

カラム実験装置を用いた分子拡散係数に関する屈曲度の算出

名城大学 学生会員 柏原あゆみ
名城大学 正会員 日比義彦

1. 目的

揮発性有機化合物(VOC)の浄化方法の1つであるバイオレメディエーションでは、好気性微生物の場合に、酸素が消費され、二酸化炭素が発生する。一方、嫌気性微生物の場合には、メタン、エタンと硫化水素が発生する。したがって、バイオレメディエーションを行う際にはこれらの土壤中ガス成分の移動形態を把握することが重要となる。これまでに、土中ガスの多成分の物質移動原理に Dusty gas モデルが有効であることが分かっており¹⁾、Dusty gas モデルを用いた土中ガスの2成分の分散特性値の算出方法が開発された²⁾。本研究では一次元 1500mm カラム実験装置と、豊浦砂とベントナイトの混合土(質量比 3:1) (以降、混合土 3:1 と称す)を用いて、窒素と二酸化炭素の2成分の分子拡散係数に関する屈曲度(以降、屈曲度と称す)を算出した。

2. 実験方法

図-1に本実験で用いた一次元の 1500mm カラム実験装置(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(スーパークレイ ホージュン 密度 2.60g/cm³)を質量比 3:1 で混合した土を用いた。また、ガスには二酸化炭素(太陽日酸規格 G1 純度 99.995%以上)と窒素(太陽日酸 規格 G3 純度 99.9995%以上)を用いた。土試料とガスの特性をそれぞれ表-1 と表-2 に示す。

間隙率0.47となるようにカラム内に上記の混合土 3:1 を詰め、二酸化炭素でカラム内を満たした。ガスは図-1 に示した右側のガスタンクからカラム内へ注入され、流量計(堀場エスティック SEF-N112MGR 最小目盛 0.001L/min 最大流量 1L/min)を通り、カラムの外へ排出された。その際に両端の圧力調整器(FAIRCHILD MODEL10 0~15kPa, 圧力計 最大圧力 20kPa 最小目盛 0.5kPa)によりカラム内の圧力を調整し、電気式圧力計(東京測器研究所 PW-100kPa 最大測定圧力 100kPa 最小目盛 0.005kPa)とロガー(東京測器研究所 TDS-303)によりカラム内の圧力を測定した。カラム内が二酸化炭素で満たされたことを確認した後、窒素ガスに切り替え、ガスシリンジ(SGE Analytical Science 最大目盛 1.0ml 最小目盛 0.02ml)によりカラム採取口 25 箇所からガスを採取した。採取したガスはガスクロマトグラフ(ジェイサイエンスラボ GC7000T)により濃度分析された。なお、本実験は温度 20℃, 湿度 50%の恒温恒湿室内で、カラムの入り口と出口の圧力差を 2kPa, 3kPa, 4kPa, 5kPa, 6kPa, 7kPa と設定して行われた。

実験で得られた濃度分布から逆解析プログラム ISCCFEM-adq により窒素の有効合成分散係数 D_{N_2} を求め、

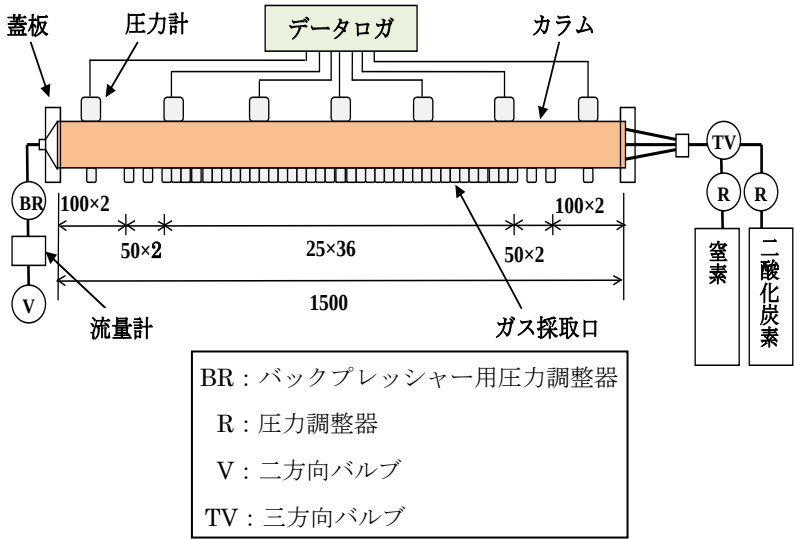


図-1 実験装置

表-1 土試料の特性

間隙率	固有透過度 (cm ²)
0.47	1.96×10 ⁻⁸

表-2 ガスの特性

ガスの種類	粘性係数 (Pa・s)
窒素	1.76×10 ⁻⁵
二酸化炭素	1.47×10 ⁻⁵

窒素の有効成分分散係数の逆数 $1/D_{N_2}$ と窒素のモル分率の相関式を求めた。その相関式の勾配 a と、窒素と二酸化炭素の分子量より求めた窒素と二酸化炭素の Knudsen 拡散係数の比 $\alpha=1.25$ により、屈曲度を考慮した分子拡散係数 ($D'_{N_2-CO_2}=(1-\alpha)/(\alpha \cdot a)$) を算出した。また、大気中における窒素と二酸化炭素の分子拡散係数 $D_{N_2-CO_2}=0.149\text{cm}^2/\text{s}$ に対する本実験で得られた屈曲度を考慮した分子拡散係数の比である屈曲度を算出した。

