

1. はじめに

近年、ガソリン由来のベンゼン類（ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレン）等の有害物質が漏洩している土壌・地下水があり、問題となっている。それは地下水飲用に最も影響が大きく、私たちの体内に入り込み人体に影響を及ぼす可能性がある。よって、土壌や地下水中に漏洩したベンゼン類の挙動を把握し、濃度予測をすることが必要となる。本実験では、実際の汚染土壌でベンゼンが時間が経過するとともに、どのように移流・拡散していくかを土壌カラムを用いて実験し、解析を行ない、汚染現場への適用を検討する。

2. 実験・解析方法

カラム（円筒）の中にベンゼン類で汚染されていた現場の土壌を入れて、ベンゼンを下方から流すという小規模の実験を行う（図1、図2参照）。この汚染現場は、ガソリンが漏洩したもので、平成3年から18年にかけて、揚水などで浄化され環境基準以下になった。そして実験条件を表1に示す。実験1, 2, 3, 4では土層高さ23cm、内径3.2cmのカラム1で実験を行った（図1参照）。また、実験5, 6では土層高さ40cm、内径3.1cmのカラム2で実験を行った（図2参照）。どちらの実験装置も、下方から注入、上方から採取をして実験を行った。ベンゼンのガス濃度測定にはガスクロマトグラフィーを用いた。次に、カラムから流出したベンゼンの濃度変化を移流・拡散方程式(1)を用いて解析を行い、分散係数 Dx を最小二乗法より決定する。その式より求めた解析解を式(2)に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dx \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Dy \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + Dz \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

$$C(x,t) = \frac{Co \cdot Vo}{8 \cdot (\pi \cdot t)^{\frac{3}{2}} \cdot (Dx \cdot Dy \cdot Dz)^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-v \cdot t)^2}{4 \cdot Dx \cdot t}\right] \quad (2)$$

ここで、 C : ベンゼンの濃度 (mg/L), Dx, Dy, Dz : 分散係数 (直進方向、横方向、縦方向), v : ベンゼンの流速 (cm/s) x : 土壌層厚(cm)

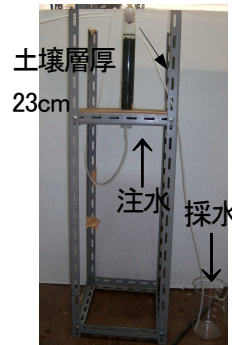


図1 カラム1

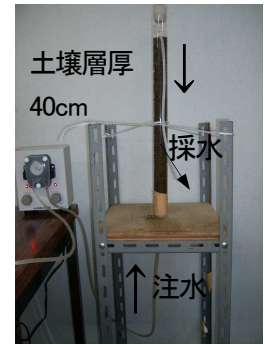


図2 カラム2

表1 実験条件

実験	土壌層厚	流量(mL/s)	ベンゼン注入濃度
1	23cm (カラム1)	1.5	440 mg/L
2		1.5	
3		1.4	
4		0.14	
5	40cm (カラム2)	0.15	
6		0.073	

3. 実験・解析結果

カラム2で行った実験6の実験・解析結果グラフを図3に示す。実験結果は、ベンゼンの平均流速 $v = 0.025$ (cm/s), 水の間隙流速 $u' = 0.035$ (cm/s) 分散係数 $Dx = 0.015$ (cm²/s) となった。ベンゼンの平均流速は、ベンゼン濃度が図3のピークが出た時間から計算した。この結果、ベンゼンの平均流速 v は、水のダルシー流速に間隙率 $n = 0.28$ を考慮した間隙流速 cm/s ($v' = v/n$) に比べて速い。実験値ではベンゼン濃度がピークになった後、濃度がゆるやかに減少する現象（テーリング）が見られる。

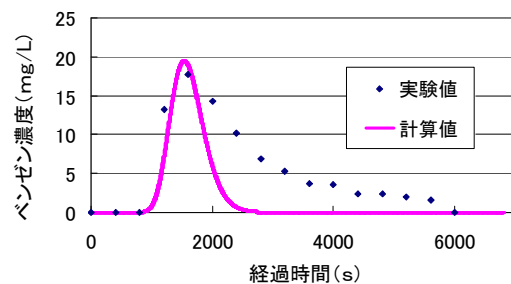


図3 実験6の実験・解析結果

また、図4は熊本県熊本市でガソリンの漏洩による汚染が広がっていた現場での地下水の濃度変化と、実験6より解析した分散係数 D_x を考慮し、移流・拡散方程式より解析したグラフで、ベンゼンの流速は、水の間隙流速と遅延係数 R で決定した。その結果を表2に、遅延係数は式(3)に示す。

