



土壤中における音波の伝播距離の推定と共鳴法の測定範囲について

深田耕太郎¹・難波将希¹・木原康孝¹

Estimation of the propagation distance of a sound wave in soil and the measurement range of an acoustic resonance method

Kotaro FUKADA¹, Masaki NAMBA¹ and Yasutaka KIHARA¹

Abstract: An acoustic technique for evaluating soil physical properties, such as the air content and air permeability, uses sound waves reflected from the soil surface or penetrating sound waves in soil. It is difficult to set the measurement range in the soil depth because the propagation distance of a sound wave in soil depends on the soil physical properties to be measured. In this study, we compared the results of an acoustic resonance method for a sample whose bottom was open to the atmosphere with those for a sample whose bottom was closed. The propagation distance of the sound wave in soil was estimated from the length of the sample whose bottom condition had no effect on the results of the acoustic resonance method. We set the sample length smaller than the estimated propagation distance of a sound wave. The precision of the acoustic resonance method was then examined. We found that the propagation distance of a 5 – 100 Hz sound wave in a decomposed granite soil sample was 3 – 7.5 cm. The propagation distance was a maximum at volumetric air content of 20 %. Setting the sample depth to 1.3 cm and closing the sample bottom, the volumetric air content was determined with ± 0.9 % precision in a measurement range of 10 % – 36 % whereas air permeability was determined with precision of ± 0.05 cm s⁻¹ in a measurement range of 0.05–0.65 cm s⁻¹.

Key Words : acoustic resonance method, volumetric air content, air permeability, attenuation distance

1. はじめに

音響測定法と呼ばれる測定技術がある。大気から土壤に音を当て、土壤表面で反射した音波や、土壤中へ侵入した音波を測定する。例えば、測定によって、ある地点における周波数と音波強度の関係をj得る。音響理論から計算される周波数と音波強度のj関係が測定結果と一致するように、土壤表面の音響インピーダンスや土壤中を伝播する音の波数などが調整される。音響インピーダンス

や波数などは、土壤の音響モデルによって、気相率、通気性（通気抵抗や通気係数として表される量）、屈曲度などを含む形で表される。よって最終的に、気相率や通気係数などの推定値が得られる（Sabatier et al., 1990; 1996）。

音響測定法には、重量法（質量測定と土粒子密度による三相分布の決定法）や通気試験（流量と空気圧の測定による通気係数の決定法）に比べて、非破壊的で測定時間が短いという特徴がある。また、以下で詳しく述べるように、土壤表面からの反射波を利用する方法（レベル差法）と、土壤中へ侵入した音波を利用する方法（プローブマイク法）があるが、どちらも、大気中の音波を土壤に当てる点が共通している。大気中の音波によって引き起こされる土壤中の音波は、固相が振動せず、気相が振動すると考えることで上手く説明できることが分かっている（Attenborough, 1987）。一方で、固相と気相が両方とも振動するという考えから出発した場合は、多孔質体中には2種類の縦波と1種類の横波が存在できる事が理論的に示されている（Albert, 1993）。この考え方の場合、土壤の音響測定法で扱うのは、3つの波の中の1つである、主に土壤空気を伝わる縦波である。

過去に、レベル差法（Hess et al., 1990; Sabatier et al., 1990）とプローブマイク法（Attenborough et al., 1986; Sabatier et al., 1996）という2種類の測定法が研究された。レベル差法では、地上10 cm程度のところにスピーカーとマイクを設けて、所定の周波数帯の音を流し、マイクへの直達音と反射音の合成音を測定する。周波数に対する音圧レベル（実効音圧と基準音圧の比の常用対数の20倍）の変化を土壤の音響モデルから導かれる予測式と比較し、気相率、通気性、屈曲度を推定する。Sabatier et al. (1990) は、屋外に設けたレス土壤、砂、粘土の3区画に対してレベル差法と重量法を比較し、気相率を約10%の精度で推定できるとした。

プローブマイク法は、長い棒の先端にマイクを取り付けたもの（プローブマイク）を土壤に挿入して、大気から土壤中へ侵入した音波を、2深度で測定する。2深度の測定結果を比較することで、音の減衰量と位相の変化が分かる。土壤の音響モデルから導かれる予測式が実験

¹Faculty of life and environmental science, Shimane University, Nishikawatsu-cho, Matsue city, Shimane prefecture, Japan 690-8504, Corresponding Author: 深田耕太郎（島根大学生物資源科学部）
2021年3月12日受稿 2021年9月17日受理

結果と一致するように、予測式の中にある通気抵抗と屈曲度を調整する。Sabatier et al. (1996) は、砂やガラスビーズに対してプローブマイク法を用いた。プローブマイク法による通気抵抗の推定値は、Leonard (1946) の方法で求めた通気抵抗の約 1/8 になった。Leonard (1946) の通気抵抗の測定原理は Grover (1955) の通気試験の原理と同じで、流量と 2 地点の空気圧差を求め、両者の比をとるというものである。通気抵抗は通気係数の逆数に比例する量である。Sabatier et al. (1996) は、プローブマイク法による通気抵抗の推定値が小さくなった理由として、音響モデルが間隙の形状を十分考慮できていない可能性を挙げている。

著者は共鳴法という別の方法を開発した (深田ら, 2010; 深田・中村, 2011)。これは、長さ 0.5 ~ 1 m の中空円筒と土壌試料をつないだ測定システムの中で、気柱の共鳴を起こすというものである。共鳴周波数を含む周波数範囲で気柱を振動させ、周波数と音波強度の関係 (共鳴曲線) を求める。共鳴曲線は、共鳴筒の長さとも共鳴筒両端の境界条件で決まる。共鳴曲線の測定結果に対して、理論式により書いた曲線が一致するように、境界条件 (音響インピーダンス) を調整する。土壌の音響モデルでは、音響インピーダンスが気相率や通気係数などを用いて表されているので、音響インピーダンスから土壌の気相率と通気係数が求まる。こうして、音響学的に推定された気相率や通気係数が、重量法による気相率や、通気試験による通気係数と比較できるようになる。鳥取砂丘砂と相馬珪砂を用いた実験 (深田ら, 2010) では、気相率 (共鳴法) は、気相率 (重量法) 20 ~ 40 % の範囲において、 ± 1 % 程度の範囲内で気相率 (重量法) と一致した。通気係数については、およそ $0.02 \sim 2 \text{ cm s}^{-1}$ の通気係数 (通気試験) の範囲において、1/5 ~ 5 倍程度の範囲内で一致した。

