

(33) 有機塩素系溶剤汚染土壌の多段同心円柱モデル による土壌ガス吸引効果の予測手法

小林 剛^{1,2*}・山岸 芳樹¹・大塚 寛人¹・窪田 慎¹・
亀屋 隆志¹・劉 予宇¹・浦野紘平¹

¹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)

²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

有機塩素系溶剤汚染土壌の浄化に多用される土壌ガス吸引法について、汚染メカニズムを考慮し、測定が容易な吸引ガス濃度の実測値を用いて補正しながら長期の浄化対策効果を予測できる新しい解析方法を提案した。汚染分布とガスの流れを多段同心円柱モデルで近似し、ストレーナー部とその上部および下部について、それぞれの各段ごとのガス流量を土壌の通気抵抗係数から決定した。また、土壌の通気抵抗の違いにより、土壌によってガスの流れ易さに大きな差があることから、効率的な浄化にはストレーナー位置が極めて重要であることが示唆された。さらに、初期の土壌中含有量分布を、表層土壌ガス濃度の分布や汚染中心の鉛直方向の土壌中含有量の分布および初期吸引ガス濃度から求める方法を提案し、実汚染現場の情報をを用いて土壌ガス吸引効果の予測計算が可能であることを示した。

Key Words : Soil vapor extraction, Long-term prediction, Soil contamination, remediation method, Organochlorine solvent

1. はじめに

有機塩素系溶剤などによる土壌汚染が各地で明らかになり、浄化対策が進められている。第一種特定有害物質（揮発性有機化合物）では、平成 20 年度までに累計で 953 件、平成 20 年度だけでも 105 件の基準超過事例¹⁾があるが、汚染の可能性があり調査が必要とされるサイトは 44 万カ所にも及ぶという報告²⁾や、5 万 5 千カ所程度の汚染サイトがあると推計した報告³⁾もあり、有機塩素系溶剤による土壌汚染も多数潜在することが想定される。

有機塩素系溶剤による汚染土壌の浄化技術としては、不飽和帯土壌中の揮発性の汚染物質を吸引除去する土壌ガス吸引法が多く用いられている。しかし、現在、この技術は経験的に用いられており、必要な浄化時間や対策費用が不明確である。このため、土質や運転条件による浄化効果の違いを長期間にわたって予測でき、適切な浄化プラントの運転管理や浄化終了の判断が行える解析・設計手法が求められている。

土壌ガス吸引法の浄化効果を予測するための従来の研究⁴⁾⁹⁾においては、長期間にわたる予測を行う際に重要

な因子となる土壌への吸着・脱離メカニズムが十分に考慮されていないこと、多くの予測パラメータが用いられ、中には現実的に設定困難なパラメータが用いられていることなどの課題が残されている。

有機塩素系溶剤の土壌からの脱離挙動については、土壌から脱離されにくく、汚染してから長期間たっている土壌ほど脱離が困難となること⁹⁾¹⁰⁾が報告されており、また、土壌粒子の粒径分布や細孔分布を用いて土壌からの脱離速度を数式化する試み¹¹⁾¹²⁾も行われている。これに対し、著者らは、汚染物質の土壌中での挙動について、気相から土壌への吸着平衡が Henry 型で表せること、その平衡定数は有機炭素含有率と含水率、オクタノール-水分分配係数およびヘンリー定数から推算できること¹³⁾を明らかにしている。また、長期間の土壌への吸着・脱離現象の解析には、土壌有機物に吸着した分の吸着・脱離と無機鉱物細孔内に吸着した分の吸着・脱離とを考慮した解析式¹⁴⁾¹⁵⁾が有効であることを明らかにしている。

ここで、実際の汚染現場での脱離挙動を解析するためには、初期の汚染分布の近似方法と吸引井を中心とした吸引ガスの流れの近似方法が重要である。しかし、現場

の汚染分布や土壌中でのガスの流れは非常に複雑であるため、詳細にシミュレーションしようとするパラメータの数が多くなり、その全てを測定、設定することは困難である。また、細かいメカニズムを部分的に厳密に計算しようとしても、初期の土壌中含有量の分布や地層による土質の違いなどの地下の状況については、様々な大きな仮定をせざるを得ないのが現実である。

そこで本研究では、不飽和帯土壌汚染サイトを深さ方向に多段に分け、さらに半径方向に同心円状に分けた多段同心円柱モデルでシミュレーションすることとし、現実的に設定可能なパラメータを用いて計算し、そのパラメータの不確かさやモデルからのずれを、浄化時に測定されるガス濃度の実測値を用いて修正していくことにより、長期間にわたる浄化効果を予測計算できる新たな手法を提案することとした。

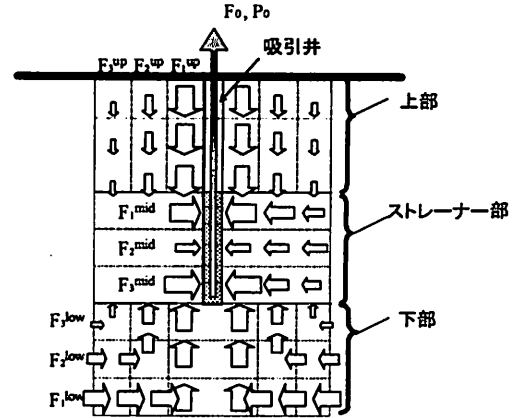


図1 土壌中でのガス流れのモデル化

2. 予測計算方法

(1) 多段同心円柱モデル

地層を構成する土壌の種類は、汚染物質の吸着性や吸引ガスの通気抵抗などに大きく影響する。また、初期の土壌中含有量は、鉛直方向および水平方向に分布をもつ。このため、土壌を深さ方向に厚み Δd [m]ごとの段に区分し、さらに吸引井を中心とした半径方向に同心円状に Δr [m]ごとの殻に区分した多段同心円柱モデルを考え、それぞれの段および殻において土壌の特性パラメータおよび初期土壌中含有量を設定し、段および殻の境界面での物質移動を逐次計算することにより、土壌中含有量や吸引ガス濃度等を予測できるようにした。

