

(36) 不飽和土壌中での揮発性有機塩素化合物の 広がりを制限する気相吸着速度の解析

小林 剛^{1,2*}・山岸 芳樹¹・清水 優子¹・亀屋 隆志¹・三宅 祐一²

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

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

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

本研究では、テトラクロロエチレンを例に不飽和土壌における湿潤土壌に対するVCOCsの吸着速度を測定・解析して、その吸着メカニズムを確認した。土壌間隙水への溶解分、土壌有機物への吸着および各粒径の土壌無機鉱物細孔内への吸着という3種類のメカニズムを考慮し、土壌の特性値等を用いて、長期にわたる吸着挙動の予測計算モデルを提案した。総括物質移動容量係数(K_{sib})を $1,000 \text{ kg-dry soil}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、粒内拡散係数(D_e)を $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{d}$ とすることで、黒ぼく土及び砂質土という2種類の特性の大きく異なる土壌で同じ速度パラメータを用いて予測計算できることが確認できた。土壌汚染物質の土壌中での広がりを予測等を行うために利用可能であることが示唆された。

Key Words : Adsorption rate, Soil pollution, Vadose zone, Volatile chlorinated organic compounds, Tetrachloroethylene.

1. はじめに

テトラクロロエチレンやトリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物 (VCOCs) による土壌汚染が問題となっている。これらの汚染の広がりを予測したり、土壌ガス吸引法などでの浄化効果を予測して効率的に浄化を行うためには、土壌中での主要な挙動である吸着・脱離メカニズムを明らかにする必要がある。これまでいくつかの研究が報告されているが、不飽和帯土壌中での汚染物質の挙動を解析するために、湿潤土壌への気相での吸着・脱離についての研究報告は少ない。

間隙に空気が存在する不飽和帯土壌への VCOCs の吸着・脱着について、土壌への気相からの VCOCs の吸着平衡は、Henry 型の吸着等温式で表すことができ、その平衡定数は有機炭素含有率で推算できることが報告¹⁾されており、有機炭素含有率が小さく吸着性の低い土壌では、土壌水分へ分配される量が無視できないという報告²⁾もなされている。また、著者らは VCOCs の比較的短期間での平衡吸着量を、VCOCs の特性値である Pow (オクタノール-水分配係数) および土壌の特性値である含水率や有機炭素含有率から求める推算式を提案し、乾燥した土壌粒子に対しては VCOCs はその細孔に毛管

凝縮して吸着するとして Dubinin-Astakhov 式を用いて解析できること^{3,4)}を明らかにしてきている。

これに対して、VCOCs の汚染土壌への吸着・脱離速度については十分な知見が無い。脱離実験で脱離がほとんど認められなくなっても初期吸着量の約 10 %が残存するなど、土壌から非常に脱離されにくいという報告⁵⁾や、土壌粒径が大きくなるほど脱離速度が小さくなり、汚染されていた期間や汚染濃度が大きいほど吸着している VCOCs の内、脱離しにくい吸着量の割合が大きくなるとの報告⁶⁾もある。これらについて、土壌粒子の粒径分布や細孔分布を用いて土壌からの吸着・脱離速度を数式化する試み^{7,10)}も行われているが、現実的に設定困難な多くの数値計算パラメーターが多く、実際の様々な土壌に適用することは困難である。また、著者らは脱離速度については、土壌有機物への吸着分および各粒径の土壌無機鉱物細孔内への吸着分、土壌間隙水への溶解分を考慮した脱離挙動解析式を提案し、有機炭素含有率や粒径分布の大きく異なる砂質土および黒ぼく土でも、土壌有機物からの脱離速度を表す K_{sa} 値が $40 \text{ kg-dry soil}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、および土壌無機鉱物からの脱離速度を表す D_e 値が $3.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{d}$ という同じ脱離速度パラメータを用いて脱離挙動の変化を予測できることを明らかにしている¹¹⁾。

本研究では、テトラクロロエチレンを例に不飽和土壤中における湿潤土壌に対する VCOCs の吸着速度を測定・解析して、その吸着メカニズムを確認するとともに、既報の脱離速度の解析と同様に土壌の特性値を用いて、長期にわたる吸着挙動の解析、予測計算式を検討するとともに、吸着速度解析のためのパラメータを明らかにすることとした。

