

地盤中における揮発性有機化合物の 浸透およびガス拡散現象

下村雅則¹・今村 聰²・末岡 徹²・長藤哲夫³・平田健正⁴

¹正会員 工修 大成建設(株)技術研究所自然環境部(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工博 大成建設(株)技術研究所自然環境部(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 工博 大成建設(株)エンジニアリング本部(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

⁴正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科(〒640-8510 和歌山市栄谷930)

不飽和地盤中における揮発性有機化合物の浸透現象およびガス拡散現象のメカニズムをカラム試験によって推定した。保水性の高いローム土中を浸透する揮発性有機化合物の透液係数は飽和度に強く依存し、珪砂や豊浦砂を用いた試験では、飽和度の影響は比較的小さいことが確認できた。また、TCEガスの拡散実験から、間隙率の等しい試料中でも試料の種類によりみかけの拡散係数が異なることを示唆し、不飽和地盤中でのガス拡散係数の飽和度依存性を明らかにした。

Key Words : column test, unsaturated soil, volatile organic compounds, seepage, diffusion, soil and groundwater contamination

1. はじめに

トリクロロエチレン(TCE)等揮発性有機化合物による土壌汚染・地下水汚染の問題がクローズアップされてきている。通常これらの問題は、揮発性有機化合物を使用している事業所のタンク・保管場所・廃棄物埋設場から不飽和地盤中に浸透して行くことにより生じるものである。不飽和地盤に浸透していく揮発性有機化合物は、比重が大きく粘性係数も水と比較して小さいため、地盤内では横方向にはほとんど拡がることなく、ほぼ真直ぐ下方に進行していくものと考えられる。そのため、この状態では広域的な汚染原因とはならないものの、不飽和地盤中の揮発性有機化合物は浸透の過程で揮発することにより、ガスの状態で存在し、拡散することになる。

広域的な汚染は、この汚染物質が帯水層に達し、わずかながらではあるが地下水中に溶解し、地下水の流れと共に拡がっていく。このため、広域的な土壌汚染・地下水汚染を未然に防ぐあるいは現在以上の汚染物質を地下水に溶解させないようにするためにはこの不飽和地盤中での汚染物質の挙動を正確に把握することが重要である。図-1に汚染メカニズムを示す。

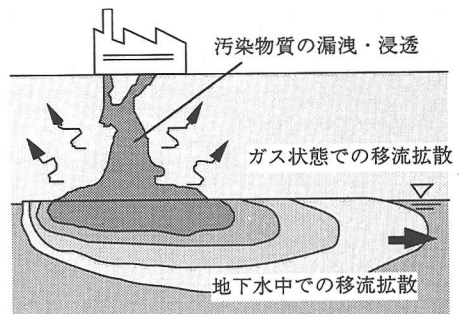


図-1 汚染メカニズム

不飽和地盤における揮発性有機化合物の浸透現象は、地盤の種類・飽和度の影響を受けると考えられる。また、これらの揮発性有機化合物は水に対する溶解度が低いために、不飽和地盤中は土壌水・揮発性有機化合物・気相の多相状態で流下していくことが予想される。多相流の理論は確立されているといえども、日本の代表的な不飽和地盤においてこれら多相状態の浸透現象に関する実験データは多くない。

また、地下水に溶解した汚染物質の移流・拡散に関しては様々な研究がされているものの、不飽和地盤中で揮発した汚染物質の分散に関する研究は、実験

的にも困難であることからほとんど実施されていない。

したがって、浄化メカニズムの把握や浄化予測を実施するためには揮発性有機化合物の浸透とガス分散についての実験データを収集する必要がある。

本研究は、不飽和地盤中における揮発性有機化合物の浸透現象、ガスの分散現象を把握するために飽和度・地盤の種類に関する浸透実験・ガス分散実験を実施して、得られた結果より浸透・ガス分散の飽和度等の依存性について検討を行ったものである。

2. 多相流れと物質移行のモデル

本研究では、実験によって得られた浸透および拡散現象についての評価を行うために、多相流れと物質移行のモデルを用いて検討を行っている。

本モデルは2相(空気・水)または3相(空気・水・非水成液相)すなわち NAPL (Non Aqueous Phase Liquid) の多孔質体内における流れおよび物質移行をモデル化している。流動解析において重要な要素となる各相間の透過度-飽和度-サクション圧の関係は、van Genuchten モデルの拡張式により定義されている。また、物質移行解析には多孔質体中の物質の拡散係数に関するパラメータを明確にする必要がある。

