

京都大学 正員 堀内 将人
 京都大学 正員 井上 頼輝
 京都大学 正員 森 澤 真輔

1. はじめに 従来より降水量よりも蒸発量が多い砂漠地帯では、灌漑用水の中の塩分が表層に蓄積し、植物の生育に悪影響を及ぼすことが問題となっている。一方、降水量が蒸発量を上回るわが国においては、このような現象は問題にならないと考えられてきたが、昭和50年東京都6価クロム鉍汚染事件は、有害物質が鉛直上方へ移動して表層土壌を汚染したと考えざるを得ない現象がわが国においても生じることを明らかにした。鉛直上方へ物質を移動させるメカニズムが何であるかは、まだ解明されておらず、抜本的制御の方策も立っていないといえる。本研究では、有害物質の鉛直上方移動が起こる1つの要因として温度勾配の影響を考慮し、人為的に温度勾配が与えられた場合に対象有害物質として選んだ6価クロムの鉛直上方移動が促進されるか否かを実験的に確認し、かつ移動メカニズムを解明し、その数学モデルを構成することを目的とする。

2. 数学モデルの構成 (1) 温度勾配下の土壌水分移動式 温度勾配下での不飽和水分移動を考える場合、液状水流れとともに水蒸気流れ、熱の流れを把握しなければ、正確に土壌水分流れを把握することはできない。ここでは、水分と熱の移動式を連立させて同時に解く Philip and de Vries⁽¹⁾の熱・水分同時移動理論を、温度勾配下での不飽和水分流れを解析するための基礎理論とする。すなわち、土壌水分移動の基礎式として次式を用いる。

$$\left(1 + \frac{D_{ev}}{\alpha \rho D_{atm}} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{(f-\theta)h\theta}{\rho} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D\theta \nabla \theta) + \nabla(D_T \nabla T) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (1)$$

$$\{C_t + L(f-\theta)h\theta\} \frac{\partial T}{\partial t} + \left[\frac{L \rho D_{ev}}{\alpha \rho D_{atm}} - L \rho \right] \frac{\partial \theta}{\partial t} = \{(\lambda_0 + L \rho D_{ev}) \nabla T\} + L \rho \nabla(D_{ev} \nabla \theta) + \rho C_t \nabla(D_{ev} \nabla \theta + D_{ev} \nabla T) + \rho C_t \{D_{ev} \nabla \theta + D_{ev} \nabla T - K\} \quad (2)$$

(2) 温度勾配下物質収支式 本研究で対象としている有害物質は重金属や放射性核種であり、その大部分は常温常圧下では揮発しない。そこで、有害物質は液状水のみによって運ばれると仮定する。また物質と土壌との間の反応式としてヘンリー型の等温吸着式 $\theta = k_d C$ (a) を採用する。物質移動の基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ (1-f) \rho_s k_d + \theta \} C = \nabla(D_e D \nabla C) + \nabla \{ (D_{ev} \nabla \theta + D_{ev} \nabla T - K) C \} \quad (4)$$

3. 温度勾配下カラム吸い上げ実験 (1) 実験方法 図-1に

示すように、粘土分を殆ど含まない砂を充填した内径5cm高さ24cmのアクリルカラムを垂直に立て、実験台にセットする。つぎに赤外線ランプを点燈し、砂層内の温度分布が定常に達したのを確認した後(約4時間後)カラム下部にセットした水槽にクロム溶液(初期濃度5ppm)をカラムの底約0.75cmが浸るまで供給した。この時間を本実験のスタート時刻とした。一定時間経過後(3, 30, 90日後)カラムを分解し、重量分析により含水率を、原子吸光分析によりクロム濃度を各々約1cmの長さごとに測定した。以上の実験と平行して熱負荷のみを除外した等温条件での吸い上げ実験を実施し、温度勾配下カラム吸い上げ実験の対照実験とした。(2) 結果 図-2~7に温度勾配及び等温吸い上げカラム(3, 30, 90日後)内の水分分布、単位体積土壌中全クロム量分布を示す。