2. 実験方法

(1) 供試土壌

土壌試料は、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および黒ぼく土を、2mmメッシュの

表-1 土壌の特性値

土壌試料	採取地	含水率 a %	真密度 ρ_{ds} kg-dry soil/L	有機炭素 含有率 α kg-C/kg-dry soil	比表面積 S m ² /kg-dry soil	有効径 D ₁₀ μm	均等係数 D ₆₀ /D ₁₀ —
砂質土A	平塚市	7.3	2.5	0.0022	15	26	8.2
粉砕砂質土A	地下2mの地層	10.6	2.5	0.0021	15	1.5	11
黒ぼく土A	横浜市	40.0	2.0	0.078	51	4.2	9.7
粉砕黒ぼく土A	表層付近	42.7	2.0	0.081	38	0.87	5.3

※有機炭素含有率は、105℃で24 h乾燥後にファイナンス社製元素分析装置EA-1108により測定した。比表面積は、105℃で24 h乾燥後にニエササイオニクス社製NOVA1200を用いて重量吸着法により測定した。

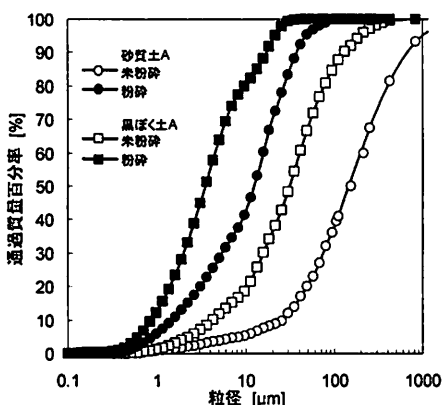


図-1 各土壌の粒径分布

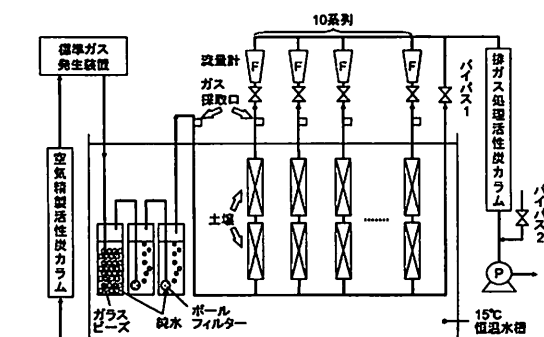


図-2 土壌-空気間吸着速度実験装置

ふるいにかけて通過したものを用いた。また、粒径の違いのみによる吸着速度の違いを調べるため、各土壌をそれぞれボールミルにより粉砕したものも試料とした。

土壌の含水率、真密度、有機炭素含有率、比表面積、有効径、均等係数を表-1に、粒径分布を図-1に示した。砂質土および黒ぼく土の特性は大きく異なり、砂質土は有機炭素の含有が少なく、粒径が大きく細孔が少ないため比表面積が小さい。黒ぼく土は、有機炭素含有率が大きく、粒径は小さく多くの細孔を有する粘土鉱物を含むため比表面積が大きい。さらに、粉砕した土壌の特性値を見ると、粉砕前後で粒径以外の土壌の特性値はほぼ等しいが、粒径は大きく変化させられたことが確認できた。なお、土壌のような多孔質材料では、比表面積の大部分を粒子内部の表面積が占めるため、比表面積はほとんど増加しないが、黒ぼく土では逆にやや減少する傾向が見られた。これは、粉砕の過程で細孔内に微細な土壌粒子や有機物が充填されて、目詰まりしてしまったと考えられる。

(2) 連続装置を用いた土壌-空気間吸着速度実験

実験装置を図-2に示した。まず、恒温水槽を15℃に設定し、清浄な土壌試料をガラスカラムに約3 g (充填高さ約4 cm, 充填密度は黒ぼく土が510 g-dry soil/L, 砂質土が770 g-dry soil/L, 充填空隙率はいずれも約0.5~0.6と通気しやすいよう締め固めないこととした) を詰めて、ガステック社製標準ガス発生装置PD-1B-2で約1,000 mg/m³に調製したテトラクロロエチレン (以下、PCEとする) ガスを20 mL/minで連続通気した。水槽内の2段の加湿器により通気ガスの温度を15℃、湿度を95%~98%に調製した。これにより、実験中の土壌の含水率の変化を防止することができた。吸着時間を変えてカラムを装置から取り外し、土壌中含有量を測定することで、吸着量の経時変化を測定した。