これらのモデルを使用して実験結果を評価するためには、揮発性の汚染物質、種々の多孔質体への適用性が問題となる。

(1) 3相の不飽和浸透特性

空気と水の2相系の飽和度-サクションの関係を表(1)で表す¹⁾。

$$\bar{S}_w = [1 + (\alpha h_{aw})^n]^{-m} \quad (1)$$

ここで、 S_w は水の有効飽和度、 α [L⁻¹]、 n [-] は多孔質体のパラメータ、 $m=1-1/n$ 、 h_{aw} は空気と水の圧力水頭差である。NAPLの存在する場所では次に示す3相の関係を仮定する²⁾。

$$\bar{S}_w = [1 + (\alpha \beta_{ow} h_{ow})^n]^{-m} \quad (2a)$$

$$\bar{S}_t = [1 + (\alpha \beta_{ao} h_{ao})^n]^{-m} \quad (2b)$$

ここで、 \bar{S}_w は見かけの水飽和度、 \bar{S}_t は有効総液体飽和度(間隙内に残留しない地盤間隙中の水、NAPL 飽和度)、 β_{ao} は、水の表面張力と NAPL の表面張力の比、 β_{ow} は、水の表面張力と水-NAPL の界面張力の比である。 h_{ow} と h_{ao} は、それぞれ NAPL と水、空気と NAPL の圧力水頭の差を示している。見かけの水飽和

度は以下の式で求められる。

$$\bar{S}_w = \bar{S}_w + \bar{S}_{ot} \quad (3)$$

ここで、 \bar{S}_{ot} は、間隙中の水の中に独立して取り込まれている NAPL の飽和度である。

次に、各相(水、NAPL、空気)の透過度は以下のように表される。

$$K_{wj} = k_{rw} K_{swj} \quad (4a)$$

$$K_{oj} = k_{ro} K_{swj} / \eta_{rp} \quad (4b)$$

$$K_{aj} = k_{ra} K_{swj} / \eta_{ra} \quad (4c)$$

ここで、 k_{rp} は p 相の飽和透水係数に対する相対浸透率 $p=w$ (水)、 o (NAPL)、 a (空気)、 η_{rp} は p 相と水との絶対粘性比、 K_{swj} は水の飽和透水係数テンソルとする。

van Genuchten の 3 相モデルに相当する相対透過度の関係を部分的に修正することにより NAPL のトラップの影響を考慮できる。相対透過度の関係は、以下によって求められる^{2), 3)}。

$$k_{rw} = \bar{S}_w^{1/2} \left[1 - (1 - \bar{S}_w^{1/m})^m \right]^2 \quad (5a)$$

$$k_{ro} = (\bar{S}_t - \bar{S}_w)^{1/2} \left[(1 - \bar{S}_w^{1/m})^m - (1 - \bar{S}_t^{1/m})^m \right]^2 \quad (5b)$$

$$k_{ra} = (1 - \bar{S}_t)^{1/2} \left[1 - \bar{S}_t^{1/m} \right]^{2m} \quad (5c)$$

ただし、全パラメータは前述の飽和・サクション圧の関係で定義したものとする。

(2) 多孔質体中の分散係数

多孔質体中の分散は分子拡散係数、力学的分散係数によって構成されており、多孔質体の屈曲を考慮した分子拡散係数は次式のように表される⁴⁾。

$$D_{op}^{dif} = \phi^{1/3} S_p^{7/3} D_{op}^o \quad (6)$$

また、力学的分散係数は以下の様に表される⁵⁾。

$$D_{pij}^{hyd} = \frac{1}{\phi S_p} \left[AT \bar{q}_p \delta_{ij} + (AL + AT) \frac{|q_{pi} q_{pj}|}{\bar{q}_p} \right] \quad (7)$$

ここで、 ϕ は多孔質体の間隙率、 S_p は p 相の飽和度、 D_{op}^o は p 相での分子拡散係数、 AL と AT は縦と横の分散長、 q_{pi} と q_{pj} は i 方向と j 方向の p 相のダルシー速度、 \bar{q}_p は p 相速度の絶対量、 δ_{ij} はクロネッカのデルタである。