4. 物質、水分、熱同時移動機構 図-2~7よりわかるように、温度勾配がある場合には、等温の場合に比べクロムの鉛直上方への移動がはるかに促進され、また、クロムの蓄積が表層から数cm下層部で著しい。このような現象を解明し、温度勾配下の有害物質の移動機構を明らかにするためには、カラム内の水分分布、温度分布の測定結果を考慮した物質、水分、熱同時移動としての解析が必要である。そこで、特にクロム量、水分、温度

表-1 記号の説明

C	有害物質液中濃度 ppm	C _c	連同多量体の熱容量 cal g ⁻¹ °C ⁻¹
C ₀	液状水に飽和 cal g ⁻¹ °C ⁻¹	C _p	水蒸気比熱 cal g ⁻¹ °C ⁻¹
D	濃度勾配を駆動力とする拡散係数 cm ² sec ⁻¹	D _{atm}	空気中での拡散分子拡散係数 cm ² sec ⁻¹
D _T	= D ₀ + D _{ev} 温度勾配の拡散係数 cm ² sec ⁻¹	D ₀	濃度勾配のみによる拡散係数 cm ² sec ⁻¹
D _{ev}	濃度勾配の蒸気拡散係数 cm ² sec ⁻¹	D _{ev}	濃度勾配の蒸気拡散係数 cm ² sec ⁻¹
h	相対湿度	K	不飽和透水係数 cm sec ⁻¹
h ₀	飽和分配係数 ml g ⁻¹	L	蒸発潜熱 cal g ⁻¹
θ	土壌中の水分量 ppm	T	温度 °C
t	時間 sec	α	工場の放射線についての水蒸気係数
τ	= dρ/dT g cm ⁻¹ °C ⁻¹	θ ₀	液状水の含水率 cm ³ cm ⁻³
θ ₀	液状水の含水率 cm ³ cm ⁻³	λ ₀	熱伝導率 cal cm ⁻¹ sec ⁻¹ °C ⁻¹
ρ	mass flow factor	ρ ₀	水蒸気の密度 g cm ⁻³
ρ ₀	液状水の密度 g cm ⁻³	ρ ₀	液状水の密度 g cm ⁻³

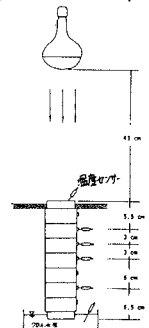


図-1 温度勾配吸い上げ実験装置図

分布の変化が激しい表層から約5cmまでの層についての物質水分、熱それぞれの移動機構の説明を試みたのが図-8である。等温条件では、水蒸気の流れは液状水流れに比べてはるかに小さく無視できるが、温度勾配下では、水蒸気流れが大きく、有害物質の輸送媒体となる液状水流れだけを考慮するのでは、現象を適切にモデル化したとはいえない。そこで、図-8では、水蒸気と液状水の流れを分離し、かつ相互の関係を明確に示すことに主眼を置いた。この図から予想されるクロムのカラム内分布としては、i)表層からの蒸発量に見合った底部からの液状水の吸い上げが起こり、それに対応した量のクロムがカラム砂層内に蓄積する。ii)温度分布、水分分布の変化が激しい表層から約5cmまでは、温度勾配による液状水と水蒸気の相互循環移動が生じ、より一層表面近くでのクロムの蓄積が促進され、逆に水蒸気凝縮域でのクロム量の低下が見られる。という2点が挙げられよう。蒸発率については、別の実験により、温度勾配カラムで $1.0 \times 10^2 \sim 2.3 \times 10^3 \text{ cm/hr}$ 、等温カラムで $3.5 \times 10^2 \sim 4.5 \times 10^3 \text{ cm/hr}$ なる値が実測されており、この値から予想されるカラム内クロムの全量は、実測結果とほぼ一致した。またiiの現象については、図-2,4,6の実測クロム分布から、この仮定が実際の現象をうまく説明し得るものであることがわかる。

