

試験方法の違いによる Knudsen 拡散係数の算出結果

名城大学大学院 学生会員 柏原あゆみ
名城大学大学院 正会員 日比義彦

1. 目的

土中ガス成分の移動形態を示す指標に Knudsen 拡散係数がある．Knudsen 拡散係数には透気試験による算出方法¹⁾と、2成分のトレーサー試験による算出方法²⁾がある．本研究では 900mm の一次元カラム試験装置と、豊浦砂とベントナイトの混合土(質量比 3:1)を用いて、透気試験とトレーサー試験により求めた Knudsen 拡散係数を比較した．

2. 試験・整理方法

2. 1. 試験器具

図-1 に本試験で用いた長さ 900mm の一次元カラム試験装置(アクリル製)の概要を示す．土試料には豊浦砂(密度 2.65g/cm³)とベントナイト(密度 2.60g/cm³)の質量比 3:1 の混合土を用いた．また、ガスには CO₂ と N₂ を用いた．間隙率 0.47 となるようにカラム内に上記の混合土を詰めた．ガスは図-1 の右側のガスタンクからカラム内へ注入され、流量計を通りカラムの外へ排出された．

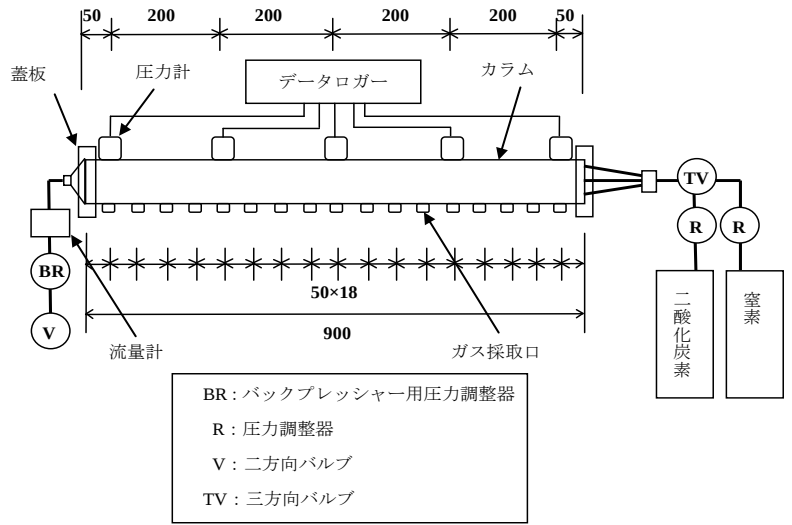


図-1 試験装置

2. 2. 透気試験

透気試験では、単一ガスを図-1 に示すカラムの右側からカラム内に注入し、カラム内の圧力と流量が一定になるまで測定を続けた．Dusty gas model より導かれた、成分*i*の $-N_i^T RT / \nabla P$ と平均圧力*P*の関係を示す下記の式(1)により、有効透過度 $B_{ke}(m^2)$ と CO₂ と N₂ の Knudsen 拡散係数 $D_{CO_2}^K$ と $D_{N_2}^K(cm^2/s)$ をそれぞれ算出した．

$$-\frac{N_i^T RT}{\nabla P} = D_i^K + \frac{B_{ke}}{\mu} \bar{P} \quad (1)$$

ここで、 N_i^T は成分*i*の総モルフラックス(mol/m²・s)、 R はモルの気体定数(Pa・m³/mol・K)、 T は温度(K)、 P は絶対圧力(Pa)、 μ は粘性(kg/m・s)である．カラム流入口とカラム流出口との絶対平均圧力 104~118kPa の間で行った．

2. 3. トレーサー試験

トレーサー試験では、バックグラウンドガス(BG)をカラム内に満たした後、トレーサーガス(TG)に切り替えた．カラム内のガスをガス採取口からガスシリンジにより採取し、ガスクロマトグラフにより濃度分析した．逆解析プログラム ISCCFEM-adq により濃度分布を移流分散方程式に最適化し、CO₂ と N₂ の有効合成分散係数 $D_{CO_2}^*$ と $D_{N_2}^*(cm^2/s)$ を求めた．Dusty gas model より導かれた、有効合成分散係数の逆数とトレーサーガスのモル分率の関係式を成分ごとに式(2)と式(3)のように求めて、 $D_{CO_2}^K$ と $D_{N_2}^K(cm^2/s)$ を算出した．

$$\frac{1}{D_{CO_2}^*} = \frac{1}{D_{CO_2-N_2}^e} (\alpha - 1) X_{CO_2} + \frac{1}{D_{CO_2-N_2}^e} + \frac{1}{D_{CO_2}^K} + \Delta_{Mech} \quad (2)$$

$$\frac{1}{D_{N_2}^*} = \frac{1}{D_{CO_2-N_2}^e} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) X_{N_2} + \frac{1}{D_{CO_2-N_2}^e} + \frac{1}{D_{N_2}^K} + \Delta_{Mech} \quad (3)$$

ここで、 $D_{\text{CO}_2-\text{N}_2}^e$ は CO_2 と N_2 の分子拡散係数(cm^2/s)、 α は $D_{\text{CO}_2}^K$ と $D_{\text{N}_2}^K$ の比、 X_{CO_2} と X_{N_2} は CO_2 と N_2 のモル分率、 Δ_{Mech} は有効合成分散係数を逆数とした場合の機械的分散に関する項(s/m^2)である。BG が N_2 、TG が CO_2 の場合と、BG が CO_2 、TG が N_2 の場合について、それぞれ圧力差 2.0, 3.0, 3.5kPa の3つで試験を行った。

