

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26850153

研究課題名(和文)排水過程における土壌空気の物理性のリアルタイム音響測定技術開発

研究課題名(英文)Real-time measurement technique for soil physical properties in drainage process

## 研究代表者

深田 耕太郎 (Fukada, Kotaro)

島根大学・生物資源科学部・助教

研究者番号：40633178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：音響測定法を用いて排水過程にある土壌試料の連続気相率をリアルタイムで測定する技術の開発を目的とした。鳥取砂丘砂の水分飽和試料を作成して排水させ、排水量と試料の質量から求めた全気相率と、音響法による連続気相率を比較した。音響測定法の時間分解能は5回1セットを約100秒かけて行う程度である。気相率の変化速度は、排水初期の数分間で0.06～6%/100秒となった。したがって音響測定法は、排水初期の数十秒を除き、本実験で設定した気相率の時間変化に十分対応できる。測定精度は±1%程度であり、これは平衡時の測定誤差に比べて大きく変わらない。

研究成果の概要(英文)：Real-time acoustic measurement technique was developed for obtaining continuous air content of soils in drainage process. Water-saturated samples using Tottori dune sand was drained. I compared total air content obtained by drainage volume and mass of sample, and continuous air content obtained by acoustic method. It costs about 100 seconds to conduct a set of acoustic tests. Air content changed at a rate of 0.06～6%/100 s in the first several minutes. Therefore, resolution time was sufficient except for first several tens of seconds. Measurement accuracy was about ±1%. This was little different from the accuracy in the equilibrium state.

研究分野：農業土木

キーワード：土壌物理学 土壌空気 音響測定

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 土壤に含まれる水分量や空気量の経時変化をリアルタイムで測定できるようになることは重要な課題である。なぜなら、そのような測定技術によって水の流れやガス交換の実態を把握し、土壤に関連する環境問題の解決に貢献できるようになるからである。しかし、現状では水分量や空気量を測定する手法は極めて限られている。

(2) 例えば、近年普及したものに、誘電率から水分量を推定する測定法がある。この方法は、地面に金属棒を挿入して繰り返し測定ができるため、現場を破壊しないという長所がある。しかし、所定の測定範囲における平均的な水分量を測定するため、土壤空気の中で大気と連続したものや水分に封入されたものを区別できない。土壤空気の移動を考える上で、大気と土壤空気が連続しているかどうかを考慮することは重要である。

(3) また、土壤試料を採取し、炉乾燥前後の質量測定から水分量を決定する方法(従来法)がある。これが最も単純で、容易であるが、試料を採取する必要があるため、現場で経時変化を知ることができない。

(4) 音響測定法は、土壤に音を当てることで、連続気相率と通気係数を同時に測定する方法である(深田ら, 2010)。ここで、連続気相率とは、大気と連続した土壤空気の体積割合として定義される。この方法は土壤を破壊しないため、経時変化を知るのに利用できる。また、土壤空気の振動を利用する方法であるため、大気と連続した土壤空気を測定の対象とする。時間分解能と水分が移動している時の測定精度については、明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

(1) 音響測定法を用いて、排水過程にある土壤試料の連続気相率をリアルタイムで測定する技術を開発する。水分移動している試料に対して音響測定法を適用し、音響測定法の時間分解能が気相率の変化速度に対応できるかという点と、平衡時の測定に比べて測定精度が異なるかどうかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 試料として、鳥取砂丘砂を用いた。鳥取砂丘砂は、粒径0.1~0.4 mmに全質量の90%が存在する砂である(Fig.1)。これを、内径5 cm、高さ2.5 cm、容積50 cm<sup>3</sup>のステンレス製円筒容器に、湛水した状態で流し込みながら充填し、水分飽和状態の試料を作成した。試料の乾燥密度は1.68~1.70 g cm<sup>-3</sup>となった。そして、試料の下部に排水を制御するためのメンブレンフィルターとチューブを取り付けた。

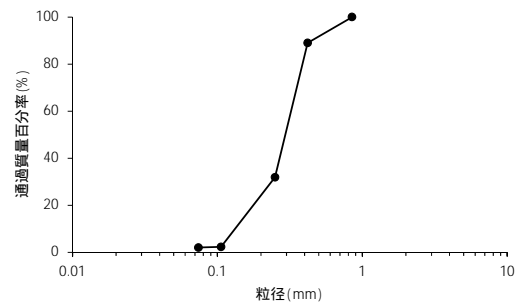


Fig.1 鳥取砂丘砂の粒度

(2) 排水チューブの先端を試料の中心から31.5 cm下げた位置に設定し、排水を開始した。排水をフラスコに受け、フラスコをロガー付きの電子天秤に載せて、排水量を1秒間隔で記録した。また、1 gの排水(2%の気相率増加)を間隔の目安として、音響測定を行った。1回5秒の測定を5回繰り返し、平均したものを1セットとした。1セット全体に必要な時間は約100秒である。したがって100秒を音響測定法の時間分解能とする。排水が終わるまで2~5セットの測定を行った。

