

## (48) 液体状テトラクロロエチレンの 土壌中での保持・地下浸透挙動の解析

小林 剛<sup>1,2\*</sup>・松島 由佳<sup>1</sup>・山岸 芳樹<sup>1</sup>・  
亀屋 隆志<sup>1</sup>・高橋 ゆかり<sup>1</sup>・浦野 紘平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学大学院環境情報研究院 (〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7)

<sup>2</sup>横浜国立大学安心・安全の科学研究教育センター (〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

\* E-mail: koba@ynu.ac.jp

近年、有機塩素系溶剤による土壌・地下水汚染が多数見つかっており、土壌中に流入した有機塩素系溶剤は液体状で土壌中に存在することが多く見られる。有機塩素系溶剤液体の土壌中での保持機構や地下浸透挙動を解析するため、テトラクロロエチレンと3種類の土壌での溶剤液体の初期平衡状態、散水後平衡状態での液存在率を測定、解析を行った。これより、土壌の特性値である含水率とpFを用いて、土壌の種類によらず初期平衡状態での液存在率を推算できる実験式の提案を試みた。また、砂質土、関東ローム、黒ぼく土では、水の浸透により溶剤液体がほとんど移動しないことがわかった。さらに、土壌中に保持されたテトラクロロエチレン液体は、浸透する水に溶解しながら地下浸透していくと考えられた。

**Key Words :** NAPL, Soil contamination, Tetrachloroethylene solvent, Liquid existence ratio, pF

### 1. はじめに

土壌汚染対策法も施行され、テトラクロロエチレンやトリクロロエチレンなどの有機塩素系溶剤による土壌・地下水汚染も多数見つかっている。これらによる土壌汚染サイトは、国が把握する累計5,281ヶ所の土壌汚染サイト<sup>1)</sup>の他にも全国に5万5千ヶ所程度も存在すると推計<sup>2)</sup>されている。

有機塩素系溶剤による汚染現場では、流入した溶剤は液体状で土壌中に存在することが多く見られる。この溶剤液体は比重が大きく、粘度が低いため、土壌によっては地下水層まで浸透しやすい。そのため、地下浸透により汚染が広がると飲料水水源が汚染され、長い浄化期間と、大きな費用が必要となる。従って、汚染の地下浸透が進む前に浄化する必要がある、特に汚染が地下浸透しやすいサイトでは早期に浄化することが必要である。そのためには土壌中に流入した溶剤液体の保持状態、雨水の浸透による溶剤液体の移動を把握する必要がある。

土壌中での有機塩素系溶剤の吸着性に関する研究<sup>3), 4)</sup>や、溶剤液体の気化拡散挙動に関する研究<sup>5)</sup>に関しては知見が蓄積されてきており、溶剤液体は土壌中では秒

単位の短時間で気化するとともに、気化・拡散には土壌への吸着性が大きく影響することが明らかになっている。しかし、有機塩素系溶剤そのものの土壌への保持のメカニズムに関しては、溶剤液体が土壌に浸入中の地下浸透挙動を解析<sup>6)</sup>したり、ガラスビーズや砂質土を用いて土壌への保持のメカニズムや不飽和帯と飽和帯との境界での挙動について検討した研究<sup>7~10)</sup>があるが、実際の土壌や特に砂質土だけでなく、より粒径の小さな関東ロームや黒ぼく土のような土壌に関する知見がほとんど無い。

著者らは過去の研究<sup>11)</sup>で、溶剤液体は土壌流入時には半楕球状に広がり、流入が停止すると広がり半楕球は下方向に伸びて停止(初期平衡状態)することを明らかにしている。現実には溶剤液体は初期平衡状態のままでは停止せず、降雨等により再移動することも考えられる。

本報では、初期平衡状態での土壌中での液存在率を $\phi_L$ 、降雨(散水)後に含水率が一定となった状態(降雨後平衡状態)の液存在率を $\phi_E$ と定義し、これらを実測して、雨水の浸透に伴う溶剤液体の土壌中での保持の状態や地下浸透挙動を解析することとした。