音波が音響インピーダンスの変化する面で反射するという考え方から分かるように、反射波から測定された音響インピーダンスは反射面が持つ情報である。したがって、土壌の音響モデルで扱われる気相率や通気係数も音の反射面における量と考えられる。一方で、重量法による気相率は、ある体積範囲内に存在する気相の体積割合のことである。そこで、気相率 (音響) と気相率 (重量法) を比較する場合に気になるのは、気相率 (音響) が、測定した面 (土壌表面) からどれくらいの深さまで同じと考えてよいのかである。これを音響測定法の測定範囲の問題と呼ぶことにする。

重量法や通気試験の測定範囲は明確である。また、試料全体を測定範囲にできそうな試料サイズというものがある。例えば、重量法においてよく用いられるのは容積 100 cm^3 の円筒容器であり、容器全体が測定範囲である。通気試験でも高さが数 cm 程度の円筒容器を用いることが多い。試料の一端の空気圧を高めて、他端に向けて流す。流れた場合、空気圧を測定した (あるいは設定した) 2 地点間が測定範囲と考えられる。

音響測定法では、ある体積範囲にわたって何か 1 つの量を測定すると考えることが難しい。例えば、レベル差法では、大気から土壌へ音波を当て、土壌表面で反射した音波を利用する。入射音波の一部は反射せずに土壌中に侵入する。侵入した音波は、土壌中で消えるか、あるいは反射して大気中に戻る。しかし、気相率や通気係数が未知の状況で、土壌中で音が消えたのか反射したのか、反射した場合どこで反射したのかを測定結果から判断するのは難しい。もし、反射しなかったと判断できた場合、土壌中で音響インピーダンスは変化しなかったと判断したことになるので、土壌表面における気相率と通気係数が、土壌中の音が伝わる範囲内で一定だったと判断したことになる。この場合、音が伝わる範囲が測定範囲であるといえるかもしれない。あるいは、反射面より先に進んだ音波は測定結果に影響していないので、深さ方向の測定範囲はないともいえる。

音波の減衰や音が伝わる距離 (伝播距離) についての知見が、プローブマイク法により得られている。Attenborough et al. (1986) は、20 cm 程度の砂の厚みがあると音が消えてしまうと述べている。Sabatier et al. (1990) は、土壌の水分量が増えると音波の減衰が増すことを示した。Sabatier et al. (1996) は、レス土壌では 100 Hz の音で 7.5 dB cm^{-1} の減衰があり、プローブマイク法で調べられるのは 2 cm 程度とした。7.5 dB の減衰は、音波強度が $10^{-0.75} = 1/5.6$ になったことを意味する。Hickey and Sabatier (1997) はサンドブラスト用の砂 (粒径は不明) を用いた実験で、試料中に侵入した音波が 10 ~ 15 cm で消えることを示した。

測定範囲の不明確さを回避するには、試料の高さを音波の伝播距離に比べて小さく設定すればよいと考えられる。この場合、音波が試料全体を伝わり底面で反射したという確実な条件のもとで、測定した音響インピーダンスから気相率と通気係数を推定することになる。用意した試料全体が測定範囲になると考えてよいだろう。また、Sabatier et al. (1990) の報告を参考にして、伝播距離には気相率依存性があると考えた場合、試料の高さを小さめにしておけば、同一試料で、より大きな伝播距離にも対応できる。前記の既往研究から推定するに、伝播距離は、数 cm ~ 15 cm 程度の範囲で気相率とともに変化すると考えられるが、伝播距離と気相率の関係は明らかではない。

試料が伝播距離よりも短い場合、試料の底面 (音波を当てる面と逆側) が閉じている場合と大気に開放している場合では、共鳴法の結果が異なると予想される。しかし、試料の高さが伝播距離を超えて大きくなると、底面の条件は共鳴法の結果に影響しなくなる。つまり、試料を短い状態から徐々に長くしていき、2 種類の境界条件の違いにも関わらず共鳴法の結果が同じになる試料長さが伝播距離になると考えた。本研究では、まき土を用いて伝播距離を求め、気相率との関係を明らかにする。そして、試料の高さを伝播距離よりも小さく設定した場合

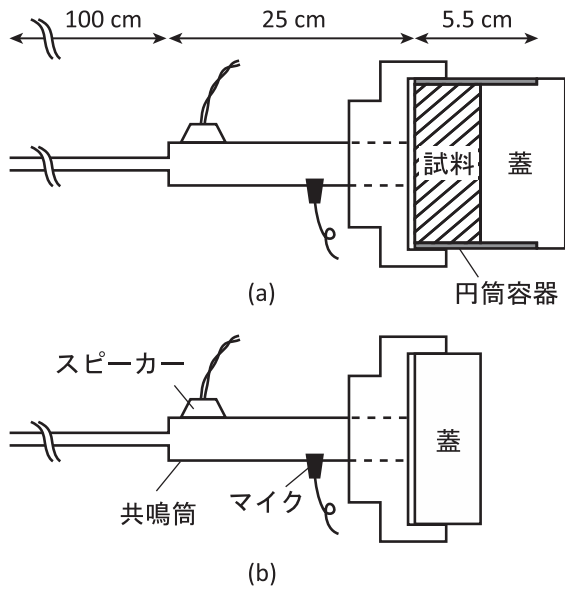


Fig. 1 実験装置 a. 試料の測定, b. 基準の測定.
Acoustic measurement system: a. sample measurement, b. reference measurement.

における、共鳴法による気相率と通気係数の推定値を、重量法の気相率と通気試験による通気係数と比較し、共鳴法の測定精度を明らかにする。

2. 試料と方法

2.1 伝播距離の推定のための試料と共鳴法

充填土壌にまさ土を使用した。まさ土は粘土（ ~ 0.005 mm）8%，シルト（ $0.005 \sim 0.075$ mm）10%程度を含む砂質土壌である。これに水分を加えて、含水比5, 7, 9, 11, 13, 15%に調整した。

はじめに、内径8.5 cm、外径8.9 cm、長さ5.5 cmのステンレス製円筒容器に、数回に分けて高さ3.0 cmだけ充填した。長さ4.5 cm、直径8.9 cmの塩ビの丸棒を用意し、長さ2.5 cm分だけ直径を数mm小さくして、円筒容器内にちょうど納まるようにした。この部品を使って、円筒容器の中でまさ土が充填されていない2.5 cm分を塩ビで充填するとともに、円筒容器の蓋となるようにした（Fig. 1a）。この「蓋あり」の状態の試料に対して、次に述べるように、共鳴法による測定を行った。