土壌中含有量は、まず、土壌試料約3 gをエタノール10 mLの入った遠沈管に入れ、縦振とう200 spmで20分間混合した後、1日に1度程度、手で振とうしながら2日間50℃恒温槽中で静置した。次に水20 mLとn-ヘキサン10 mLを添加し、手で激しく振とうした後、遠心分離を行い、n-ヘキサン層を採取し、0.3 mLシリカカートリッジに通液・精製して、ECD検出器付ガスクロマトグラフ (GC: 島津製作所製GC-14A, カラム: 島津製作所製CBP-5, 0.2 mm φ×25 m) で分離・定量した。長期間汚染された土壌では、土壌粒子内部まで汚染物質が到達し、1回の抽出では全量抽出できないため、エタノール層を捨て、同様の操作で再度抽出を行い、それぞれの抽出量の和から土壌中含有量を求めた^{11) 12)}。なお既報¹²⁾により、ほぼ全量抽出されることが確認できている。

3. 結果と考察

(1) 各土壌への吸着量の経時変化

はじめに土壌の種類の違いによる吸着速度の違いを確認するため、未粉碎の各土壌でのPCE吸着時の土壌中含有量 C_s の経時変化を図-3に示した。黒ぼく土Aでは2日程度で吸着平衡に到達したが、砂質土Aでは50日以上かかっても土壌中含有量が変化し続け、吸着平衡に到達しなかった。黒ぼく土Aは、有機炭素含有率が高く、吸着量の大部分が土壌有機物へ吸着していることが明らかにされており³⁾、土壌有機物への吸着速度は極めて速いことが確認された。また、土壌有機物が少ない砂質土Aでの実験結果から、2日間程度でわずかに含有する土壌有機物および無機鉱物の比較的吸着しやすい箇所には速やかに吸着しているが、無機鉱物への吸着は非常に遅いと考えられる結果となった。既報の脱離速度の解析¹¹⁾においても、同様に無機鉱物からの脱離は非常に遅く、粒径が大きいほど遅くなることが明らかになっている。これらより、土壌無機鉱物への吸着は、長期間にわたって無機鉱物の細孔内部まで汚染物質が入ると考えられ、さらに既報¹¹⁾より長期間かけて汚染された土壌からの脱離は非常に時間がかかることとなる。すなわち、事故などにより土壌にVOCsを漏洩させた場合は、放置せずに速やかに浄化することが重要であることも示唆された。

(2) 粉碎土壌と未粉碎土壌との吸着速度の比較

吸着速度への土壌の粒径影響を調べるために、各土壌で未粉碎土壌および粉碎土壌での土壌中含有量の経時変化を測定し、図-4、図-5に示した。未粉碎の粒径が大きい砂質土では50日以上経過しても吸着平衡に到達しなかったが、粉碎した砂質土Aでは14日程度でほぼ吸着平衡に到達した。これより、無機鉱物は粒子が小さくなるほど、吸着速度が速くなることが確認でき、土壌無機鉱物内での粒内拡散の速度が律速となっていると考えられた。また、黒ぼく土Aについては、未粉碎土壌でも吸着速度が極めて速いため、粉碎した場合にも違いが見られず、平衡吸着量はほとんど変化しなかった。黒ぼく土Aでは、吸着量のほとんどが、土壌有機物に吸着しているため、無機鉱物の粒径が変化しても、平衡吸着量吸着量にはほとんど影響しなかったと考えられた。

(3) 吸着挙動予測計算モデルによる解析

a) 土壌粒径を考慮した脱離挙動予測計算モデルの作成

実験結果から、土壌への吸着は有機物への吸着と無機鉱物への吸着が主と推測できる。そこで既報¹¹⁾の脱離を考えたときと同様に、土壌間隙水への溶解分(吸収)と、土壌有機物への吸着および各粒径の土壌無機鉱物細孔内

への吸着という3種類の段階を考慮した吸着挙動予測モデルを以下のように考えることとした。図-6にモデルの概要を示す。なお、湿潤土壌では土壌有機物および無機鉱物への吸着は、土壌間隙水へ溶解した後水相を介してそれぞれに吸着していると考えた。また、通常の含水