表-1 土壌試料の特性値

| 土壌試料  | 採取地          | 採取時の含水率<br>a<br>% | 真密度<br>$\rho_{ds}$<br>kg-dry soil/L | 有機炭素含有率<br>$\alpha$<br>kg-C/kg-dry soil | 比表面積<br>S<br>$m^2/g$ -dry soil | 有効径<br>$D_{10}$<br>$\mu m$ | 均等係数<br>$D_{60}/D_{10}$<br>— |
|-------|--------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 砂質土   | 平塚市 地下2mの地層  | 7.3               | 2.5                                 | 0.0022                                  | 15                             | 26                         | 8.2                          |
| 関東ローム | 横浜市 地下約5mの地層 | 45                | 2.5                                 | 0.013                                   | 180                            | 2.2                        | 18                           |
| 黒ぼく土  | 横浜市 表層付近     | 40                | 2.0                                 | 0.078                                   | 51                             | 4.2                        | 9.7                          |

## 2. 実験

### (1) 対象化合物および供試土壌

各実験および分析用の標準液には、和光純薬工業製特級テトラクロロエチレン (PCE) を使用した。分析用標準液の溶媒には和光純薬工業製の残留農薬試験用n-ヘキサン300を使用した。また、土壌中含有量測定の有機溶剤には、n-ヘキサン300およびエタノール300を使用した。精製水には、イオン交換水をさらに精製活性炭カラムに通した水を用いた。

土壌試料は、神奈川県平塚市および横浜市から採取した汚染されていない砂質土、関東ローム、黒ぼく土を、2mmメッシュのふるいにかけて通過したものを用いた。使用した土壌の採取時の含水率、真密度、有機炭素含有率、比表面積、有効径、均等係数を測定し、表-1に示した。また、粒径分布を図-1に示した。

### (2) 初期平衡状態での土壌中での液存在率測定実験

#### a) 初期平衡状態での液存在率の測定

液の移動が見かけ上、停止する初期平衡状態での土壌中での溶剤液体の液存在率  $\phi_L$  を測定するための装置および実験手順を図-2に示した。なお、液存在率は汚染土壌充填体積あたりの溶剤液体体積と定義した。

図-2のように内径20mm×高さ30mmのガラス製カラムを縦に8個積み上げ、カラム同士のつなぎ目は、揮発を防ぐため、FEP熱収縮チューブ（収縮後の幅20mm、収縮前内径25mm）をつなぎ目から上下のカラムに10mm程度重なるようにして熱収縮させ、その上から巾30mmのテフロンテープを重ねて巻いた。これにより、実験中の溶剤液体の揮発による重量損失は、7日間静置しても流入させたPCE重量約15gに対して0.03g以下の0.2%程度と、十分無視できることが確認されている。この装置に汚染されていない土壌試料を充填高さ225mm程度となるように入れた。装置下端は、片側（上部）の閉じたカラムを、装置上端は高さが10mmの蓋で密閉することとした。なお、各土壌の溶剤液体流入前の初期含水率は、それぞれ黒ぼく土が39、42、46、48%、関東ロームが39、43、46%、砂質土が4.0、8.5、10、14%に調整したものをを用いた。

