

## 16. 多孔体中の気液混相流に関する実験的研究

○富樫聡・松田拓巳・豊田富晴・藤縄克之（信州大学）

### 1. はじめに

これまで、土壤汚染や地下水汚染の修復方法は様々に検討され、多くの手法が確立しているが、その多くは膨大なコストを要する現状にある。また、最終処分場や不法投棄現場における土壤汚染では、メタンガスや硫化水素ガスの発生が問題となっており<sup>1)</sup>、このような微生物分解で発生したガスの通気帯中の拡散機構や解析手法に関する知見は、十分に蓄積されているとは言い難い。従って、コスト削減を目指し、土壤ガス吸引等の修復方法を適用する際の適用有効範囲の割り出しや修復効率等を定量的に評価する手法が必要である。

本研究は、通気帯中の気体と地中水の同時移動（混相流）のメカニズムを室内基礎実験により明らかにし、この結果を踏まえて今後、多孔体中の気液混相流の数値解析手法を確立することにより、汚染修復に伴う経済的負担の軽減に資する技術の開発に役立てるものである。

### 2. 気液混相流実験

#### 2.1 実験の概要

従来、土壤空気圧は大気圧と等しいとする仮定のもとに、土壤水分の移動が解析されてきたが、通気帯中に粘土層が存在し、微生物分解等で発生した土壤ガスの地表への移動を抑制するような土層構造下においては、土壤ガス吸引時に大きなガスの差圧が発生するため、従来の理論では十分な解析ができなかった。そこで、本実験により浸透流に伴う土壤中の空気圧を測定し、混相流のメカニズムについて考察する。

実験は、ガラスビーズ（GB）や砂を充填したカラムを用い、吸水過程及び排水過程の各段階で実施し、異なる試料の気液混相流の移動特性に関して実験結果より考察を行う。実験で得られるデータは、a：吸水量、b：排水量、c：残留水分量（吸水量と排水量の差分）、d：間隙空気圧、e：排水過程終了時の体積含水率（サクシオンより算出）であり、このうちa～dは経時的に取得する情報である。

#### 2.2 実験装置

気液混相流実験の装置概要図を図1に示す。また、装置の特徴について表1に整理する。図1に示すとおり、カラム上部のバルブを開閉で、粘土層等により多孔体中のガス移動が抑制される状態（密閉時）と通常状態（開放時）の2ケースを想定した実験を行い、土壤ガスの移動メカニズムを検討する。

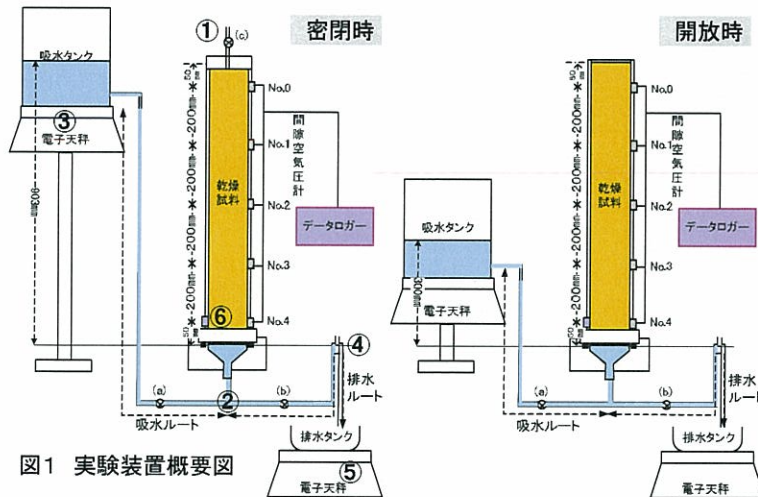


図1 実験装置概要図

表1 実験装置の特徴

実験装置の概要	
①	カラム上部にバルブを設け、カラム密閉時と開放時の条件における実験が可能。
②	カラム底部に吸水用・排水用の2種類の管を接続。実験の目的に応じてバルブにより管路を開閉
③	電子天秤で吸水量（吸水タンクの減少量）を測定。
④	排水ルートではカラムから排水された水が排水タンクに貯留。排水口高はカラム底部とレベル。
⑤	電子天秤で排水量を測定。
⑥	カラム底部上 5cm に小型テンシオメータを設置し、間隙水圧を測定。

