



# 音響測定法に基づいた砂質土壌の連続気相率と通気係数の関係

深田耕太郎<sup>1</sup>・木原康孝<sup>1</sup>

## Relationship between continuous air content and air conductivity in a sandy soil based on acoustic measurements

Kotaro FUKADA<sup>1</sup> and Yasutaka KIHARA<sup>1</sup>

**Abstract:** Soil air conductivity has a hysteretic relationship with the air content of the soil, likely caused by amount of entrapped air depending on the wetting or drying history of the soil. Entrapped air content can be evaluated as the difference between total air content according to the volumetric water content and continuous air content based on the acoustic measurements. Acoustic tests were conducted for a 50-cm<sup>3</sup> cylindrical container filled with Tottori Dune sand at several stages in the drainage or imbibition process. We evaluated a relationship between continuous air content and air conductivity, as well as the effects of entrapped air on the hysteresis. Air was entrapped in the course of imbibition of water for the total air content from 15 % to 10 %. Within this total air content range, air conductivity was found to be uniquely determined with the continuous air content. Since almost no air was entrapped for the total air content exceeding 15 %, continuity of air in the soil depending on wetting or drying was assumed to be a main reason for the air conductivity – total air content hysteresis.

**Key Words :** Tottori Dune sand, soil air, trapped air, air conductivity, hysteresis

### 1. はじめに

土壌の通気性は、通気係数によって定量的に表され、多くの場合、気相率との関係で示される。これは、気相率をパラメータとして通気係数を理論的に導出したいという動機 (Millington and Quirk, 1961) や、あるいは実用的には、通気係数を気相率から予測できると有用であるという理由 (Moldrup et al., 1998) などに基づいている。その際重要になるのが、通気係数は吸水過程と排水過程で同じ気相率に対して異なる値を示すという現象、すなわちヒステリシスである (Pavlikis and Barden, 1972; Stonestrom and Rubin, 1989)。

通気性のヒステリシスの傾向については、いくつかの異なる報告が見られる。吸水過程初期の通気係数は排水過程より大きいという結果が、砂岩 (Colonna et al., 1972) や砂質土壌 (神谷ら, 2006a, b; 神谷・井上, 2008; Rouf et al., 2012) を用いた実験から得られている。しかし、吸水過程初期で排水過程と変わらず、吸水過程が進むと排水過程よりも小さくなるという結果もある (Geffen et al., 1951; Osoba et al., 1951; Land, 1971)。さらに、Naar et al. (1962) は、固結状態の砂では吸水過程の方が小さく、ガラスビーズでは逆になると報告し、Bang (1984) は石油の回収シミュレーションにおいて、吸水過程の通気係数の方が小さいと仮定している。

通気性のヒステリシスの一因は封入空気である。その理由は、封入空気は通気に寄与しないという点にある。例えば Land (1971) は、吸水過程の通気係数が排水過程より小さくなるのは、吸水過程では空気が封入されて通気に寄与する空気量が減るためであると考えた。一方で、封入空気を原因としないヒステリシスも確認されている。Stonestrom and Rubin (1989) は、実際に砂質土壌の封入空気量を測定し、乾燥側では封入空気が存在しないにもかかわらず、通気係数のヒステリシスは存在することを示した。したがって、気相率と通気係数の関係に見られるヒステリシスを理解するためには、まず、封入空気の影響を他の要因がもたらす影響と区別する必要がある。

音響測定法 (深田ら, 2010) は、音波を土壌に当てることで、土壌の連続気相率と通気係数を同時に測定する方法である。連続気相率とは大気と連続した土壌空気の体積割合として定義される。音響測定法を利用すると、従来の質量測定による全気相率と連続気相率の差として封入空気の気相率を求めることができる。また、音響測定法が封入空気を測定対象としないため、通気性のヒステリシスの中で封入空気を要因としないものを特定できる可能性がある。

そこで本研究では、音響測定法を用いて連続気相率と通気係数の関係を明らかにし、通気性のヒステリシスにおける封入空気の影響を特定することを目的とする。

<sup>1</sup>Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, Nishikawatsu-cho, Matue, Shimane, 690-8504, Japan. Corresponding author: 深田耕太郎, 島根大学生物資源科学部。  
2015年11月17日受稿 2016年5月16日受理