本研究では、内径2.5 cm、長さ25 cmの塩ビパイプと内径1.6 cm、長さ100 cmの塩ビパイプをつないだものを共鳴筒として用いた（Fig. 1）。共鳴筒の一端を塩ビ板で閉じて、もう片方の端を大気に開放した状態で（Fig. 1b）、共鳴筒の側面に設置したスピーカーから、共鳴筒内へ5～100 Hzのスイープ波を約5秒間発信した。Fig. 1bの状態を基準と呼ぶことにする。スピーカーの駆動と同時に、共鳴筒の側面に設置したマイクを用いて共鳴筒内の音を録音した。録音データから周波数と音波強度の関係性を求めた。そして、共鳴周波数と共鳴幅を求めた。

共鳴周波数とは、音波強度が最大となる周波数である。また、共鳴幅は音波強度が最大値の半分になる2つの周波数のうち小さい方（左半値周波数）と共鳴周波数の差である。本研究期間を通して、基準の共鳴周波数は51.6～52.0 Hz、共鳴幅は1.9～2.1 Hzであった。基準を測定した後、共鳴筒を試料とつないで（Fig. 1a）、再度音響測定を行った。共鳴筒と試料は径が異なるため、取り外しができ、接続時は気密性を保てるように、Oリングを用いたコネクタを使用した。試料の上端は共鳴筒内の空気と連続している。試料の下端は（蓋ありの場合）塩ビの丸棒により閉じられている。「蓋あり」の状態の試料に対して音響測定した後、塩ビの丸棒を取り除いた「蓋なし」の状態に、再度音響測定を行った。共鳴筒を横にした状態で測定を行ったが、試料が形を保っていたため、蓋を外しても土が容器からこぼれることはなかった。

次に、3.0 cmだけ充填してある試料にまさ土を加えて容器いっぱい（5.5 cm）になるように充填した。そして塩ビの丸棒で蓋をした。蓋ありの状態に音響測定を行い、その後、蓋なしの状態に音響測定を行った。最後に、5.5 cmだけ充填してある試料に長さ2.0 cmの円筒容器をつないで長さ7.5 cmとし、そこにまさ土を充填した。前述と同様に、蓋ありの状態に音響測定を行い、その後、蓋なしの状態に音響測定を行った。測定後、試料の一部を使って含水比を求めた。充填時の全体の質量と含水比より、乾燥密度と三相分布を求めた。計算に必要な土粒子密度の値は、4回の測定結果より、 $2.636 \pm 0.014 \text{ g cm}^{-3}$ （平均値 ± 標準誤差）を用いた。以上の実験を、含水比5%と7%の試料に対して、長さ3.0 cmから始めて5.5 cmに延長したものを2回、9, 11, 13, 15%に対して、長さ3.0 cmから始めて5.5 cmに延長したものを2回、長さ5.5 cmから始めて7.5 cmに延長したものを2回繰り返した（Table 1 上段）。これらの試料で得た共鳴周波数と共鳴幅の値に、蓋の有無、および試料の高さが与える影響を調べた。蓋の有無が現れなくなる試料高さを求め、伝播距離の大まかな推定値とした。

2.2 気相率と通気係数の測定のための試料と共鳴法

次に、2.1節の試料とは別に、まさ土を3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14, 14.5, 15, 17.5%の含水比に調整した。そして、内径8.5 cm、長さ2 cmのステンレス製円筒容器に、伝播距離の推定に基づき（後述の3.1

Table 1 試料諸元.
Sample data.

含水比	内径	長さ	底面の条件
5, 7, 9, 11, 13, 15 %	8.5 cm	3 → 5.5 cm, 5.5 → 7.5 cm	蓋あり, 蓋なし
3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14, 14.5, 15, 17.5 %	8.5 cm	1.3 cm	蓋あり

節参照), 高さ 1.3 cm 分だけまき土を充填した (Table 1 下段). 各含水比に対して 2~3 個, 全部で 48 個の試料を作製した. これらの試料に対して, 共鳴法による測定を行った. 測定で得た共鳴曲線と理論式の差の二乗和が最小になるように, 理論式の中の音響インピーダンス Z_s を調整した. 共鳴曲線を与える音圧分布 $p(x,t)$ の理論式は以下のようにになっている (深田・中村, 2011).

$$p(x,t) = D \frac{iZ_s \cos \beta x - Z_a \sin \beta x}{iZ_s \cos \beta L - Z_a \sin \beta L} e^{-i\omega t} \quad (1)$$

ここで, D は共鳴曲線の大きさを決める定数 (Pa), Z_s は共鳴筒と試料の境界条件として与えた音響インピーダンス (Pa s m^{-1}), β は伝播定数 (m^{-1}), L は共鳴筒の有効長さ (m), Z_a は大気音響インピーダンス (413 Pa s m^{-1}), $i = \sqrt{-1}$, ω は角周波数 (rad s^{-1}), x は音圧を測定した点の試料表面からの距離 (0.04 m), t は時間 (s) である. 共鳴曲線は, $p(x,t)$ の二乗の絶対値と周波数の関係である. 式中の定数は基準の共鳴曲線により決定した. 例えば, $D = 0.006 \text{ Pa}$, β の虚部 $= 0.043 \text{ m}^{-1}$, $L = 1.76 \text{ m}$ である. β の実部は波数と呼ばれる量で, 実験に用いた周波数によって与えられる.

音波が試料を通過し, 試料底面において固定端の条件で反射するとした場合, 試料表面の音響インピーダンス Z_s (Pa s m^{-1}) は以下の式で与えられる (深田・中村, 2011).

$$Z_s = \frac{\rho_w g l}{3 \kappa_a} + i \frac{p_0}{\omega \Omega l} \quad (2)$$

ここで, ρ_w は水の密度 (1000 kg m^{-3}), g は重力加速度 (9.8 m s^{-2}), l は試料長さ (0.013 m), κ_a は通気係数 (m s^{-1}), p_0 は大気圧 (101300 Pa), ω は角周波数 (rad s^{-1}), Ω は気相率 ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), $i = \sqrt{-1}$ である. ここで気相率は, 試料の断面積に対する音波が通過する面積の比として定義される.

式 (2) を変形することで, 気相率 (共鳴法) と通気係数 (共鳴法) の計算式を以下のようにした.

$$\text{気相率 (共鳴法)} = \frac{p_0}{\omega X l} \times 100 \quad \% \quad (3)$$

$$\text{通気係数 (共鳴法)} = \frac{\rho_w g l}{3R} \times 100 \quad \text{cm s}^{-1} \quad (4)$$

ここで R は音響インピーダンスの実部 (Pa s m^{-1}), X は音響インピーダンスの虚部 (Pa s m^{-1}) である. ω (角周波数) の値は, 測定した共鳴曲線から共鳴周波数を求め, 2π 倍した. 気相率を % で表示するため 100 をかけた. そして, 通気係数を cm s^{-1} の単位で表示するため 100 をかけた.

