

京都大学 正員 堀内 将人
京都大学 正員 井上 頼輝
日本水道コンサルタント 高野 謙

1. はじめに 昭和50年の東京都6価クロム鉍率事件以来、わが国でも有害物質の鉛直上方への移動が注目され、その移動機構解明のための研究が進められている。その結果、これまでの研究により、6価クロムが主に毛管圧により夜状水とともに鉛直上方に運ばれること⁽¹⁾、さらに温度勾配がある場合、上方へのクロムの移動が促進されることが実験的に明らかにされた。しかし、このような鉛直上方へのクロムの移動を有効に制御するための方策は未だ確立されていない。そこで本研究では、地層を構成する土壌の粒径に注目し、表層数cmをその下層の砂より大きな粒径の砂におきかえた場合、クロムの上方への移動がどの程度抑制されるかを実験的に確認するとともに、等温、水分分布定常条件下の不飽和成層土壌中でのクロム移動を予測する基礎式を数値的に解くことにより、クロムの移動機構を解析する。

2. 実験装置および方法 図-1に示すように、初期濃度約2ppmのクロム原液中に3種類のアクリルカラム(1)均-A層カラム、(2)3cmB層カラム、(3)6cmB層カラム、A層、B層を構成する各砂の物理特性、および透水係数を表-1、図-2に示す。)を垂直に立て、カラム吸い上げ実験を行った。一定時間経過後(15、60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の深さごとに測定した。

表-1 A砂、B砂の物理特性 表-2 各カラムの平均蒸発率

	A砂	B砂
密度 (gr/cm ³)	2.67	2.59
有効径 (mm)	0.51	0.92
均等係数 (-)	2.00	1.45

カラム	蒸発率 (cm/day)
均-A層カラム	0.027
3cmB層カラム	0.010
6cmB層カラム	0.006

また、この実験と平行して図-1の3種類の吸い上げカラムと同じ層構造をもつ、底を密閉した湿潤土壌カラムの重量変化を測定することにより、各カラムの水分蒸発率を求めた。

3. 実験結果および考察 均-A層、3cmB層、6cmB層カラムの15日後、60日後の砂層内水分分布および単位体積土壌中全クロム量分布を図-3～図-8に示す。また、各カラムの平均蒸発率を表-2に示す。15日後では、均-A層カラムについては、既に表層近くでクロムの蓄積の起っている。また、3cmB層カラムでも、絶対量にすれば均-A層には及ばないが、境界上約1cmの所でクロムの蓄積が起っている。一方、6cmB層カラムは、まだクロムの蓄積は見られない。つぎに60日後では、均-A層、3cmB層、6cmB層ともにクロムの蓄積が進んでいる。3cmB層、6cmB層では、境界面上約1～1.5cmの地点でクロムの蓄積が見られるが、均-A層に比べるとその絶対量ははるかに小さい。

クロムが蓄積する深さは、 θ_e がほぼゼロに近い風乾状態になる地点の直下($\theta_e \approx 0.01$)に相当している。このことは、クロムが夜状水流れによって鉛直上方に輸送され、 θ_e が約0.01となる地点において夜状水流れが停止し、かつその付近において主なる蒸

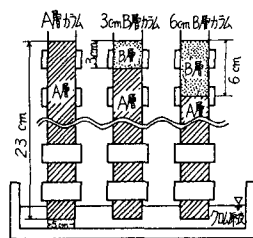


図-1 実験装置図

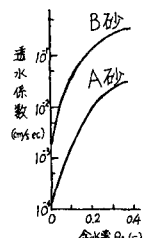


図-2 A砂、B砂の透水係数

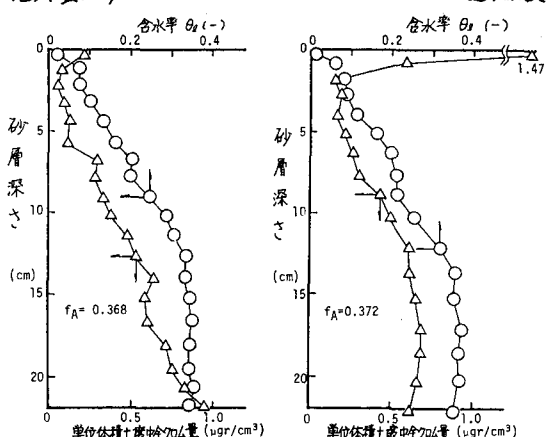


図-3 均-A層カラム 15日後の水分分布とクロム分布 図-4 均-A層カラム 60日後の水分分布とクロム分布

発が起きることによりクロムは輸送媒体を失い、そこで蓄積してゆくとするクロムの上方向の移動機構を間接的に支持するものと考えられる。

4. 数学モデルによるクロム移動の予測 等温条件下では不飽和土壌中の物質移動式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-f)\rho_s k_{du} + \theta_g]C = \nabla(\theta_g D \nabla C) + \nabla(\theta_g C) \quad (1)$$