## 2. 方法

試料は、内径 5 cm、長さ 2.5 cm のステンレス円筒容器に鳥取砂丘砂を充てんしたものである。鳥取砂丘砂は、粒径 0.1 ~ 0.4 mm に質量の約 90 % が存在する砂である。円筒容器の底面には、メンブレンフィルター (Pall Corporation, Versapor1200 Membrane Disc Filters) を取り付け、底面からの水分調整を可能にした。

排水過程の試料を作る場合、円筒容器に湛水した状態で砂を流し込み、乳棒で突き固めた。この操作を数回繰り返して、最後に表面を整形した。吸水過程の場合は、空の容器に風乾状態の砂を入れ、同様の操作を行った。試料の乾燥密度は、排水過程で  $1.64 \sim 1.70 \text{ g cm}^{-3}$ 、吸水過程で  $1.63 \sim 1.66 \text{ g cm}^{-3}$  となった。試料数は、排水過程で 11 個、吸水過程で 10 個である。

次に、排水過程の場合、試料の中心に対して水頭差を  $-2.0$  から  $-8.5 \text{ kPa}$  まで段階的に大きくしていき、水分飽和状態から排水した。一段階の水頭差の変化分は  $0.2 \text{ kPa} \sim 1 \text{ kPa}$  であり、一つの試料につき、7 ~ 9 回の段階を設けた (水頭差の例:  $-2.9, -3.4, -3.7, -3.9, -4.2, -4.44, -4.9, -5.4 \text{ kPa}$ )。排水開始から 12 ~ 24 時間後、排水量の測定と音響測定を行った。吸水過程の場合は、試料の中心に対して水頭差を  $-4.0$  から  $0 \text{ kPa}$  まで段階的に小さくしていき、空気飽和状態から水分を増加させた。一段階の水頭差の変化分は  $0.2 \text{ kPa} \sim 0.5 \text{ kPa}$  であり、一つの試料につき、6 ~ 8 回の段階を設けた (水頭差の例:  $-3.9, -2.9, -2.4, -1.9, -1.4, -0.9, -0.4 \text{ kPa}$ )。吸水開始から 24 時間後、吸水量の測定と音響測定を行った。

最終段階の測定後、試料を炉乾燥した。試料の炉乾燥質量と排水量あるいは吸水量から、各段階における試料の全気相率を求めた (従来法)。また、連続気相率と通気係数については、深田ら (2010) の音響測定法によった。

音響測定法は連続空気を集中定数系で近似している (深田ら, 2010)。そのため、近似が成立しない場合は、連続気相率が真値より過小評価される。過小評価の生じる条件や大きさは限定的であるが、封入空気の影響と過小評価のどちらも、連続気相率を全気相率より小さくするため、2つを区別するのは難しい。本研究では、全気相率と連続気相率が良く一致する結果をもとに、全体の傾向から、過小評価した可能性のある点を示し、封入空気の影響と分けて考察した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 全気相率と連続気相率の関係

Fig. 1 は従来法による全気相率と音響測定法による連続気相率の関係を示したものである。排水過程では、全気相率 3 % 程度からスタートし、排水とともに 33 % 程度まで増加した。連続気相率と全気相率は、全気相率が 13 ~ 18 % の範囲を除けばほぼ等しい。この結果から、

試料底面からの排水にともない、排水量と同体積の空気が試料上面から大気と連続した形で試料内へ浸入したと考えられる。

排水過程の全気相率 13 ~ 18 % (Fig. 1 の矢印付き●) では、連続気相率が全気相率より最大で 5 % 程度低く評価された。これを封入空気の発生と考えることはできる。しかし、全気相率 13 % より小さい範囲で連続気相率と全気相率の良い一致が見られるため、その後の気相率の増加によって空気が封入されたとは考えにくい。したがって、これらの結果は連続気相率が真値よりも過小に評価されたものであると推測した。