音響測定後の試料に対して, 0.05 ~ 0.4 kPa の圧力を加えて, 0.04 ~ 0.3 L の空気を流した. 圧力と流量を測定し, ダルシーの法則から通気係数を求めた. 最後に, 重量法により気相率を求めた.

平面波の音波強度は, 振幅の絶対値の 2 乗に比例するため, 距離 x (m) だけ進んだ音波の減衰の程度を, 土壌中の音波の波数 k_b (m^{-1}) を用いて, $e^{-2\text{Im}(k_b)x}$ のように表すことができる (Crawford, 1973). ここで $\text{Im}(k_b)$ は k_b の虚部である. 音波強度が $1/e$ ($= 0.367\dots$) に減衰するまでの距離を減衰距離 d (m) とすると, $e^{-2\text{Im}(k_b)d} = e^{-1}$, つまり $2\text{Im}(k_b)d = 1$ より, $d = [2\text{Im}(k_b)]^{-1}$. ここで, 深田・中村 (2011) より, 波数 k_b を次式により与えることにした.

$$k_b = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \Omega \rho_w g}{p_0 \kappa_a}} \quad (5)$$

最終的に, 音波の減衰距離を求める式は以下のようになった.

$$\sqrt{\frac{p_0 \kappa_a}{2\omega \Omega \rho_w g}} \times 100 \quad \text{cm} \quad (6)$$

cm の単位で表示するため 100 をかけた. ここで, 式 (6) 中の Ω と κ_a は, 音響モデルで用いられている気相率と通気係数であるが, 本研究では, 重量法と通気試験の測定値を代入した.

次に, 気相率 (重量法) を x , 気相率 (共鳴法) を y として線形回帰式を求めた. 次式により, y の回帰式からの平均二乗偏差の平方根 (標準偏差) σ_n を求めた.

$$\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 / n \quad (7)$$

ここで, δ_i は回帰式からの y のずれ (偏差), n はサンプル数 (ここでは 39) である.

上記の標準偏差を, 気相率で見た場合の, 共鳴法の精度の指標とする. 加えて, もし, 気相率 (重量法) と気相率 (共鳴法) が同じ量であり, 理想的には一致するはずだと考えられるなら, 気相率 (重量法) を真値として, 共鳴法の正確度を評価することができる. しかし本研究では, 測定原理がそもそも違うということから, 気相率 (共鳴法) と気相率 (重量法) は別の量であり, 両者には何か関係があるかもしれないとだけ考えることにする. 通気試験による通気係数と共鳴法による通気係数についても, 同様に, 回帰式と標準偏差を求め, 共鳴法の精度について考察した. また, 両者の関係について調べた.

3. 結果と考察

3.1 伝播距離

試料の乾燥密度は $1.53 \sim 1.68 \text{ g cm}^{-3}$ となった. 含水比が大きいほど乾燥密度は大きくなった. 固相率は 59 ~ 63 % となった. 体積含水率は, 含水比 5, 7, 9, 11, 13, 15 % に対して, それぞれ 8, 11, 14, 17, 21, 25 % となった. 気相率は, 33, 30, 26, 23, 18, 12 % となった. 乾燥密度が変化すると, 同じ気相率でも通気係数が変化す

る可能性がある。通気係数が小さくなった場合は、減衰距離が小さくなる。したがって、もし高水分側でも乾燥密度を 1.53 g cm^{-3} で調べていたら、本研究で得た結果より減衰距離が大きくなった可能性がある。

Fig. 2 (a) に、含水比 15%、長さ 3 cm の試料を用いた場合の共鳴曲線の測定例を示す。縦軸の音波強度は絶対値が不明なため、基準の最大値を 1 として示した。基準の共鳴周波数は 51.8 Hz、左半値周波数は 49.7 Hz、共鳴幅は $51.8 - 49.7 = 2.1 \text{ Hz}$ となった。

蓋ありの試料の共鳴曲線は、全体的に基準より小さく、低い周波数側に移動している。共鳴周波数は 49.4 Hz、左半値周波数は 46.8 Hz となった。したがって共鳴幅は、 $49.4 - 46.8 = 2.6 \text{ Hz}$ である。基準からの変化量で考えると、共鳴周波数が $49.4 - 51.8 = -2.4 \text{ Hz}$ 、共鳴幅が $2.6 - 2.1 = 0.5 \text{ Hz}$ となる。これを、虚数単位 i を用いて、 $-2.4 + 0.5i \text{ Hz}$ と書く。ただし、単位 (Hz) は実部と虚部それぞれに付いている。共鳴周波数が小さくなったのは、共鳴筒が土壌空気のみで長くなったためである。また、共鳴幅が大きくなったのは、土壌が音のエネルギーを吸収したためである。

蓋なしの場合、共鳴周波数は 51.6 Hz、共鳴幅は 4.5 Hz となった。基準からの変化量は $-0.2 + 2.4i \text{ Hz}$ である。蓋ありの場合に比べて共鳴周波数の変化が小さい。これ

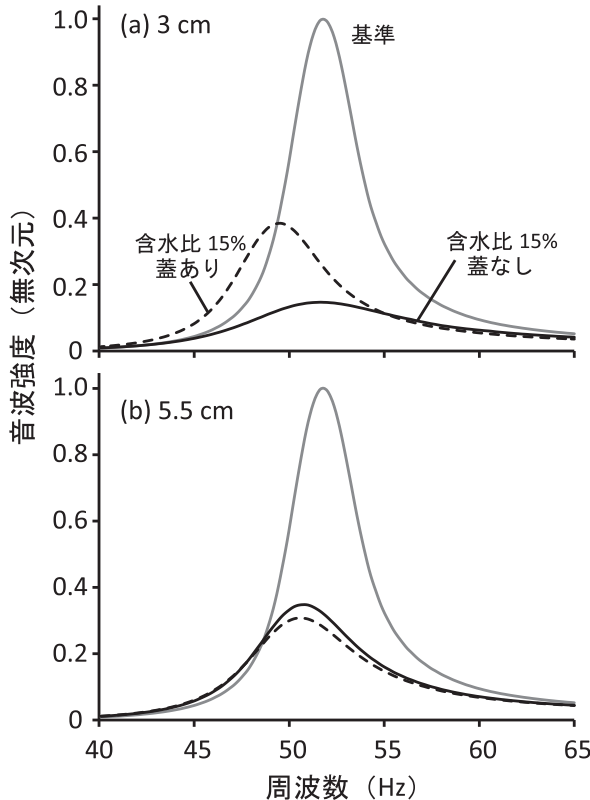


Fig. 2 共鳴曲線の測定例 (含水比 15%) a. 長さ 3 cm, b. 長さ 5.5 cm.