ここに、 f : 間隙率 ρ_s : 土壌密度

k_{du} : 不飽和分配係数 D : 拡散係数

θ_g : 体積含水率 C : クロム濃度

θ_g : 液状水フラックス

ただし、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を仮定している。水分分布定常では、 θ_g は次式で計算される。

$$\theta_g = E - \nabla(D_{gw} \nabla \theta_g) \quad (2)$$

ここに、 E : 蒸発率 D_{gw} : 含水率勾配による水蒸気拡散係数

式(1)、(2)を連立させ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壌中全クロム量を計算した。ただし、蒸発率は実測した値を用い、クロム分布は15日後の実測分布を初期分布とした。結果を図-9、図-10に示す。図を見てわかるように、実測値と予測値はかなりよく一致している。このことは、式(1)(2)が等温条件下、成層土壌中でのクロムの移動を予測する基礎式として有効であることを示している。また、式(2)の右辺第2項がクロム分布にあまり影響を与えなかったことから、等温条件下では、ほぼ表層からの蒸発率に見合った上方への液状水移動が生じ、液状水の蒸発時にクロムの蓄積が起こると考えられる。このことから逆に、表層付近に、粒径の大きな層を設けることにより、クロムの表層への蓄積を低く抑えることができたのは、表層付近の土壌水分量を少なくすることによって蒸発領域が深くなり蒸発率を低く抑えることができたためと考えることができる。

5. おわりに 表層に粒径の大きな砂層を設けることにより、クロムの上方への移動が抑制されることを実験的に確認できた。今後は、より現実的な制御工法を開発するため、表層は乱さず、表層下数cm以深に粒径の大きな層を設けた場合の制御可能性、適切な大粒径層の厚さなどを検討する実験が必要である。

参考文献 (1) 横田、井上、森澤：才36回 土木学会年次学術講演会概要集(Ⅱ-8)

(2) 堀内、井上、森澤：才37回 土木学会年次学術講演会概要集(Ⅱ-40)

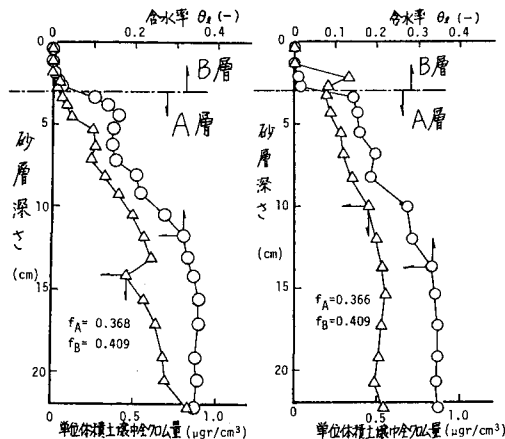


図-5 3cm B層カラム 15日後の水分分布とクロム分布

図-6 3cm B層カラム 60日後の水分分布とクロム分布

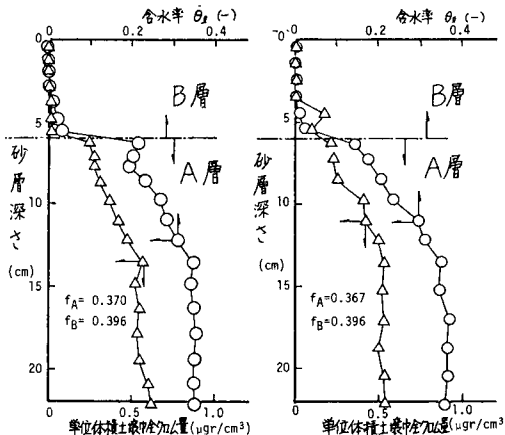


図-7 6cm B層カラム 15日後の水分分布とクロム分布

図-8 6cm B層カラム 60日後の水分分布とクロム分布

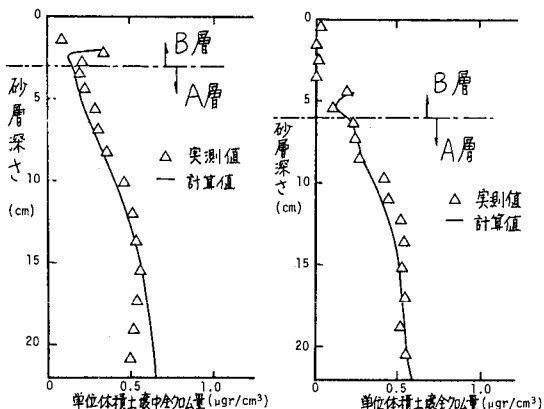


図-9 3cm B層カラム 60日後のクロム分布実測値と予測値

図-10 6cm B層カラム 60日後のクロム分布実測値と予測値