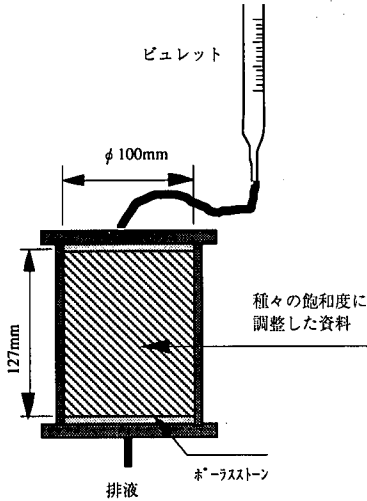


図-2 透液試験装置

表-1 透液試験に用いた揮発性有機化合物の物理定数

物質名	分子量	溶解度 mg/L at 20℃	比重	粘性係数 Pa.s	表面張力 N/m
TCE	131.39	1,100	1.48	5.8×10^{-4}	0.03
ベンゼン	78.11	1,780	0.88	6.5×10^{-4}	0.03

3. 揮発性有機化合物の浸透現象

(1) 浸透実験の概要

不飽和地盤に浸透していく揮発性有機化合物の挙動を把握するために、図-2に示す締め固め透水試験用100mmモールドを用いて透液係数及び残留揮発性有機化合物量（間隙中の揮発性有機化合物量）の測定を行った。ここでは、試料中に浸透物質（NAPL）を通水した場合の圧力勾配（浸透物質の密度と水頭から算定した圧力の勾配）と浸透流速の比例定数を透液係数と表現している。また、残留揮発性有機化合物量は試験終了後にカラム内の試料を採取して分析した。試験では、TCEおよびベンゼンを浸透物質としており、試験装置の作成にあたってはこれらの物質に対して抵抗力の強い材料を使用している。

使用したTCEとベンゼンの物理定数を表-1に示す。比重に関してはTCEは水より重く、ベンゼンは水より軽い。水に対する溶解度はベンゼンの方が大きい。どちらも難溶性物質であるといえる。また、粘性係数・表面張力については両者とも大きな差はない。

試験に用いた試料として、関東地方に広く分布するローム土と、比較のために豊浦砂、珪砂を選択した。試験ケースはローム土、豊浦砂、珪砂ともにそれぞれ5段階に飽和度を変化させている。試験ケース一覧を表-2に示す。

表-2 透液試験ケース

試料	飽和度 (%)	浸透物質
関東ローム	5.4, 20.2, 49.8, 80.4, 96.6	TCE
関東ローム	4.7, 20.5, 48.9, 81.4, 96.0	ベンゼン
標準砂	0.0, 26.0, 47.0, 80.0, 96.0	TCE
標準砂	0.0, 26.9, 45.7, 80.0, 96.0	ベンゼン
4号珪砂	0.0, 17.0, 37.2, 80.0, 96.0	TCE
4号珪砂	0.0, 19.4, 40.6, 80.0, 96.0	ベンゼン

密度は、ローム (1.06 t/m³)、豊浦砂 (1.56 t/m³)、珪砂 (1.66 t/m³) にはほぼ統一して行った。試験の手順を以下に示す。

- 1) 風乾させた試料に対して、乾燥密度、飽和度を考慮し所定の水を加え調整する。
- 2) 100mmのモールドに所定の乾燥密度になるように3層に分割して突固める。その後ポーラスストーンを装着し、透液試験の準備をする。
- 3) 試料上面からTCEまたはベンゼンを大気圧条件下で流下させ、その透液係数および水分の排出量を測定する。透液係数は、地盤に浸透したNAPLの量（ビュレットで測定）から算定し、定常状態の透液係数をその飽和度の時の透液係数とした。
- 4) 透液係数測定後、試料を5分割し、残留揮発性有機化合物水分量を測定する。

(2) 浸透実験の結果

試料としてローム土を使用した場合の飽和度と透液係数の関係を図-3に示した。飽和度が増加するにしたがってそれぞれの物質の透液係数は減少していくが、特に飽和度が60%を超えるあたりから急激に減少していくのがわかる。いずれのケースも実験中有機化合物浸入にともなう水分の排出はなかった。これはローム土の強い保水性のため、NAPLがサクションにより間隙中に取り込まれた水を押し出すことなく、連続した空隙を流下したものと考えられる。また、ローム土を使用した場合にはTCEとベンゼンの差はほとんど見られない。また、図中の実線は式(5b)によって求めた相対透過度から算定したもので、ローム土に相当する不飽和浸透特性の値を仮定している。飽和度が50%以下の場合には、間隙内の飽和度の増加による透液係数の低下が実験結果と多層流れモデルの結果ではほぼ一致している。ところが、飽和度が高くなるとNAPLが浸透する部分の間隙の減少以上に実験から得られた透液係数が低下している。これは、水の飽和度の上昇に伴い、NAPLが通過する連続した空隙の減少および流路が複雑になっているためであると考えられる。

