

## 土壌水分ヒステリシスがガス・熱輸送係数に及ぼす影響

### Effect of Soil-Water Retention Hysteresis on Gas and Heat Transport Parameters

理工学研究科環境科学・社会基盤部門 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子  
Department of Environmental Science and Infrastructure Engineering  
Shoichiro Hamamoto, Ken Kawamoto, Toshiko Komatsu

#### Abstract

Knowledge of soil-gas and heat transport parameters is essential for simulating behaviors of greenhouse/toxic gases and changes in soil temperature in natural and man-made soil ecosystems, for example in urban polluted soil sites and the soil cover layer at municipal landfill sites. Degree of water-saturation at different water potentials (as described by the soil-water retention curve) highly affects both gas and heat transport parameters. In this study, the effects of water retention hysteresis (non-singularity in the wetting and drainage curves of soil-water retention) on the soil-gas diffusion coefficient ( $D_p$ ), air permeability ( $k_a$ ), and thermal conductivity ( $K$ ) were investigated. Different sand size fractions representing different particle shapes were used for measuring gas and heat transport parameters. Soil-water retention hysteresis highly affected the gas transport parameters, showing higher  $D_p$  and  $k_a$  values for the wetting processes than those for drying processes at the same air content. This suggests that the existence of more continuous pore-networks for the wetting processes enhanced diffusive and advective gas transport. Opposite to the behavior of the gas transport parameters, the effect of soil water retention hysteresis on  $K$  was insignificant for all sand materials.

#### 1. はじめに

有機物に富んだ廃棄物処理場の廃棄物層では、メタン等の温室効果ガス類や汚染ガスが生成され、これらガス類は覆土を介して大気へと放出される。また廃棄物層では、微生物分解により熱が発生し、覆土層を介して廃棄物層と大気との熱交換が生じる。一方、揮発性有機化合物による土壌汚染サイトでは、浄化工法の一つとして汚染サイトを原位置で加熱し、気化した汚染ガスを吸引する工法（現場熱処理および土壌ガス吸引法）が適用されることがある。この浄化工法では、汚染地盤内の汚染ガスと熱の移動特性が浄化効率に大きく影響を与える。このように、地盤内のガス・熱移動特性の正確な理解は、廃棄物処分場における正確な環境リスク評価、処分場の安定化促進、土壌汚染サイトでの浄化工法の最適化を図る上で非常に重要である。

地盤のガス輸送係数（通気係数・ガス拡散係数）および熱輸送係数（熱伝導率）は、地盤のガス・熱輸送を表す支配方程式に直接組み込まれる輸送係数であり、ガス・熱輸送係数を精度よく把握することは地盤内のガス・熱輸送を正確に予測する上で必要不可欠である。著者らはこれまで、国内外の多くの地盤試料を対象として地盤の物理的性質（土性・水分条件など）とガス・熱輸送係数の関係を調べ、数多くのガス・熱輸送係数の予測モデルを提案してきた<sup>1,2,3</sup>。本報では、地盤のガス・熱輸送係数に関する研究の一例を紹介する。

降雨や乾燥という天候の変化は土壌内の水分状態（飽和度，吸引圧）を随時変化させる。吸水と脱水過程では，飽和度と吸引圧（サクション）の関係が異なることが知られており，これを土壌水分ヒステリシス現象という。土壌水分ヒステリシス現象がガス・熱輸送係数に与える影響の理解は，実際の気候条件を考慮しより現場に適した地盤内のガス・熱輸送解析を行う上で非常に重要である。本研究では異なる粒形・粒径を有する砂試料を用いて，土壌水のヒステリシス現象がガス輸送係数（通気係数・ガス拡散係数）および熱輸送係数（熱伝導率）に与える影響を調べた。

## 2. 実験方法

### 2.1. 実験試料および装置

本研究では異なる粒子の形状を持つ2種類の砂 Granusil, Accusandを用いた。Table 1 に使用した試料の基本物性を示す。

Table 1 Physical properties of sands used in this study.