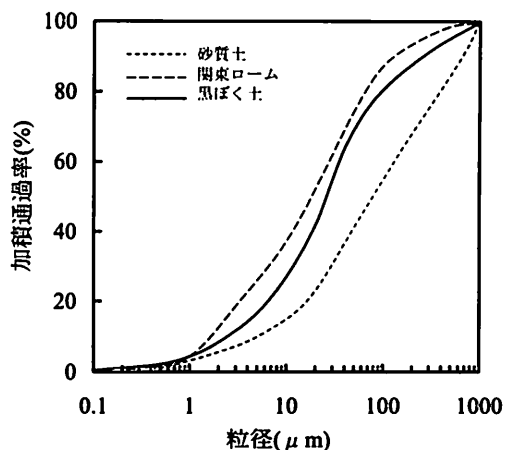


図-1 供試土壌の粒径分布

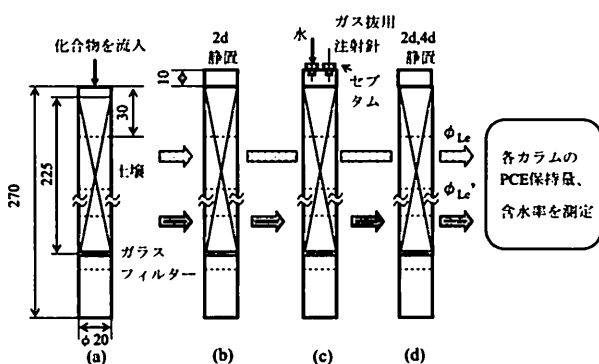


図-2 溶剤液体の土壌中での液存在率の測定方法

土壌を詰めた実験装置上部から3.0～4.5 mLのPCE液体を自然浸透速度で流入（図-2(a)）させた後に速やかに上部を蓋で密閉した。液量はカラムの最下段までPCE液体が到達する程度の量を事前に予備試験により把握した。流入前後での実験装置全体の重量変化を測定し、流入させた溶剤液体重量を求めた。15℃の恒温室内で、溶剤液体の移動が停止するまで、2日間静置（図-2(b)）した後に、実験装置を上部から分解し、各カラム中の土壌をねじ口瓶へと採取し、重量を測定した後、土壌中含有量測定を行った。各段のカラムに保持されている溶剤液体量

を測定するとともに、105℃24時間乾燥器内で乾燥させた際の重量変化と溶剤液体量から、含水率も測定した。ここで、土壌カラム下端のガラスフィルターの影響で、下部のいくつかの段では溶剤液体が貯まって保持量が高くなったこと、最上段は揮散によりやや溶剤液体の保持量が小さくなったことから、濃度分布が生じなかった上部から2～4段目の溶剤液体量、含水率を用いて解析を行うこととした。なお、これらの上部のカラムの含水率は、液流入後も初期含水率とほとんど変化が見られなかった。

水を浸透させない状態で溶剤液体の移動が停止した後の土壌中での溶剤液体の存在率を $\phi_{le}$ （汚染土壌体積あたりの溶剤液体体積）として求めた。

#### b) 降雨平衡状態での液存在率の測定

降雨後平衡状態での液存在率 $\phi_{le}'$ を測定するための実験装置および手順も図-2に合わせて示した。

実験は、a) の手順で初期平衡状態となったカラム（図-2(b)）を用いた。まず、実験装置最上部のふたを散水用のふたに取り替え（図-2(c)）、実験装置全体の重量を測定した。次に降水を想定して10 mm/h (0.05 mL/min) という低流量で降雨(散水)させるため、ケミカルポンプの流量0.25 mL/minで1分稼働、4分停止を繰り返し、いずれの土壌でもカラム最下部のガラスフィルターから水が出てくるまで約150min間(7.5mL程度)散水した。散水後、上部の蓋を密閉用の蓋に交換して、実験装置全体の重量を測定し、正確な散水量、つまり装置内の水分増加量を求めた。15℃の恒温室内で、溶剤液体の移動が再び停止するまで、2日間静置（図-2(d)）した後に、a) と同様に実験装置を上部から分解し、各カラム中の土壌をねじ口瓶へと採取し、重量を測定した後、土壌中含有量測定を行った。再び静置した後の土壌中に保持された溶剤液体量と含水率を測定した。この時、濃度分布が生じなかった土壌カラムの上部から2～4段目の溶剤液体量、含水率の測定結果を用いて解析を行った。土壌カラム下端のガラスフィルターの影響で含水率が高くなったカラムの測定値は、解析に用いないこととした。

#### c) 土壌中含有量の測定

土壌中含有量の測定は、エタノール20 mLの入った遠心沈殿管に土壌試料を約10 g採取し、縦振とうで混合した。48時間静置後、水40 mLとn-ヘキサン10 mLを添加し、手で激しく振とうした。遠心分離を行った後、n-ヘキサン相を2～5 mL採取し、0.3 mLシリカカートリッジを通した試料を、FID-GCで分離、定量した。

なお、初期平衡状態の測定、散水後平衡状態の測定、含有量測定の一通りの操作を通じて、溶剤液体のマスバランスを確認したところ、回収PCE量は土壌に流入させたPCE量の90%以上となり、実験操作中の損失はほぼ無視でき、十分な精度で実験が行えることを確認した。

#### d) 初期平衡状態でのPCEの存在状態の確認

溶剤液体の注入を停止した後、含水率が高すぎない条件では、液の移動がある液存在率 $\phi_{le}$ でほぼ停止すること<sup>3)</sup>がわかっている。