(3) 31.5 cmの条件で平衡に達した後、排水チューブの先端を今度は36.5 cmまで下げ、再び排水させた。そして、同様に排水量の記録と音響測定を行った。同じ操作を41.5 cm、46.5 cmの条件で繰り返した。46.5 cmの測定後、試料を炉乾燥させ、質量を測定した。以上の実験を5つの試料に対して行った。試料の炉乾燥質量と排水量から、従来法により各時刻における試料の全気相率を求めた。また、連続気相率については、深田ら(2010)の音響測定法によった。

### 4. 研究成果

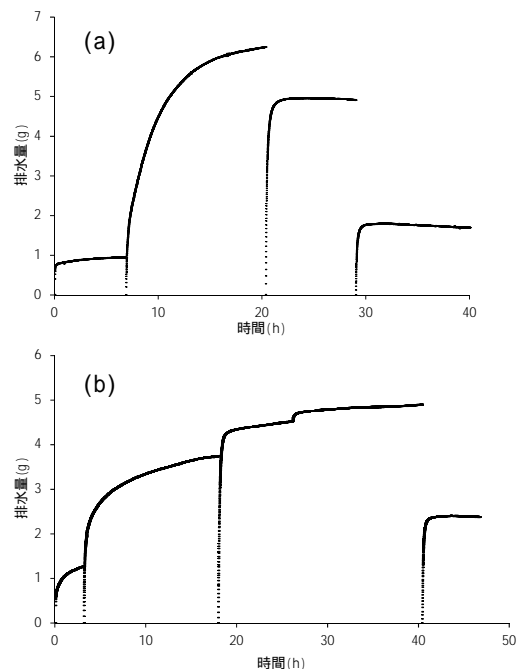


Fig.2 排水量の時間変化

(1) Fig.2(a)(b)は、排水量の時間変化の測定例である。各図中の4つの曲線が、それぞれ、31.5 cm, 36.5 cm, 41.5 cm, 46.5 cmの各段階に対応している。図から分かるように、排水速度は初期に最も大きく、約  $0.03 \text{ g s}^{-1}$  であった。その後、数分間で急激に減少して  $0.0003 \text{ g s}^{-1}$  程度となり、緩やかに減少しながら、排水を続けた。排水量は1~6 gであり、排水終了までの時間は最短で3時間であった。10時間を超えても排水を続けた場合もあった。

(2) 排水量と排水時間の関係は非線形性が強い。また、Fig.2(a)(b)の違いから分かるように、試料による違いも存在する。今回の実験条件では、各段階において、排水時間全体の初期0.1~10%の間に排水の50%が完了し、排水時間全体の初期3~50%の間に排水の90%が完了することが分かった。このことから、音響測定法の時間分解能が問題となるのは、排水の初期である。排水速度  $0.0003 \sim 0.03 \text{ g s}^{-1}$  は、1セットの音響測定(100秒)に対して、0.06~6%の気相率の変化に相当する。したがって、最初の数十秒を除けば、音響測定法は気相率の変化速度に十分対応できる。

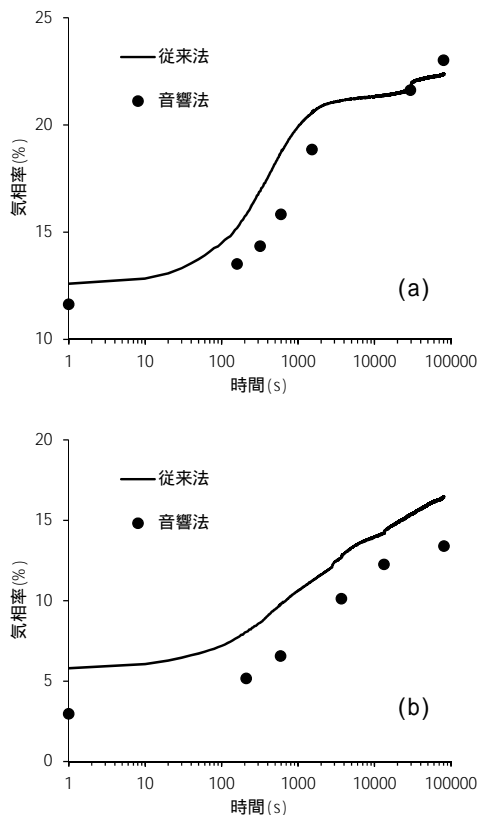


Fig.3 気相率の時間変化

(3) Fig.3(a)は41.5 cm, (b)は36.5 cmの条件における実験結果の例である。排水量と試料の炉乾燥質量から求めた従来法の気相率(全気相率)を線で示した。●は音響測定法による連続気相率である。排水開始時と排

水終了時に1つずつ、その間に4~5つの測定点がある。(a)と(b)のどちらを見ても、音響法の結果の方が従来法よりも気相率の値で2~3%小さい。この原因は、音響測定法の計算方法にあると考えられる。しかし、水分移動のない状態での測定精度(深田ら, 2010)と変わらないことから、音響測定法は、少なくとも本実験で設定した水分移動速度の範囲内で、連続気相率を平衡時と同精度で測定できることが明らかとなった。

