送風機を備えた一樣流風洞で地表の乾燥条件とする。その風洞内には整流格子がおかれている。風洞のほぼ中央に直径0.08 m、長さ0.8 mの透明(アクリル樹脂)カラムが2本鉛直に風洞底板に取付けられており、それら2本のカラムの外周をおおう形で直径0.1 m、長さ0.8 mの塩化ビニール製の貯水タンクが置かれている。この貯水タンクには溶質(NaCl液、濃度3%)が貯めてあり、タンクには水位計が取付けられており、蒸発量を計

ることができ、減水位は定期的に供給する。試料カラムには温度計(タカラサーミスター、K700)センサーが3本試料表面下0.05 m間隔でそう入されており、試料カラムにはは線状に3 mmの試料サンプリング孔が45個あけられている。サンプリング試料(3 g程度)は50ccのビーカー水に混合されて、導電率計(KENEK; MK-106, 精度: 1/1000%)によって濃度が測られる。サンプリング試料と同量が元のサンプリング孔にもどされる。同様に含水率はサンプリングされた試料の重量計量

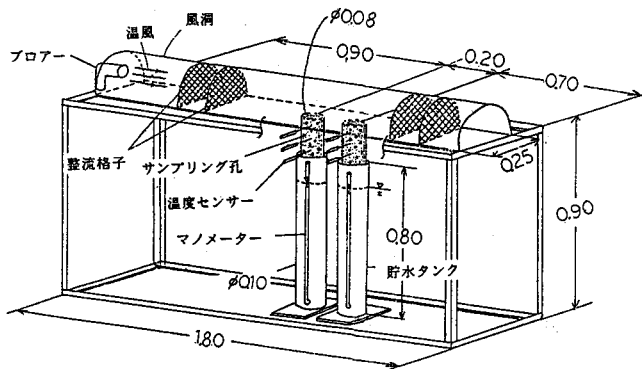


図-1 実験装置の概略

によって決められる。すべての実験は21℃の恒温恒湿室で行なわれた。実験期間が10日程度に及ぶため、実験室の温度管理が重要である。さらに、風洞内の風速は風量から平均風速を用いる。実験に使用した試料は標準砂（平均粒径＝0.03 mm）であり、飽和透水係数 1.06×10^{-4} m/s、毛管上昇高は0.25 mであった。また標準砂の熱伝導率は飽和時で1.465 W/mK（乾燥時0.209 W/mK）であり、土の比熱は 7.4×10^2 J/kgK、土の密度は 1.56 kg/m^3 であった。

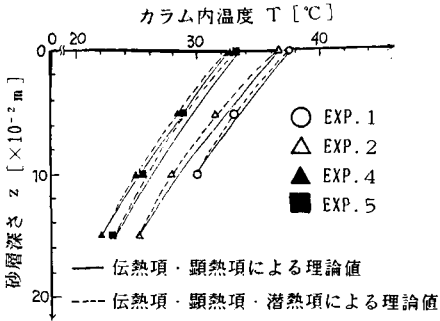
表－1 に示したような条件に基づき実験を5 ケース行った。条件は大別して風速の大きい場合と小さい場合であり、それぞれ風温は一定に保ち風速による蒸発量の変化をとらえることにし、また各場合において地表面から地下水面までの高さを変え、地下水面位置における蒸発量の変化及びそれが溶質の移動にどう影響するかを調べた。特にExp.3のように表面から地下水面までの深さが毛管上昇高を超えるような場合についても実験を行い、溶質移動現象における毛管帯の役割を明確にすることにした。

3 実験結果と考察

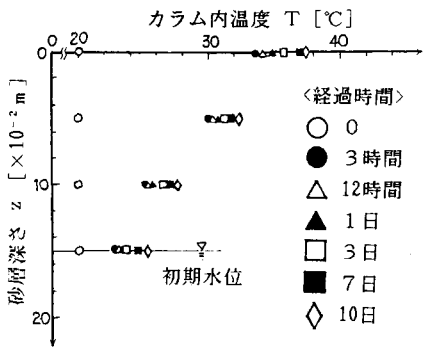
実験結果は砂層カラム中の温度、含水率、濃度および蒸発量について得られるが、その結果について順を追って説明していくことにする。まず、図－2 はExp.2におけるカラム上端よりの深さ z とカラム内温度 T との関係を経時的に表わしたものである。これによると表面温度は時間と共に上昇し早い段階で定常状態に近づいているのが分かる。図－3 は深さ z とカラム内温度が定常となった時の分布であり、不飽和帯において温度はほぼ直線の分布をしている。また表面においては潜熱の影響により風温との差が大きい。図－4 は表面から地下水面までの深さが毛管上昇高より大きい場合のカラム内温度の経時変化である。カラム表面に乾燥層が発達しているため、表面での潜熱による温度低下がなく温度分布は大きな曲率を示している。図－5 はカラム内の体積含水率の経時変化と深さの関係であり、表面直下において初期の段階で急激に変化するもののその後ゆるやかに