(2) 吸引ガスの流れの近似方法

同じ吸引圧力下においても、土壌の種類や含水率によって通気抵抗は大きく異なる。また、ガスの流れは吸引井のストレーナー(開孔部)の深さの部分と、その上下の部分とは異なる。そこで、各部位でのガスの流れを図-1に示すように、主に垂直方向の流れ、水平な半径方向の流れおよびそれらの両方が起こると近似し、それぞれにおける吸引流量を以下のように計算することとした。

a) ストレーナー部における吸引ガスの流れ

ストレーナー部では、吸引圧が主に段ごとにかかるとし、吸引ガスは吸引井に向かって水平に流れると近似する。すなわち、ストレーナー部では、最上段および最下段を除き、上下に接する段へ流出および流入する吸引ガスの流れはないと近似した。このとき、吸引井からの半径方向を r 軸とし、ストレーナー部のある j 段での吸引ガス流量を F_j^{mid} [m³/s]、土壌1段の厚みを Δd [m]とすると、ある距離 $r_{i,j}$ [m]での空筒線速度 $u_{i,j}^{mid}$ [m/s]は(1)式で表される。

$$u_{i,j}^{mid} = F_j^{mid} / 2\pi r_{i,j}^{mid} \Delta d \quad (1)$$

また、土壌を詰めたカラム内の通気抵抗 $\Delta P / \Delta r$ は Ergun¹⁹⁷⁰の(2)式によって表せる。

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} = \frac{1 - \varepsilon_b}{\phi_s d_p \varepsilon_b^3} \left[\frac{150(1 - \varepsilon_b)\mu}{\phi_s d_p} u + 1.75 \rho_f u^2 \right] \quad (2)$$

ここで、 ΔP は圧力損失[Pa]、 Δr はガスの流れ方向の殻の厚み[m]、 ε_b は充填空隙率[-]、 ϕ_s は形状係数[-]、 d_p は粒子の体積平均径[m]、 μ は空気粘度[Pa·s]、 u は空筒線速度[m/s]、 ρ_f は空気密度[kg/m³]である。

なお、実際の汚染現場で、吸引井からの吸引ガス流量は最大でも2,000 m³/d程度である。このとき、土壌中での空筒線速度 u は、吸引井のストレーナー部周辺で最も大きくなるが、周囲数cmを除外すれば0.05 m/s以下¹⁸⁾の線速度となるため、(2)式の第二項は第一項と比べて十分に小さく、無視できると考えられた。このため、(2)式の第一項の係数を通気抵抗係数 R [Pa·s/m²]と定義することにより、 $\Delta P / \Delta r$ が(3)式のように近似できる。

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} = \left[\frac{150(1 - \varepsilon_b)^2 \mu}{\phi_s^2 d_p^2 \varepsilon_b^3} \right] u \equiv Ru \quad (3)$$

したがって、(3)式と(1)式とから、各殻での圧力損失 $\Delta P_{i,j}^{mid}$ は、吸引井から r_i の位置での吸引圧力を $P_{i,j}^{mid}$ [Pa]とすると(4)式で表され、吸引井での吸引圧力 P_0 [Pa]は(5)式で表される。

$$\Delta P_{i,j}^{mid} = P_{i-1,j}^{mid} - P_{i,j}^{mid} = \frac{R_j^{mid} \Delta r F_j^{mid}}{2\pi r_{i,j}^{mid} \Delta d} \quad (4)$$

$$P_0 = \sum_{i=1}^{i_{end}} \Delta P_{i,j}^{mid} = R_j^{mid} \Delta r F_j^{mid} \sum_{i=1}^{i_{end}} \frac{1}{2\pi r_{i,j}^{mid} \Delta d} \quad (5)$$

ただし、 i_{end} は最外殻を表す。多くの土壌汚染サイトでは、吸引影響範囲が20mより小さいことを考慮すれば、 $\Delta r=0.5$ mとして、 $i_{end}=40$ まで計算することとした。(5)式より、ストレーナー部の各段での流量は(6)式で表せる。

$$F_i^{mid} = \frac{P_0}{R_i^{mid} \Delta r \sum_{i=1}^{i_{end}} \frac{1}{2\pi r_i^{mid} \Delta d}} \quad (6)$$

ただし、ストレーナー部の最上段ではその上部から、ストレーナー部の最下段ではその下部からガスの流入があるため、以下で考えることとした。

b) ストレーナーより上部における吸引ガスの流れ

ストレーナーより上部での吸引ガスの流れは、図-1のように、ストレーナー部の最上段の負圧によって、地表から各段の境界面を通じて鉛直方向に流れて、ストレーナー部最上段に流入すると近似した。ストレーナー部より上部では、地表面から大量に流入する空気に比べて少量となる最外殻より外側からの水平方向の流入は考慮しないこととした。このとき、ある i 殻で吸引ガスの流量 F_i^{up} は、(7)式で表される。

$$F_i^{up} = \frac{A_i^{up}}{\sum_j (R_j^{up} \Delta d)} P_{i,1}^{mid} \quad (7)$$