溶剤は土壌中では土壌間隙中に液として存在するもの、土壌粒子の細孔に吸着しているもの、土壌の水相に溶解しているもの、気化しているものとが考えられる。液の移動を把握するにはそれぞれの存在割合を知る必要があり、土壌中の全溶剤液体のマスバランスは(1)式のようになり、各項は(2)式～(5)式のように表せる。

$$M_T = M_L + M_w + M_s + M_G \quad (1)$$

$$M_T = \frac{\phi_{le} \cdot V \cdot \rho_L \times 10^6}{W_s} \quad (2)$$

$$M_w = \frac{10^{-3} a \cdot s}{100 - a} \quad (3)$$

$$M_s = \frac{C_{Gs}}{H_{sw}} V_w \quad (4)$$

$$M_G = \frac{C_{Gs}}{W_s} \left( V - \frac{10^{-3} \cdot W_s}{\rho_L} - \frac{10^{-3} a \cdot W_s}{100 - a} - \phi_{le} \cdot V \right) \quad (5)$$

ここで、 $M_T$  [g/kg-dry soil] は全溶剤液体量、 $M_L$  [g/kg-dry soil] は間隙中の溶剤液体量、 $M_w$  [g/kg-dry soil] は水相への溶解量、 $M_s$  [g/kg-dry soil] は固相への吸着量、 $M_G$  [g/kg-dry soil] は溶剤液体ガス量である。また、 $V$  [m<sup>3</sup>] は充填体積、 $V_w$  [m<sup>3</sup>] は土壌間隙水体积、 $a$  [%] は含水率、 $s$  [g/m<sup>3</sup>] は水溶解度、 $C_{Gs}$  [g/m<sup>3</sup>] は飽和気相濃度、 $H_{sw}$  [m<sup>3</sup>-water/kg-dry soil] は固液吸着平衡定数、 $\rho_L$  [kg-dry soil/L-dry soil] は土壌の真密度、 $\phi_{le}$  [-] は初期平衡状態での液存在率、 $\rho_L$  [g/m<sup>3</sup>] は溶剤液体の密度、 $W_s$  [kg-dry soil] は乾燥土壌重量である。(1)式から、間隙中の溶剤液体量は(7)式となる。

$$M_L = M_T - M_w - M_s - M_G \quad (6)$$

(4)式で、吸着量を推算するとき、Henry型の吸着等温式が飽和溶解度まで成り立つと仮定した。

なお、含水率7%の砂質土中での初期平衡状態の溶剤液体の各存在状態の割合を(2)～(6)式を用いて計算した

表-2 砂質土壌中でのPCEの状態別存在割合の計算例

|          | PCEの<br>存在量<br>(g-PCE/kg-drysoil) | PCEの<br>存在割合<br>(%) |
|----------|-----------------------------------|---------------------|
| 全PCE量    | 28.1                              | 100                 |
| 間隙中のPCE液 | 28.0                              | 99.74               |
| 固相への吸着   | 0.0263                            | 0.09                |
| 水相への溶解   | 0.0247                            | 0.09                |
| PCEガス    | 0.0222                            | 0.08                |

例を表-2に示す。これから、土壌間隙中の溶剤液体の存在割合は99.7%であるのに対して、水への溶解分、吸着分、気化分は0.1%未満と非常に小さく、十分無視できる。初期平衡状態では、注入されたほとんどの溶剤液体は、液状で存在しており、本報では固相への吸着量、水相への溶解量、溶剤液体ガス量は考慮せず、溶剤液体にのみ着目することとした。また、この結果は他の土壌や、通常の土壌の含水率の範囲では、溶解分はやや大きくなるなど変化はするが、大きく異ならないと考えられた。

### 3. 結果および考察

(1) 土壌中での初期平衡状態での液存在率の測定・解析  
溶剤液体が流入する際の各土壌の含水率が異なると、土壌に保持される溶剤液体量がどの様に変化するのかを調べた。溶剤液体を流入させる前の含水率と初期平衡状態での液存在率との関係を図-3に示す。これより、いずれの土壌においても、各土壌での現実的に見られる含水率の範囲においては含水率が約10%小さくなると、 $\phi_{Lc}$ が数倍大きくなることがわかる。これは、含水率が大き