$$R = \frac{u'}{v} \quad (3)$$

ここで、 R ：遅延係数、 v ：ベンゼンの流速

u' ：水の間隙流速

式(3)より実験での遅延係数を計算すると、1.4となった。

また、本研究では、実際に汚染されていた現場の土壌で実験を行ったので、テーリングが生じたと考えられる部分を濃度が減少していく式で解析を行なった。その式を式(4)に示す。今回は、経過時間が2800秒からテーリングが生じたと考え、2800秒での測定値を初期濃度として解析を行なった。また、図4の解析で用いた現場のデータを式(4)でも解析を行った。結果グラフをそれぞれ図4、図5に示し、最小自乗法より決定した減少速度係数 k の解析結果は表2に示す。また、式(4)の解析解を式(5)に示す。

$$\frac{d}{dt}(C \cdot n \cdot V + Kd \cdot C \cdot \rho \cdot V) = -k \cdot C \cdot n \cdot V \quad (4)$$

$$\text{これを解くと、} C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{k}{R}t\right) \quad (5)$$

$$\text{ここで、} R : \text{遅延係数、} R = 1 + \left(\frac{\rho}{n}\right) \cdot Kd \quad (6)$$

C ：ベンゼン濃度、 n ：間隙率 (0.2 とする)、 V ：汚染範囲の体積 (m^3)、 Kd ：ベンゼンの土壌への吸着係数 (1.458 とする)、 ρ ：土壌密度 (kg/L) (1.8 とする)、 k ：減少速度定数 (1/s)

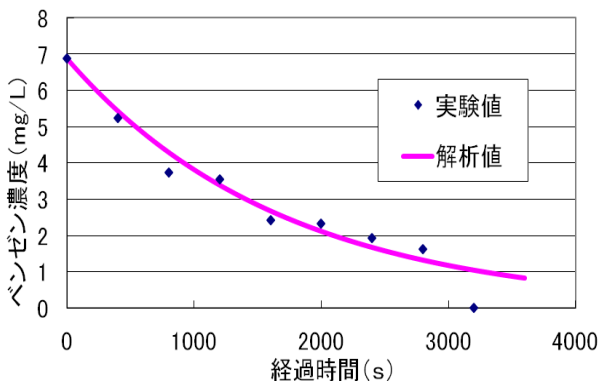


図4 実験データを用いた式(4)による解析結果

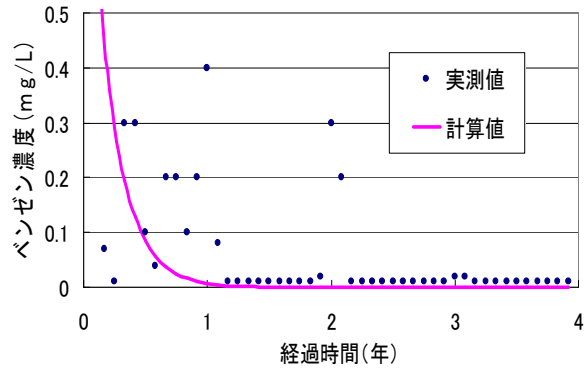


図5 現場データを用いた式(4)による解析結果

表2 減少速度定数 k

実験 ($R=1.4$)	汚染現場 ($R=14.1$)
$8.2 \cdot 10^{-4}$ (1/s)	$2.2 \cdot 10^{-6}$ (1/s)

式(6)を用いて理論的な遅延係数 R を計算すると、14.1となった。

4. 考察

実験で求めた遅延係数は1.4で、理論式から算出した14.1より値が小さくなった。また、遅延係数を考慮した式で減少速度定数を算出すると、実験のほうが大きくなった。このことにより、ベンゼンの吸着・脱着は、仮定されているような平衡状態で行っていないと考えられる。今回のカラム実験により得られた結果より、移流拡散方程式で解析し、テーリングについては、ベンゼンの土壌への吸着後の脱着を減少速度定数で表すことができた。この方法を用いれば、現場の濃度も予測することが可能となる。

5. 今後の課題

実験で求めた遅延係数は、理論的に算出した値と差が生じており、現場への適用の際には、このことを考慮する必要がある。

謝辞

大成建設(株)高畑陽氏と名古屋大学井上康氏には、汚染サイトの状況を教えて頂き、論文などを頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高畑ら：熊本市におけるガソリン汚染サイトのMNAに関する研究、第12回講演集、p.807-812、2006。
- 2) Fujinaga et al.: Methodology for Setting Risk-Based concentrations of Contaminants in Soil and Groundwater and Application to a Model Contaminated Site, Risk Analysis, Vol.32, No. 1, pp.122-137, 2012.
- 3) Wiedemeier et al.: Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface, WILEY, pp.140-149, 1999.
- 4) U.S.EPA: Regional Screening Levels, Region9, 2011
<http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/>.