#### 2.3 測定機器

空気圧及び間隙水圧の値は、データロガーにより自動計測を行う。また、次に示す測定機器を用いることで、本実験により得られる情報の高精度化が可能となる。

### 2.3.1 小型テンシオメータ

図1に示したカラム実験装置で間隙水圧を測定するためには、小型化した圧力センサーが必要となる。そこで、本実験では図2に示すような構造を有する小型テンシオメータを作成した。なお、カラム底高を基準面(Z=0 mm)とし、Z=850 mm, 650 mm, 450 mm, 250 mm, 50 mm に位置する間隙空気圧計をそれぞれ、No.0, No.1, No.2, No.3, No.4 とする。作成した小型テンシオメータの測定精度については、精密デジタル圧力計 (YOKOGAWA, 圧力測定精度 0.001kPa) の測定値と比較を行うことで評価する。両者の比較の結果 (決定係数 $R^2$ ) を表2に示す。これより、No.0~No.4のすべての小型テンシオメータにおいて、精密デジタル圧力計測定値を正值とした場合の相関性は $R^2=0.9997 \sim 0.9999$ と非常に高く、小型テンシオメータの測定値の妥当性が確認できた。

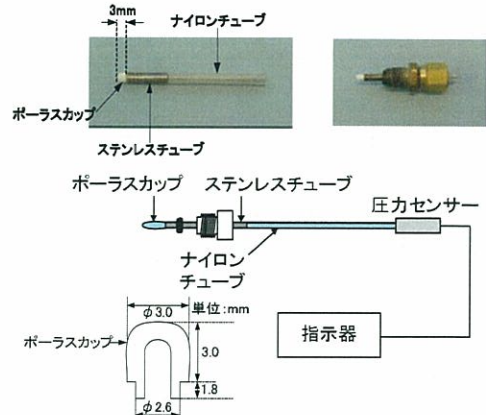


図2 小型テンシオメータ

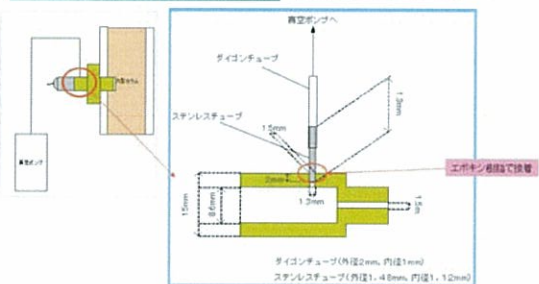
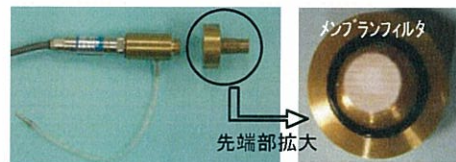


図3 間隙空気圧計

### 2.3.2 間隙空気圧計

本実験で計測する間隙空気圧に関しては、これまで計測するためのセンサー等の実用化はなされていない。そこで、センサーと試料の接触部に疎水性の膜を用い、気液混相状態においても水圧に関係なく間隙空気のみを計測できる測定機器 (間隙空気圧計) を作成した。疎水性の膜にはメンブランフィルター (東洋アドバンテック製品, サポーテッドPTFEタイプメンブランフィルタ, 孔径  $0.1 \mu\text{m}$ , 厚さ  $130 \mu\text{m}$ ) を使用している。作成した間隙空気圧計とその構造について図3に示す。間隙空気圧計の測定精度の評価は、小型テンシオメータと同様に精密デジタル圧力計測定値との相関をとり評価した。両者の比較の結果を表2に示す。これより、No.0~No.4のすべての間隙空気圧計において、精密デジタル圧力計測定値との相関性は $R^2=0.9987 \sim 0.9991$ と非常に高く、間隙空気圧計の信頼性が確認できた。

表2 測定機器の精度

センサー No	測定精度			
	小型テンシオメータ		間隙空気圧	
	決定係数 $R^2$	平均	決定係数 $R^2$	平均
No.0	0.9998	0.9998	0.9990	0.9989
No.1	0.9997		0.9988	
No.2	0.9998		0.9989	
No.3	0.9999		0.9991	
No.4	0.9998		0.9987	

### 2.4 実験方法

本実験は、室温  $23^\circ\text{C}$  の恒温室で行い、粒径の小さい順に ①GB  $\phi 0.1 \text{ mm}$ , ②豊浦標準砂  $\text{mm}$ , ③GB  $\phi 0.4 \text{ mm}$ , ④GB  $\phi 1.0 \text{ mm}$  の4種類の試料を用いた。各試料は概ね同様の間隙率となるように空中落下法により均一に充填する。試料別の諸元を表3に、水分特性曲線を図4に示す。水分特性曲線はvan Genuchtenの関係式<sup>2)</sup>より作成し、パラメータは長谷川(2009)<sup>3)</sup>, (2010)<sup>4)</sup>を参考にしている。これらの試料ごとに、吸水過程と排水過程において実験を実施し、データ計測を行った。

