

土中におけるガスの拡散実験手法の検討

早稲田大学 学生会員 ○中谷 大樹
早稲田大学 フェロー会員 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。

そこで本研究では、鉛直方向と水平方向に変化させた小型モールド実験を行い、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。

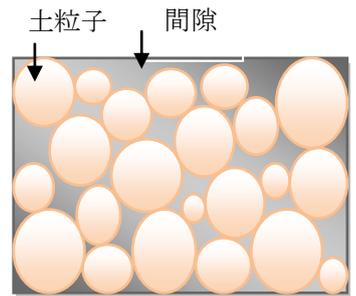


図 1 土粒子と間隙

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

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

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、ガスの比重および供試体の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、ガスの移動方向を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。なお、 D_0 は各ガスの空気中での拡散係数を表す。

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 $n_a=37.5[\%]$, 含水比 $w=0, 2.5, 5[\%]$ となるように作成した。

表 1 ガスの種類と特性

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

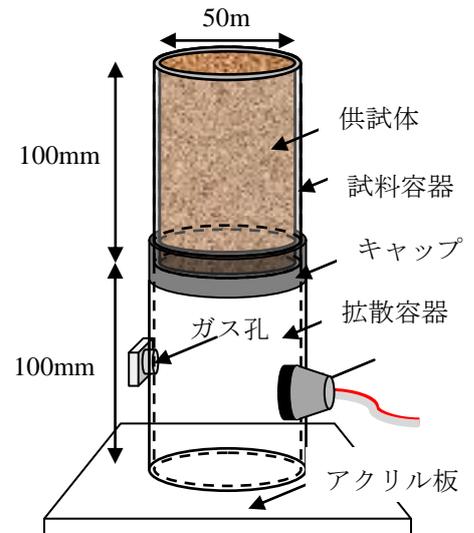


図 2 小型モールド実験装置 (鉛直方向流れ)

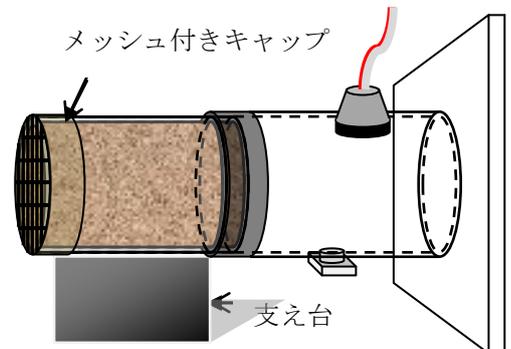


図 3 小型モールド実験装置 (水平方向流れ)

キーワード 拡散, 含水比, 比重, ガラスビーズ

連絡先 〒169-8885 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 58 号館 205 号室 TEL 03-5286-3405

(2)実験結果

式(1)の左辺の移流項を無視すると，土中のガスの 1 次元の拡散現象は，以下の Fick 則によって表される。

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

式(2)より算出した土中のガス拡散係数 D_e と表 1 に示すような D_0 との比 D_e/D_0 と含水比 w の関係を，ガスの気体別に図 4～図 6 に示す。これらの図より，すべてのガスで含水比 w が大きいほど D_e/D_0 は小さくなった。また，空気より比重の大きい二酸化炭素では鉛直方向の D_e/D_0 が小さくなり，空気より比重の小さい水素では鉛直方向の D_e/D_0 が大きくなり，比重の影響が顕著である。

4. 移流項を考慮した差分計算

鉛直方向の比重による D_e/D_0 の値への影響を考慮するため，式(1)左辺の移流項を含めた，乾燥供試体の鉛直方向の二酸化炭素ガスおよび水素ガス濃度の時間変化を計算した。そして，計算結果が鉛直方向の実測値と最も近くなる拡散係数 D_e を算出した。計算結果を図 7，図 8 および表 2 に示す。この図および表より，移流項を考慮すると，鉛直方向においても比重差の影響がでない水平方向の拡散係数 D_e の値と同数値が得られた。

5. まとめ

今回の結果を以下にまとめる。

- 1)含水比 w が大きいほど D_e/D_0 は小さくなる。
- 2)ガスの比重が空気に比べて大きいとき，鉛直方向の D_e/D_0 が小さくなり，ガスの比重が空気に比べて小さいときは鉛直方向の D_e/D_0 が大きくなる。
- 3)移流項を考慮すると，鉛直方向流れの小型モールド実験においても水平方向流れのガスの拡散係数を求めることができる。