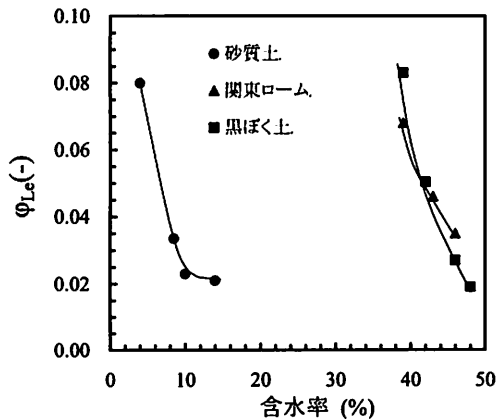


図-3 含水率と初期平衡状態での液存在率  $\phi_{Lc}$  との関係

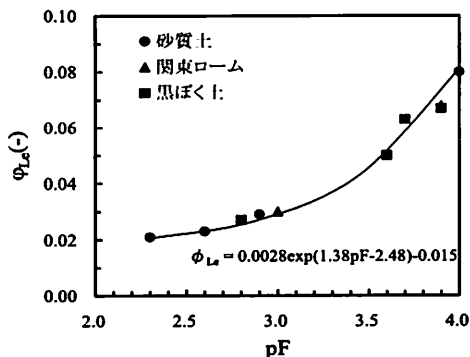


図-4 初期平衡状態での液存在率  $\phi_{Lc}$  と pF との関係

くなると、溶剤液体を保持できる小さな間隙が水で満たされるためと考えられる。

さらに図-3で土壌による違いをみると、 $\phi_{Lc}$ は黒ぼく土<関東ローム<砂質土となった。砂質土と比較して、黒ぼく土、および関東ロームは粒径が小さいため土壌中に溶剤液体を保持できる小さな間隙が多く、溶剤液体をより保持しやすいと考えられる。

黒ぼく土と関東ロームでは、粒径は関東ロームの方が小さい。粒径が小さい方が毛管力が強く働くため、溶剤液体も保持しやすくなると考えられるが、今回の土壌では明瞭な違いは見られなかった。黒ぼく土や関東ロームのような粘性土は団粒構造を有することから、粒径の違いが大きくは現れなかったようにも考えられる。粒径と含水率が $\phi_{Lc}$ に影響することから、ここで、土壌が水を保持しようとする力を表す毛管ポテンシャルを用いた整理を試みた。毛管ポテンシャルpFは(7)式によって表される。

$$pF = \log(\text{毛管ポテンシャル}[\text{cm}]) \quad (7)$$

砂質土、関東ローム、黒ぼく土における溶剤液体を流入させる前の各含水率でのpFと $\phi_{Lc}$ との関係を求め、図-4に示した。用いた土壌は、粒径の大きな砂質土から、粒径の非常に細かい関東ローム、粒径が細かくかつ土壌有機物の多い黒ぼく土というように大きく特性が異なる。しかし、図から土壌の種類によらず、 $\phi_{Lc}$ はほぼ同じ曲線で表せた。これより、溶剤液体も土壌水分と同様に毛管力によって土壌中に保持されていると推察される。この $\phi_{Lc}$ とpFとの関係の近似曲線を求めたところ、(8)式のように表せた。

$$\phi_{Lc} = 0.0028 \exp(1.38 pF - 2.48) - 0.015 \quad (8)$$

土壌の種類は3種類と少ないが、(8)式を用いれば、 $2.3 < pF < 4.0$ の範囲では、土壌の種類によらずpFから $\phi_{Lc}$ が推算できる可能性が示唆される。pFが1.8または2.0の値の時をほ場含水量といい、これ以下のpFでは重力で地下浸透する水分がある。また、pFが4.2の状態を永久しおれ点といい、植物の根が水を吸えないほど乾燥している状態である。このため、 $2.3 < pF < 4.0$ は土壌の現実的水分状態の範囲であるといえる。

以上から、pFが同じ値であれば、土壌が異なってもPCE液は毛管力により同じ強さで保持されていると考えられる。ただし、(8)式のように、PCE液の保持されやすさが、土壌によらず等しいということは、土壌間隙のPCE液での満たされやすさが、いずれの土壌でも大きく異ならないという意味となる。図-1に示すような、ある程度粒径の小さな土壌(砂質土も小さな粒径の土壌を多

く含む)で、限られた含水率(pF)の範囲では、含水率の増加に対するpF変化が大きく異ならなかったことから、このような結果となったが、異なる粒度分布の土壌では、土壌間隙の満たされやすさが異なるため、水分特性曲線自体も大きく異なり、PCE液の保持されやすさは同様の結果とならないことも想定される。