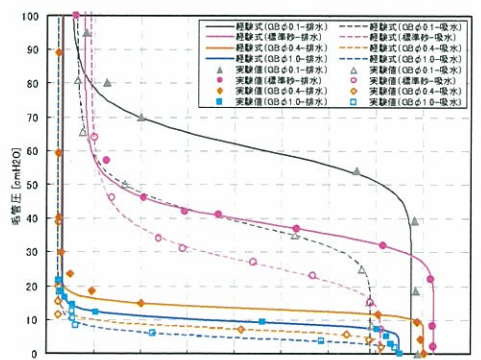


図4 水分特性曲線

表3 実験に用いた試料の物性値

No	試料	50%粒径 $\phi$ (mm)	間隙率	van Genuchten関係式の係数							
				排水過程				吸水過程			
				$\alpha$	$\beta$	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$\beta$	$\theta_r$	$\theta_s$
①	GB $\phi 0.1 \text{ mm}$	0.1	0.421	0.02552	7.95424	0.02520	0.38718	0.02552	7.95424	0.03221	0.34529
②	豊浦標準砂	0.17	0.414	0.02626	9.63581	0.03943	0.41090	0.38246	5.95826	0.03943	0.41090
③	GB $\phi 0.4 \text{ mm}$	0.4	0.393	0.07536	13.03386	0.01560	0.40080	0.13947	7.62907	0.01235	0.35560
④	GB $\phi 1.0 \text{ mm}$	1.0	0.397	0.10520	9.57328	0.01684	0.37523	0.21932	5.07373	0.01258	0.37330

van Genuchtenの経験式

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\phi|)^{\beta}} + \theta_r, \quad \gamma = 1 - \frac{1}{\beta}$$

$\alpha, \beta$ : パラメータ,  $\theta_r$ : 残留体積含水率,  $\theta_s$ : 飽和体積含水率,  $\phi$ : サクシオン



### 2.4.1 吸水過程

吸水過程における実験は、カラムに乾燥試料を充填し、カラム内に吸水する過程において間隙空気圧を計測することにより空気の伝播状況を捉える。実験手順を図5(上図)に示す。実験は試料毎に3回実施した。

### 2.4.2 排水過程

排水過程における実験は、吸水過程で定常に達した状態を初期条件として、カラム内の水分を排する過程での土壤ガスの移動特性を調べるために実施する。実験手順を図5(下図)に示す。吸水過程と同様に、実験は試料毎に3回実施している。

## 3. 実験結果

吸水過程、排水過程共に、試料毎に3回実施した計測データの平均値を用いて、実験結果を整理する。

### 3.1 カラム内水分量

吸水過程において計測する吸水量はカラム内の水分量と言える。また、排水過程における排水量を、吸水過程定常状態時のカラム内水分量から差し引くと、カラム内に残留する水分量となる。

密閉時、開放時の両ケースにおいて、吸水～排水過程におけるカラム内水分量の変動状況を図6に示す。また、密閉時および開放時の、定常になるまでにかかる時間とそのときのカラム内水分量、吸水高を、それぞれ表4に示す。

#### 密閉時

図6より吸水過程では試料の粒径が小さいほど定常に達するまで多くの時間を要し、且つカラム内に多く吸水される傾向にあることがわかる。開放時と比較すると、吸水過程ではカラム内の空気が封入された状態で水がカラム内に浸入することによる間隙容積の減少に伴い、間隙内が加圧状態となり、更なる水の浸入が抑制されるため、吸水量が小さくなると考えられる。一方排水過程では、粒径が大きいほど排水量が多く、定常状態に早く達することが確認できる。開放時と比べ排水量が多いのは、圧力が排水時に開放されることでカラム内の水分を外に押し出すためと思われる。粒径の小さい試料ほど残留する水分量が多い(残留体積含水率が大きい)ことがわかる。

#### 開放時

カラム上部バルブを開放し空気の封じ込めがない状態では、密閉時に比べて吸水過程で吸水量が多く、また排水過程の排水量は少ない。また、排水過程では、多孔体の毛管力により、重力排水効果が小さいことがわかる。

表4に示すとおり、開放時定常状態における総吸水量、毛管上昇高は共に粒径が小さいほど大きくなる傾向にあり、特に毛管上昇高は、粒径に従い図7に示すような関係が確認できる。

