

# 多孔体中の1次元流れ場における気泡の捕捉性に関する研究

○名古屋大学大学院環境学研究科 学生会員 長田茂  
 名古屋大学エコトピア科学研究所 正会員 井上康  
 名古屋大学エコトピア科学研究所 正会員 片山新太

## 1.はじめに

地下水・土壌汚染の浄化手法として微生物の浄化作用を用いる反応性透過壁(バイオバリア)が注目されている。バイオバリアでは、微生物からの生成ガスの蓄積による透水性の低下によって浄化能が低下する。そのため、多孔体間隙中に捕捉される気泡量の推定法の確立が求められている。本研究では、間隙に気泡が捕捉される現象を、ガス発生によって多孔体が飽和条件から不飽和条件へ変化する現象として捉え、多孔体間隙を凹凸がある円管の集合としてモデル化し、間隙全体の気泡の捕捉量を計算する式を構築した。この式の検証のため、GB(ガラスビーズ)間隙水の排水試験と、気泡発生を伴う透水試験を行い、気泡捕捉量を推定する為のパラメータを計算した。

## 2.理論的考察

間隙を凹凸のある毛管束でモデル化する。図1のように半径  $r_{in}=cr$ ,  $r_{out}=r/c$ , 長さ  $l_{in}=ar_{in}$ ,  $l_{out}=ar_{out}$  の円管が連結したものを間隙ユニットと定義し、系の中の間隙を間隙ユニットが直列した凹凸のある毛管の集合として考える。定数  $c$  は間隙ユニットの凹凸の度合いを表し、凹凸パラメータと呼ぶ。

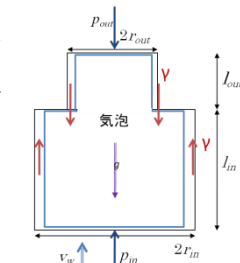


図1 間隙ユニット

間隙ユニットは、4つの隣接する粒径  $d[L]$  のGBに囲まれる空間と同じ個数であり、内部の気泡には外力として表面張力、水圧、重力が働き、外力の和が鉛直下向きの時に間隙ユニットと同体積の気泡が捕捉されると仮定する。また、間隙ユニット内の水の流れには Darcy 則が適用できると仮定する。

ここで、相当毛管半径が  $r \sim r+dr$  の間にある間隙ユニットについて、体積の和を  $dV_g(r) [L^3]$ , 個数を  $dN(r)[-]$ , 捕捉する気泡の体積を  $dV_{gu}(r)[L^3]$  と書くと、間隙に限

界まで気泡が入ったときの系の中のガスの捕捉量  $V_g [L^3]$  は次式(1)～(4)で計算できる。

$$V_g = nV_t \int_A (1-S_r) \frac{dS_e}{dr} dr \quad (1)$$

$$\{A\} = \left\{ r \left| ar \left( c + \frac{1}{c} \right) \left( \frac{\rho_w w_w}{K_e} + \rho_w g \right) - ar \left( c + \frac{1}{c^5} \right) \rho_w g - \frac{2\gamma}{r} \left( c - \frac{1}{c} \right) < 0 \right. \right\}$$

$$a = \frac{n(1-S_r)d^3}{9(1-n)(c^3+c^{-3})} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{1}{r^3} \frac{dS_e}{dr} dr \quad (2)$$

$$\frac{dS_e}{dr} = \frac{-m}{1-m} \left( \frac{2\alpha\gamma}{r^2 \rho_w g} \right) \left\{ 1 + \left( -\frac{2\alpha\gamma}{r \rho_w g} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right\}^{-(1+m)} \left( -\frac{2\alpha\gamma}{r \rho_w g} \right)^{\frac{m}{1-m}} \quad (3)$$

$$S_t = (1-S_r) \left[ 1 + (-\alpha\psi)^{\frac{1}{1-m}} \right]^m + S_r \quad (4)$$

ここで、 $V_t[L^3]$  は系の体積、 $n [-]$  は多孔体の間隙比、 $A$  は気泡が間隙ユニットに捕捉される条件を満たす  $r$  の集合、 $m[-], \alpha[-], S_r[-]$  は水分特性曲線のフィッティングパラメータ、 $S_t[-]$  は飽和度、 $S_e[-]$  は有効飽和度、 $v_w[LT^{-2}]$  は流速、 $\nu[M^2 T^{-1}]$  は水の動粘性係数、 $\rho_w[ML^{-3}]$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $\gamma[MT^{-2}]$  は水のガラスに対する表面張力、 $K_e[L^2]$  は有効固有浸透係数を表す。

## 3.実験方法

平均粒径が 0.25mm, 0.50mm, 0.75mm, 密度が  $2.7g/cm^3$  の3種のGBを用い水分特性曲線を Anwar(1999)に従って求めた。(図2)

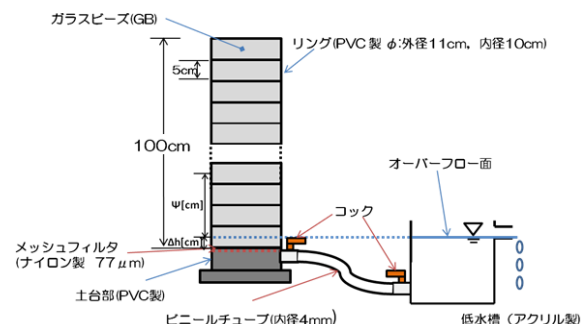


図2 排水試験実験装置の概要

キーワード：バイオバリア 多孔体 飽和-不飽和系 透水性 気泡の捕捉

連絡先：〒464-8603 名古屋市千種区不老町 TEL：052-789-5856 又は 5858、FAX：052-789-5857

PVC 製リング内部に水と GB を充填し、重力排水を行った。GB の重量と乾燥重量の差からリング各段の飽和度  $S_{[-]}$  を算出した。リング中央とオーバーフロー面との高さの差  $\psi[\text{cm}]$  をマトリックポテンシヤルとして求めた。得られた水分特性曲線を van Genuchten(1980)より得られる式(4)によって近似し、パラメータフィッティングにより  $m, a, S_r$  を得た。

