

## 第七部門

## 地下水中ベンゼンの移流・拡散および微生物分解の実験的検討

大阪府立工業高等専門学校 正会員 ○藤長 愛一郎  
 大阪府立工業高等専門学校本科 西 智代  
 大阪府立工業高等専門学校本科 真砂 憂大

## 1. はじめに

土壌・地下水汚染が90年代から日本において社会問題になっている。汚染された土地をリスク管理して使うことは土壌汚染対策法で認められているが、土地を売買する際には高額な費用のかかる完全浄化が求められるため、汚染が判明した土地の半数程度が放置されている<sup>1)</sup>。そこで、比較的安価なバイオレメディエーションや自然減衰法(Natural Attenuation)などの原位置浄化法を採用し<sup>2)</sup>、リスク管理することにより、土地用途や現場の状況を考慮することができれば、この問題は解決すると考えられる。

本研究では、汚染された土地(汚染サイト)をリスク管理することを前提として、原位置浄化法を選定する際に重要となる濃度減少予測を、定水位透水試験を応用した簡易な装置を製作して実験した。そして、ベンゼンの濃度変化を移流・拡散の数式モデルを用いて予測した。また、微生物による分解・浄化効率を把握するため、寝屋川の河川水を用いたバッチ式のビーカー実験を行い、分解速度を解析した(図1参照)。

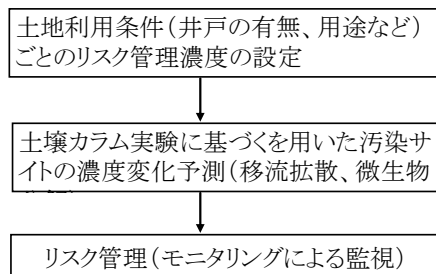


図1 提案するリスク管理の手順

## 2 土壌カラム実験によるベンゼンの挙動解析

## 2.1 実験方法

図2に製作した土壌カラム実験装置(1.5ℓ, 直径7.85cm)を示す。土壌カラムに、土浦標準砂を厚さ(L)21.7cm詰め、水道水を上方から流し、余剰水を排水することで水位差 $\Delta H$ (31.0cm)を一定にした。そして、ベンゼン水溶液(0.44g/l, 20cm<sup>3</sup>)をカラムの上部から注入し、実験を開始した。ベンゼンの分析にはガスクロマトグラフィー・ヘッドスペース法で用いた。

見かけの流速(ダルシー流速, 比流量) $u$ は0.035 cm/sであり、ダルシーの式( $u=k \cdot \Delta H/L$ )より、透水係数 $k$ は0.033 cm/sと算定された。また、実流速 $v$ は見かけの流速 $u$ を間隙率 $n$ (測定値0.47)で除し、0.075 cm/sと算出される。

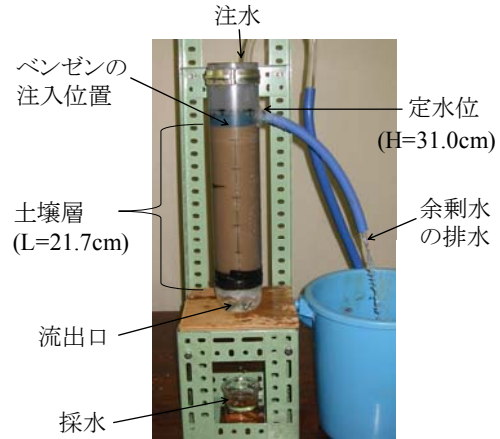


図2 カラム実験装置

## 2.2 解析方法

移流・分散によるベンゼン濃度変化を予測するために、一次元の移流に三次元の拡散に微生物分解(一次反応速度式)を考慮したモデル式を使用する。解析解は式(2)<sup>3)</sup>を利用した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - k \cdot C \quad \text{式(1)}$$

$$C(x, t) = \frac{C_0 V_0}{8(\pi \cdot t)^{3/2} (D_x \cdot D_y \cdot D_z)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(x - v \cdot t)^2}{4 D_x \cdot t} - kt \right] \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $C_0$ :ベンゼンの初期濃度(440 mg/l),  $V_0$ :ベンゼンの初期容量(20cm<sup>3</sup>),  $t$ :ベンゼン投入後の時間(s),  $D_x, D_y, D_z$ : $x, y, z$ 方向の分散係数( $x$ を流れ方向, $y$ と $z$ を $x$ に直角な方向, $D_y$ と $D_z$ はともに $D_x$ の1/10の値とした),  $x$ :砂層の表面からの距離,  $v$ :ベンゼンの流速(cm/s),  $k$ :微生物分解速度定数(1/day)(カラム実験では考慮せず, $k=0$ とする)

## 2.3 実験結果および解析結果

カラム流出口で採水した流出水中のベンゼン濃度の実測値と式(2)を用いて計算した予測値を図3に示す。分散係数 $D_x$ とベンゼンの流速 $v$ を未知数として、実験結果の値を用いて最小自乗法により求めた。その結果、 $D_x$ は0.0038 cm<sup>2</sup>/sとなり、移流を伴う拡散(分散)は、分子拡散係数の文献値 $9.8 \times 10^6$  cm<sup>2</sup>/s<sup>4)</sup>よりかなり大きな値となった。また、ベンゼン流速 $v$ は0.068 cm/sとなり、実流速 $u$ (0.075 cm/s)より小さい値となっており、この遅れは土壌への吸着・脱着が主な原因であると考えられる。