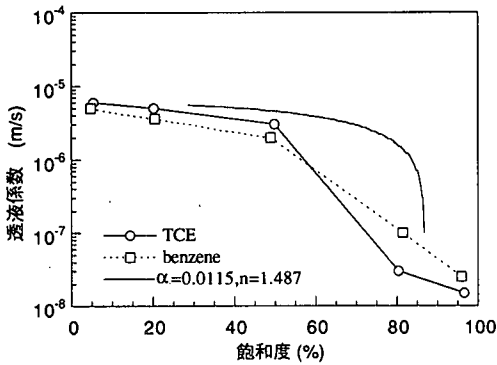


図-3 透液係数の飽和度による変化 (ローム土)

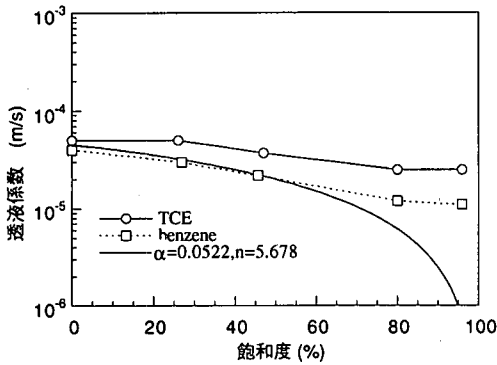


図-4 透液係数の飽和度による変化 (豊浦砂)

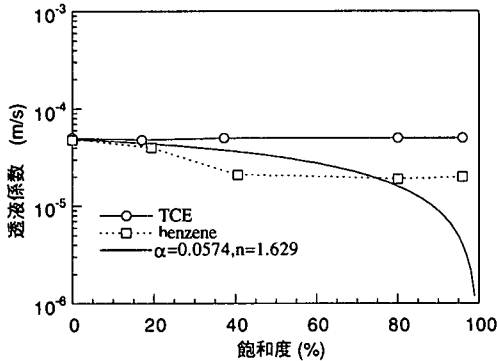


図-5 透液係数の飽和度による変化 (けい砂)

次に、図-4、図-5に豊浦砂および珪砂の飽和度が透液係数に及ぼす影響を示す。ローム土の場合と同様に図中の実線は各試料に相当する不飽和浸透特性を仮定して得られたものである。いずれの場合も実験中に有機化合物の浸入にともなって水分が排出されてくるので、図中80%と100%近くの高飽和度の部分での実際の飽和度は図に示した値より小さい。また、飽和度が50%程度以下の場合には、有機化合物の浸入にともなう水分の排出は見られず、飽和度が80%以上の場合には水分の排出により飽和度が60%以下に低下している。このことを考慮すると、多相流れモデルと実験結果は同様の傾向を示していると言える。

ここで、透液物質の違いによる透液係数の差に着目してみると、ローム土の場合と異なり飽和度が高くなるとTCEの透液係数はベンゼンの透液係数よりも2.5倍程度大きな値を示している。水分の排出が見られない低飽和度の場合には、TCEとベンゼンの透液係数の差は小さいが、高飽和度の場合には、TCEやベンゼンが浸透する際に間隙水を押し出していく。その際に浸透物質の比重が小さいベンゼンの方が間隙水を動かす力が弱く透液係数が低下していることが考えられる。

(3) 浸透のメカニズム

不飽和地盤中を流下していく揮発性有機化合物の浸透メカニズムは、地盤の物性によって大きく異なっている。

ローム土のように保水性が強い地盤では間隙水が移動しにくいので、飽和度が高くなるほど通過できる間隙が減少するとともに、NAPLが通過できる連続した間隙の屈曲が複雑になることから、高飽和度では急激に透液係数が低くなる。そして、間隙水を押し出さずに浸透するローム土の場合にはNAPLの種類による透液係数の差はほとんど無い。ところが、豊浦砂や珪砂のように保水性の低い地盤では、ローム土と比較して容易に間隙水が移動するため、連続した間隙に限らず間隙水を押しつけて浸透していく。そのため、間隙水の排水が見られる高飽和度の豊浦砂や珪砂の場合にはNAPLの比重により透液係数が変化する。