3. 実験結果

逆解析により求めた圧力差 7kPa の場合の有効成分分散係数の逆数 $1/D_{N_2}$ と窒素のモル分率の相関を図-2 に示す。相関式の相関係数の二乗は 0.914 となり $1/D_{N_2}$ と窒素のモル分率の相関性は高く、相関式の勾配は $-2.53\text{s}/\text{cm}^2$ となった。また表-3 に示すように、本実験の $1/D_{N_2}$ と窒素のモル分率の相関式の相関係数の二乗は 0.621~0.990 となり、 $1/D_{N_2}$ と窒素のモル分率の相関性が比較的高い。また、これらの相関式の勾配は $-2.42\sim-2.93\text{s}/\text{cm}^2$ となった。混合土 3:1 の屈曲度を考慮した分子拡散係数は $0.068\sim0.083\text{cm}^2/\text{s}$ で、屈曲度は $0.458\sim0.555$ となった。

1500mm カラム実験装置を用いた豊浦砂の屈曲度は $0.049\sim0.053$ であり、混合土 3:1 の場合の屈曲度の方が豊浦砂の場合より大きい値となった。混合土 3:1 の固有透過度が $1.96\times10^{-8}\text{cm}^2$ で、豊浦砂の固有透過度が $2.05\times10^{-7}\text{cm}^2$ であったことより、固有透過度が小さいほど屈曲度が大きくなった。また、900mm カラム実験装置を用いた豊浦砂とベントナイトの混合土(質量比 4:1) (以降、混合土 4:1)の屈曲度は 0.872 であり、混合土 3:1 の場合の屈曲度の方が混合土 4:1 の場合より小さい値となった。これは 900mm カラム実験装置を用いた混合土 4:1 の屈曲度が、カラム長の影響で正確に求められなかったことが原因であると考えられる。

4. まとめ

1500mm カラム実験装置を用いた混合土 3:1 の屈曲度は $0.458\sim0.555$ となった。1500mm カラム実験装置を用いた混合土 3:1 の屈曲度は 1500mm カラム実験装置を用いた豊浦砂の屈曲度より大きい値となった。このことより屈曲度が固有透過度と相関する可能性があることが分かった。また、1500mm カラム実験装置を用いた混合土 3:1 の屈曲度は 900mm カラム実験装置を用いた混合土 4:1 の屈曲度より小さい値となった。これは 900mm カラム実験装置のカラム長の影響が原因であると考えられる。

5. 参考文献

1) 日比義彦:土壌ガス中の多成分化学物質の拡散数値モデルの誘導, 地下水学会誌, 第 53 巻第 2 号, pp.153 ~164, 2011.

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, 土木学会論文集 C, 地圏工学, Vol.67, No.2, pp.198-209, 2011.

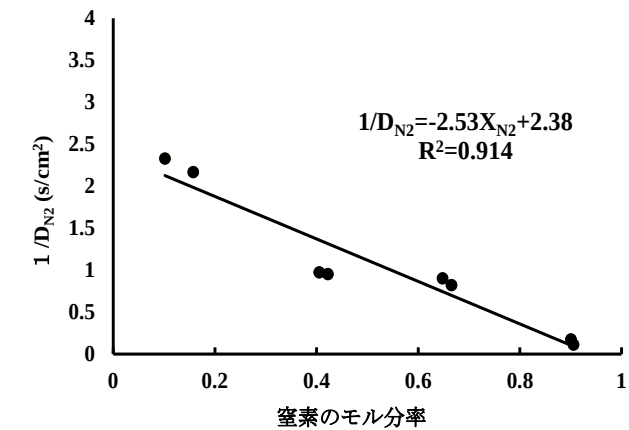


図-2 圧力差 7kPa の有効成分分散係数の逆数とモル分率の相関式

表-3 分子拡散係数の算出結果

圧力差 (kPa)	相関係数 の二乗 R^2	勾配 a (s/cm^2)	屈曲度を考慮した 分子拡散係数 $D'_{CO_2-N_2}$ (cm^2/s)	屈曲度 τ
2.0	0.990	-2.42	0.083	0.555
3.0	0.621	-2.77	0.072	0.484
4.0	0.940	-2.42	0.083	0.555
5.0	0.944	-2.79	0.072	0.481
6.0	0.900	-2.93	0.068	0.458
7.0	0.914	-2.53	0.079	0.531