表－1 実験ケースと条件

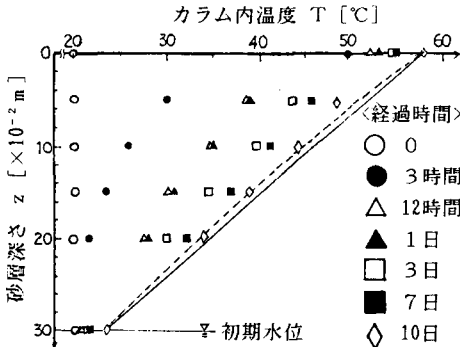
実験ケース	試料砂	地下水位	風速	風温	単位体積重量
EXP. 1	標準砂 (0.03mm)	-0.10 m	2.09 m/s	71.4℃	1.56 kg/m ³
EXP. 2		-0.15 m			1.55 kg/cm ³
EXP. 3		-0.30 m			1.56 kg/m ³
EXP. 4		-0.15 m	1.20 m/s	55.2℃	1.58 kg/m ³
EXP. 5		-0.20 m			1.55 kg/m ³



図－3 最終状態のカラム内温度分布



図－2 カラム内温度の経時変化 (Exp.2)



図－4 カラム内温度の経時変化 (Exp.3)

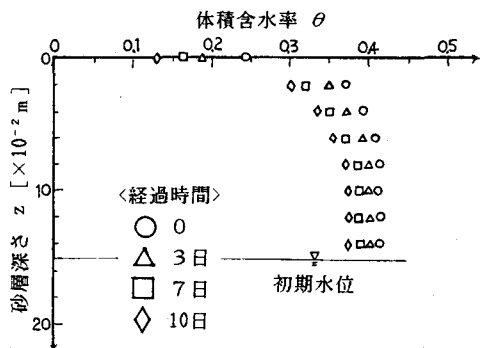


図-5 含水率の経時変化 (Exp.2)

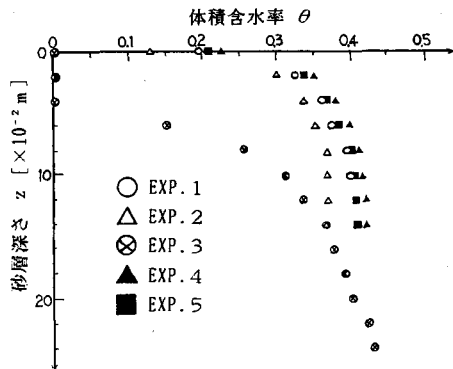


図-6 最終状態の含水率分布

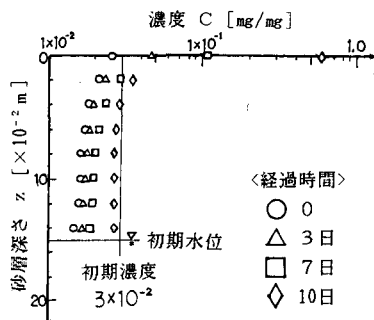


図-7 カラム内濃度の経時変化 (Exp.2)