本実験で求めた透液係数は、実際に地表面から漏洩した汚染物質がどの程度の速度で帯水層に到達するか判断する材料となる。その値は、ローム土の場合には 10^{-5} ~ 10^{-8} m/sと飽和度による影響が顕著である。また、豊浦砂・珪砂の場合には透液係数の飽和度による影響は小さく、比重が大きいかほど浸透速度は速いものの、その値は 10^{-5} m/sオーダーであった。

4. 揮発性化合物ガスの拡散

(1) ガス拡散実験の概要

揮発性有機化合物汚染の特徴の一つは、不飽和地盤においてガスの状態で拡散して行くことである。当然のことながら不飽和地盤中のガス拡散現象は、原液の浸透と同様に、地盤の種類や飽和度に影響される。

そこで本実験では、豊浦砂を使用しガス拡散現象の飽和度依存性についての検討を行った。また、比較のためにガラスビーズおよび珪砂も使用している。実験には図-6に示すような高さ150mm程度の小型のカラムを使用し、その試料下部に10mg/lのTCE溶液を注入して一定濃度ガスの発生源とした。

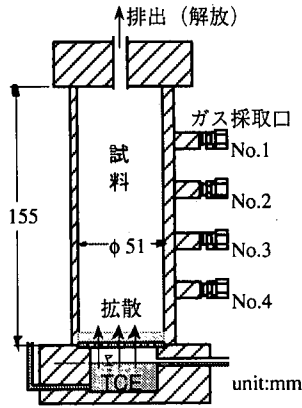


図-6 拡散実験カラム

表-3 拡散実験ケース

試料	乾燥密度	含水比	飽和度	間隙率
	ρ_d (t/m ³)	w (%)	Sr (%)	n (-)
ガラスビーズ(2mm)	1.55	0.0	0.0	0.40
珪砂6号	1.50	0.0	0.0	0.43
	1.45	0.0	0.0	0.45
	1.52	2.5	9.0	0.42
豊浦砂	1.41	4.2	12.9	0.47
	1.58	6.9	27.4	0.40
	1.56	10.0	38.2	0.41
	1.51	14.8	52.0	0.43

ガス濃度の測定に関しては、カラム内のガス採取によってガスの移流が生じ、拡散現象の把握が困難となることが予想されるため、間隙体積の0.1%以下である0.1mlのガスを採取してPIDガスクロマトグラフで分析を行った。また、出口境界の影響を考慮してNo.3のガス採取口よりガスを採取した。

実験手順を以下に述べる。

- 1) 風乾させた試料に対して、乾燥密度・飽和度を考慮し所定の水を加え調整する。
- 2) モールドに所定の乾燥密度になるように3層に分割して突固める。
- 3) 試料下部にTCE溶液(10mg/L)を注入する。
- 4) ガス採取口より0.1mlのガスをサンプリングし、PIDガスクロマトグラフでガス濃度の分析を行う。
- 5) 試験後の含水比・間隙水濃度の測定
実験ケースを表-3に示す。

(2) ガス拡散実験の結果

移流の無い場合の土中ガスの拡散は、屈曲率(Tortuosity)、間隙水への溶解などに影響されるものと考えられる。屈曲率および溶解による遅延は計測が困難な値である。本実験では、これらの影響をすべて含んだ形での拡散係数が求められるため、この拡散係数を無理に分離していない。実験結果から拡散係数を算

