

土中におけるガスの拡散実験手法の検討

拡散 含水比 比重

早稲田大学 学生会員 美濃部 尚子
早稲田大学大学院 特別会員 中谷 大樹
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

1. はじめに

現在、土中での汚染ガスの汚染範囲の推定や、空気注入による地盤の不飽和化など、様々な場面で土中でのガスの挙動の把握が必要とされている。ガスの移動には拡散現象と移流現象によって構成されている。その中の拡散現象の調査方法として、ガスが充満した容器の上に供試体をはめ、鉛直方向にガスを拡散させる方法が一般的である。しかし、そのガスの気体の種類によっては、空気と気体の比重差による移動が発生してしまう可能性がある。

昨年度は窒素、二酸化炭素、窒素のガスを用いて乾燥媒体における鉛直方向と水平方向の拡散係数の違いを調査した。今年度は含水媒体における鉛直方向と水平方向の拡散係数の違いを調査する。

2. 土中でのガスの移動現象

ガスの土中における移動現象は、濃度差による拡散現象と、圧力差による移流現象によって構成されている。拡散現象は Fick 則、移流現象は Darcy 則によって表わされており、それぞれ拡散係数 D_e および透気係数 k といったパラメータを用いる。

土中を図 1 のようにモデル化すると、ガスの空気間隙内の移動は以下の移流拡散方程式によって表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{n_a} \nabla \left[\frac{k}{\mu} \cdot \{-\nabla P' - (\rho - \rho_{air})g \cdot C\} C \right] = \frac{D_e}{n_a} \nabla(\nabla C) \quad (1)$$

ここに、 C : ガス濃度, n_a : 空気間隙率, k : 透気係数, μ : 粘性係数, P' : 圧力差, ρ : ガス密度, ρ_{air} : 空気密度, D_e : ガス拡散係数

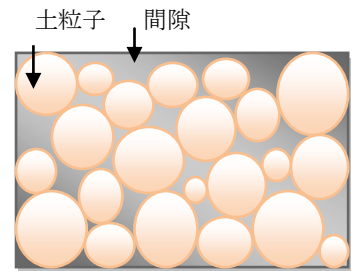


図 1 土粒子と間隙

3. 小型モールド実験

(1) 実験方法

小型モールド実験では、ガスと空気に圧力差を与えない状態におけるガスの拡散現象に着目し、媒体の密度と含水状態の違いによるガス拡散係数 D_e の変化を調査した。図 2、図 3 のようなガス拡散実験装置を用いて、鉛直方向と水平方向のそれぞれの場合について、拡散容器内に充満させたガスを供試体内に拡散させ、定常状態に至るまでの容器内のガス濃度の変化を 1 分ごとに測定した。用いたガスは表 1 に示す通りであり、 D_0 は、空気中における拡散係数である。

供試体は、小型モールド試料容器(内径 50mm、高さ 100mm)にガラスビーズ(平均粒径 $D_{50}=0.95\text{mm}$)を入れ、空気間隙率 $n_a=0.375$ となるように作成した。

表 1 ガスの気体と特性

ガスの種類	比重 (空気=1)	$D_0[\text{cm}^2/\text{s}](T=273\text{K})$
窒素	0.967	0.178
二酸化炭素	1.53	0.130
水素	0.0695	0.665

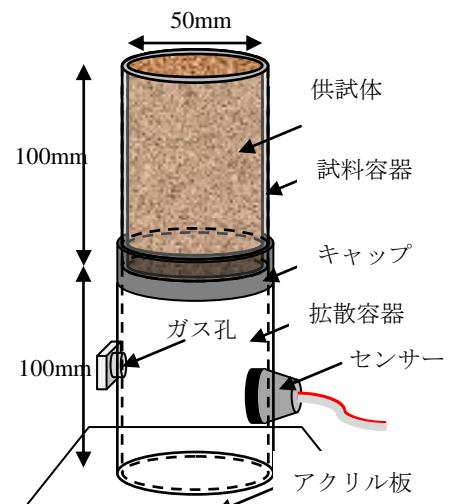


図 2 小型モールド実験装置 (鉛直方向)

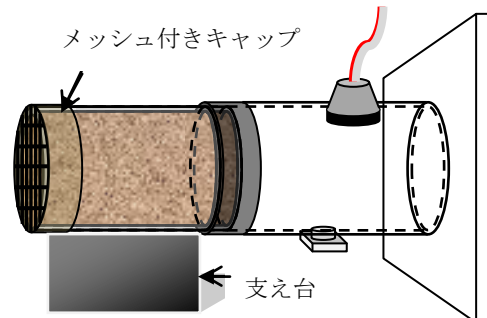


図 3 小型モールド実験装置 (水平方向)

表 2 拡散係数算出結果(T=273K)

気体	窒素					
含水比[%]	2.5			5.0		
拡散係数[cm ² /s] (鉛直方向)	0.0582	0.0593	0.0589	0.0473	0.0471	0.0484
拡散係数[cm ² /s] (水平方向)	0.0585	0.0589	0.0593	0.0313	0.0310	0.0282
気体	二酸化炭素					
含水比[%]	2.5			5.0		
拡散係数[cm ² /s] (鉛直方向)	0.0033	0.0049	0.051	0.0034	0.0048	0.0041
拡散係数[cm ² /s] (水平方向)	0.0092	0.0092	0.0079	0.0045	0.0072	0.0058
気体	水素					
含水比 [%]	2.5			5.0		
拡散係数[cm ² /s] (鉛直方向)	0.2702	0.2719	0.2652	0.2309	0.2367	0.2257
拡散係数[cm ² /s] (水平方向)	0.2635	0.2456	0.2441	0.1805	0.1883	0.1882