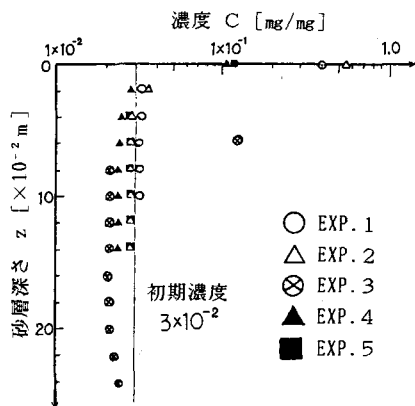


図-8 カラム内濃度の最終状態

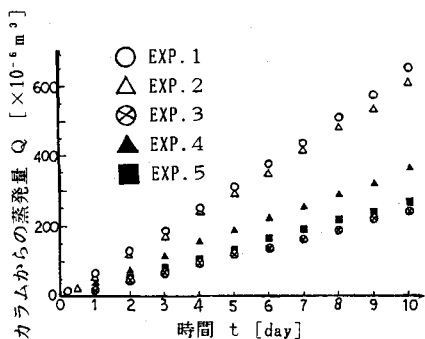


図-9 蒸発量の経時変化

全体的に減少して10日程度で定常に至っている。図-6は定常状態での含水率の最終分布を示しているが、風速の大きい方が低含水率側に位置している。また、Exp.3における含水率の変化する深さは丁度毛管帯の上縁であり、この付近で温度が急激に変化しているのも興味深い。図-7は、表面からの深さと濃度の関係を経時的に表わしたものであり、時間の経過と共に表面での濃度が上昇しているのが分かる。図-8は10日経過後の各実験における濃度の鉛直分布を表わしたものであり、風速が大きく、温度が高い程表面付近での濃度が増加している。しかし、地下水面の深さによる違いは明瞭でない。また、Exp.3の濃度分布がカラム内で不連続となっているのは、塩分が液状水と共に移動するため、乾燥層内での水分移動が水蒸気によるためである。従って、表層付近での蓄積は見られずカラム内の毛管帯上縁付近に蓄積が見られる。図-9は、カラムからの蒸発量と時間の関係を表わしており、風速、風温が高い方が蒸発量も多く直線的に変化している。上述した一連の実験結果から温風による地下水の溶質移動が毛管帯の位置に大きく支配されていることが明確にされたものと思う。

4 支配方程式と理論解析

(1) 水分移動に関する基礎式

Philip & de Vries(1959)¹⁾ は不飽和多孔媒体中の熱を伴う水分移動を気相と液相とに分けて移動則を与え、質量保存則を定式化し基礎式を得た。それによると、水蒸気と液状水のフラックスは温度勾配と水分勾配に比例すると考えそれぞれ次式のようになる。

$$\frac{q_v}{\rho_v} = -D_{T_v} \nabla T - D_{\theta_v} \nabla \theta, \quad (1) \quad \frac{q_l}{\rho_l} = -D_{T_l} \nabla T - D_{\theta_l} \nabla \theta - k i \quad (2)$$

ここに、 q_v, q_l : それぞれ水蒸気、液状水のフラックス密度、 ρ_v, ρ_l : それぞれ水蒸気、液状水の密度、 T : 温度、 θ : 体積含水率、 D_{T_v} : 熱的水蒸気拡散係数、 D_{θ_v} : 等温水蒸気拡散係数、 D_{T_l} : 熱的液状水拡散係数、 D_{θ_l} : 等温液状水拡散係数、 k : 不飽和透水係数、 i : 鉛直方向の単位ベクトルである。

また、水分の相変化を考慮した質量保存則を各相について考えると

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = -\nabla \left(\frac{q_v}{\rho_v} \right) + E, \quad (3) \quad \frac{\partial \theta_l}{\partial t} = -\nabla \left(\frac{q_l}{\rho_l} \right) - E, \quad (4)$$

となり、ここに、 θ_v, θ_l : それぞれ水蒸気、液状水の体積含水率、 t : 時間、 E : 蒸発率である。

ついで、式(1)~(4)より次式を得る。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (D_T \nabla T) + \nabla (D_\theta \nabla \theta) + \frac{\partial k}{\partial z}, \quad (5) \quad \left. \begin{aligned} D_T &= D_{T_v} + D_{T_l} \\ D_\theta &= D_{\theta_v} + D_{\theta_l} \\ \theta &= \theta_v + \theta_l \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

ここに、 D_T : 熱的水分拡散係数、 D_θ : 等温水分拡散係数、 z : 鉛直座標である。

(2) 熱移動に関する基礎式

不飽和多孔媒体中の熱移動は de Vries (1958)²⁾ により論じられているが、熱移動と保存の関係を使って基礎方程式を次のように得ることができる。まず、多孔媒体中の熱フラックス密度 (単位時間、単位面積を通過する熱量) q_h は次式で与えられる。

$$q_h = -\lambda \nabla T + L_0 q_v + c_v (T - T_0) q_v + c_l (T - T_0) q_l, \quad (7)$$