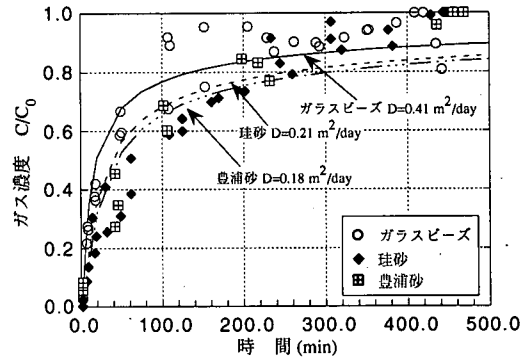


図-7 乾燥状態での拡散係数の比較

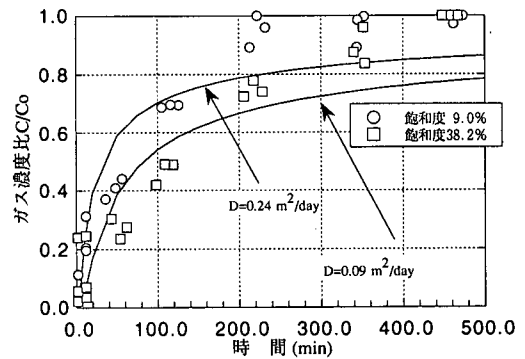


図-8 ガス濃度の経時変化(豊浦砂)

定した式を式(8)に示す。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (8)$$

ここに、 C はガス濃度、 C_0 はガス供給源でのガス濃度、 x はガス供給源からガス採取位置までの距離、 D は拡散係数、 t [T] は時間、 u [LT⁻¹] はガスの移流速度であり、境界条件は $C(x,0) = 0$ ($x \geq 0$)、 $C(0,t) = C_0$ ($t \geq 0$)、 $C(\infty,t) = 0$ ($t \geq 0$) である。

乾燥状態でのガラスビーズ、珪砂、豊浦砂の試験結果を図-7に示す。3試料の間隙率はほとんど等しいにもかかわらず、拡散係数の値はガラスビーズと他の2試料では2倍程度異なっている。これはガラスビーズよりも珪砂・豊浦砂の間隙の屈曲が複雑になっているからと考えられる。

次に豊浦砂の飽和度とガス濃度の経時変化の関係を図-8に示した。図-8は飽和度が9.0%と38.2%の場合の結果を比較したものであり、飽和度が高い場合にはガス濃度の上昇傾向が緩やかになっていることがわかる。

以上の結果および間隙水濃度の測定結果を基に、飽和度と拡散係数および実験後の間隙水中の濃度の関係を整理したものを図-9に示した。拡散係数は飽和度が30%程度まではほぼ同程度の値を示しているが、

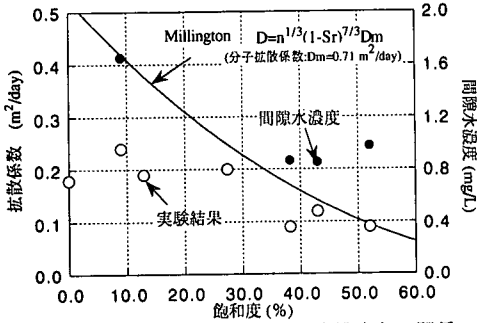


図-9 飽和度と拡散係数・間隙水濃度との関係
TCE注入口

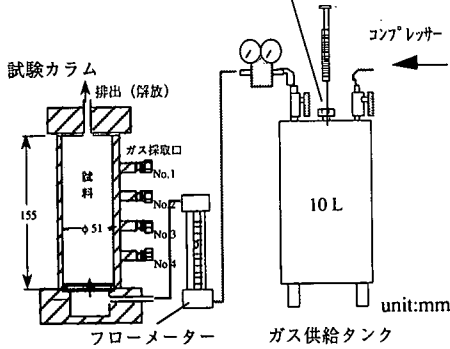


図-10 ガス分散実験装置

飽和度が40%程度から急激に低下している。全体的には含水比が高くなると拡散係数が小さくなっていくことがわかる。式(6)に示すMillingtonらの理論的な研究と今回の実験結果を比較して見ると、飽和度の高い部分では比較的良く一致しているが、飽和度が低くなるとその差は大きくなっていく。

理論的な研究において、多孔質体中の拡散係数はその間隙率と、飽和度に依存するものと考えられているが、実際には図-7からわかるように、間隙率が等しくても、試料の違いによってその値も変化している。

したがって、多孔質体中のガス拡散係数は間隙率と飽和度だけで求められるものではなく、間隙の形状によっても異なると考えられる。

(3) ガス移流実験の概要

移流を考慮したガスの分散実験装置を図-10に示す。本システムは試料下部から一定濃度のガスを供給し、カラム上部のNo.1ガス採取口よりガスを採取してガス濃度の経時変化を測定することにより、分散係数を推定するものである。対象とする汚染物質はTCEとし、10Lのステンレス製タンクを使用し約20ppmのガスを供給している。