Sand	Bulk density	Particle density	Porosity	Mean diameter
	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$D_{50}(\text{mm})$
Granusil#30	1.61	2.66	0.394	0.50
Granusil#50	1.61	2.66	0.394	0.31
Accusand#30/40	1.79	2.65	0.325	0.52

段階的に吸引圧を制御できる一次元カラム実験装置<sup>4</sup>を用いて，吸水・脱水過程でのガス輸送係数（ガス拡散係数  $D_p$ ，通気係数  $k_a$ ）・熱輸送係数（熱伝導率  $K$ ）を測定した。Figure 1 に本実験で使用した一次元カラム装置の概要を示す。試料の砂を充填するリングは直径 150mm，高さ 120 mm，容積 2120  $\text{cm}^3$  である。リングの底となる部分は保水性の高い多孔質板となっている。この多孔質板から上方に 33mm 地点が中心となるよう Sample ring には直径 24mm の孔が 16 箇所開けられており，通気・拡散実験を行う際にはこの孔を介してガス移動が行われる。この孔はねじ式の stopper プラグで塞

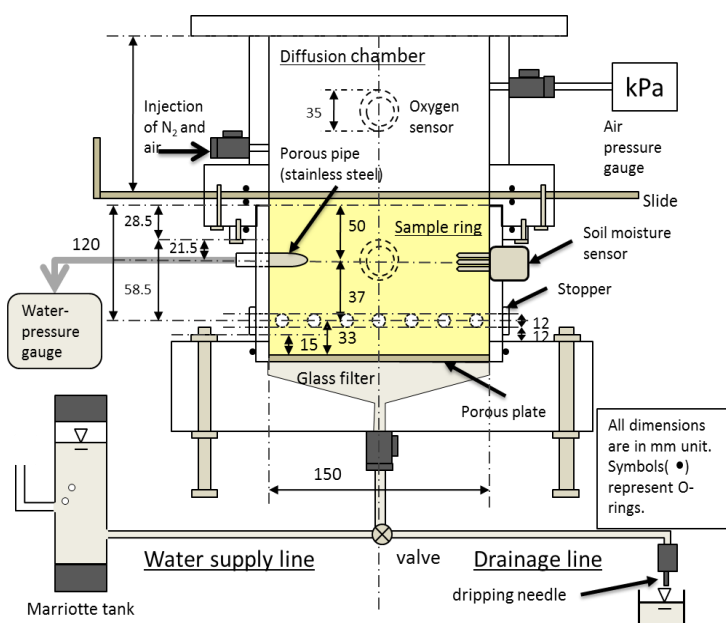


Figure 1 Schematic illustration of experimental setup.

ることが可能であり、試料を詰める際やサクシオンを変化させるなどガス輸送係数測定以外の時は閉じられている。またリングには水圧計、試料内の体積含水率、温度を測定するセンサー(ECH2O 5TE, Decagon Device Inc. WA, USA), 酸素電極(KE-12, Yuasa Power Supply Ltd. Tokyo, Japan), 熱物性測定用センサー(KD2-Pro), 気圧計(A1170499, Yamamoto Electric Works Co. Ltd., Kobe, Japan; range < 5 kPa and accuracy  $\pm 0.01$ ) が備え付けられている。リング上方は拡散容器となっており、同様の気圧計とその片側に空気、窒素を送り込むためのバルブがある。脱水過程では排水用のチューブと注射針を、吸水過程ではマリョット管を用いた。

## 2.1. 実験手順

リングに所定の乾燥密度を与えるように試料を水中充填した。試料充填後、段階的に所定のサクシオンを作用させながら、試料の水分状態が平衡に至ったことを確認した後に前述の stopper プラグを取り外し通気・拡散実験を行った。

拡散係数の測定には酸素ガスをトレーサーガスとして用いた。まず図中のスライド式仕切り板を閉めた状態で拡散容器内を窒素で充満させる。その後仕切り板を開き大気ガスと窒素を相互拡散させ、拡散容器内の酸素ガス濃度変化を測定した。拡散係数は「土壌のガス拡散係数の測定法」<sup>5</sup> により算出した。なお、大気中での酸素の拡散係数  $D_0$  は  $0.204 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  とした。

通気実験では所定の流量で空気をコンプレッサーより拡散容器に送り込み、その時の流量・試料上端の圧力(拡散容器に設けた気圧計より測定)と試料下端の圧力(リングに設けた気圧計より測定)の差圧を測定した。通気係数はダルシー式を用いて算出した。

熱伝導率はカラムに備え付けた KD2-Pro を用いて測定を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1. 水分特性曲線