ここに、 λ : 見掛けの熱伝導率、 L_0 : 基準温度 T_0 での蒸発熱、 c_v, c_l : それぞれ水蒸気、液状水の比熱であり、式中右辺第1項は熱伝導による寄与、第2項是水蒸気による潜熱輸送のそれ、第3項是水蒸気による顕熱輸送のそれ、第4項は液状水による顕熱輸送の寄与を表わしている。また、単位体積当りの総熱量 Q は、浸漬熱を無視すれば次式のように書ける。

$$Q = \rho_s c_s (1-n) (T - T_0) + L_0 \rho_e \theta_v + c_v \rho_e \theta_v (T - T_0) + c_l \rho_e \theta_l (T - T_0), \quad (8)$$

ここに、 ρ_s : 土の密度、 c_s : 土の比熱、 n : 間隙率であり、また右辺第1項は土の熱量、第2項は水分の相変化による熱量、第3項是水蒸気の熱量、第4項は液状水の熱量を表わす。

一方、熱フラックスの保存則は、

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\nabla q_h, \quad (9)$$

のように与えられるから、式(9)に式(4)、(7)、(8)を代入すると、求める基礎方程式は、

$$c' \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) - (c_v q_v + c_l q_l) \nabla T - L_0 \rho_e E, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} c' &= \rho_s c_s (1-n) + c_v \rho_l \theta_v + c_l \rho_e \theta_l \\ L &= L_0 - (c_l - c_v) (T - T_0) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

となり、式(10)中右辺第1項は伝熱に関する項、第2項は顕熱に関する項、第3項は潜熱に関する項を表わしており、さらに c' は湿った土の体積熱容量を表わしており、 L は温度変化を考慮した潜熱を表わしている。

(3) 溶質移動に関する基礎式

溶質の土粒子への吸着は無く、蒸気相による溶質の移動は液状水による移動に比べ十分小さいものとするならば、溶質の移動は拡散と液状水の流れにより進むため、溶質の移動則と保存則はそれぞれ、

$$q_s = -\theta_e D_h \nabla C + \left(\frac{q_e}{\rho_e}\right) C, \quad (12), \quad \frac{\partial}{\partial t} (\theta_e C) = -\nabla q_s, \quad (13), \quad D_h = D + D_d, \quad (14)$$

となる。ここに、 q_s :溶質のフラックス、 D_h :流体力学的分散係数、 D :機械的分散係数、 D_d :分子拡散係数、 C :濃度である。式(13)に式(14)、(12)を代入すれば、基礎式は次式で表わせる。

$$\theta_e \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla (\theta_e D_h \nabla C) - \left(\frac{q_e}{\rho_e}\right) \nabla C + EC, \quad (15)$$

(4) 温度の理論解析

上述した水分移動、熱移動、溶質移動に関する3つの支配方程式を与えられた初期・境界条件のもとで数値解析によって解くことにより、現象を再現させることも可能ではあるが、今回は温度について定常解を導くことにする。

まず式(10)において、水蒸気による顕熱輸送は液状水の顕熱輸送に比べ十分に小さく、定常状態すなわち $\partial T / \partial t = 0$ であるとするならば、式(10)を鉛直一次元の式でかくと、

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c_e q_e}{c'} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{L \rho_e}{c'} E = 0, \quad (16)$$

となる。ここに $\kappa = \lambda / c'$:熱拡散係数である。式(16)の左辺第1～3項はそれぞれ伝熱、顕熱、潜熱に関する項であり、これを最も簡単な伝熱項だけの場合から順に解くことにする。

① 伝熱項のみの場合:地下水水位が毛管帯内にある場合に注目して基礎式と境界条件は、

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} T = T_s, \quad z = 0 \\ T = T_0, \quad z = l \end{array} \right\}, \quad (17)$$

と表わされ、その解は、

$$T = (T_0 - T_s) z / l + T_s, \quad (18)$$

となる。

② 伝熱項及び顕熱項の場合:定常状態の仮定より q_e はカラム内ではほぼ一定の値をとるとすると、

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \alpha \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \alpha = \frac{c_e q_e}{c'}, \quad (19)$$

と表わされ、①の場合と同様の境界条件において式(19)を解くと、

$$T = \frac{1}{1 - e^{\alpha l}} \{ T_0 (1 - e^{\alpha z}) + T_s (e^{\alpha z} - e^{\alpha l}) \}, \quad (20)$$