水分特性曲線 (Fig. 2) は、問題の測定点が過小評価

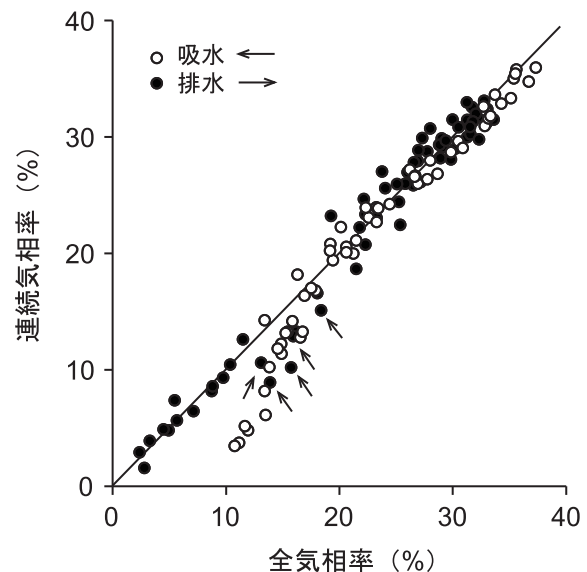


Fig. 1 全気相率と連続気相率の関係。  
Relationship between total air content and continuous air content.

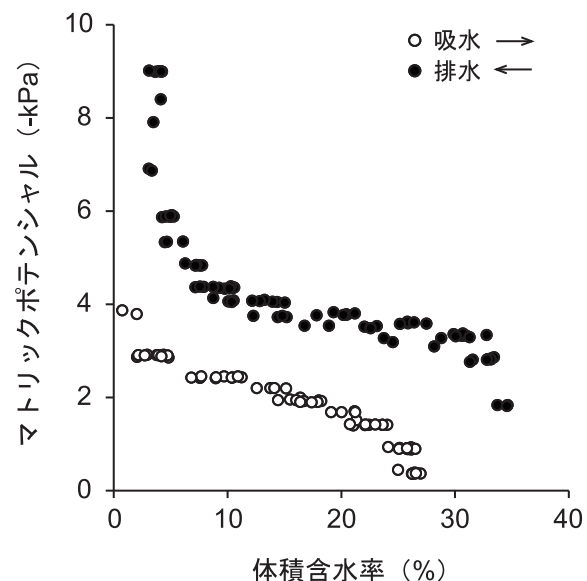


Fig. 2 鳥取砂丘砂の水分特性曲線。  
Soil-water characteristic curve for Tottori Dune sand.

の起きやすい状況にあった可能性を示している。排水過程の全気相率 13～18% (体積含水率 19～24%) では、マトリックポテンシャルの変化に対する全気相率の変化が最も大きい。つまりこの全気相率範囲は、排水が急速に進み、気相が試料全体に広がる段階である。このとき、比較的細長い連続気相が試料全体を貫くような状況が実現し、集中定数近似が成り立たなかった可能性がある。これらの測定点と通気係数との関係については次節で述べる。

吸水過程の結果を見てみると、全気相率は 37% 程度からスタートし、吸水とともに 10% 程度まで減少した。終了時の水頭はほぼ 0 kPa であり、試料はこれ以上吸水しなかった。吸水の停止は、気相が試料外へ移動しなかったことを示す。つまり、はじめは大気と連続していた気相が水分によって封入されたと推測できる。連続気相率は全気相率 37～15% で全気相率に等しく、全気相率が 15% から 10% まで減少するのにもない、15% から 3% まで減少した。全気相率 10% における排水過程の結果との明確な違いにより、封入空気が吸水とともに全気相率 15% あたりで発生し、7% 程度まで増加したと推測した。

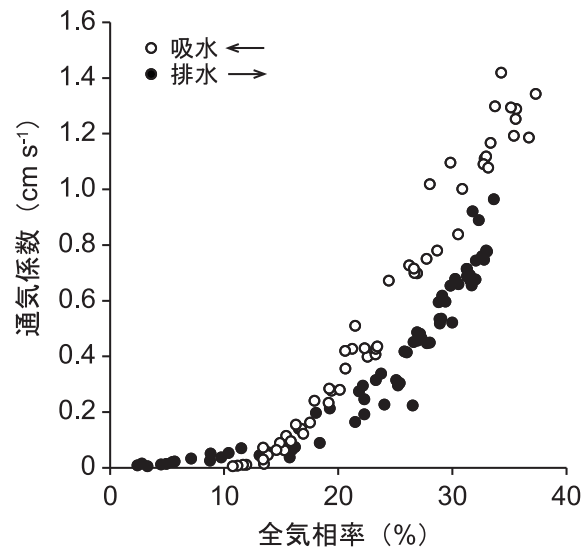
### 3.2 連続気相率と通気係数の関係

Fig. 3 (a) は従来法の全気相率と音響測定を通気係数の関係を示したものである。排水過程では、通気係数はゼロに近い状態からスタートし、排水とともに  $1 \text{ cm s}^{-1}$  程度まで増加した。吸水過程では、 $1.4 \text{ cm s}^{-1}$  程度からスタートし、吸水とともにゼロまで減少した。通気係数は全気相率 15% より大きい範囲で吸水過程の方が大きい。15% 以下で大小関係が逆転し排水過程の方が大きくなったように見える。そして、10% 以下では吸水過程の点が存在しないため、比較できない。