体積含水率と吸引圧(サクシオン)の関係を表した水分特性曲線を Figure 2 に示す。得られた水分特性曲線から排水過程、吸水過程では体積含水率とサクシオンの関係が異なり、ヒステリシスが表れていることがわかる。特にサクシオンの低い領域、すなわち体積含水率が大きい値の領域でのヒステリシスがみられた。また、完全な飽和状態から排水をした Main Drying の過程は、その後の 1st Wetting, 2nd Drying, 2nd Wetting と比較して低いサクシオン領域において体積含水率が高いことがわかる。これは、封入空気の影響が考えられる。

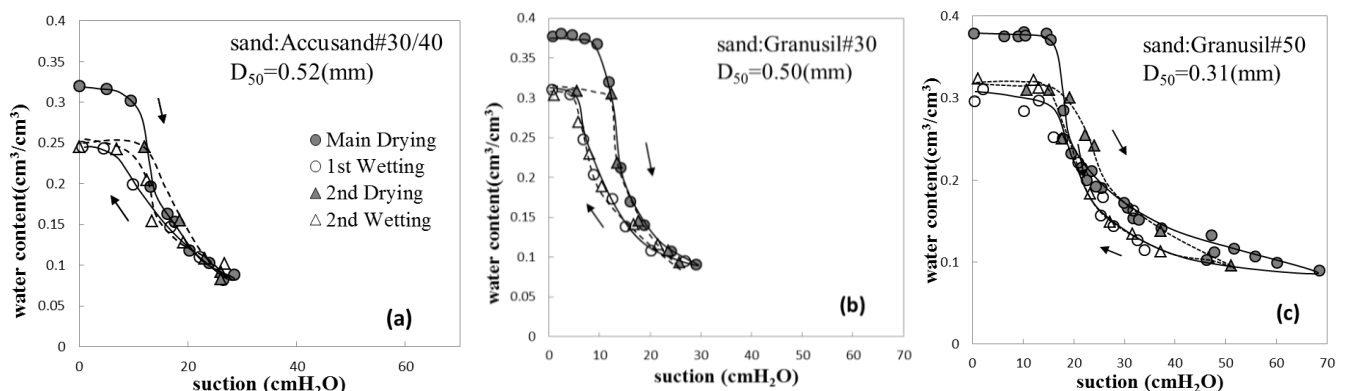


Figure 2 Soil-water retention curves for (a) Accusand #30/40, (b) Granusil #30, and (c) Granusil #50.

### 3.2. ガス輸送係数(通気係数 $k_a$ , 拡散係数 $D_p$ )

Figure 3 に Accusand#30/40, Granusil#30, Granusil#50 の通気係数および拡散係数と体積含水率との関係を示す. 通気係数・拡散係数ともに同気相率において吸水過程の方が排水過程に比べ, 高い値を示した. このことから, 粗大間隙間を連結する微細間隙内が吸水過程ではガス道として寄与しやすく, 高い粗大間隙の連結性がガス輸送を促進したことが考えられる. Stonestrom ら(1989)<sup>6</sup> も砂とシルト質の団粒土を用いた同様の実験により吸水過程において同気相率条件で排水条件よりも通気係数が高いことを報告している. 同様の傾向を Colonna ら(1972)<sup>7</sup> も述べている.

一回目と二回目の排水過程を比較すると, 通気係数, 拡散係数ともに一回目の排水過程が二回目よりも低い値を示した. 特に Granusil#50 ではその差が顕著に見られた. このことから, 一回目と二回目での排水過程では, 同気相率条件で水分分布が異なり, 二回目の排水過程では一回目よりもより連結した間隙構造を有していることが考えられる. また, Granusil#50 は粗い粒子形状を有し, Granusil#30 よりも粒径が小さいことから, 単位体積あたりの粒子同士の接触点が多いと考えられ, このことがガス輸送係数のヒステリシス依存性に影響を与えていることが示唆された.