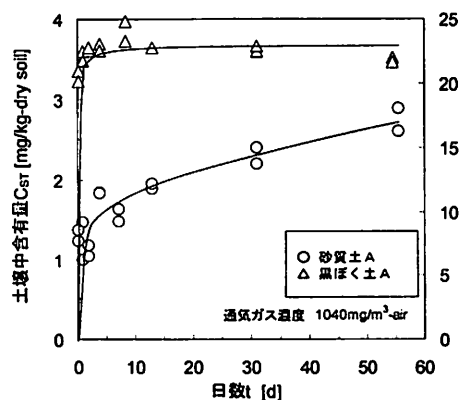


図-3 各土壌への吸着量の経時変化の比較

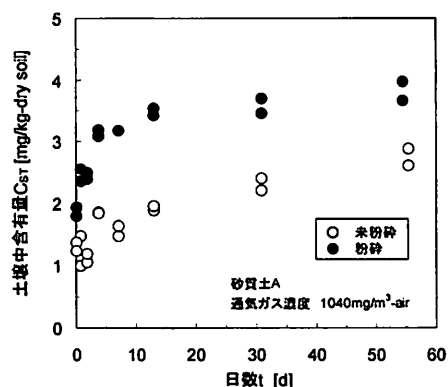


図-4 未粉碎および粉碎土壌への吸着量の経時変化(砂質土A)

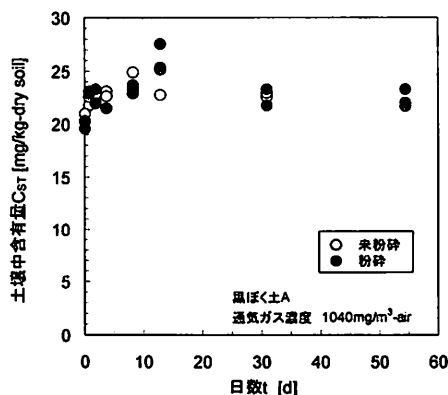


図-5 未粉碎および粉碎土壌への吸着量の経時変化(黒ぼく土A)

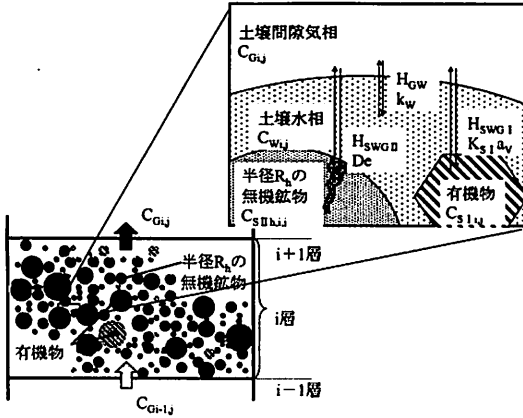


図-6 脱離挙動解析モデルの概要

率の土壌では、土壌細孔内の水分量は土壌粒子の外表面に付着する水分量と比べて少なく、水への溶解速度は無機鉱物への吸着に比べて十分早いと考えられるため、常に気液平衡が成り立つと簡略化して計算することとした。

図-6のように土壌を1層が均一と見なせるよう薄く分割し、各層毎の物質の挙動を考えることとした。第*i*層の土壌固相濃度の土壌有機物への吸着分の変化および第*i*層の土壌固相濃度の粒径区分*h*の土壌粒子細孔内への吸着分の変化は、脱離するときと同様の考え方で既報¹¹⁾のように(1)式および(2)式で表せることが示唆される。

$$\rho_b V_s \frac{dC_{S1i}}{dt} = V_s K_{S1a_v} (H_{SWG1} C_{Gi} - C_{S1i}) \quad (1)$$

$$\rho_b V_s \frac{dC_{S1h,j}}{dt} = V_s \frac{15De\rho_b}{R_h^2} (H_{SWG1} C_{Gi} - C_{S1h,j}) \quad (2)$$

ここで、 C_{S1i} および $C_{S1h,j}$ は*i*層での土壌有機物への吸着量および無機鉱物への吸着量[mg/kg-dry soil]、 C_{Gi} は土壌気相濃度[mg/m³]、 H_{SWG1} および H_{SWG1} は土壌有機物への吸着平衡定数および無機鉱物への吸着平衡定数[m³/kg-dry soil]を表す。また、 ρ_b は充填密度[kg-dry soil/m³]、 V_s は土壌一層の充填体積[m³]、 K_{S1} は土壌有機物への固体側総括物質移動係数[kg-dry soil/m²·h]であり土壌有機物への吸着の速さを表すパラメータである。 a_v は充填層単位容積あたりの粒子外表面積[m²/m³]を表し、 $K_{S1}a_v$ として総括物質移動容量係数ともいう。 De は粒内拡散係数[m²/h]であり、細孔内における拡散の速さを表す土壌の質によって変化するパラメータである。 R_h は粒径区分*h*の土壌粒子半径[m]を表す。