ただし、 $P_{i,1}^{mid}$ はストレーナー部最上段での殻の負圧[Pa]、 A_i^{up} は殻の水平方向の断面積[m²]、 R_j^{up} はストレーナーより上部の j 段目の土壌の通気抵抗係数[Pa·s/m²]である。

また、ストレーナー部最上段の各殻での圧力損失 $\Delta P_{i,1}^{mid}$ は、ストレーナーより上部からのガスの流入が各殻にあるため、(3)式と(1)式とから(8)式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,1}^{mid} &= P_{i-1,1}^{mid} - P_{i,1}^{mid} \\ &= \frac{R_i^{mid} \Delta r (F_{i-1,1}^{mid} + F_i^{up} + F_{i+1}^{up} + \dots + F_{i_{end}}^{up})}{2\pi r_i^{mid} \Delta d} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、最外殻 i_{end} 殻での負圧 $P_{i_{end},1}^{mid}=0$ とすると、 $F_{i_{end},1}^{up}=0$ となり、(8)式と(7)式から $P_{i_{end},1}^{mid}$ は(9)式、 $F_{i_{end},1}^{up}$ は(10)式で表され、それぞれ $F_{i_{end},1}^{mid}$ の関数として表せる。

$$P_{i_{end}-1,1}^{mid} = \frac{R_{i_{end}}^{mid} \Delta r}{2\pi r_{i_{end}}^{mid} \Delta d} F_{i_{end},1}^{mid} \equiv x_{i_{end}-1,1}^{mid} F_{i_{end},1}^{mid} \quad (9)$$

$$F_{i_{end}-1}^{up} = \frac{A_{i_{end}-1}^{up}}{\sum_j (R_j^{up} \Delta d)} x_{i_{end}-1,1}^{mid} F_{i_{end},1}^{mid} \equiv y_{i_{end}-1}^{up} F_{i_{end},1}^{mid} \quad (10)$$

同様に外側の殻から順番に $F_{i,j}^{mid}$ を(8)式に代入していくと $P_{i,j}^{mid}$ は(11)式のように $F_{i_{end},1}^{mid}$ の関数で表せ、これを(7)式に代入すると $F_{i,j}^{up}$ は(12)式のように $F_{i_{end},1}^{mid}$ の関数として表せる。こうして、各殻の $P_{i,j}^{mid}$ および $F_{i,j}^{up}$ は $F_{i_{end},1}^{mid}$ の関数として表せた。

これより、吸引中心での負圧 $P_{0,1}^{mid}$ は(11)式から $F_{i_{end},1}^{mid}$ の関数で表され、これに実測したストレーナー部での負圧

$P_{0,1}^{mid}=P_0$ を代入すれば、 $F_{i_{end},1}^{mid}$ を求めることができる。これを(11)式および(12)式に代入すれば、任意の殻での負圧および流量を求められる。

$$\begin{aligned} P_{i,1}^{mid} &= x_{i+1,1}^{mid} F_{i_{end},1}^{mid} + \frac{R_i^{mid} \Delta r}{2\pi r_{i+1}^{mid} \Delta d} (1 + \sum_{i=1}^{i_{end}} y_i) F_{i_{end},1}^{mid} \\ &\equiv x_{i,1}^{mid} F_{i_{end},1}^{mid} \end{aligned} \quad (11)$$

$$F_i^{up} = \frac{A_i^{up}}{\sum_j (R_j^{up} \Delta d)} x_{i,1}^{mid} F_{i_{end},1}^{mid} \equiv y_i^{up} F_{i_{end},1}^{mid} \quad (12)$$

c) ストレーナーより下部における吸引ガスの流れ

ストレーナーより下部でのガスの流れは、図-1のように各殻では、ストレーナー部の最下段の負圧によって、吸引ガスは垂直方向上向きに流れてストレーナー部最下段に流入すると近似した。これと同時に、深部には通気性の悪い地層や飽和帯(地下水)などがあることが多いため、ここでは図-1のように最外殻では外側から水平方向にガスが流入すると近似することとした。すなわち、ストレーナー部最下段の殻に流入するガスの流量 $F_{i,j_{low}}^{low}$ は、鉛直方向に流れる部分と水平方向に流れる部分の抵抗を考慮して(13)式で表される。

$$F_i^{low} = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_i^{low}} \sum_{j=1}^{j_{low}+1} (R_j^{low} \Delta d) + R_{j_{low}+1,1}^{low} \Delta r \sum_{i=1}^{i_{end}} \frac{1}{2\pi r_i^{low} \Delta d} \right)} P_{i,j_{end}}^{mid} \quad (13)$$

ここで $P_{i,j_{end}}^{mid}$ はストレーナー部最下段の殻での負圧[Pa]、 A_i^{low} は殻の水平方向の断面積[m²]、 R_j^{low} はストレーナーより下部の j 段の土壌の通気抵抗係数[Pa·s/m²]である。

また、ストレーナー部最下段の各殻での圧力損失 $\Delta P_{i,j_{end}}^{mid}$ は、(8)式と同様に(14)式および(15)式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,j_{end}}^{mid} &= P_{i-1,j_{end}}^{mid} - P_{i,j_{end}}^{mid} \\ &= \frac{R_{i,j_{end}}^{mid} \Delta r (F_{i-1,j_{end}}^{mid} + F_{i,j_{low}}^{low} + F_{i+1,j_{low}}^{low} + \dots + F_{j_{low}}^{low})}{2\pi r_{i,j_{end}}^{mid} \Delta d} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Delta P_{i,j_{end}}^{mid} = P_{i-1,j_{end}}^{mid} - P_{i,j_{end}}^{mid} = \frac{R_{i,j_{end}}^{mid} F_{i_{end},1}^{mid} \Delta r}{2\pi r_{i,j_{end}}^{mid} \Delta d}, \quad i=j_{low}+1 \sim i_{end} \quad (15)$$