## (2) 降雨後平衡状態での液存在率の測定・解析

初期平衡状態の土壌に散水(降雨)後、水の移動が停止し、含水率がほぼ一定となった状態(降雨後平衡状態)の液存在率 $\phi_{l,e}'$ を測定し、初期平衡状態での液存在率 $\phi_{l,e}$ と比較して、土壌中での散水による移動を測定、解析した。砂質土、関東ロームおよび黒ぼく土の実験結果を図-5(a)(b)(c)に示す。

散水による含水率の変動により、保持されていた水分と溶剤液体とが容易に入れ替わるのであれば、 $\phi_{l,e}'$ は散水後の含水率の時の $\phi_{l,e}$ と一致すると考えられる。しかし、図-5から分かるように、ばらつきは多いものの、いずれの土壌においても、含水率は大きく変化しても、散水前の $\phi_{l,e}$ と散水後の $\phi_{l,e}'$ が大きく変化しないことが示唆された。これより、一度初期平衡状態に達した土壌中のPCE液体は、今回行った含水率の範囲(pFが2.3以上)、10mm/h程度の散水条件、ふるいがけした均一な粒径の小さな土壌では、散水により再移動しにくく、一度保持された溶剤液体は容易には水と入れ替わらないことが示唆された。

また、散水前後の土壌間隙にしめる土壌間隙水相(土壌粒子細孔中の水は除く)、気相および溶剤液体(PCE)相の体積比を図-6(a)(b)(c)に示した。これより、どの土壌でも散水により土壌間隙水が増えても土壌間隙には気相が十分に存在することがわかる。このため、散水によって新たに加わった水は、PCE液相を押し出すことなく、土壌間隙中の気相を押し出してpFが1.8~2.0程度までは土壌中に保持されるが、そのままPCEを押し流さずに土壌中に浸透したと考えられた。

なお、実際の土壌汚染現場においては、年月を経るとともに降雨とともに溶剤液体が地下浸透することが確認されている。今回の実験では、土壌表層に水が貯まらない散水条件であったこと、ふるいにかけた均一な土壌を用いたこと等が現場の条件とは異なる。さらに間隙の多くが水で満たされるような多量の降水により移動することや、不攪乱土壌では団粒構造や大きな間隙も存在するため、今回測定された含水率やpFの値に対するPCE液の保持力よりも弱い力で保持される液も存在し、これらが雨水の浸透により移動することも考えられる。

## (3) 土壌間隙への溶剤液体の保持機構の考察

以上の結果から、土壌間隙への溶剤液体の保持機構の

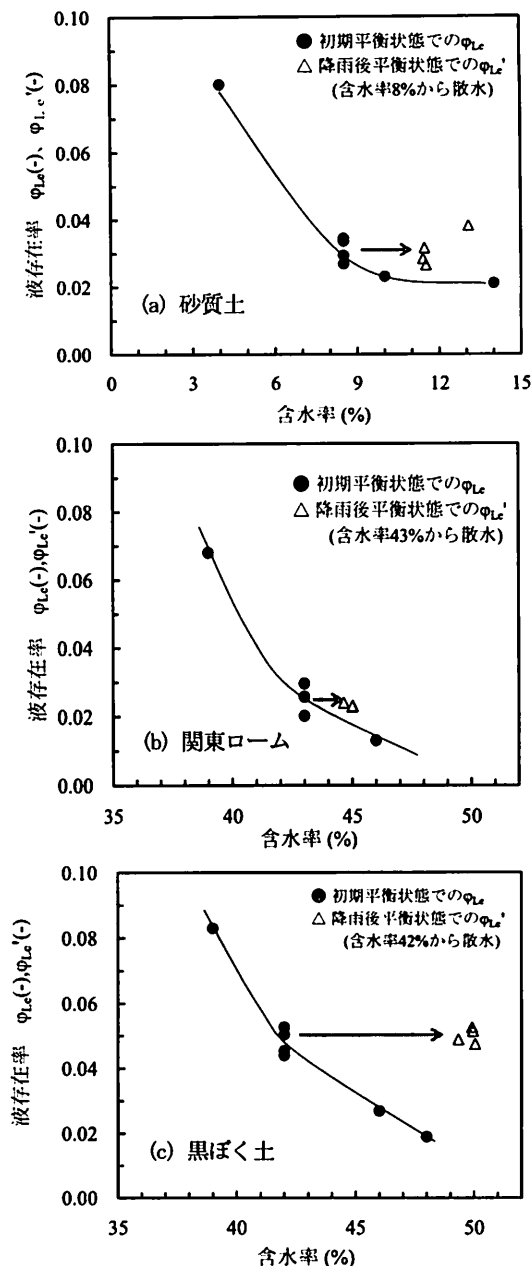


図-5 液存在率の散水前後での変化

イメージを図-7に示した。

土壌中では、含水率が比較的大きい時には水の保持力が強い間隙の狭い部分は、既に水が保持されている。土壌固相は親水性であるため、通常、土壌粒子の表面は水で覆われていると考えられる。