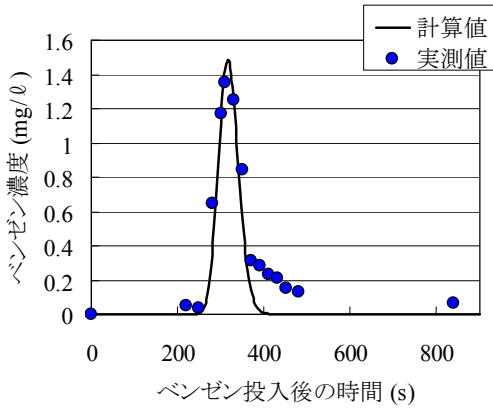


図3 カラム流出口におけるベンゼン濃度の経時変化

### 3. 微生物分解実験

#### 3.1 実験方法

2種類のベンゼン濃度(88mg/l, 0.88mg/l)を、微生物が存在する寝屋川の水と純水(Blank)でそれぞれ30ml作成した。そして、実験開始日、1日後、5日後の各分析項目を測定した。

分析項目は、ベンゼン、微生物数、溶存酸素(DO)およびpHとした。

#### 3.2 実験結果

ベンゼン初期濃度 88mg/l と 0.88mg/l の河川水 (菌あり) と Blank (菌なし) の濃度変化を図4に示す。初期濃度が88mg/lでは1日目には76mg/lと停滞しているが、その後、対数的に減少している。初期濃度 0.88mg/l については1日目から対数的に減少している。

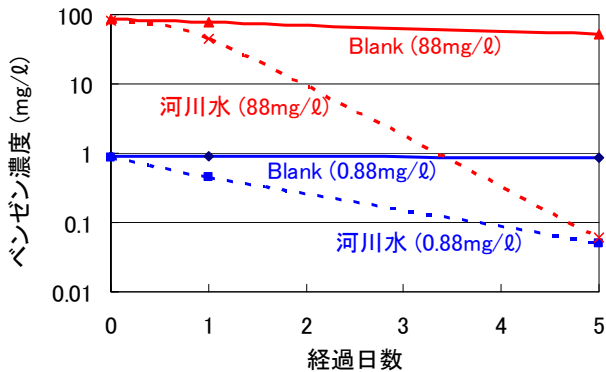


図4 初期値0.88mg/lのベンゼン濃度の経時変化

また、微生物量の変化を図5に示す。初期濃度 0.88mg/l は1日目に微生物量が増加し、5日後には減少した。この結果は、ベンゼン濃度が1日目で半減し、5日目で既に濃度が十分減少したことを示唆している。また、初期濃度 88mg/l については5日目までほぼ変化がない。この結果は、1日目にベンゼン濃度があまり減少せず、微生物の増殖停滞期と関連があることを示唆している。また、DOは5日間で、ベンゼン初期濃度 0.88mg/l が1mg/l程度、88mg/l が2mg/l程度減少した。なお、pHは7.6程度で変化

はなく、優位な低下は見られなかった。

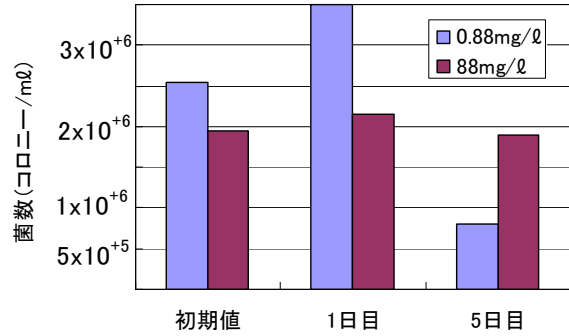


図5 微生物量の推移

### 3.3 微生物分解速度解析

ベンゼン濃度の減少速度は濃度に比例する一次反応とすると式(3)で表される。

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad \text{式(3)}$$

ここで C:ベンゼン濃度(mg/l)

k:一次反応速度定数(1/day)

kの値を実験結果を用いて最小自乗法で求めると、ベンゼン濃度0.88mg/lの場合は0.45(1/day)となり、88mg/lの場合は0.19(1/day)となった。SuarezとRifaiは現場や実験による嫌気性条件下でのベンゼン分解速度をまとめ、45データの平均は0.003(1/d)で最小0~最大0.023(1/d)であった<sup>5)</sup>。このことにより、好気性による反応速度はかなり高く、処理時間の面で有利であるといえる。

### 4. おわりに

本研究では、原位置浄化法をリスク管理に適用するために、簡単なカラム実験を実施し、移流・拡散モデル式を用いて地下水中のベンゼンの挙動を解析し、さらに微生物分解速度を求めた。この実験結果を使うと、モニタリングや詳細調査の計画、さらに原位置浄化法の設計を行なうためのデータが取得でき、リスク管理と合わせれば、汚染で放置された土地の問題を解決する手段になり得ると考えられる。

### 参考文献

- 1) 環境省(2007):平成17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
- 2) 藤長愛一郎ら(2003): リスクアセスメントに基づいた土壌・地下水複合汚染の現場ごとの浄化目標値設定手法に関する検討, 土木学会論文集 No.727/VII-26, pp.39-47.
- 3) Baetslé LH (1969): Migration of radionuclides in porous media, In A.M.F. Duhamel Progress in Nuclear Energy Series XII, Health Physics, Pergamon Press, Elmsford, New York, pp.707-730.
- 4) U.S.EPA(2004): Region 9: "PRG Table", "Phys-Chem Table".
- 5) Suarez MP and Rifai HS (1997): Biodegradation rates for fuel hydrocarbons and chlorinated solvents in groundwater. Bioremediation Journal 3 (4), pp.337-362.