ここで、最外殻 i_{end} 殻での負圧 $P_{i_{end},j_{low}}^{mid}=0$ として、 $j_{low}+1$ 殻まではストレーナーより下部からのガスの流入はないと考えると、 $P_{j_{low},j_{end}}^{mid}$ は(16)式で表される。

$$P_{j_{low},j_{end}}^{mid} = \sum_{i=j_{end}}^{j_{low}+1} \left(\frac{R_{i,j_{end}}^{mid} \Delta r}{2\pi r_i^{mid} \Delta d} F_{i_{end},j_{end}}^{mid} \right) \equiv x_{j_{low},j_{end}}^{mid} F_{i_{end},j_{end}}^{mid} \quad (16)$$

これより j_{low} 殻でのストレーナーより下部からのガスの流入量 $F_{j_{low},j_{end}}^{low}$ は(13)式を用いて(17)式で表される。

$$F_{flow}^{low} = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_{flow}^{low}} \sum_{j=1}^i (R_j^{low} \Delta d) + R_i^{low} \Delta r \sum_{i=j_{low-1}}^{j_{end}} \frac{1}{2\pi r_i^{low} \Delta d} \right)} x_{flow,jend}^{mid} F_{tend,jend}^{mid} \quad (17)$$

$$\equiv y_{flow,jend}^{low} F_{tend,jend}^{mid}$$

(14)式に(16)式および(17)式を代入して $P_{flow,jend}^{mid}$ は(18)式のように表され、 $F_{flow,jend}^{low}$ は(19)式で表され、それぞれ $F_{tend,jend}^{mid}$ の関数として表せる。

$$P_{flow,jend}^{mid} = P_{flow,jend}^{mid} + \frac{R_{jend}^{mid} \Delta r (F_{tend,jend}^{mid} + F_{flow}^{low})}{2\pi r_{flow}^{mid} \Delta d} \quad (18)$$

$$\equiv x_{flow,jend}^{mid} F_{tend,jend}^{mid}$$

$$F_{flow,jend}^{low} = \frac{1}{\left(\frac{\sum_{j=1}^{j_{low}} (R_j^{low} \Delta d)}{A_{flow,jend}^{low}} + R_{flow,jend}^{low} \Delta r \sum_{i=j_{low-1}}^{j_{end}} \frac{1}{2\pi r_i^{low} \Delta d} \right)} x_{flow,jend}^{mid} F_{tend,jend}^{mid} \quad (19)$$

$$\equiv y_{flow,jend}^{low} F_{tend,jend}^{mid}$$

同様外側の殻から順番に計算して、 $i=1 \sim j_{low}$ 殻での各殻の $P_{flow,jend}^{mid}$ および $F_{flow,jend}^{low}$ は $F_{tend,jend}^{mid}$ の関数として(20)式および(21)式のように表せる。

$$P_{flow,jend}^{mid} = x_{flow,jend}^{mid} F_{tend,jend}^{mid} + \frac{R_{jend}^{mid} \Delta r}{2\pi r_{flow,jend}^{mid} \Delta d} (1 + \sum_{i=1}^{j_{low}} y_i) F_{tend,jend}^{mid} \quad (20)$$

$$\equiv x_{flow,jend}^{mid} F_{tend,jend}^{mid}$$

$$F_{flow,jend}^{low} = \frac{1}{\left(\frac{\sum_{j=1}^{j_{low-1}} (R_j^{low} \Delta d)}{A_{flow,jend}^{low}} + R_{flow,jend}^{low} \Delta r \sum_{i=1}^{j_{low-1}} \frac{1}{2\pi r_i^{low} \Delta d} \right)} x_{flow,jend}^{mid} F_{tend,jend}^{mid} \quad (21)$$

$$\equiv y_{flow,jend}^{low} F_{tend,jend}^{mid}$$

これより、吸引中心での負圧 P_{0j} は(20)式から $F_{tend,jend}^{mid}$ の関数で表されるため、これに実測したストレーナ部での負圧 $P_{0jend}^{mid} = P_0$ を代入すれば、 $F_{tend,jend}^{mid}$ を求めることができる。これを(20)式および(21)式に代入すれば、任意の殻での負圧および流量を算出できる。

d) 初期の土壤汚染分布の近似方法

浄化前の初期の土壤汚染の分布は、ボーリング調査を多数行えば、ある精度で推定可能だが、ボーリング調査は、多くの費用がかかり、ボーリングに伴って汚染の拡散も危惧されるため現実的でない。これに対し、比較的容易に得られる情報としては、ボーリングバーで一定間隔の基盤目状に約1mの深さの細穴を開け、土壤ガスを吸引して、検知管や携帯ガスクロマトグラフ等で測定して得られる水平方向の初期表層土壤ガス濃度分布や、吸引井等を設ける際に採取したコア土壤中の含有量を測定して得られる鉛直方向の初期土壤中含有量の測定値があ

る。ただし、表層土壤ガス濃度分布の形は、汚染が拡がっている地下土壤空間全体の土壤中含有量分布の形を表しているわけではない。また、土壤中含有量の測定では、サンプルの採取時に揮散によるロスが極めて大きく、また全量を抽出して定量することも困難である。これらのため、初期土壤中含有量については、おおよそのオーダーや汚染分布の形を知る程度の情報しか得られない。