また、含水率が小さく、pFが1.8~2.0程度より大きくなるほど、土壌は水を保持しようとする力(pF)が大きくなる(φ<sub>l,e</sub>が大きくなる)。これにより、溶剤液体も土壌中の

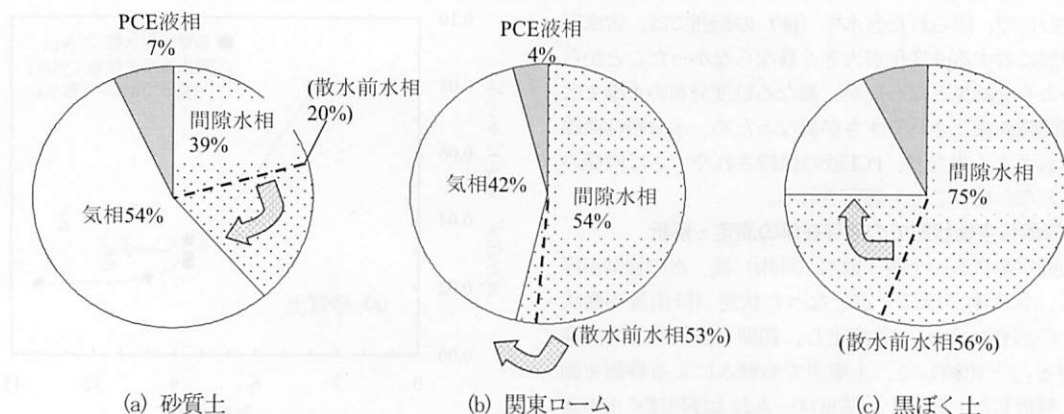


図-6 散水前後の各土壌中の各相の体積比の変化

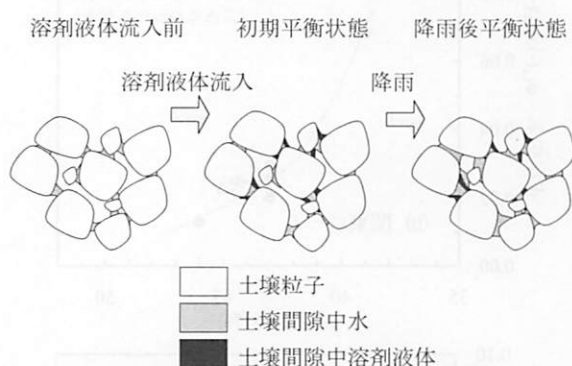


図-7 土壌中での溶剤液体の保持機構

水分と同様に毛管力によって保持され易くなって、初期平衡状態までは保持が可能となる。

含水率の高い土壌では、溶剤液体は疎水性であるため、もともと保持されていた水を追い出してまで保持されず、図-3のように、含水率が高くなるとともに $\phi_{Le}$ は小さくなったと考えられる。

初期平衡状態の土壌において、降雨などにより含水率が高まった場合には、実験で用いた3種類の土壌においては、一時的に含水率は高くなり、pFが小さくなるが、水はPCEと容易に置き換わることが無いため、間隙を浸透する水は、間隙に保持されるPCEを溶解しながら地下浸透していくと考えられた。

今回は比較的小粒径の小さな砂質土で実験を行っているが、より粒径の大きな砂質土では地下浸透の速度も大きくなり、また水や溶剤液体を保持する毛管力もさらに弱まり、浸透水により溶剤液体が押し流されることも推察されるため、どのような結果となるか今後、確認すべきと考えられた。