試験カラムの上部から採取したガスは、PIDガスクロマトグラフを使用して精密に分析を行った。試料は珪砂4号を使用し、含水比を調整してカラムに充填

表-4 ガス分散実験ケース

試料	ケース名	乾燥密度 $\rho d(\text{g/m}^3)$	含水比 $w(\%)$	飽和度 $S_w(\%)$	間隙率 $n(\%)$
珪砂4号	A-1	1.70	0.0	0.0	0.36
		1.69	0.0	0.0	0.36
	A-2	1.69	1.9	8.6	0.36
		1.67	1.9	8.3	0.37
	A-3	1.68	2.2	10.1	0.37
		1.69	2.2	10.3	0.36
A-4	1.58	6.1	23.7	0.41	
	1.60	6.1	24.6	0.40	
A-5	1.59	7.3	28.9	0.40	
	1.62	7.3	30.3	0.39	
A-6	1.63	9.4	39.4	0.39	
	1.62	9.4	39.1	0.39	

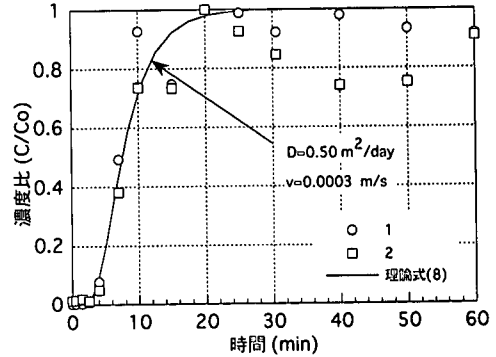


図-11 濃度比の経時変化 (case A-3)

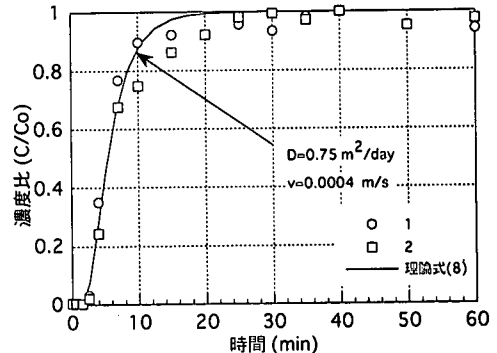


図-12 濃度比の経時変化 (case A-6)

した。実験ケースを表-4に示す。また、今回の実験におけるガスの供給量は約50L/minと一定にして計測時間はガス濃度が十分一定となる1時間としている。

(4) ガス移流実験結果

ガス濃度比の経時変化の一例を図-11、図-12に示す。ここで、測定されたガス濃度の最大値を C_0 の値としている。図中の実線は、式(8)の流速と分散係数をパラメータとしてガス濃度比が急激に変化する部分が一致するようにフィッティングを行った結果である。本実験ではガスを採取した地点が境界に近いため、無限遠境界を仮定している式(8)によるフィッティングでは正確な値は求められないが、移流を考慮したカラム試験は全て同条件で行っているため、飽和度と分散係数に対する相対的な関係を評価することができるものと考えている。

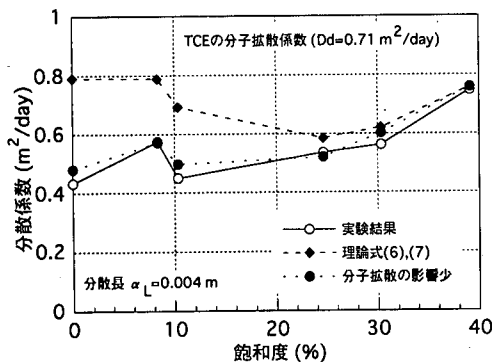


図-13 飽和度と分散係数の関係

各ケース2回の測定結果は、各々同様の傾向を示していることから、式(8)によるフィッティングにはこれらの平均値を使用した。フィッティングの結果、飽和度が高くなるほど分散係数が大きくなる傾向を示した。これは、飽和度の上昇に伴ってガスが通過する連続した間隙の屈曲が複雑になることから、移流による分散が大きくなっていることを示している。また、実験は定流量で行ったが、フィッティングにより得られた流速が異なるのは、流量制御の誤差であるものと考えられる。

次に、飽和度と分散係数の関係を整理したものを図-13に示す。図中の実線は、実験結果から得られたものである。また、式(6)と式(7)から算出した飽和度と分散係数の関係を黒丸で示した。