そこで、本報では、上記の比較的容易に得られる実測値を活用して、初期の土壤中分布の予測近似方法を考えた。すなわち、表層土壤ガスが高濃度となった汚染中心部でのボーリング調査結果を用いて、汚染中心部での鉛直方向の初期土壤中含有量の測定値を仮置き値とする。また、表層土壤ガス濃度の水平方向の分布を正規分布に近似し、分布の形を表す標準偏差 σ_0 を求める。各段の初期土壤中含有量の水平方向の分布の形は表層土壤ガス濃度分布の形と等しいと近似して、 σ_0 と汚染中心部での初期土壤中含有量の測定値とから、各段の各殻における初期土壤中含有量を仮置き値として設定することとした。この仮置き値は、運転開始後に実測される吸引ガス濃度が予測値より δ 倍異なれば、実際の初期土壤中含有量も δ 倍異なるとして補正することとした。また初期の汚染分布の形を表す σ_0 は、現実に確認する方法が無いことからフィッティングパラメータとして、実測ガス濃度がある期間予測濃度とずれた場合に適宜補正することとした。

(3) 土壤および吸引ガス濃度の予測計算式

既報¹⁴⁾¹⁵⁾より、土壤有機物および無機鉱物からの脱離速度は(22)式および(23)式で表せ、土壤固相濃度 $C_{s,j}$ [mg/kg-dry soil]は(24)式で表すことができる。また土壤気相濃度 $C_{g,j}$ [mg/m³]の変化は(25)式で表される。

$$\rho_b V_s \frac{dC_{s1,j}}{dt} = -V_s K_{s1} a_{VR} (C_{s1,j} - H_{SWG1} C_{g1,j}) \quad (22)$$

$$\rho_b V_s \frac{dC_{s2,j}}{dt} = -V_s \frac{15 De \rho_b}{r_{ph}^2} (C_{s2,j} - H_{SWG2} C_{g2,j}) \quad (23)$$

$$C_{s,j} = C_{s0,j} + \sum_{h=1}^{10} C_{s2h,j} m_h + \frac{a}{(100-a)} \frac{C_{g1,j}}{H_{GW}} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_b V_s \frac{dC_{g,j}}{dt} = & u A C_{g-1,j} - u A C_{g,j} + \frac{D_g}{\Delta z} A (C_{g-1,j} - C_{g,j}) \\ & - \frac{D_g}{\Delta z} A (C_{g,j} - C_{g+1,j}) + V_s K_{s1} a_{VR} (C_{s1,j} - H_{SWG1} C_{g1,j}) \\ & + \sum_{h=1}^{10} V_s \frac{15 De \rho_b}{R_h^2} (C_{s2h,j} - H_{SWG2} C_{g2,j}) m_h \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 $C_{s1,j}$ と $C_{s2h,j}$ は土壤有機物への吸着量と土壤無機鉱物への吸着量[mg/kg-dry soil]、 u は空筒線速度[m/d]、 ρ_b は充填密度[kg-dry soil/m³]、 V_s は土壤一段の充填体積

[m³], K_{sd} は固体側総括物質移動係数[kg-dry soil/m²·h], α_{Ri} は充填層単位容積あたりの粒子外表面積[m²/m³], $H_{swg,i}$ および $H_{swg,d}$ は土壌有機物への吸着平衡定数および土壌無機鉱物への吸着平衡定数[m³/kg-dry soil]を表す。また, D_p は粒内拡散係数[m²/d], r_{ph} および m_{ph} は粒径区分 h の土壌の粒子半径[m]および全土壌に対する重量比[-], α は含水率[%], H_{swt} はヘンリー定数[-]を表す。

なお, ある j 段の土壌体積 $V_{s,j}$ [m³]およびストレーナ一部での段の鉛直方法の断面積 $A_{i,j}^{mid}$ [m²]は, (26)式および(27)式で表され, ストレーナの上部および下部でガスが鉛直方向に流れる時の断面積 $A_{i,j}^{up}$ および $A_{i,j}^{low}$ [m²]は(28)式で表される。これらより, ストレーナ一部およびストレーナより上部または下部で, 空筒線速度 $u_{i,j}^{mid}$, $u_{i,j}^{up}$, $u_{i,j}^{low}$ [m/d]は, (29)式~(31)式で表される。ただし, 本研究では, $r_i=0.05$ m, 円柱の深さ区分 $\Delta z=0.5$ m, 同心円の厚さ区分 $\Delta r=0.5$ mとした。

$$V_{s,j} = \pi(r_{i-1}^2 - r_i^2)\Delta z \quad (26)$$

$$A_{i,j}^{mid} = 2\pi r_i^{mid}\Delta z \quad (27)$$

$$A_{i,j}^{up} = A_{i,j}^{low} = \pi(r_{i-1}^{up2} - r_i^{up2}) = \pi(r_{i-1}^{low2} - r_i^{low2}) \quad (28)$$

$$u_{i,j}^{mid} = \frac{F_j^{mid}}{A_{i,j}^{mid}} \quad (29)$$

$$u_{i,j}^{up} = \frac{F_i^{up}}{A_{i,j}^{up}} \quad (30)$$

$$u_{i,j}^{low} = \frac{F_i^{low}}{A_{i,j}^{low}} \quad (31)$$

(4) シミュレーションの対象とした浄化サイトの概要

本モデルにより, 予測計算を試みる対象として, 実際の土壌ガス吸引法による浄化事例に本モデルを適用した。この事業所では, 旧廃液置き場を中心として深さ約1 mから6 mまでの土壌がテトラクロロエチレン (PCE) で汚染されていた。また, 表層から約3 mが黒ぼく土層, 約3~5 mが関東ローム層, 約5~7 mが砂礫層, 約7 m以下は帯水層であり, ストレーナは1~6 mに切られた。吸引ポンプには, ブロウ (出力0.51 kw, 風量36 m³/h) を用い, 約1,400 h (58 d) 連続運転で浄化された。