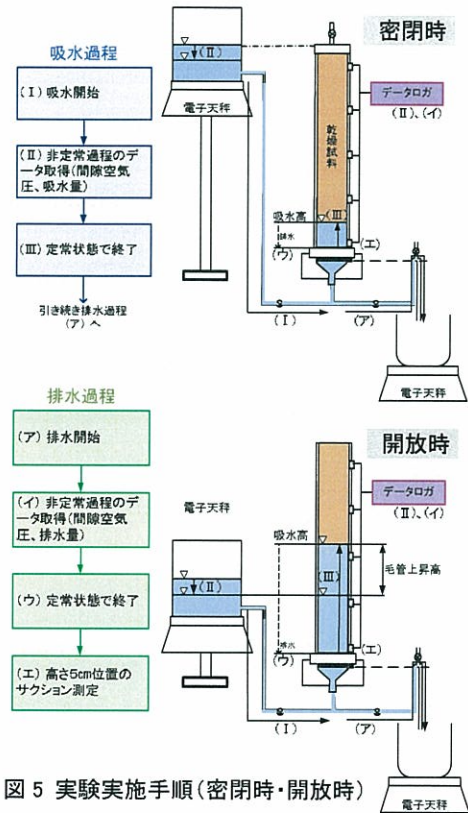
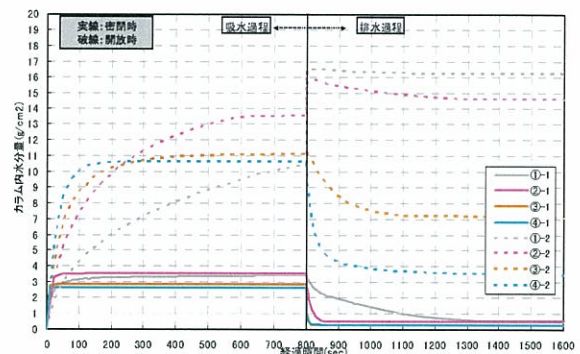


図5 実験実施手順(密閉時・開放時)



開放時の定常到達時間は表4参照(①-2、②-2はt=800secでは非定常)

図6 カラム内水分量

表4 密閉時/開放時の実験結果

No.	試料	条件	大気圧 (hPa)	定常状態				
				到達時間 (sec)	カラム内水分量 (g/cm²)	吸水高 (mm)	吸水タンク水位 (mm)	毛管上昇高 (mm)
①-1	GB	密閉	-	120	3.2	93	-	-
①-2	φ0.1mm	開放	967.8	3,050	15.1	540	279	261
②-1	標準砂	密閉	-	80	3.5	90	-	-
②-2	標準砂	開放	965.6	1,250	14.9	425	284	128
③-1	GB	密閉	-	40	2.8	74	-	-
③-2	φ0.4mm	開放	967.2	350	10.9	300	290	10
④-1	GB	密閉	-	30	2.6	72	-	-
④-2	φ1.0mm	開放	968.3	240	10.6	300	293.5	6.5

\*吸水高は乾燥試料の湿潤前線を目視で測定

\*開放時の定常状態において、吸水タンク水位はカラム内水面(完全飽和部)と考えることができる

\*開放時の定常状態における毛管上昇高は、吸水高-水面で算出

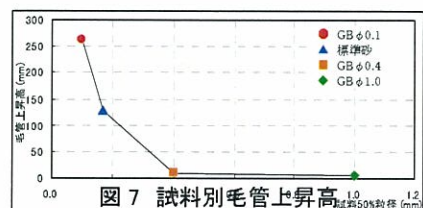


図7 試料別毛管上昇高



### 3.2 間隙空気圧

カラム内水分量と同様に、吸水過程から排水過程にかけて経時的に計測した密閉時の間隙空気圧の変動について整理を行った。なお、開放時はすべての測定地点において、速やかに空気圧=0(大気圧)となる。

No.0 地点の間隙空気圧の時刻変化を図 8 に示す。間隙空気圧が粒径の小さい試料ほど高くなるのは、吸水量が多くカラム内の空隙が減少するためである。また、カラム内鉛直方向における間隙空気圧分布は、図 9 及び図 10 に示すとおり、吸水過程及び排水過程の初期において差異が見られる。この差異は間隙中における空気移動の特徴を示しており、粒径が小さいほど顕著である。また、吸水過程、排水過程共に経過時間 50 秒程度ですべての計測地点でほぼ一定値となることが確認できた。試料が水で飽和される No.4 を除くと、最大計測位置間隔は 600mm (No.0 と No.3) であり、これらが 50 秒で一定値を示す場合、空気の移動速度は(=60cm/50sec)、つまり  $\times 10^0$  (cm/s) のオーダーとなり、これは同様の粒径を有する媒体の透水係数に比べると 2~3 オーダー高いものであり(表 5 参照)、水に比べて空気の移動速度は速いことが確認できた。