#### 4. まとめ

有機塩素系溶剤液体の土壌中での保持機構や地下浸透挙動を解析するため、3種類の土壌での溶剤液体の初期平衡状態、散水後平衡状態での液存在率を測定、解析を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 簡単に測定できる土壌の特性値であるpFを用いて、今回用いたような粒径の小さな土壌で、 $2.3 < pF < 4.0$ であれば、土壌の種類によらず初期平衡状態での液存在率を以下の実験式で推算できる可能性が示唆された。

$$\phi_{Le} = 0.0028 \exp(1.38 pF - 2.48) - 0.015$$

- (2) 散水後の水や溶剤液体の移動が停止した降雨後平衡状態での液存在率と初期平衡状態での液存在率とを比較したところ、ふるいがけした均一な砂質土、関東ローム、黒ぼく土において、10 mm/hの散水条件では、水の浸透により溶剤液体がほとんど移動しないことがわかった。
- (3) 土壌間隙への溶剤液体の保持機構を整理し、粒径の小さな土壌においては、土壌中に保持されたPCE液体は、浸透する水に溶解しながら地下浸透していくと考えられた。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（若手研究(B)、課題番号14780440）により実施された。

#### 参考文献

- 1)平成21年度 土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果,  
<http://www.env.go.jp/water/report/h22-02/>
- 2)小林剛, 土壌汚染の現状と今後の課題, 安全工学, 40(3), 161-167(2001)
- 3)成瀬洋児, 渡辺政敏, 土山秀樹, 伊藤英一, 矢木修身: ト

- リクロロエチレンの土壌への吸・脱着について, 水環境学会誌, 16, pp.346-353 (1993)
- 4) T. Kobayashi, Y. Shimizu and K. Urano, Estimation of Adsorbed Amounts of Volatile Chlorinated Organic Compounds to Wet Soil Based on the Properties of the Compounds and Soils, *The Science of Total Environment*, 301, pp.215-223 (2003)
- 5) 小林剛, 松島由佳, 浦野紘平: 汚染土壌中での有機塩素系溶剤液体の気化・拡散挙動の解析, 廃棄物学会誌, 15(5), pp.347-352(2004)
- 6) R. C. Walker, C. Hofstee, J. H. Dane, W. E. Hill, Surfactant enhanced removal of PCE in a nominally two-dimensional, saturated, stratified porous medium, *J. Contaminant Hydrology*, 34, pp.17-30(1998)
- 7) T. Hirata, K. Muraoka, Vertical Migration of Chlorinated Organic Compounds in Porous Media, *Wat. Res.*, 22, pp.481-484(1988)
- 8) M. C. Tekrony, R. C. Ahlert, Residual saturation of packed columns with chlorinated solvents, *J. Hazardous Materials*, 60, pp.127-142(1998)
- 9) C. Hofstee, J. H. Dane, W. E. Hill, Three-fluid retention in porous media involving water, PCE and air, *J. Contaminant Hydrology*, 25, pp.235-247(1997)
- 10) A. Luciano, P. Viotti, M. P. Papini, Laboratory investigation of DNAPL migration in porous media, 176, pp.1006-1017(2010)
- 11) 松島由佳, 山岸芳樹, 小林剛, 浦野紘平, 揮発性有機塩素化合物液の土壌中での移動の解析, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第7回講演集, pp.15-18 (2000)

(2011. 5. 30受付)

## Analysis of Retainment of the Tetrachloroethylene Solvent in Soil and its Infiltration

Takeshi KOBAYASHI<sup>1, 2</sup>, Yuka MATSUSHIMA<sup>1</sup>, Yoshiki YAMAGISHI<sup>1</sup>,  
Takashi KAMEYA<sup>1</sup>, Yukari TAKAHASHI<sup>1</sup>, Kohei URANO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

<sup>2</sup>Center for Risk Management and Safety Sciences, Yokohama National University

Soil pollution by volatile organochlorine solvents, such as tetrachloroethylene and trichloroethylene is a serious environmental problem. The organochlorine solvent often exists with form of NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) in the soil. In this study, the retainment mechanism in unsaturated soil and the infiltration behavior of the tetrachloroethylene solvent were analyzed. The liquid existence ratio of three soils in the initial equilibrium and the after sprinkling equilibrium were measured and analyzed. Using water content ratio and pF which were a property value of the soil, an empirical equation for estimation of a liquid existence ratio in the initial equilibrium was suggested. The solvent liquid was hard to move with water underground infiltration, in sand, Kanto loam and black soil. It is suggested that the retained organochlorine solvent in soil infiltrate to underground while it is dissolving in saturation water.