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, 日本土壤肥料学雑誌, 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)

表 2 拡散係数 $D_e(\text{cm}_2/\text{s})$ 計算結果

ガスの種類	実測値 (鉛直方向)	実測値 (水平方向)	計算値
二酸化炭素	0.0244	0.0269	0.0275
水素	0.2980	0.2623	0.2721

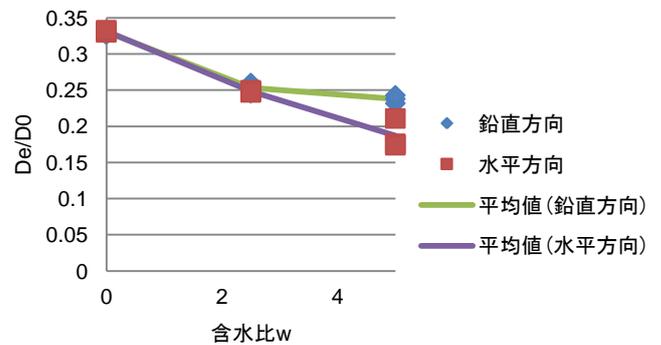


図 4 実験結果(窒素)

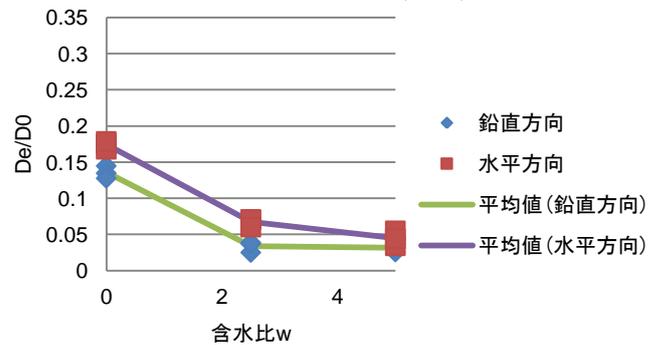


図 5 実験結果(二酸化炭素)

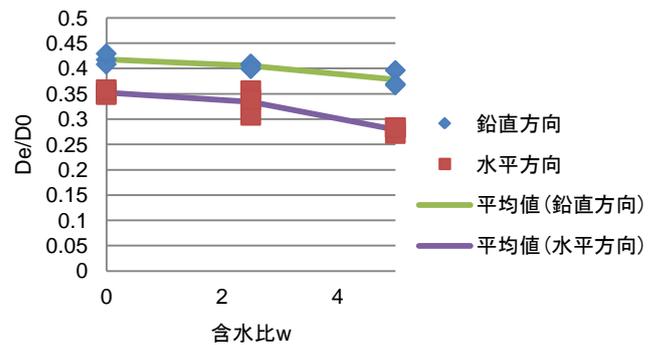


図 6 実験結果(水素)

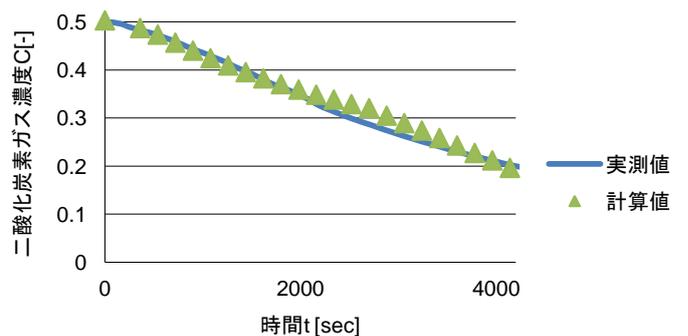


図 7 計算結果(二酸化炭素)

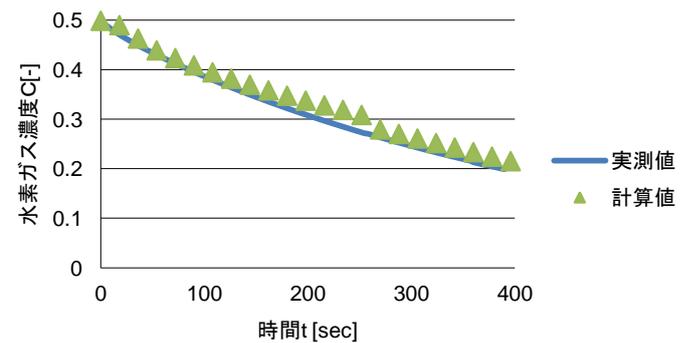


図 8 計算結果(水素)