この(1)式および(2)式を微小時間 Δt として差分型にすることにより、コンピュータを用いて数値計算できるようにした。 $C_{S1i,j}$ および $C_{S1h,j}$ について整理すると(3)式および(4)式となる。ここで、添字の*j*は時間区分を表す。

$$C_{S1i,j} = \left(1 - \frac{K_{S1}a_v \Delta t}{\rho_b}\right) C_{S1i,j-1} + \frac{K_{S1}a_v H_{SWG1} \Delta t}{\rho_b} C_{Gi,j-1} \quad (3)$$

$$C_{S1h,j} = \left(1 - \frac{15De}{R_h^2} \Delta t\right) C_{S1h,j-1} + \frac{15De H_{SWG1}}{R_h^2} \Delta t C_{Gi,j-1} \quad (4)$$

以上より、土壌固相濃度 C_{STi} は(5)式で求められる。第一項は土壌有機物への吸着分、第二項は各粒径の無機鉱物への吸着分、第三項は土壌水分への溶解分を表す。ここで、粒径区分は10区分以上に細かく区切っても計算結果が変化しなかったことから、粒径の分布範囲を10粒径区分に等比となるように区切り計算することとした。

$$C_{STi} = C_{S1i,j} + \sum_{h=1}^{10} C_{S1h,j} m_h + \frac{a}{(100-a)} \frac{C_{Gi,j}}{H_{GW}} \quad (5)$$

ここで、 m_h は粒径区分*h*の土壌粒子の重量比[-]、 a は含水率[%]、 H_{GW} はヘンリー一定数[-]を表す。

b) 土壌への吸着速度を表すパラメータの検討

黒ぼく土と砂質土での土壌への吸着量の経時変化および粒径の異なる砂質土での土壌への吸着量の経時変化について、それぞれの実測値に計算線をフィッティングさせた結果を図-7および図-8に示した。ここで、 H_{SWG1} は