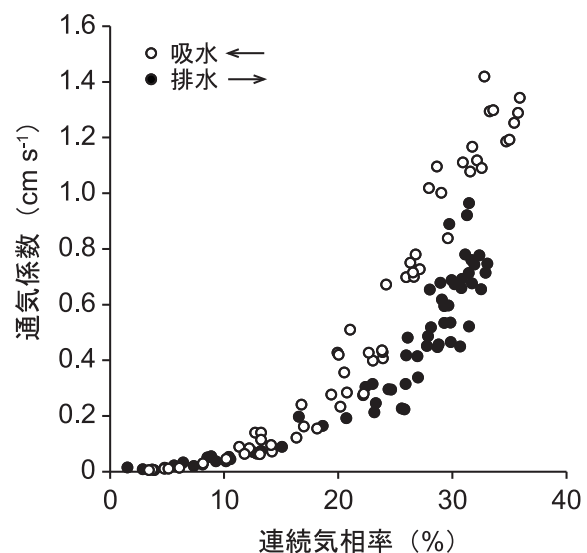
Fig. 1 から得た推測を踏まえると、全気相率 10～15% の範囲では吸水過程で封入空気が生じているため、全気相率は同じでも通気に寄与する量は吸水過程の方が小さい。このことが、全気相率が 15% を下回ると吸水過程の通気係数の方が小さくなったように見える現象をもたらしたと考えられる。そこで、Fig. 3 (a) の横軸を音響測定による連続気相率としたものを Fig. 3 (b) に示す。排水過程の分布には大きな変化はないが、吸水過程の点は連続気相率 15% 以下の範囲で左側に移動している。その結果、連続気相率 3～15% ではヒステリシスが認められなくなった。

ここで、連続気相率を過小評価した可能性のある排水過程の結果 (Fig. 1 の矢印付き●) について見る。他の測定点と同じ操作により、Fig. 3 (a) から (b) の変化に対して、測定点は全気相率 13～18% から連続気相率 8～15% へと移動した。これを、本来全気相率と連続気相率が等しかったはずと考えて測定点を移動させなかったとしても、連続気相率 3～15% ではヒステリシスが認められなくなったという結論は変わらない。その理由は、注目しているのが、主に吸水過程のグラフ上における変化であることによる。

次に全気相率 15% 以上に注目する。Fig. 1 よりこの範囲で封入空気は生じていない。したがって、Fig. 3 (a) と (b) のどちらにおいても、吸水過程と排水過程で通気に寄与する量が等しいにもかかわらず通気係数が異なるという状況が表れている。封入空気に関係なく生じるヒステリシスの原因は連続性、すなわち、形成される通気経路の形状が吸水過程と排水過程で異なる (神谷ら, 2006b) ことによる。その定量的な指標としては、



(a)



(b)

**Fig. 3** 気相率と通気係数の関係 (a) 従来法による全気相率を用いた場合. (b) 音響測定による連続気相率を用いた場合. Relationship between air conductivity and (a) total air content obtained using the conventional method; and (b) continuous air content obtained using the acoustic method.

Millington and Quirk (1961) が間隙の相互作用として評価した effective flow area や、屈曲度 (Jury and Horton, 2006) などが考えられる。

以上をまとめると、封入空気が生じている気相率範囲では、通気係数は主に通気に寄与する量だけで決まり、封入空気が生じていない気相率範囲では、通気係数は連続性の違いによるヒステリシスを示すということが明らかとなった。この結論の後半部分は 1 章で紹介した Stonestrom and Rubin (1989) の結果と同じである。前半部分は、おそらく本研究で初めて示されたものである。今後の課題は、この結論が一般的なものかどうかを、他の土壌を用いて確認することである。