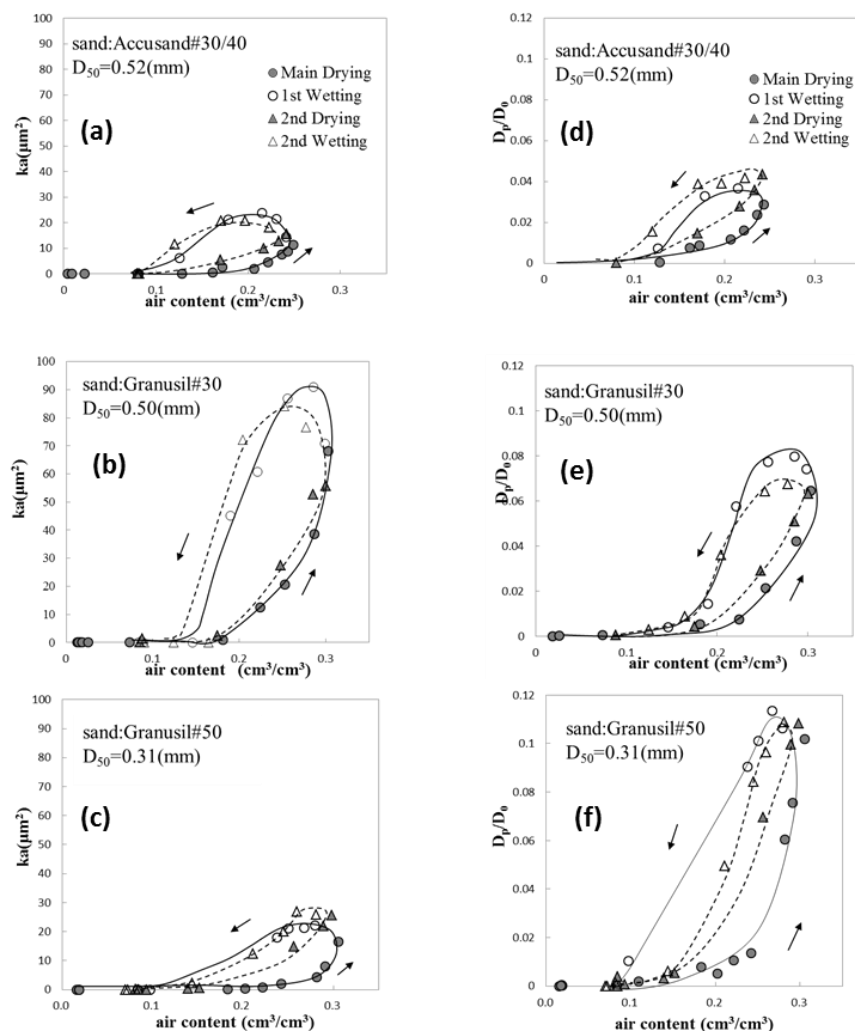


Figure 3 Air permeability;(a)(b)(c) and gas diffusivity;(d)(e)(f) as a function of air content for (a)(d) Accusand #30/40, (b)(e) Granusil #30, and (c)(f) Granusil #50.

### 3.3. 熱輸送係数(熱伝導率 $K$ )

Figure 4 に試料 Granusil#50 の熱伝導率測定結果を示す. 各サイクルにおいて気相率の増加と

もに熱伝導率は低下した。これは水分量が低下することで液相を介した熱伝導が低下したためである。ヒステリシスの影響はガス輸送係数に比べ小さく、排水・吸水過程において顕著な差は見られなかった。このことから熱伝導率は水分量には影響を受けるが、水分分布の違いによる影響は小さいと考えられる。

### 3.4. 間隙特性パラメータ(屈曲度 T)

多孔質媒体中を気体や溶質が移動する場合、複雑な経路をとることにより直進経路に比べて移動距離が大きくなる。これを屈曲という。屈曲度 T は 土壤間隙構造を均一な管路の束により構成されたモデルとした場合の傾きを示し、気相率とガス拡散係数より、 $T = \{\varepsilon/(D_p/D_0)\}^{0.5}$  として表される。

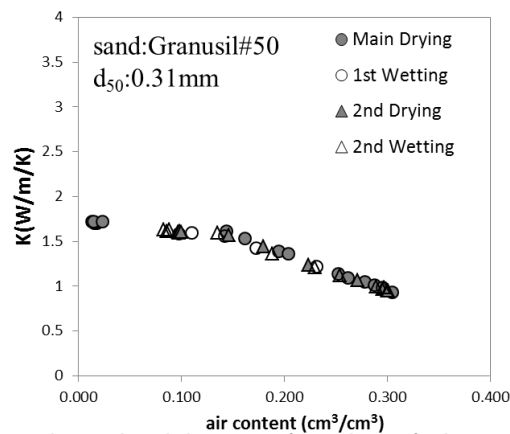


Figure 4 Thermal conductivity as a function of air content for Granusil #50.