次に、気泡が GB カラムの間隙内にどれだけ捕捉されるかを原(2010)に準じ調べた。(図 3)

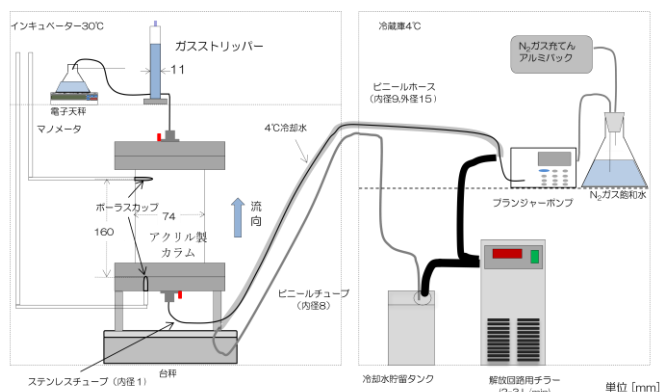


図 3 ガス発生透水試験の実験装置の概要

アクリル製カラムに GB と水を充填し、30℃に保ったカラムに、4℃の窒素飽和水をプランジャーポンプで流量 5mL/min で送水し、温度差によって窒素ガスの気泡を発生させた。電子天秤で測定したカラムの重量からガスの捕捉量  $V_g[\text{cm}^3]$  を求め、マノメータの水頭差から固有浸透係数  $Ke[\text{mm}]$  を測定した。

#### 4.結果と考察

実験によって得られた水分特性曲線(図 4)と、カラムの気泡の捕捉量の最大値(図 5)を用いて凹凸パラメータ  $c$  および  $a$  の計算を行った。(表 1)  $c$  は凹凸の度合いを示す値だが、いずれも 1 との差は 1%未満であった。これは間隙のモデルとして考えた毛管が

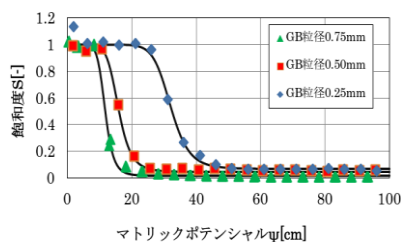


図 4 水分特性曲線

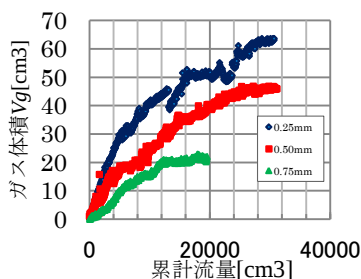


図 5 気泡の捕捉量

表 1 凹凸パラメータの計算結果

| $d[\text{mm}]$           | 0.75     | 0.5      | 0.25     |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| $S_g[-]$                 | 0.06     | 0.12     | 0.17     |
| $Ke_{\min}[\text{cm}^2]$ | 1.04E-05 | 8.98E-06 | 2.80E-07 |
| $c[-]$                   | 1.00536  | 1.00253  | 1.000702 |

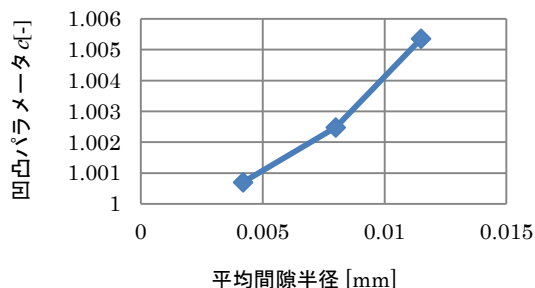


図 6 平均間隙半径と  $c$  の関係

極めて単純円管に近いことを示している。

この結果、平均間隙半径の平均値と凹凸パラメータ  $c$  には正の相関があることが分かった。(図 6)

今後は平均間隙半径と  $c$  の関係を調べ、 $c$  の予測式を構築することが課題である。

#### 5.結論

本研究では多孔体の間隙を間隙ユニットの集合として表し、間隙ユニットの凹凸の度合いを表すパラメータ  $c$  が定まると気泡の最大捕捉量が計算できるようなモデルを構築した。実験の結果  $c$  は 1 に極めて近い値となり、凹凸毛管モデルと単純毛管モデルの形状的な差は極めて小さく、 $c$  の僅かな差が間隙の気泡の捕捉性能に影響することが示唆された。

#### 【参考文献】

- 原茂樹(2010) 透過性反応浄化壁を模した 1 次元流れ場の透水性に関わる研究,名古屋大学大学院社会基盤工学専攻修士論文.2010.
- Anwar A (1999) An Investigation of Non-Aqueous Phase Liquid Volatilization in Porous Media, Nagoya U. Grad. School of Eng. Ph.D. thesis. 1999.
- Mualem Y (1976) A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resource. Res., Vol. 12, pp. 513-522.
- Truong H.T (2000) Displacement of Residual Oil from Porous Media by Brine/Surfactant/Alcohol Solutions, Nagoya U. Grad. School of Eng. Ph.D. thesis .2000.
- van Genuchten m. Th. (1980) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. AM. J., Vol. 44, pp. 892-898