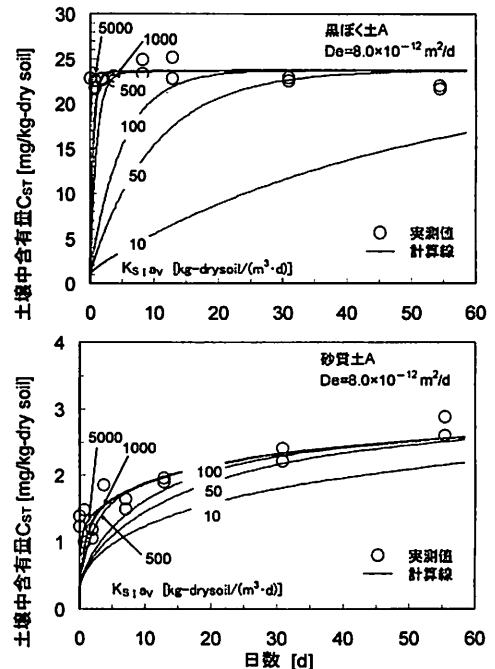


図-7 黒ぼく土および砂質土の吸着量の経時変化のフィッティング

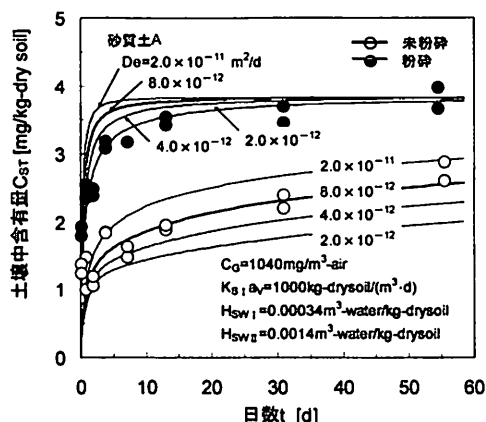


図8 粒径が異なる砂質土の吸着量の経時変化のフィッティング

既報³⁾⁴⁾での有機炭素含有率を用いた推算式 ($H_{SWG} = 0.0073 \text{ Pow}^{0.5} \alpha$) を用いて決定した。 H_{SWG} は土壌を約半年間密閉容器内で汚染したときの土壌中含有量 C_{ST} (黒ぼく土 25 mg/g-dry soil, 砂質土 5.0 mg/g-dry soil) と気相濃度 C_G (黒ぼく土 1,100 mg/m³, 砂質土 1,400 mg/m³) とが平衡状態に到達していると考え、 $H_{SWG} (=C_{ST}/C_G)$ から土壌有機物への吸着分として H_{SWG} を引き、水への溶解分として気液平衡分を差し引いて決定した。なお、 H_{SWG} の値は、予測計算結果の 2 日程度までの土壌中含有量に経時変化影響を及ぼし、 H_{SWG} の値は粒径が大きい土壌ほど平衡に到達するのが遅くなるため、長期の土壌中含有量の経時変化に影響を及ぼすと推察される。有機炭素含有率から得られる H_{SWG} については、既報より ±30% 程度の比較的良好な精度で測定されていると考えられるが、 H_{SWG} についてはデータも少ないため、様々な土壌でのデータの蓄積が期待される。

実験結果に K_{SA} および De をフィッティングパラメータとして適用し求めることとした。図-7 および図-8 より、以下に述べるように計算線は実測値をよく表すことが確認できた。

K_{SA} は土壌有機物への吸着速度を表し、土壌有機物への吸着は約 2 日間で吸着平衡に到達するとされているため、各土壌の 2 日間程度までの実測値に合うようにフィッティングさせて求めることとした。図-7 より、 K_{SA} は 500~5000 kg-dry soil/(m³·d) とすることができ、10 倍変化しても長期間の予測にはほとんど影響しなかった。また、砂質土および黒ぼく土のいずれの土壌においても、同じ K_{SA} の値でフィッティングしようとする、1000 kg-dry soil/(m³·d) 程度にすることが妥当と考えられた。

De については、無機鉱物への吸着量が比較的多い砂質土で粒径が大きい未粉碎土、粒径の細かい粉碎土の実

験結果を用いてフィッティングして求めることとした。

図-8 より、 De はばらつきはあるものの $2 \times 10^{-12} \sim 2 \times 10^{-11}$ m²/d 値であると考えられた。最もフィッティングの良い値で見ると砂質土では、未粉碎土壌の De は粉碎土壌と比べて 4 倍程度大きくなったが、無機鉱物の組成は等しく粒径が異なる土壌においては、同じオーダーの値の De でフィッティングできることが示唆された。さらに粒径が異なる土壌についてデータを蓄積する必要があるが、ここでは自然の土壌でもある未粉碎土の実験結果から得られた、 8×10^{-12} m²/d の方が比較的精度良く予測計算できていると考え採用することとした。なお、黒ぼく土は有機炭素含有率が高く、粒径が小さいため、土壌有機物への吸着分の割合が大きくなり、 De を変化させても予測結果はほとんど変化しなかった。

未粉碎土と粉碎土での De の値の違いは、実験や用いた土壌のばらつきも考えられるが、粉碎土の方が De がやや小さくなっていることから、粒径が小さくなることによる吸着速度の向上がやや抑制されている可能性も考えられる。今回、土壌の粉碎は、ボールミルを用いて行ったが、土壌を粉碎することによって、吸着に有利な大きな細孔の部分から土壌粒子が砕けて、大きな細孔の割合が減少し、吸着速度には不利となるより孔径の小さな細孔の割合が多くなったとも考えられる。また、ボールミルで粉碎する際に、細孔がより微細な土壌粒子や有機物によって塞がれて目詰まりしたこと、微細な粒子の方が粒径分布の測定精度がやや低下することも考えられた。

以上より、本モデルを用いて各土壌への吸着量の経時変化を推算することができ、有機物への吸着と各粒径の無機鉱物への吸着とを考慮した本モデルの仮定の妥当性が示された。今後、構成成分の異なる様々な土壌について、 K_{SA} および De を測定することにより、同様に様々な土壌についての吸着挙動を予測できることが期待される。

4. まとめ

特性の大きく異なる 2 種類の砂質土および黒ぼく土を用いて吸着速度実験を行い、VOCs の土壌有機物への吸着速度は速いこと、無機鉱物の粒径が大きいと吸着速度が極めて遅くなることが確認できた。