となり、 z を鉛直下向きを正としているため、蒸発過程における $q_e < 0$ であるから $\alpha < 0$ となり、 z が大きくなるにつれ $e^{\alpha z}$ は小さくなり図-3に示したように実験値と近い値になる。

③ 伝熱項、顕熱項及び潜熱項を含めた場合:まず、式(16)における左辺第3項について、蒸発率 E は経験的に温度に比例すると考えられるので、

$$L \rho_e E = k_1 (T - T_i) L \rho_e, \quad (21)$$

となるような比例定数 k_1 [$T^{-1} K^{-1}$]を導入する。また、 T_i :初期温度とすれば、式(16)は、

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \alpha \frac{\partial T}{\partial z} - \beta T = -\beta T_i, \quad \alpha = \frac{c e q e}{c'}, \quad \beta = \frac{L \rho e k_1}{c'}, \quad (22)$$

となり、一般解と特殊解を加えて、

$$T = C_1 e^{\zeta z} + C_2 e^{\xi z} + T_i, \quad \frac{\zeta}{\xi} = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 4 \kappa \beta}}{2 \kappa}, \quad (23)$$

と表わせる。同様の境界条件を代入し、 C_1, C_2 の定数を決定すると、

$$T = \frac{1}{e^{\zeta l} - e^{\xi l}} \{ \{ (T_0 - T_i) - e^{\xi l} (T_s - T_i) \} e^{\zeta z} - \{ (T_0 - T_i) - e^{\zeta l} (T_s - T_i) \} e^{\xi z} \} + T_i, \quad (24)$$

となる。

実際の計算においては $L = 4190 \{ 597.3 - 0.559 (T - 273.15) \}$ (J/kg), $\lambda = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda^*) (\theta/n) + \lambda^* (W/\text{mK})$ ($\lambda_{\text{sat}}, \lambda^*$ はそれぞれ飽和時、乾燥時の熱伝導率) を用いて行った。結果は図-3 中に各ケースごとに示してあるが、表面から地下水面までの深さが毛管高さを超える Exp. 3 の場合を除いてほぼ実験値と一致しているが、その精度は潜熱項を考慮した理論値の方が高く、実験値の曲率をよく表わしているといえる。

む す び

蒸発を伴う毛管流動による地下水からの溶質移動現象に関して実験的研究を試みた。その結果いくつか新しい知見を得たものと思われる。それらを要約すると以下のようである。

① 砂カラムの表面下の温度経時変化は数時間で急激に変化し10日程度で定常に至る。また各実験ケースの定常温度分布は風速と境界温度が高いほど高温側に位置し、潜熱の影響を受ける。更に、地下水位が毛管帯より低い場合には毛管带上縁付近で急激な温度勾配が形成される。

② 含水率の鉛直分布は蒸発直後地表面直下で急激に低下し、その後徐々に定常状態に近づいていく。また、表面から水面までの深さが大きい場合には毛管带上縁において含水率が急激に0に向い、蒸気水による水分移動が支配する。

③ 濃度の鉛直分布は表面付近で時間と共に増大し、風速が大きく温度が高い程その傾向は著しい。また、毛管帯より深い場合には毛管带上縁付近に塩分の蓄積がおこる。

④ 蒸発量の経時変化は時間と共に直線的に増加する傾向があり、風速、風温によってその傾きが変わる。

参 考 文 献

- 1) Philip, J.R. and D.A. De Vries : Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 38, 228~232(1957)
- 2) De Vries, D.A.: Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 39, 909~916(1958)
- 3) Fritton, D.D.: Don Kirkham and R.H. Shaw: Soil water evaporation isothermal diffusion and heat water transfer, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34, 183~189, (1970)
- 4) Sato, K., K. Nishibayashi, & K. Sudo : Fundamental study on unsaturated flow with heat transfer in drying process, 5th APD. IAHR, 1986, 357~374
- 5) 佐藤他：地表付近の蒸発過程における熱・水分の移動の解析，第42回年講，1987
- 6) Hanks, R.J., H.R. Gardner and M.L. Faibourn : Evaporation of water from soil as influenced by drying with wind or radiation., Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31, 593~598 (1967)
- 7) 井上他：不飽和土壌カラム内での温度勾配が非吸着性物質の上方移動に及ぼす影響，第42回年講，1987