3. 結果と考察

(1) 汚染現場の浄化効果の予測手順の検討

提案した多段同心円柱モデルを実際の浄化サイトに適用するために, 以下のような予測手順を考案した。

- 表層土壌ガス調査により実測した表層のガス濃度分布の形から σ_r を仮置きする。また, ボーリング調査により各地層の土壌の種類を決定するとともに, 汚染中心での各深さでの土壌中含有量の実測値を初期土壌中含有量として仮置きする。
- 地表から鉛直方向に0.5 mずつの段に分割し, また半径方向に0.5 mずつの段に分割する。 σ_r と鉛直方向の初期土壌中含有量とから, 各段, 各段の初期土壌中含有量分布を仮置きする。
- 汚染物質と土壌の種類とから, 計算に用いる吸着・脱離のパラメータの値を決定する。 H_{swg} , K_{sga} , D_p , D_c および無機鉱物の粒径分布は土壌の種類から値を決めて計算することとした。ここで, H_{swg} は既報¹³⁾より土壌の有機炭素含有率から推算できる。なお, K_{sga} と D_p は砂質土と黒ぼく土とで大きく異ならなかったことを既報¹⁴⁾で報告した。 D_c は別報¹⁵⁾の値を用いた。粒径分布は, 同種の土壌の値を用いるが, 様々な土壌について, データベース化しておけば, より精度の高い予測が可能と考えられる。 H_{swg} は, 測定に長期間を要することから, 既報¹⁴⁾を参考に仮置き値とした。
- 実際の吸引井での負圧または全流量の実測値と各土壌の通気抵抗係数 R を用いて, F_j^{mid} , F_i^{up} および F_i^{low} を決めて吸引ガス濃度を予測計算する。通気抵抗係数も同種の土壌の値として, 既報¹⁶⁾の値を用いた。
- 鉛直方向の初期土壌中含有量として実測値 C_{sgw} を仮置きし, 数日間の予測ガス濃度を計算して実測ガス濃度と差がある場合には, 仮置きした初期土壌中含有量分布を両者の比である δ 倍して $C_{sgw} = \delta C_{sgw}$ に補正する。
- 補正後の予測結果を用いて, 効率的な運転条件や浄化目標に応じた効率的な浄化期間を検討する。決定した運転条件である期間浄化を実行する。
- この間, 吸引ガス濃度を検知管などで実測し, 予測値と比較して大きくずれていれば, 仮置き値である σ_r を設定し直して予測を修正し, 運転を続ける。さらに浄化を続け, 吸引ガス濃度が予測値と大きくずれてきたら, 再度 σ_r または H_{swg} を設定し直す。このように予測結果と比較しながら仮置き値を自己修正することで, 比較的短期間の吸引ガス濃度の実測データから長期間の浄化効果を予測することができる。

(2) 本手法を用いた浄化効果の予測例と予測手法の検討

a) 初期土壌中含有量分布仮置きと各段のガス流量の設定

4.2の手順に従い, パラメータを表-1に示したように設定して, 浄化効果予測を行った。 H_{swg} は, この汚染サイトと同じ地域の複数の土壌の平均的な有機炭素含有率

表-1予測計算に用いたパラメーター

	$K_{st} \delta_v$ kg-dry soil/(m ³ ・s)	D_0 m ² /d	D_G m ² /d	H_{SWG1} m ³ /kg-dry soil	H_{SWG2} m ³ /kg-dry soil
砂質土	40	3.0×10^{-11}	0.30	6.8×10^{-4}	2.8×10^{-3}
関東ローム	40	3.0×10^{-11}	0.30	4.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
黒ぼく土	40	3.0×10^{-11}	0.30	9.2×10^{-3}	7.6×10^{-3}

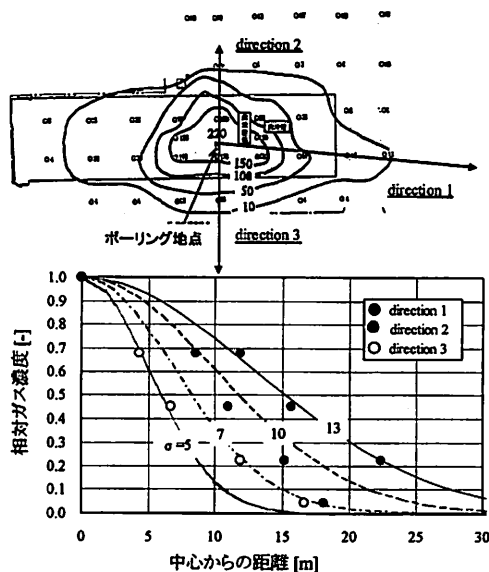


図-2 土壌汚染サイトの例

を用いて、既報¹⁰⁾から算出した、 K_{sa} 、 D_0 、 D_G および粒径分布は、同種の土壌での実測値^{10,18)}を用いた。また、 H_{SWG1} は実験が長期にわたり正しく求めることが困難なため、同種の土壌で測定したおおよその値¹⁰⁾を仮置き値として用いた。