3. 結果

3. 1. 透気試験結果

図-2 に式(1)に示した N_2 および CO_2 の $-N_1^T RT/\nabla P$ と平均圧力 $\bar{P}$ の相関式を示す。図-2 より、相関式の勾配は、 CO_2 の場合で $4.653\text{E-}08\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 N_2 の場合で $3.744\text{E-}08\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$ となり、有効透過度 B_{ke} はそれぞれ $6.839\text{E-}13\text{m}^2$ と $6.590\text{E-}13\text{m}^2$ となった。また、相関式の切片より $D_{\text{CO}_2}^K$ は $7.335\text{E-}04\text{m}^2/\text{s}$ 、 $D_{\text{N}_2}^K$ は $9.031\text{E-}04\text{m}^2/\text{s}$ となった。

3. 2. トレーサー試験結果

図-3 に有効合成分散係数の逆数 $1/D_{\text{CO}_2}^*$ (または $1/D_{\text{N}_2}^*$) と TG のモル分率 X_{CO_2} (または X_{N_2}) の相関関係の例として、圧力差 2.0kPa の相関式を示す。これらの相関式の勾配と切片より、圧力差 2.0kPa の場合の $D_{\text{CO}_2}^K$ は $4.494\text{E-}02\text{cm}^2/\text{s}$ となり、 $D_{\text{N}_2}^K$ は $8.460\text{E-}02\text{cm}^2/\text{s}$ となった。

4. 各試験で算出した Knudsen 拡散係数の評価

図-4 に Reinecke and Sleep¹⁾ で用いられた B_{ke} と空気の Knudsen 拡散係数 D_{air}^K の相関を示す。各試験結果の $D_{\text{CO}_2}^K$ と $D_{\text{N}_2}^K$ を空気の分子量 28.966 の 1/2 乗で割ることで D_{air}^K に変換し、図-4 にプロットした。その結果、透気試験より求めた B_{ke} と D_{air}^K の関係は Heid et al.³⁾ や Reinecke and Sleep¹⁾ の近似直線に近い値となった。一方、トレーサー試験より求めた B_{ke} と D_{air}^K の関係は Heid et al.³⁾ や Reinecke and Sleep¹⁾ の近似直線にほとんど一致しなかった。

5. 参考文献

- 1) Stefan A. Reinecke and Brent E. Sleep : Knudsen diffusion, gas permeability, and water content in an unconsolidated porous medium, *Water Resources Research*, VOL.38, NO.12, 1280, doi:10. 1029/2002WR001278, 2002.
- 2) 日比義彦, 田口弘和 : Dusty Gas モデルを用いた分散係数と Knudsen 拡散係数の算出方法の開発, 土木学会論文誌 C(地圏工学), Vol.67, No.2, pp.198-209, 2011.
- 3) Heid, J.G., J.J. McMahon, R.F. Nielsen, and S.T. Yuster : Study of the permeability of rocks to homogeneous fluids, in *Drilling and Production Practice*, pp.230-246, Am. Petrol. Inst., New York, 1950.

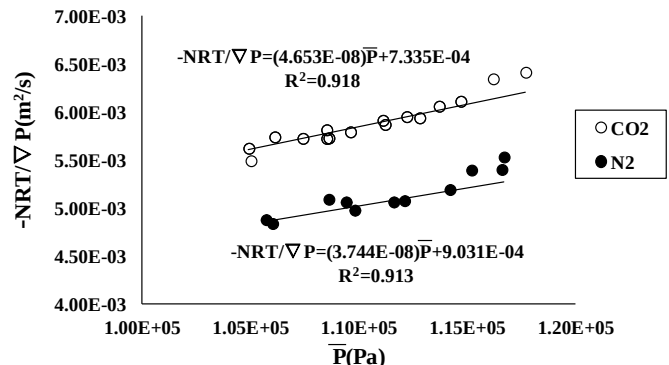


図-2 $-N_1^T RT/\nabla P$ と $\bar{P}$ の相関

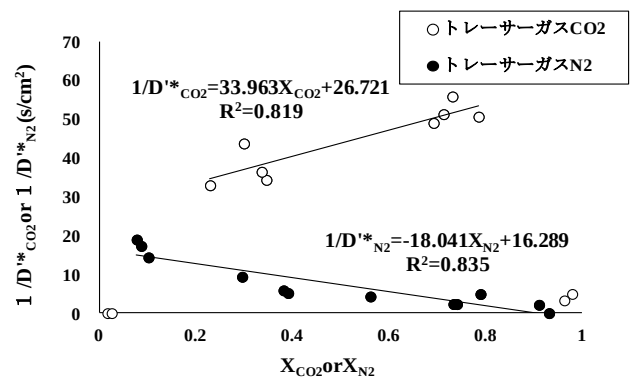


図-3 $1/D_{\text{CO}_2}^*$ or $1/D_{\text{N}_2}^*$ と X_{CO_2} or X_{N_2} の相関(圧力差 2.0kPa)

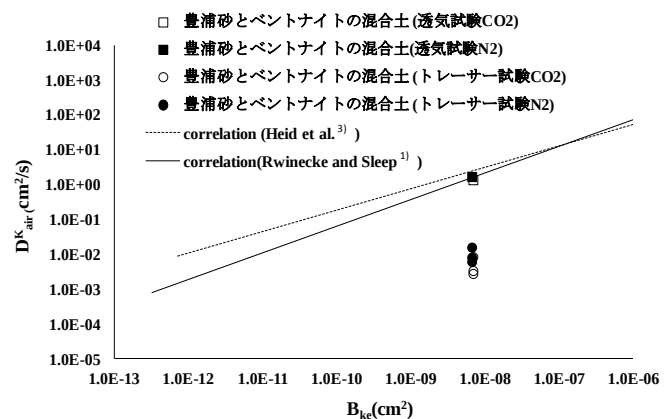


図-4 D_{air}^K と B_{ke} の相関