また、図-9に示すように豊浦砂を用いて実施した移流の無い場合の同様の実験では飽和度が30%以下において、分子拡散係数は飽和度の影響が小さくほぼ一定の値であることを示している。この結果を考慮して分散係数を求めると図中の破線のようになる。実験結果と分子拡散の影響を小さくした場合の分散係数はほぼ同様の値を示すことから、今回の条件下では、式(6)で示すものよりも分子拡散の影響は少なく、移流が卓越する飽和度の高い場合において式(6)は十分適用できるものであることがわかる。

(5) ガス拡散のメカニズム

不飽和地盤中のTCEガスの拡散は、連続した間隙を通過していく。間隙水の拡散への影響には、汚染物質の間隙水への溶解に起因する拡散の遅れと間隙の減少による拡散経路の変化がある。今回の実験では溶解度の低い物質を使用したため、間隙水中からTCEはほとんど検出されていない。このように間隙水や土粒子が汚染物質を吸収しない場合には飽和度の上昇に伴い間隙経路が複雑になっていき、見かけの分子拡散係数は減少していく。そして、移流のある場合の分散は大きくなる。これは、飽和度が高くなるほど実流速が

大きくなるためである。

今回実施したTCEの実験では、豊浦砂の飽和度と見かけの拡散係数の関係を明らかにし、飽和度の高い部分では従来の理論的な研究結果を用いることができることがわかった。また、試料の間隙率および飽和度が等しい場合においても、試料の種類によって見かけの拡散係数の値が異なることがわかった。これは、間隙形状の複雑さによって拡散経路も複雑になるためだと考えられる。

5. おわりに

揮発性有機化合物による土壤汚染・地下水汚染の問題は、地盤環境を保全するうえで早急に解決すべき問題である。一度地下に浸透してしまった汚染物質の回収は非常に困難であり、修復のためにはばく大な費用と時間を要する。そして、地下に浸透した汚染物質は帯水層に達するまで、必ず不飽和地盤を通過することになる。不飽和地盤中における汚染物質の挙動は、これまでにあまり明確にされておらず、不飽和地盤中にトラップされた汚染物質は長期的な汚染源となる。そのため本研究では不飽和地盤中における汚染物質の挙動を把握することを目的として実験を行ってきた。

今回の実験では揮発性有機化合物として、浸透はTCEとベンゼンを、ガスの移流・拡散はTCEを使用し、透液係数および拡散係数の飽和度依存性を明らかにした。他の汚染物質あるいは別の種類の地盤における汚染物質の挙動については検討を行っていないが、以上の実験結果より定性的な傾向は推定できている。

参考文献

- 1) Van Genuchten, M. T. : A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898, 1980.
- 2) Parker, J. C. and Lenhard, R. J. : A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow, 1. Saturation-pressure relations, Water Resource Res., 23, pp.2187-2196, 1987.
- 3) Kaluarachchi, J. J. and Parker, J. C. : Effects of nonwetting liquid entrapment on multiphase flow in porous media. Transport in Porous Media, p.7, 1989.
- 4) Millington R.J. and Quick, J. : Gas diffusion in porous media, Science. 130:pp.100-102, 1959.
- 5) Bear, J. : Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York, 764 p., 1972.
- 6) 今村聡, 末岡徹, 長藤哲夫, 金子伯男, 藪田英俊: 土壤浄化工法の適用について, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.1967-1968, 1991.

7)Akio Ogata:Theory of dispersion in granular medium, Fluid
Movement in Earth Materials, pp.112-113,1970.

(1998.2.26 受付)

SEEPAGE AND GAS DIFFUSION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN UNSATURATED SOILS

Masanori SHIMOMURA, Satoshi IMAMURA, Toru SUEOKA,
Tetsuo NAGATOU and Tatemasa HIRATA

The researches of contaminants' behaviors in unsaturated soils are important to remove the contaminants effectively. A series of column tests was conducted to understand the mechanisms for seepage and gas diffusion behaviors of volatile organic compounds (VOCs) in unsaturated soils. The result of seepage tests yielded that permeability of VOCs in loam, which has high water-holding capacity, is strongly affected by degree of water saturation, but less affected in silica sand and Toyoura sand. Besides, gas diffusion tests indicated that diffusion coefficients of VOCs gas differ in the various kinds of specimens even they are prepared at a same porosity.