Measurement example of the resonance curve (15% water content): a. sample having a length of 3 cm, b. sample having a length of 5.5 cm.

は、蓋がないと試料底面で空気が振動できるためである。対して、共鳴幅の変化が大きいのは、試料底面を通して音のエネルギーが大気中へ逃げたためと考えられる。

次に、長さ 5.5 cm の結果を見る (Fig. 2b)。蓋ありの場合と蓋なしの結果は似ている。どちらも基準に比べて小さく、少し低い周波数側に移動している。蓋ありの結果は $-1.3 + 1.1i \text{ Hz}$ 、蓋なしの結果は $-1.1 + 0.9i \text{ Hz}$ である。蓋ありと蓋なしの結果が似ているのは、試料が長くなったことで、試料内で音波が減衰し、底面の条件が共鳴に影響しなくなったためと考えられる。

すべての結果をまとめたものが Fig. 3 である。Fig. 3 は、共鳴周波数の変化量を実部、共鳴幅の変化量を虚部として、実験結果を複素平面上に表示したのになっている。図中の斜線は、共鳴周波数の変化量と共鳴幅の変化量が等しい線である。全体のおおまかな傾向を見てみると、蓋ありの測定結果は、図中の斜線より左側、蓋なしの測定結果は斜線の右側に分布している。3 cm の場合、測定結果は、共鳴周波数の変化量が $-6 \sim 2 \text{ Hz}$ 、共鳴幅の変化量が $0 \sim 7 \text{ Hz}$ の範囲に分布している (Fig. 3a)。5.5 cm、7.5 cm と試料が長くなると、分布の広がりが狭くなって、斜線付近にまとまった (Fig. 3b, c)。試料が長くなることで、蓋ありと蓋なしの違いが小さくなったことがわかる。この時、共鳴筒と試料の境界条件は、試料の長さや底面の条件とは関係ない量で表されるはずである。このような音響インピーダンスは、特性音響インピーダンスと呼ばれている。

土壌の音響モデル (Attenborough, 1983; 深田・中村, 2011) によると、特性音響インピーダンスは、通気抵抗が大きいとき、近似的に実部と虚部が等しい。さらにこの時、共鳴周波数と共鳴幅の変化量が等しくなるということも理論的に示されている (Pierce, 1981; 深田ら, 2010)。Fig. 2 の測定例で見ると、試料長さが 3 cm のとき、 $-2.4 + 0.5i$ (蓋あり) と $-0.2 + 2.4i$ (蓋なし) であったものが、5.5 cm になると、 $-1.3 + 1.1i$ (蓋あり) と $-1.1 + 0.9i$ (蓋なし) となり、試料が長くなったことで実部と虚部の差が小さくなっているのが分かる。この結果を音響理論の観点から見てみると、3 cm は底面の条件が共鳴に明確に影響していたが、5.5 cm になると、底面の条件が共鳴に影響しなくなり、共鳴曲線の形状を、特性音響インピーダンスで説明できるようになったと解釈できる。

次に、含水比 (気相率) による傾向の違いに注目する。共鳴周波数の変化量と共鳴幅の変化量が、蓋の有無により異なるかどうか、試料が長くなるとどうなるかを、Fig. 3 より読み取る。繰り返しによる実験結果のばらつきは、ほとんどの場合 1 Hz より小さい。一部、2 Hz 程度のものである。Fig. 3 上で含水比ごとに結果を見て、蓋の有無による結果の違いが、繰り返しによるばらつきに比べて大きい場合は、蓋の影響があると判断した。

例えば含水比 5% (気相率 33%) の場合、蓋ありと蓋なしの結果はどちらも $-2.5 + 1.5i$ 付近にあり、蓋の影

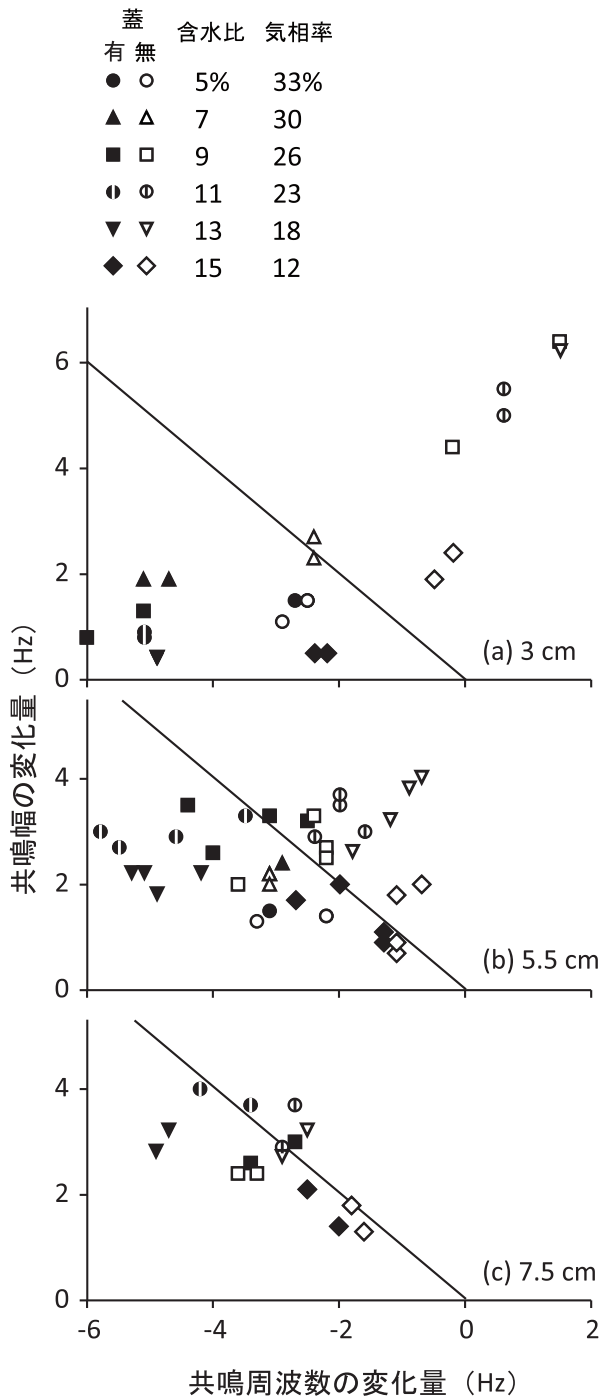


Fig. 3 共鳴周波数と共鳴幅の関係。
Relationship between the resonant frequency and resonance width.