Figure 5 に示すように、屈曲度は気相率が低い領域で高い値となり、気相率が大きくなるにつれ減少する傾向が見られた。これは低気相率では多くの間隙が水で満たされ、ガス路の連結性が低下するためである。また、一回目の排水過程は、吸水過程および二回目の排水過程に比べ全ての気相率の範囲において高い屈曲度が得られた。このことから特に一回目の排水過程では粗大間隙間の連結性が悪く、より屈曲性に富んだガス道を有していることが考えられた。

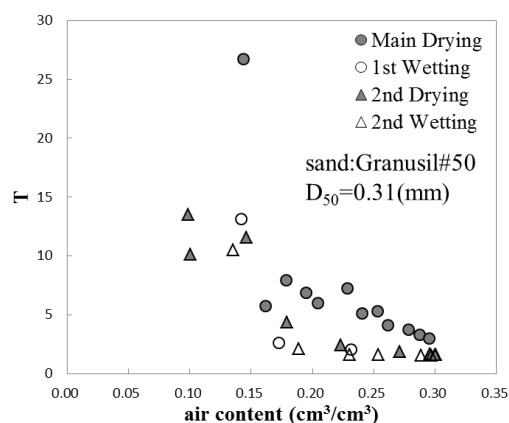


Figure 5 Pore-network tortuosity as a function of air content for Granusil #50.

## 4. 結論

本研究では一次元カラムを使用し、ガス輸送係数(拡散係数・通気係数)と熱輸送係数(熱伝導率)を異なる粒径・粒子形状を有した砂試料を用いて測定し、土壤水分ヒステリシス現象がガス・熱輸送係数に与える影響を調べた。ガス輸送係数においては、排水過程での通気・拡散係数が吸水過程

のものと比較して低い値となった。この結果は、排水・吸水過程での試料内の水分分布の違いが、粗大間隙間の連結性に影響を与えたためと考えられる。また、粒子形状が粗く粒径が小さい試料でガス輸送係数のヒステリシス依存性はより顕著に見られた。一方、熱伝導率は排水・吸水過程による差は見られなかった。ガス拡散係数と気相率から計算された間隙の屈曲度の計算結果から、特に一回目の排水過程では他の吸水・排水過程に比べ全気相率条件で屈曲性に富んだ間隙構造を有していることが示唆された。

本研究では、吸水・排水過程における水分分布の違いを定量的に評価するまでには至っていない。今後 X 線 CT 装置などを用いて土壌内の間隙構造を可視化し、吸水・排水過程における水分分布の違い、特に粗大間隙の連続性について定量化する試みが求められる。吸水・排水履歴を考慮したより精度の高いガス・熱輸送係数予測モデルの構築は今後の課題である。

## 謝辞

本研究の実験を進めるにあたり、多大の協力をいただいた笹沼公美氏（理工学研究科博士課程前期 2 年）に謝意を表す。

## 参考文献

1. Hamamoto, S., P. Moldrup, K. Kawamoto, and T. Komatsu. (2009): Effect of particle size and soil compaction on gas transport parameters in variably-saturated, sandy soils. *Vadose Zone J.* 8, 986-995.
2. Hamamoto, S., P. Moldrup, K. Kawamoto, and T. Komatsu. (2010): Excluded-volume expansion of Archie's law for gas and solute diffusivities and electrical and thermal conductivities in variably-saturated porous media. *Water Resources Research.* 46, W06514.
3. Hamamoto S., P. Moldrup, K. Kawamoto, and T. Komatsu. (2011): Two-region Extended Archie's Law Model for Soil Air Permeability and Gas Diffusivity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75: 795-806.
4. Rouf, M. A., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Sakaki, and T. Komatsu, and P. Moldrup. (2011): Unified measurement system with suction control for measuring hysteresis in soil-gas transport parameters, *Water Resources Research*, 48, W02506, doi:10.1029/2011WR010615.
5. 遅沢省子、久保田徹(1987)：土壌のガスの拡散係数測定法，*日本土壌肥料科学雑誌*，第 58 巻，第 5 号，528-535.
6. Stonestrom, D. A., and J. Rubin. (1989): Air permeability and trapped-air content in two soils, *Water Resources Research*, 25(9): 1959-1969.
7. Colonna, J. and F. Brissaud. (1972): Evolution of capillarity and relative permeability hysteresis, *Society of petroleum engineers journal*, 253: 28-38.