

# 土壌中におけるVOCガスの密度流に関する研究

## Density driven flow of gas of volatile organic compounds in soils

濱本昌一郎 宮崎毅 溝口勝

Shoichiro Hamamoto Tsuyoshi Miyazaki Masaru Mizoguchi

**はじめに：**近年、日本において工場からの漏洩や不法投棄によって揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compound, (VOC)) による土壌および地下水の汚染が顕在化してきている。VOC ガスの多くは、空気よりも比重が大きいため、周囲との間に密度差が生じ、重力の影響による密度流が生じる。本研究では、土壌の物理性が VOC ガスの密度流に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、以下のことを行った。(1) 豊浦砂および立川ロームを用いて、拡散による移動特性、密度流による移動特性の違いを実験的に明らかにする。(2) 実験結果をガス移動モデルで解析し、密度流に影響を与える物理パラメーターを明らかにする。

**実験：(1) カラム実験** 豊浦砂と立川ローム (2 mm ふるい通過分) を供試土として用いた。所定の乾燥密度で気相率が 40%、30%、20% になるようにカラムに充填した。また、VOC としてガソリンなどに含まれる 2-メチルペンタン (イソヘキサン) を用いた。Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。インレットチャンバー (IC) 内にトレーサー原液の入ったシャーレを敷き詰め、飽和ガスで充満させる。プランジャーを引くことでガス移動を開始させる。実験は拡散流のみを想定した水平方向と、拡散流と密度流を想定した鉛直方向の 2 パターンで行い、カラム中のガス密度 (IC から 5cm、15cm、25cm 地点) と流出端からの排出フラックスの経時変化を測定した。

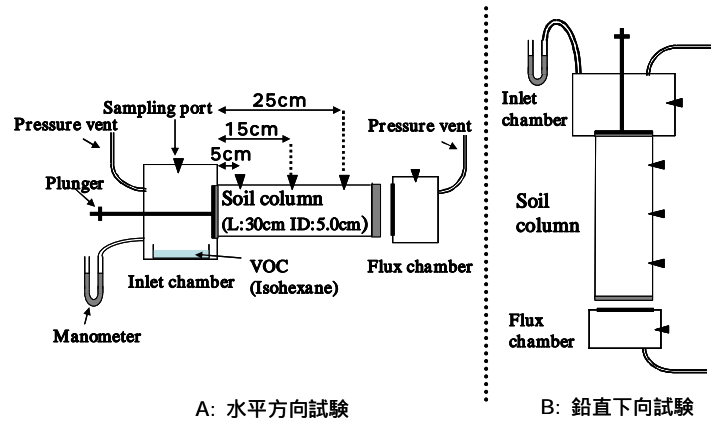


Fig.1 実験装置の概念図

(2) **数値解析** ガス移動に影響を及ぼす物理パラメーターとして、豊浦砂と立川ロームにおける拡散係数および通気係数を測定し、カラム実験で得られた結果を以下の拡散および密度流を含む支配方程式を用いて解析した。

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \frac{\partial \rho_g}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \left[ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right] \rho_g \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) は気相率、 $\rho_g$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) は気相中におけるガス密度、 $D$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) は拡散係数、 $t$  (s) は時間、 $z$  (m) は距離、 $k$  ( $\text{m}^2$ ) は通気係数、 $\eta$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) は混合粘性係数、 $P$  ( $\text{kg m s}^{-2}$ ) は気相中における全圧、 $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) は気相中における全ガス密度、 $g$  ( $\text{m s}^{-2}$ ) は重力加速度である。本研究では、土壌中の気圧を大気圧で一定とし、圧力勾配を無視した。

**結果と考察：(1) カラム実験** すべての気相率条件で、定常状態におけるカラム中のガス密度は、鉛直下向が水平方向よりも豊浦砂で最大で 1.6 倍、立川ロームで 2.0 倍大き

なくなった (Fig. 2)。鉛直下向では密度流が発生し、VOC ガスの移動が促進されたことが実験的に確認された。水平方向実験では、カラム中のガス密度変化および流出端からの排出フラックスともに、同気相率条件において両土壌で明瞭な相違が見られなかった。一方、鉛直下向実験では特に気相率 40% と 30% 条件で、定常状態でのカラム中のガス密度は、立川ロームの方が豊浦砂よりも 1.2 ~ 1.4 倍高くなり、流出端からの排出フラックスは、すべての気相率で立川ロームの方が豊浦砂よりも 1.2 ~ 2.0 倍高くなった。これらの結果から立川ロームの方が豊浦砂よりも大きな密度流が生じたと考えられた。