響は認められない。また、長さ 3 cm と 5.5 cm の結果は似ている。したがって、音の伝播距離は 3 cm より小さかったと推定できる。含水比 7% (気相率 30%), 9% (26%), 15% (12%) の場合は、3 cm のとき、蓋の影響があるが、5.5 cm になると蓋の影響が認められないか、小さい。したがって、音の伝播距離は 3 cm ~ 5.5 cm 程度と考えられる。含水比 11% (気相率 23%) の場合は、5.5 cm でもまだ蓋の影響があるが、7.5 cm になると認められない。したがって、音の伝播距離は 5.5 cm から 7.5

cm の間にあると考えられる。含水比 13% (気相率 18%) の場合は、7.5 cm でもまだ蓋の影響があるように見える。したがって、音の伝播距離は 7.5 cm 以上の可能性がある。以上の結果は大まかではあるが、音波の伝播距離は気相率 10 ~ 30% でおおよそ 3 ~ 7.5 cm であり、含水比 11 ~ 13% (気相率 18 ~ 23%) あたりで最大となったようである。共鳴筒の内径を変えずに円筒容器の内径を変えて同じ実験を行った場合、円筒容器の内径が大きくなるほど共鳴曲線の基準からの変化量は大きくなる。これは内径が大きくなった分、同じ伝播距離に対して土壌空気の体積が増えるためである。一方で、伝播距離は音がどれだけ土壌中に侵入するかの指標であるから、円筒容器の内径には関係がない。よって共鳴筒内の音を試料表面に伝えられる限り、円筒容器の内径は伝播距離の推定結果に影響しないと考えられる。ただし、共鳴筒に比べて試料の内径が大きくなりすぎると、共鳴筒から試料表面への音の伝播が阻害され、伝播距離の推定に影響が出るかもしれない。

2.2 節では、土壌中で音波強度が $1/e$ まで減衰する距離 (減衰距離) を他のパラメータから推定するために式 (6) を導入した。式 (6) から推察できる気相率と減衰距離の関係は、上記で得た気相率と伝播距離の関係にも当てはまるかもしれない。式 (6) によると、減衰距離は κ_a/Ω (通気係数 / 気相率) の平方根に比例している。通気係数は透水係数と同じように、単位圧力勾配におけるフラックスで定義されているから、見かけの流速であり、通気係数を気相率で除した量が、実際の流速に近いと考えられる。音響理論の中で言い換えると、通気係数 / 気相率という量は、土壌中における空気の振動速度の日安である。よって、式 (6) によれば、気相率の増加に対して減衰距離が増加するためには、振動速度が増加する必要がある。それには、通気係数が気相率の 1 乗より大きな指数で増加しなければならない。乾燥側で気相率の増加に対して伝播距離が小さくなったのは、気相率に対する通気係数の変化率が関係していると考えられる。

以上の実験結果より、試料が長くなるほど、試料底面の条件が共鳴に及ぼす影響が小さくなることを確認できた。そこで、共鳴法を用いる場合、2通りの境界条件の使い方が考えられる。1つ目は、試料を伝播距離より十分短くして、共鳴曲線に試料底面の影響が明確に表れるようにする。十分と書いたのは、試料の長さが伝播距離程度になると、試料底面の影響が小さくなることで、表面音響インピーダンスの測定誤差が大きくなると考えられるためである。例えば、試料が短い方 (Fig. 2a) が長い方 (Fig. 2b) よりも基準と試料の共鳴曲線の違いが大きく、試料底面の影響が明確に表れていることが分かる。もう1つは、試料を伝播距離より長くして、試料底面の条件が共鳴に影響しないようにする。試料内に侵入した音波は消えると想定することになる。この方法を採用すると、1章でも述べたように、音波はどの範囲を測定しているのかという問題に明確に答えられない。仮に、伝播

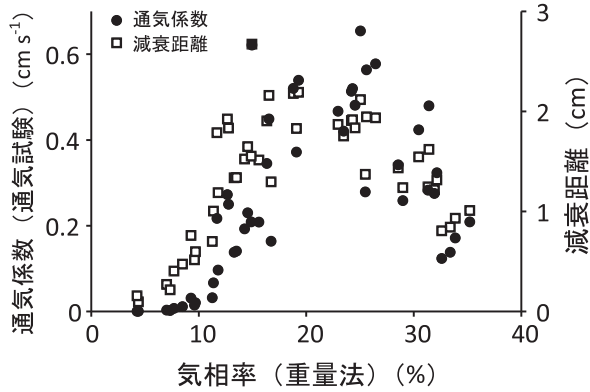


Fig. 4 気相率 (重量法) と減衰距離の関係。
Relationship between the volumetric air content obtained using the gravimetric method and attenuation distance.

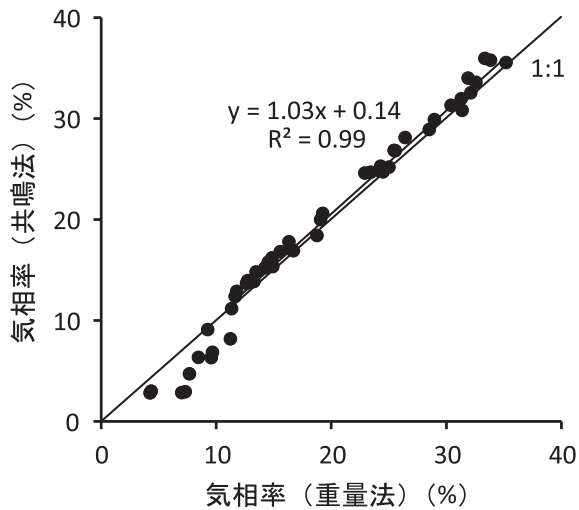


Fig. 5 気相率 (重量法) と気相率 (共鳴法) の比較。
Comparison of the volumetric air content obtained using the gravimetric method with that obtained using the acoustic resonance method.