表 5 試料別の透水係数オーダー<sup>5)</sup>

媒体種類	透水係数の目安 k (cm/s)	備考
ガラスビーズを詰めたもの	$10^{-3} \sim 10^0$	ビーズ粒径、詰め方による
砂を詰めた円筒容器	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	砂粒径分布、詰め方による

### 3.3 試料の残留体積含水率

排水過程で定常状態に達したときのカラム内底部から 5cm 地点のサクシオンを計測し、van Genuchten の関係式から試料の残留体積含水率を算出した。算出した体積含水率を表 6 に示す。これより、粒径の小さい試料程サクシオンが大きいことから、残留体積含水率も増加する傾向が確認できる。ただし、GB  $\phi$  0.1 mm と豊浦標準砂を比較すると、粒径の大きい豊浦標準砂の値のほうが若干大きい。

## 4. 結論

本研究で実施した気液混相流実験結果から、次の結論が得られた。

- 1) 本研究で作製した小型テンシオメータと間隙空気圧計は、従来の計測機器と同程度の測定精度を有する。
- 2) 吸水量の増加が密閉カラム内の空隙を減少させ、その分、間隙空気圧が高くなる。
- 3) 密閉時の排水過程において、開放時と比べて多く排水されるのは密閉カラム内への吸水によって高まった内部の圧力が、排水時に開放されることでカラム内の水分を外に押し出すためと考えられる。
- 4) 多孔体中における空気の移動速度は水の移動に比べて速い。

#### 参考文献

- 1) 藤縄克之(2010):環境地下水学 第2章 堆積物間隙の流体と流れの原理, 共立出版株式会社
- 2) 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
- 3) 長谷川純也(2009): 多孔体中の気液二相流に関する実験的研究, 信州大学工学部土木工学科卒業論文
- 4) 長谷川純也・牛嶋聖・藤縄克之・豊田富晴(2010): 不飽和カラムからの蒸発と塩類集積に関する実験的研究, 日本地下水学会春季講演会講演要旨, pp.162-165
- 5) 登坂博行(2006): 地圏水循環の数理 流域水環境の解析法, 東京大学出版会, pp.133

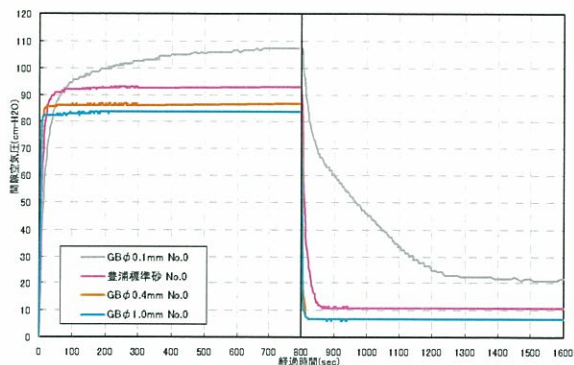


図 8 間隙空気圧(密閉時)

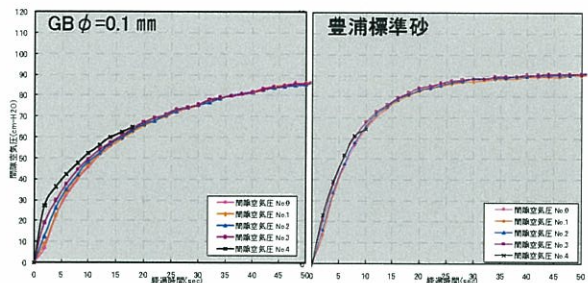


図 9 吸水過程初期における間隙空気圧(地点別)

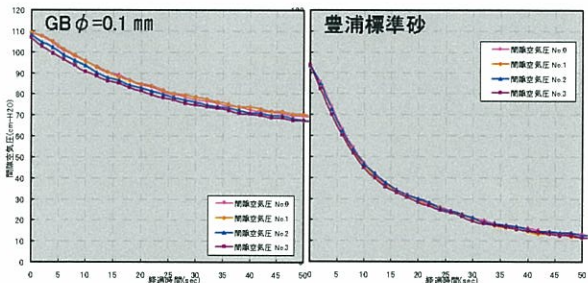


図 10 排水過程初期における間隙空気圧(地点別)

表 6 試料別の残留体積含水率

No	試料	サクシオン (cm H <sub>2</sub> O)	残留体積含水率
1	GB $\phi$ 0.1	52.53	0.344
2	豊浦標準砂	32.52	0.350
3	GB $\phi$ 0.4	16.01	0.053
4	GB $\phi$ 1.0	18.51	0.018