(2) 数値解析 実測された拡散係数は、拡散係数は、Xu et al. (1992) の結果と同様に、同気相率条件においては両土壌で明瞭な相違が見られなかった。また、得られた拡散係数を用いて行った数値解析は、水平方向実験の結果と良く一致した。一方で、通気係数は同気相率条件で立川ロームの方が豊浦砂よりも大きな値を示した (Fig.3)。この原因として、空隙構造が発達している立川ロームでは、粗空隙を通じた早い空気の流れが生じたためと考えられた。次に、得られた拡散係数と通気係数を用いて、鉛直下向のガス移動に対する数値解析を行った。Fig.4 に、気相率 40% で定常状態におけるカラム中のガス密度の数値解析結果を示す。豊浦砂において数値解析結果は実測値と良く一致した。一方、立川ロームでは通気係数を  $2.0 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{)}$  とすることで実測値と良く一致した。このことから、鉛直下向における両土壌の密度流の相違は Fig.4 が示すように、通気係数が大きくなるとカラム中のガス密度は増加し、同様に流出端からの排出フラックスも増加するためと説明できた。

4. まとめ: カラム実験と数値解析の結果から、拡散移動が支配的である水平方向での移動特性は、同気相率条件では土壌間で

差が見られないこと、密度流が影響する鉛直下向でのガス移動特性は、密度流によってガス移動が促進し、土壌による密度流フラックスの相違は通気係数によって説明できることが分かった。また、土壌による空隙構造の相違が通気係数に影響を及ぼすことが考えられた。

引用文献: Xu et al.: Compaction effect on gas diffusion coefficient in soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 56(6), 1992

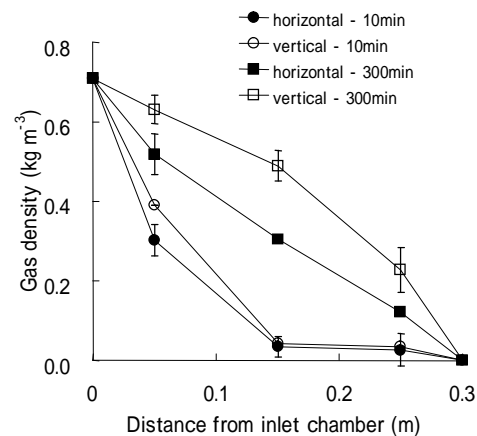


Fig.2 ガス密度の時間変化(立川ローム、気相率40%)

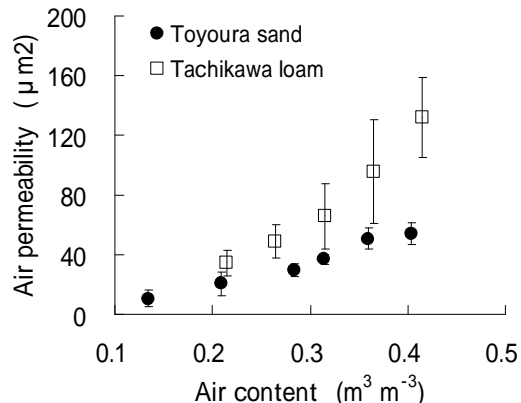


Fig.3 豊浦砂と立川ロームにおける通気係数

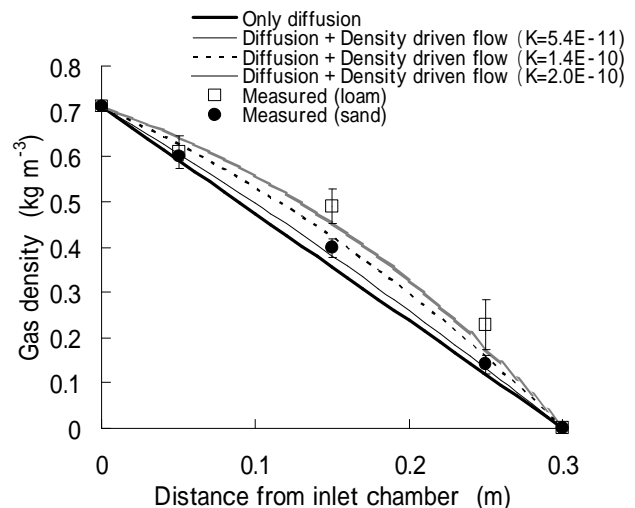


Fig.4 鉛直下向における数値解析結果(気相率40%)