5. 水分、温度定常分布下での砂層内クロム分布のシミュレーション

今回の実験では、水分、温度の両分布とも定常に達した後にクロム吸い上げ実験を行ない、かつ土壌水分、温度分布も実測した。したがって、それらの実測分布を関数近似して式(4)に代入し、その式をCrank-Nicholson型の差分近似により離散化して数値的に解き砂層内単位体積土壤中全クロム量分布を計算した。結果を図-9に示す。図を見てわかるように、実測値と計算値は比較的良く似た分布パターンを示しており、このことは今回構成した数学モデルが水分、温度定常分布下での有害物質移動を予測するモデルとして利用できる可能性があることを意味しているといえる。

6. おわりに

今後に残された課題としては、i)昼夜で地表面付近の温度勾配が逆転することの効果の解明 ii)土壌の物理特性、環境条件による蒸発率の変化と、それらが物質移動に及ぼす効果を明らかにする。iii)数学モデルにおける各パラメータのより妥当な値について検討を加える。iv)液状水と水蒸気のマクロな流れを直接実測することにより、土壌水分の挙動をより精密に把握する。等が挙げられる。

参考文献 1. Philip, J.R and de Vries : Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Materials under Temperature Gradients, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 39, No. 2, pp. 222-232 (1957)

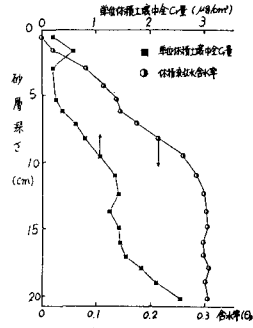


図-2 温度勾配吸収カラム (3日後)

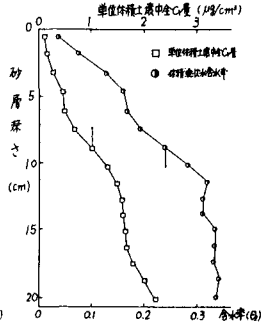


図-3 等温条件吸収カラム (3日後)

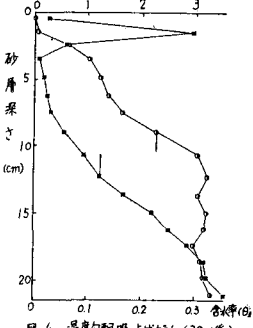


図-4 温度勾配吸収カラム (30日後)

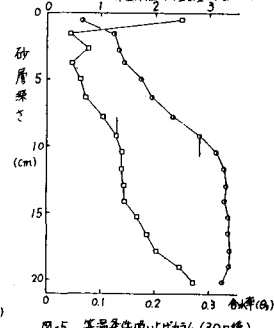


図-5 等温条件吸収カラム (30日後)

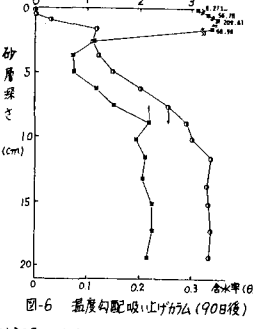


図-6 温度勾配吸収カラム (90日後)

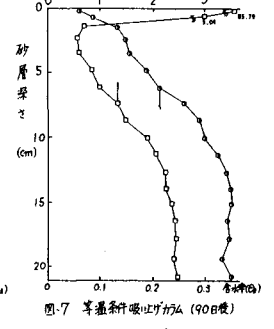


図-7 等温条件吸収カラム (90日後)

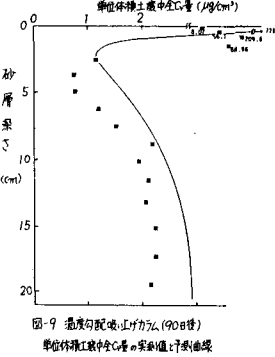


図-9 温度勾配吸収カラム (90日後)

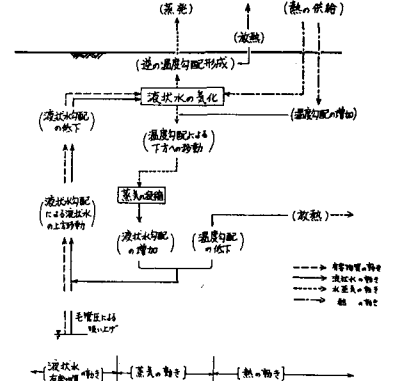


図-8 温度勾配下での物質水分熱の移動機構