水平方向の初期土壌中含有量分布は、図-2のように表層土壌ガス調査で得られた分布から各方向への濃度変化を正規分布とすると、標準偏差 σ は5~13 m程度となった。この浄化サイトでは、上部の建屋の影響で σ が方向によって異なったが、建屋の影響が最も小さいと考えられるdirection3の $\sigma = 5$ mと仮置きすることとした。各段の初期土壌中含有量は、ボーリング調査で得られた汚染中心での鉛直方向の分布と σ を用いて計算すると、後述のd)に示すように求められた。また、吸引井のガス流量は36 m³/hから、ストレーナー部での各段における吸引ガス流量を設定した。黒ぼく土層からは28 m³/h、関東ローム層からは5.6 m³/h、砂礫層からは2.0 m³/hとなった。

b) 初期土壌中含有量分布補正と吸引ガス濃度変化の予測

吸引ガス濃度の経時変化の計算結果を実測値とともに図-3に示した。初期土壌中含有量の実測値 $C_{S,0}$ を用いた

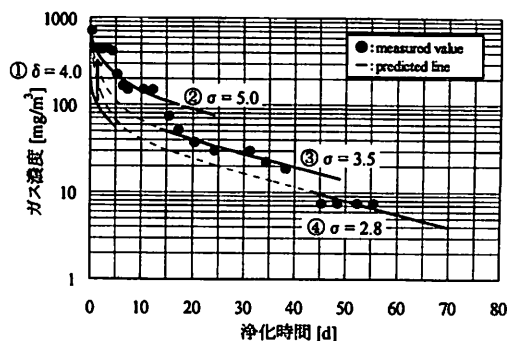


図-3 実測値と予測線との比較

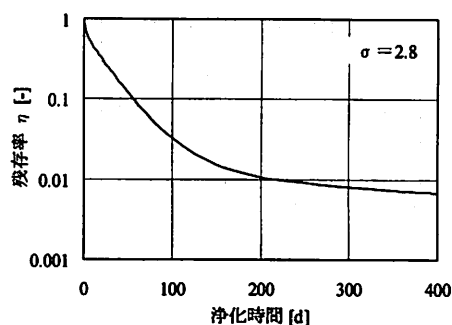


図-4 土壌中の残存率の経時変化の計算例

約2 d程度の吸引ガス濃度の予測線と実測値とを比較すると約4倍の差があったため、 $\delta=4.0$ として初期土壌中含有量 $C_{S,0}$ を決め直した。また、約15 dおよび約45 dで予測線と実測値とが離れたため、 σ を3.5および2.8の値に修正した。このような修正を必要としたことは、最初に設定した初期土壌中含有量分布に比べて、吸引井に近い部分では土壌中含有量が約4倍大きく、離れた部分ではより小さかったことを意味する。これは、吸引井付近には汚染物質が液状で存在して高濃度となり、離れた部分ではガスのみであったため、過大な値に設定してしまったためと考えられる。汚染中心の液の量は、限られたボーリング調査から把握することは不可能である。しかし、液状の汚染物質は、既報¹⁰⁾より非常に気化速度が速いことが分かっている。そのため、液は比較的速やかに気化すると考えられ、液が吸引除去された後は、予測精度が向上すると考えられる。図-3でも時間の経過とともに修正の間隔も長くなっている。

以上のように予測を行えば、比較的短期間の実測値から長期間を予測することが可能であることが示され、本研究で提案した多段同心円柱モデルおよび実測吸引ガス濃度によって補正を行う浄化効果予測手法が実際の汚染

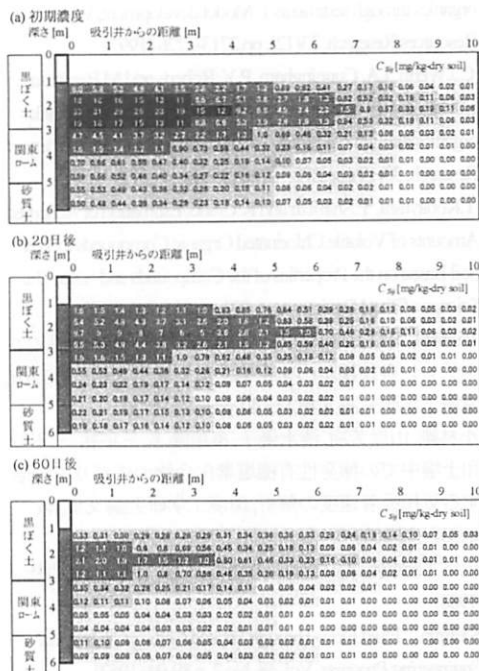


図-5 土壌中含有量分布の経時変化の計算例

現場に適用できると考えられた。

c) 浄化サイトにおける浄化効果低減の確認

汚染物質の浄化前総量に対する残存率[%]の経時変化を計算した例を図-4に示す。これより、浄化初期には傾きが大きく汚染物質が効率よく除去されるが、時間の経過とともに傾きは小さくなり、除去効率が低下することが示され、土壌ガス吸引法の問題点である現象も確認できた。このようにして、本予測手法を用いれば、様々な運転条件（流量、ストレーナー位置など）を変化させて効率的な運転条件を検討できるとともに、経済性も考えて自然減衰による浄化などの他の浄化方法に切り替える時期の判定も可能になる。

d) 土壌中含有量分布の変化予測と浄化効果向上の検討

浄化開始から0d、20d、60d後の土壌中含有量分布の計算結果の例を図-5に示す。これより黒ぼく土層の高濃度部分の土壌中含有量は、60dで約1/16まで低下したことが分かった。また、砂礫層では、同じ60dで約1/5にしか低下せず、浄化に時間がかかることがわかった。これは、飽和帯付近の砂礫層は含水率が高く通気抵抗が大きいため、流量が小さくなっていることも原因であるが、砂礫中の無機鉱物の粒径が大きいために、脱離速度が遅いことも原因と考えられる。また、今回の予測例から、この浄化サイトでは黒ぼく土の浄化が十分ではなく、多少の汚染が残っていることが分かる。この浄化現場では、