土壌間隙水への溶解分、土壌有機物への吸着および各粒径の土壌無機鉱物細孔内への吸着という 3 種類の段階を考慮した吸着挙動予測モデルを提案し、 K_{SA} を 1,000 kg-dry soil/(m³·d)、 De を 8×10^{-12} m²/d とすれば、特性の大きく異なる 2 種類の土壌において同じ速度パラメータを用いて予測計算できることが分かった。

今後、構成成分の異なる様々な土壌について、速度パ

ラメータである K_{sc} および De および無機鉱物への吸着性を表す $H_{s/c}$ を測定し、パラメータの範囲や無機鉱物などの成分との関係を一般化することにより、土壌汚染物質の土壌中での広がり等の予測式としての利用できることが期待される。

参考文献

- 1) M.S. Peterson, L.W. Lion and C.A. Shoemaker : Influence of vapor-phase sorption and diffusion on the fate of trichloroethylene in an unsaturated aquifer system, *Environmental Science and Technology*, Vol. 22, No. 5, pp. 571-578, 1988.
- 2) S.K. Ong and L.W. Lion : Effects of soil properties and moisture on the sorption of trichloroethylene vapor, *Water Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 29-36, 1991.
- 3) 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*, Vol. 301, pp. 215-223, 2003.
- 4) 小林剛, 清水優子, 浦野紘平 : 有機塩素化合物蒸気の任意含水率土壌への吸着平衡モデルと平衡吸着量の推算方法, 廃棄物学会誌, Vol. 15, No. 5, pp. 438-442, 2004.
- 5) Takeshi KOBAYASHI, Yuko SHIMIZU and K. URANO : Analysis of Adsorption Equilibrium of Volatile Chlorinated Organic Compounds to Dry Soil, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B108, pp. 69-75, 2004.
- 6) 成瀬洋児, 渡辺政敏, 土山秀樹, 伊藤英一, 矢木修身 : テトラクロロエチレンの土壌からの脱着, 用水と廃水, Vol. 37, No. 5, pp. 5-9, 1995.
- 7) 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収・脱着について, 水環境学会誌, Vol. 16, pp. 346-353, 1993.
- 8) C.J. Werth, K.M. Hansen : Modeling the effects of concentration history on the slow desorption of trichloroethene from a soil at 100% relative humidity, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 54, pp. 307-327, 2002.
- 9) J.A. Cunningham, C.J. Werth, M. Reinhard and P.V. Roberts : Effects of grain-scale mass transfer on the transport of volatile organics through sediments 1. Model development, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 12, pp. 2713-2726, 1997.
- 10) C.J. Werth, J.A. Cunningham, P.V. Roberts and M. Reinhard : Effects of grain-scale mass transfer on the transport of volatile organics through sediments 2. Column results, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 12, pp. 2727-2740, 1997.
- 11) 小林剛, 山岸芳樹, 亀屋隆志, 浦野紘平 : テトラクロロエチレンの長期間汚染土壌からの脱離挙動解析方法, 環境工学研究論文集, Vol. 40, pp. 689-695, 2003.
- 12) 宮本健一, 浦野紘平, 三野美都里, 藤江幸一 : 土壌の低沸点有機汚染物質含有量の測定方法, 水環境学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 477-488, 1995.

(2009. 5. 22 受付)

Analysis of Adsorption Rate to Limit an Expanse of Volatile Chlorinated Organic Compounds Vapor in Vadose Zone

Takeshi KOBAYASHI^{1, 2}, Yoshiki YAMAGISHI¹, Yuko SHIMIZU¹,
Takashi KAMEYA¹ and Yuichi MIYAKE²

¹ Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

² Center for Risk Management and Safety Sciences, Yokohama National University

Soil pollution by volatile chlorinated organic compounds (VCOs) such as tetrachloroethylene and trichloroethylene is a serious problem. In this study, a practical adsorption rate equation for analysis of VCOs expanse in vadose zone was developed by considering the adsorption to both soil organic matter and soil minerals and the dissolution in soil water. The adsorption rate of VCOs to soil organic substances was fast, although the adsorption rate to soil minerals was very slow. It was suggested that adsorption rate to soil minerals was limited by internal-diffusion in the soil particles. For a sand and a black soil whose characteristics were greatly different, the adsorption behavior of tetrachloroethylene could be expressed using the proposed adsorption rate equation with the same rate parameters. The parameters were decided, $K_{s/c} = 1,000 \text{ kg-dry soil}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, $De = 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{d}$.