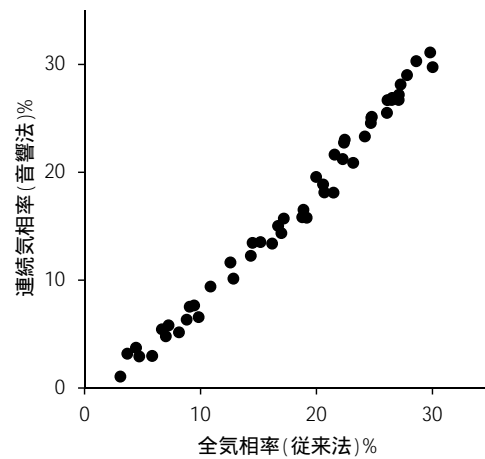


Fig.4 従来法と音響法の比較

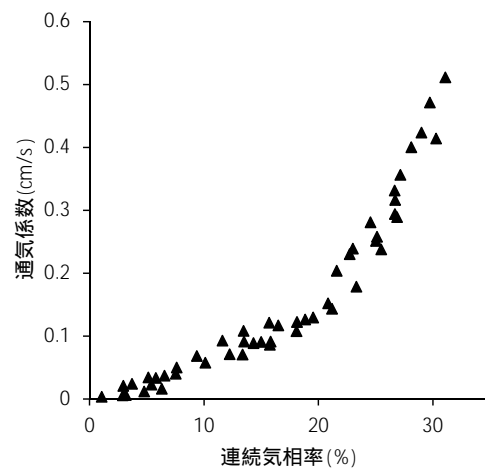


Fig.5 連続気相率と通気係数の関係

(4) Fig.4は、従来法による全気相率と音響法による連続気相率の関係を示したものである。測定点は、排水開始から終了までのすべての点を含む。Fig.4を見ると、連続気相率は全気相率とよく一致している。このことから、排水過程では、試料から排水された水分と同体積の空気が、大気と連続した状態で試料内へ浸入したことが分かる。また、測定精度はFig.3(a)(b)で推定したように2~3%であり、気相率の変化速度にはよらないと考えられる。

(5) Fig.4に対して線形回帰を行った結果、

傾きは  $1.10 \pm 0.02$ , 切片は  $-2.9 \pm 0.4\%$  となった。ここで $\pm$ に続く数値は標準誤差である。切片の値は、音響法の過小評価の大きさが  $-3\%$  程度であることを示している。また、従来法に誤差がなく、校正によって  $-3\%$  の過小評価を取り除けば、標準誤差  $0.4\%$  の  $2\sim 3$  倍を目安として、 $0\sim 35\%$  の気相率範囲で、およそ  $\pm 1\%$  の精度で連続気相率を測定できることが分かった。

(6) Fig.5 は音響法による連続気相率と通気係数の関係である。連続気相率が  $0\sim 35\%$  まで増加するにしたがい、通気係数は  $0\sim 0.5 \text{ cm s}^{-1}$  まで増加した。この結果は、排水の増加とともに通気性が増加したことを示している。この結果は、音響測定法が通気係数のリアルタイム測定としても使えることを示している。

(7) 以上をまとめると、本研究では、音響測定法を用いて排水過程にある土壤試料の連続気相率をリアルタイムで測定する技術の開発を目的とした。鳥取砂丘砂の充填試料を作成して排水させ、排水量と試料の質量から求めた全気相率と、音響法による連続気相率を比較した。音響測定法の時間分解能は 5 回 1 セットを約 100 秒かけて行う程度である。この分解能は、排水初期の数十秒を除き、本実験で設定した気相率の時間変化に十分対応できる。測定精度は  $\pm 1\%$  程度であり、これは平衡時の測定誤差に比べて大きく違わない。

(8) 今後の課題は、音響測定法を現場土壤を含め、他の土壤に対して適用することである。この技術により、土壤表層付近の気相の物理性をリアルタイムで非破壊的に把握できるようになる。そして、大気と土壤のガス交換などを土壤物理の視点から説明できるようになることで、環境問題の解決に貢献できると考える。

#### <引用文献>

深田 耕太郎, 三野 徹, 中村公人, 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, 土壤の物理性, 115 号, 3-13

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計 1 件)

深田 耕太郎, 木原 康孝, 音響測定法に基づいた砂質土壤の連続気相率と通気係数の関係, 土壤の物理性, 査読有, 133 号, 2016, 印刷中

##### [学会発表](計 3 件)

深田 耕太郎, 砂質土壤の通気性に関するヒステリシスの実験と確率解釈, 土壤物理学

会大会, 2014 年 10 月 25 日 (宮城) 宮城大学

釜瀬 諒太, 石倉 尚樹, 葛城 隆治, 深田 耕太郎, 音波を用いた真砂土と黒ボク土の気相率の測定, 土壤物理学大会, 2015 年 10 月 24 日 (佐賀) 佐賀大学

深田 耕太郎, 砂質土壤における気相率の鉛直分布と通気性のヒステリシス, 土壤物理学大会, 2015 年 10 月 24 日 (佐賀) 佐賀大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

深田 耕太郎 (FUKADA, Kotaro)

島根大学・生物資源科学部・助教

研究者番号: 40633178