距離が測定範囲であると考えたとしても、それが試料の一部になることや、伝播距離が気相率に依存して増減することにより、音響測定範囲を重量法および通気試験の測定範囲と一致させることが難しくなる。本研究では、音響測定範囲を重量法と通気試験の測定範囲と一致させて、両者を比較することを目的としているので、1つ目の方法を採用する。

本研究では、伝播距離の推定結果 (3 ~ 7.5 cm) より、試料高さを 1.3 cm とすることにした。できるだけ小さな気相率に対して、試料底面からの反射波が弱まらないよう、3 cm の半分程度を目安と考えた。短い試料の作成は、おそらく 5 mm 程度まで可能である。ただし、試料の断面積をそのままにして長さだけ短くすると、試料全体の体積が小さくなることで、系が基準状態 (Fig. 1b) に近くなり、音響インピーダンスの測定精度が悪くなる。

以上より、1.3 cm とした。以下では、高さ 1.3 cm の試料の結果について見ていく。

Fig. 4 に、重量法による気相率と通気試験による通気係数の関係、および、これらの値を式 (6) の Ω と κ_a の代わりに用いることで得た減衰距離を示した。通気係数は、0.0002 ~ 0.65 cm s^{-1} となった。また、通気係数は気相率の増加とともに増加し、25% あたりで最大となった。30% 付近で若干の減少傾向がみられる。ただし、全体的にはばらつきが大きく、15 ~ 30% にかけて 0.2 ~ 0.6 cm s^{-1} の値を示した。

減衰距離は 0 ~ 2 cm となった。また、減衰距離は、気相率 20% (含水比 13%) あたりで最大を示している。この傾向は、音響測定の結果から推定した伝播距離と気相率の関係と一致している。伝播距離は気相率 12 ~ 33% の範囲で 3 ~ 7.5 cm と推定した。同じ気相率範囲の減衰距離は、Fig. 4 より、およそ 1 ~ 2 cm である。これらの数字を比較すると、伝播距離は減衰距離の 3 ~ 4 倍である。減衰距離は、音波強度が $1/e$ (37%) まで減衰する距離として定義されている。したがって、音が伝播距離だけ進むと、音波強度は $1/e^4 \sim 1/e^3$ (2 ~ 5%) まで減少する計算になる。本研究では伝播距離の推定を経て試料高さを決定したが、音響試験を経ずに試料高さを決定したい場合は、例えば、気相率 10, 20, 30% における通気係数を通気試験により求めて、式 (6) により減衰距離を計算すれば、それが試料高さの目安になるといった方法が考えられる。

Fig. 4 によると、気相率 0 ~ 10% の範囲では、減衰距離が 0 ~ 0.5 cm 程度に見積もられている。伝播距離を減衰距離の 3 倍で計算すると 0 ~ 1.5 cm となり、気相率 0 ~ 10% の範囲では、伝播距離が試料高さ (1.3 cm) より小さかった可能性がある。そのため、今回の試料に対して音響測定できた気相率範囲を、およそ 10 ~ 36% とした。

3.2 共鳴法の精度

Fig. 5 は共鳴法による気相率と重量法による気相率の比較である。48 個の試料のうち、気相率 (重量法) が 10 ~ 36% のものは 39 個あった。10% 以下の残り 9 個は、共鳴法の値が重量法の値より小さい。対して、10 ~ 36% の範囲では、共鳴法の値が重量法より大きいものが多かった。39 個のデータに対する線形回帰の結果は $y = 1.03x + 0.14$, $R^2 = 0.99$ となった。また、10 ~ 36% の 39 個のデータに対する、共鳴法による値の標準偏差は 0.9% となった。過去に鳥取砂丘砂と相馬珪砂を用いた実験 (深田ら, 2010) では、気相率 10 ~ 20% で共鳴法による値の明らかな低下傾向が得られ、水や土粒子との間に気泡として存在する空気 (封入空気) が原因であると考察した。封入空気には大気中の音波が直接伝わらないことから、封入空気のみで測定されず、気相率 (共鳴法) が小さくなると思われるためである。今回の実験では、気相率 (重量法) が 4 ~ 11% の結果に対して、共鳴法による値の低下傾向が現れた。封入空気が原

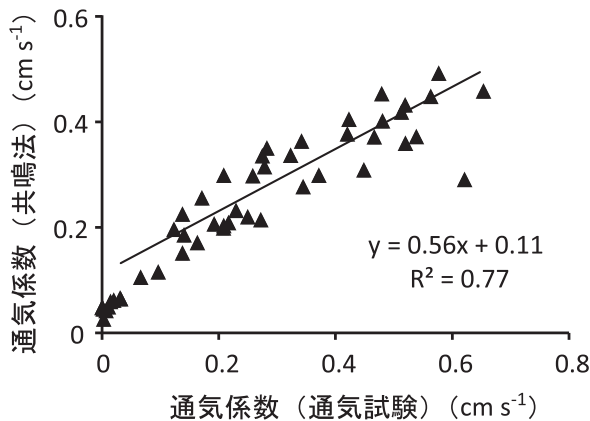


Fig. 6 通気係数（通気試験）と通気係数（共鳴法）の比較。 Comparison of the air permeability obtained using the permeability test with that obtained using the resonance method.

因の可能性がある。しかし、試料底面の影響が明確にあると想定した範囲（10～36%）の境界にあるため、明確なことは言えない。

Fig. 6 は共鳴法による通気係数と通気試験による通気係数の比較である。気相率（重量法）10%以下の9個の試料に対して、通気係数（通気試験）は $0.0002 \sim 0.03 \text{ cm s}^{-1}$ 、通気係数（共鳴法）は、 $0.02 \sim 0.06 \text{ cm s}^{-1}$ となった。そして、気相率（重量法）10～36%までの39個の試料に対して、通気係数（通気試験）は $0.03 \sim 0.65 \text{ cm s}^{-1}$ 、通気係数（共鳴法）は、 $0.06 \sim 0.49 \text{ cm s}^{-1}$ となった。共鳴法は 0.0002 cm s^{-1} といった小さな値を出していない。通気試験では、一定量の空気が流れる時間が長くなるのに対応して、より小さな通気係数を算出できる。ただし、通気試験器からの空気漏れや、試料からの水分量の蒸発などの制限がかかるため、実際には、 $10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ 程度が通気試験で求められる通気係数の下限値である。一方で、共鳴法で求められる通気係数の下限値は、基準と試料の共鳴曲線の測定精度で決まる。気相率と通気係数が小さくなると、音響インピーダンスが大きくなり、試料の共鳴曲線が基準の共鳴曲線に近づく。つまり現状では、通気係数が 0.02 cm s^{-1} より小さい試料の共鳴曲線を基準の共鳴曲線と区別できない。

気相率（重量法）10～36%の39個のデータに対して、通気係数（共鳴法）の標準偏差は 0.05 cm s^{-1} となった。測定値（ $0.03 \sim 0.65 \text{ cm s}^{-1}$ ）に対する標準偏差（ 0.05 cm s^{-1} ）の相対的な大きさが、気相率の場合（10～36%に対して0.9%）に比べて大きいようである。つまり、Fig. 6のほうがFig. 5よりも大きくばらついている。ばらつきの原因には、音響インピーダンス測定、質量測定、流量測定、圧力測定など、各試験において生じる偶然誤差がある。さらにここでは、音響測定を重量法や通気試験と比較することで生じる原因というものがあると考えられる。気相率（共鳴法）と気相率（重量法）がよく一致するという結果は、音波の通過する面積割合としての気相率（共鳴法）が、試料長さを指定することで、ある体積