(2)実験結果

表 2, 及び図 4,5,6 に得られた実験結果を示す. 図 4 の, 窒素ガスの場合, 鉛直方向と水平方向で拡散係数の値にほぼ差がないのがわかる. 図 5 の二酸化炭素ガスの場合, 鉛直方向の方が水平方向より D_e/D_0 の値が小さくなっていることがわかる. 図 6 の水素ガスの場合, 鉛直方向の方が水平方向より D_e/D_0 の値が大きくなっていることがわかる. これらの結果と表 1 の比重の値から, 比重が 1 より大きい CO_2 では鉛直方向で D_e/D_0 の値が小さくなり, 比重が 1 より小さい H_2 では鉛直方向で D_e/D_0 の値が大きくなる.

このことから, 含水状態においても鉛直方向では空気との比重差による気体の移動が拡散係数の値に影響を与えたと考えられ, 鉛直方向の拡散現象には比重差による移動を考慮する必要がある. なお, ここでは下記の式により拡散係数を求めている. 土中における窒素ガスの 1 次元の拡散現象は, 式(1)の左辺第 2 項の移流項を除いた以下の Fick 則によって表わされる.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{n_a} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

上記の(3.1)式から拡散係数 D_e の決定に関しては, Currie による式が提案され, 以下のように表せる. ¹⁾

$$-\ln \frac{C_i - C}{C_i - C_0} = \frac{D_e}{n_a} \cdot \alpha_i^2 \cdot t - \ln \left[\frac{2n_a}{L_a} \cdot \frac{1}{L_s \left\{ \alpha_i^2 + \left(\frac{n_a}{L_a} \right)^2 \right\} + n_a / L_a} \right] \quad (3.2)$$

- C_i : 空気中の窒素ガス濃度 [-]
- C_0 : 拡散試験容器内の初期窒素ガス濃度 [-]
- L_a : 拡散試験容器の長さ [m]
- L_s : 供試体の長さ [m]

$\alpha_n = \alpha \tan(\alpha L_s) = n_a / L_a$ の n 番目の正根

式(3.2)より, $-\ln\{(C_i - C)/(C_i - C_0)\} \sim t$ のグラフの傾きを求め, そこに α_i および n_a を代入することで, 土中での窒素ガス拡散係数 D_e を算出できる. 以上の結果より, この方法で拡散係数を求める場合には, 水平方向モールド実験が適切であると言える. しかし, 実験では水平方向と鉛直方向でガスの密度の影響がでており, 今後移流項を考慮した拡散係数 D_e の算出方法について検討する.

4. まとめ

本研究の結果を要約すると以下のとおりである.

- 1)含水状態においてもガスの気体と空気と比重差がある場合, 鉛直方向の拡散現象に比重差によるガスの移動が発生する.
- 2)Currie の式により拡散係数を求める場合には, 水平方向モールド実験が適切である.

参考文献

- ・ 遅沢省子, 久保田徹: 土壌のガス拡散係数の測定法, 日本土壤肥科学雑誌, 第 58 巻, 第 5 号(1987)
- ・ 近藤智, 赤木寛一: ガスの土中での移動特性 地盤工学研究発表会 (2010)

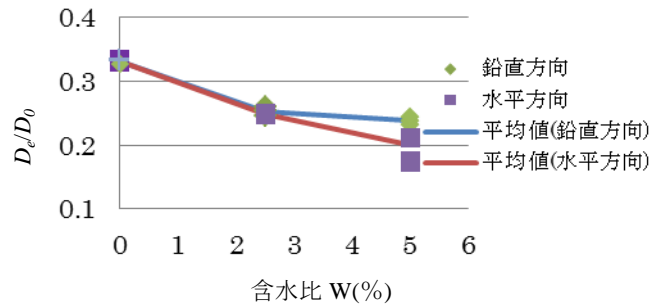


図 4 窒素ガスの拡散係数比較図

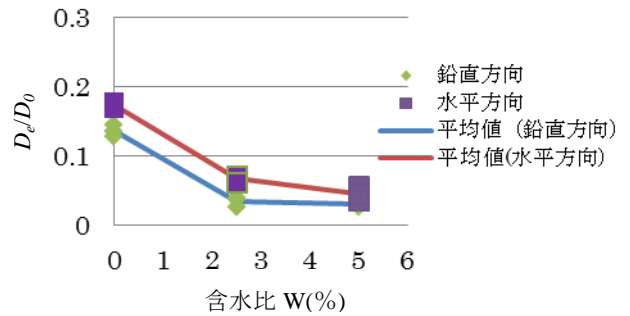


図 5 二酸化炭素ガスの拡散係数比較図

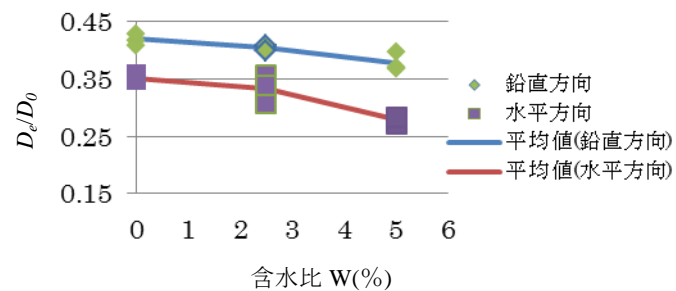


図 6 水素ガスの拡散係数比較図