表層付近までストレーナーが切られているため、表層からのガスの流入量が多くなり、黒ぼく土層の高濃度に汚染されている段には十分な量のガスが流れていないことが考えられる。より高濃度で汚染されている段により多くのガスが流れるように、表層に近い段や汚染の少ない段にストレーナーを切らないようにすれば、より効率的な浄化ができたと考えられる。このように、本手法を用いれば、ストレーナーの位置や吸引流量などの最適な条件を求めて、より効率的な浄化が行えると考えられた。

なお提案したモデルは、現時点では脱離現象のみを考慮しており、汚染分布が大きく歪んでいたり、汚染箇所が複数ある場合などにも適用できるよう、初期汚染濃度の競って方法の検討や吸着減少も考慮したモデルに拡張することが有用である。さらに、提案した浄化効果予測手法を様々な運転条件での多くの汚染現場に適用し、最適運転条件の決定方法や浄化終了時期の判定方法について検討し、別報で報告したい。

5. まとめ

本研究では、現実設定可能なパラメータのみを用い、また土壌汚染メカニズムを考慮した浄化効果予測手法を構築し、設定したパラメータでの不確実性を測定が容易な吸引ガス濃度の実測値で補正しながら長期間の浄化効果を予測する方法を検討し、以下の結論を得た。

- 吸引ガスの流れ方を簡単な多段同心円柱モデルに近似し、各土壌の通気抵抗係数からストレーナー部とその上部および下部、また各部の各段ごとに流れるガス流量の分配方法を決定できた。
- 初期土壌中含有量の分布は、容易に得られる表層土壌ガス濃度分布、汚染中心付近での鉛直方向の土壌中含有量分布を用いて仮置きし、運転初期に得られる吸引ガス濃度を用いて補正できた。また、吸引ガス濃度の予測値と実測値とを比較して、修正することにより、短期間の実測値から長期間の浄化効果を予測できる新しい浄化効果予測手法を提示した。
- 本モデルを実際の汚染現場に用いて、吸引ガス濃度変化や土壌中含有量の経時変化を予測計算できることを確認した。また、本法で土壌の種類の違いによる浄化しやすさや、ストレーナーの位置による浄化効果などの検討も可能となり、最適運転条件や費用対効果を考えた浄化手法の切り替えの検討に有効と考えられた。

参考文献

- 環境省水・大気環境局、平成20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/h21-04/index.html>

- 2) 山本勇：わが国における土壤汚染要診断サイト数を推定する, 地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会第6回講演集, p.1-2 (1998)
- 3) 小林剛：土壤汚染の現状と今後の課題, 安全工学, Vol.40, No.3, pp161-167 (2001)
- 4) 長藤哲夫ら：揮発性有機塩素化合物の土壤ガス吸引法における浄化影響要因に関する研究, 土木学会論文集, No.594, pp35-44, (1998)
- 5) A.T.Yeung and Hui-Tsung Hsu : Semianalytical Simulation of Soil Vapor Extraction, Pract Period Hazard Toxic Radioact Waste Manag, Vol.6, No.1, pp.14-22 (2002)
- 6) J.F.Campagnolo and A. Akgerman : Modeling of Soil Vapor Extraction (SVE) System -Part I, Waste Management, Vol.15, No.5/6, pp.379-389 (1995)
- 7) J.F.Campagnolo and A. Akgerman : Modeling of Soil Vapor Extraction (SVE) System -Part II, Waste Management, Vol.15, No.5/6, pp.391-397 (1995)
- 8) 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, 16, pp.346-353 (1993)
- 9) 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, 37(5), pp.5-9 (1995)
- 10) 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, 54, pp.307-327 (2002)
- 11) 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, 33(12), pp.2713-2726 (1997)
- 12) 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, 33(12), pp.2727-2740 (1997)
- 13) 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)
- 14) 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)
- 15) 小林剛, 山岸芳樹, 清水優子, 亀屋隆志, 三宅祐一, 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, 環境工学研究論文集, 46, pp.307-312 (2009)
- 16) 化学工学協会編, 化学工学便覧, p.278, 丸善株式会社 (1988)
- 17) S.Ergun : Fluid Flow Through Packed Columns, Chemical Engineering Progress, Vol. 48, No.2, p.89-94 (1952)
- 18) 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)
- 19) 大塚寛人, 小林剛, 浦野紘平, 土壤ガス吸引法による汚染土壌の浄化効果の予測手法—地質による流量配分方法と浄化効果のダイナミック補正予測手法—, 第10回地下水・土壤汚染防止対策研究集会, pp.549-551 (2004)

(2010. 5. 21 受付)

Effect Prediction Method for Vapor Extraction Remediation of Organochlorine Solvent in Soil by Multilayer Concentric Cylinder Model

Takeshi KOBAYASHI^{1,2}, Yoshiki YAMAGISHI¹, Hiroto Otsuka¹,
Shin KUBOTA¹, Takashi KAMEYA¹, Yuyu LIU¹, Kohei URANO¹

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

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

The long-term prediction method is needed to select the most effective cleanup condition for vapor extraction remediation of volatile pollutants in soil. In this study, a new long-term prediction method of remediation effect considering the cleanup mechanism was proposed, in which the uncertainty of the parameters were corrected by the gas concentration measured easily. Both the pollution distribution and gas flow were approximated to the simple multilayer concentric cylinder model. The gas flow rate was decided by using the air-flow resistance coefficient of each soil layers. The initial concentration distribution in soil was decided temporarily from the surface gas concentration distribution, the vertical soil concentration distribution in the pollution center and the initial suction gas concentration. It is proposed that this prediction method can be applied to actual field.