#### 4. 結論

音響測定法に基づき評価された連続気相率を用いることで、通気性のヒステリシスを封入空気によるものと他の原因とに分けた。鳥取砂丘砂の場合、封入空気は吸水過程の全気相率 10 ~ 15 % の範囲で生じる。そして、封入空気が生じている全気相率範囲において、通気係数は主に連続気相率だけで決まる。全気相率 15 % 以上では、空気の連続性を主要因とするヒステリシスが存在する。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 26850153 の助成を受けたものです。また、編集長、編集委員、読者の皆様に多くの助言を賜りましたことをここに記し、感謝いたします。

#### 引用文献

- Bang, H.W. (1984): Simulation study shows hysteresis effect on oil recovery during a cyclic steam process. *Oil Gas J.*, 82: 83–86.
- Colonna, J., Brissaud, F. and Millet, J.L. (1972): Evolution of capillarity and relative permeability hysteresis. *Soc. Pet. Eng. J.*, 12: 28–38.
- 深田耕太郎, 三野 徹, 中村公人 (2010): 音波の共鳴現象を利用した砂の連続空気量と通気係数の測定. *土壌の物理性*, 115: 3–13.
- Geffen, T.M., Owens, W.W., Parrish, D.R. and Morse, R.A. (1951): Experimental investigation of factors affecting laboratory relative permeability measurements. *Pet. Trans., AIME*, 192: 99–110.
- Jury, W.A. and Horton, R. (2006): 土壌物理学 — 土中の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用 — (取出伸夫監訳: 井上光弘・長 裕幸・西村 拓・諸泉利嗣・渡辺晋生訳), p. 207. 築地書館, 東京.
- 神谷浩二, Bakrie, R., 井上光弘 (2006a): 鳥取砂丘砂の透気係数と飽和度の関係. *日本砂丘学会誌*. 53: 11–18.
- 神谷浩二, Bakrie, R., 本城勇介 (2006b): 保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定. *土木学会論文集 C*, 62: 679–688.
- 神谷浩二, 井上光弘 (2008): 水分特性曲線を用いて不飽和土の透気係数と飽和度の関係を推定する関数モデルの考察. *土木学会論文集 C*, 64: 650–661.
- Land, C.S. (1971): Comparison of calculated with experimental imbibition relative permeability. *Soc. Pet. Eng. J.*, 11: 419–425.
- Millington, R.J. and Quirk, J.P. (1961): Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, 57: 1200–1207.
- Moldrup, P., Poulsen, T.G., Schjønning, P., Olesen, T. and Yamaguchi, T. (1998): Gas permeability in undisturbed soils: measurements and predictive models. *Soil Sci.*, 163: 180–189.
- Naar, J., Wygal, R.J. and Henderson, J.H. (1962): Imbibition relative permeability in unconsolidated porous media. *Soc. Pet. Eng. J.*, 2: 13–17.
- Osoba, J.S., Richardson, J.G., Kerver, J.K., Hafford, J.A. and Blair, P.M. (1951): Laboratory measurements of relative permeability. *Pet. Trans. AIME*, 192: 47–56.
- Pavlikis, G. and Barden, L. (1972): Hysteresis in the moisture characteristics of clay soil. *J. Soil. Sci.*, 23: 350–361.
- Rouf, M.A., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Sakaki, T., Komatsu, T. and Moldrup, P. (2012): Unified measurement system with suction control for measuring hysteresis in soil–gas transport parameters. *Water Resour. Res.*, 48: W02506.
- Stonestrom, D.A. and Rubin, J. (1989): Air permeability and trapped-air content in two soils. *Water Resour. Res.*, 25: 1959–1969.

## 要 旨

土壌の気相率と通気係数の関係はヒステリシスを示すことが知られており、封入空気が原因の一つと考えられている。しかし、封入空気の影響の特定には至っていない。過去に提案された音響測定法によって、全気相率と連続気相率の関係を求め、封入空気量を評価することが可能となった。本研究では、連続気相率と通気係数の関係を明らかにし、通気性のヒステリシスにおける封入空気の影響を特定することを目的とした。鳥取砂丘砂を  $50 \text{ cm}^3$  円筒容器に充填し、排水過程と吸水過程において段階的に音響測定を行った。その結果、封入空気は吸水過程の全気相率  $10 \sim 15 \%$  の範囲で生じ、この全気相率範囲において、通気係数は主に連続気相率だけで決まることが分かった。また、全気相率  $15 \%$  以上では、封入空気は存在しないため、空気の連続性がヒステリシスの主要因と考えられる。

キーワード：鳥取砂丘砂，土壌空気，封入空気，通気係数，ヒステリシス