範囲内に存在する空気量と一致することを示している。通気係数の場合はどうやら気相率ほどではなく、空気の振動の抵抗を通気係数の単位で読み替えたとしても、通気試験の結果を完全に表すわけではない。このような測定原理の違いや音響モデルの使い方が、通気試験と比較したときのばらつきの原因になると考えられる。

通気係数に対する線形回帰の結果は $y = 0.56x + 0.11$ 、 $R^2 = 0.77$ となった。共鳴法による通気係数の推定値は通気試験の結果と一致するのではなく、別の線形な関係を示した。1章で述べたように、Sabatier et al. (1996) は、通気試験による通気抵抗がプローブマイク法による値より約8倍大きいと報告している。通気係数は抵抗の逆数に比例するから、Sabatier et al. (1996)の報告では、プローブマイク法による通気係数の方が大きい。深田ら(2010)の結果では、 $0.02 \sim 2 \text{ cm s}^{-1}$ の通気係数（通気試験）の範囲において、通気係数（共鳴法）は通気係数（通気試験）の1/5～5倍程度であった。本研究によって、通気係数（共鳴法）と通気係数（通気試験）の関係が議論できるまでに測定精度が向上したといえる。精度が向上した理由は、試料底面の反射波が結果に明確に影響するように、所定の気相率範囲に対して試料高さを調整できたからである。さらに考察を進めて、他の音響測定法との違いを議論できるようになるには、まだ、レベル差法やプローブマイク法の測定範囲や精度に関する知見が足りない。

4. まとめ

本研究では、試料底面を大気に開放した状態と蓋で閉じた状態が共鳴法に及ぼす影響を、試料長さを変えながら調べた。そして、底面の影響が出なくなる試料長さを特定することで、音の伝播距離を推定した。充填したまき土に対する音波の伝播距離は、およそ3～7.5 cmであった。伝播距離は気相率20%あたりで最大になる傾向が得られた。試料高さを1.3 cmとし、試料の底面を閉じて共鳴法を用いた場合、気相率（共鳴法）は10～36%の範囲で気相率（重量法）と一致し、標準偏差は0.9%であった。通気係数（共鳴法）は通気係数（通気試験）と一致せず、別の線形な関係を示した。通気係数（共鳴法）の標準偏差は 0.05 cm s^{-1} となった。

伝播距離と気相率の関係は土壌によって異なると考えられる。また、用いる音の周波数によっても変わる。伝播距離に対して試料高さを短くしたい場合、重量法や通気試験の結果をもとに減衰距離を推定できれば、それが試料高さの目安になる。このとき、音波が底面で反射し、底面の条件が共鳴曲線に影響を与えることが期待できるため、試料全体を測定範囲と考えることができる。共鳴法の測定範囲が明確になり、同じ範囲を測定した重量法や通気試験の結果と比較することで、測定精度について議論できるようになる。今後、様々な土壌で共鳴法の知見を増やすことで、レベル差法やプローブマイク法と共

鳴法を、精度の観点などから比較することが可能となるだろう。また、気相率（共鳴法）と気相率（重量法）の部分的な不一致や、通気係数（共鳴法）と通気係数（通気試験）の線形関係の持つ意味を考察できるようになると考えられる。

第1章で紹介したレベル差法は、音響装置が土壌の測定部分に接触しないように設計されている。本研究では、共鳴筒と土壌試料を特殊なコネクタを利用して接続した。しかし、共鳴筒と試料を切り離して、共鳴筒の端を土壌表面から少しだけ（例えば5 mm）離しても、土壌表面は共鳴筒の境界に影響を及ぼすことが分かっている。どの程度まで共鳴筒と土壌を離して置けるのか、著者はまだ知らない。今後、このような系で得られた共鳴曲線から、土壌表層の気相率や通気係数を求める方法を調べていくことで、共鳴法を、レベル差法と同じように、屋外の土壌に対する非破壊測定法として発展させていくことができるだろう。

謝辞

本研究を行うにあたり、科学研究費補助金 20H03117 と 21K05830 の助成を受けました。

引用文献

- Albert, D.G. (1993): A comparison between wave propagation in water-saturated and air-saturated porous materials. *J. Appl. Phys.*, 73(1): 28–36.
- Attenborough, K. (1983): Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 73(3): 785–799.
- Attenborough, K. (1987): On the acoustic slow wave in air-filled granular media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(1): 93–102

- Attenborough, K., Sabatier, J.M., Bass, H.E. and Bolen, L.N. (1986): The acoustic transfer function at the surface of a layered poroelastic soil. *J. Acoust. Soc. Am.*, 79(5): 1353–1358.
- Crawford, Jr., F.S., 高橋秀俊監訳 (1973): *パークレー物理学* コース 3 波動 (上), pp. 337–344. 丸善, 東京.
- 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.
- 深田耕太郎, 中村 公人 (2011): 砂質土壌の気相率と通気係数の音響測定法の開発と同手法を通して見た気相の構造. *土壌の物理性*, 119: 39–52.
- Grover, B.L. (1955): Simplified air permeameters for soil in place. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 19: 414–418.
- Hess, H.M., Attenborough, K. and Heap, N.W. (1990): Ground characterization by short-range propagation measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87(5): 1975–1986.
- Hickey, C.J. and Sabatier, J.M. (1997): Measurements of two types of dilatational waves in an air-filled unconsolidated sand. *J. Acoust. Soc. Am.*, 102(1): 128–136.
- Leonard, R.W. (1946): Simplified flow resistance measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 17: 240–241.
- Pierce, A.D. (1981): *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*, p. 120. McGraw-Hill, New York.
- Sabatier, J.M., Hess, H., Arnott, W.P., Attenborough, K., Romkens, M.J.M. and Grissinger, E.H. (1990): In situ measurements of soil physical properties by acoustical techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 658–672.
- Sabatier, J.M., Sokol, D.C., Frederickson, C.K., Romkens, M.J.M., Grissinger, E.H. and Shipps, J.C. (1996): Probe microphone instrumentation for determining soil physical properties: testing in model porous materials. *Soil Tech.*, 8: 259–274.

要 旨

土壌の音響測定法は、土壌表面で反射した音波や、土壌中へ侵入した音波を利用して、気相率や通気性を測定する方法である。しかし、土壌中での音波の伝播距離が測定対象の物理性に依存するため、音響測定範囲をあらかじめ設定することが難しい。本研究では、試料長さを変えながら、試料底面を大気に開放した状態と蓋で閉じた状態における共鳴法の結果を比較した。そして、底面の境界条件が共鳴法の結果に影響しなくなる試料長さを特定することで、土壌中の音の伝播距離を推定した。伝播距離より短くなるように試料の高さを決め、共鳴法による測定精度について検討した。充填したまさ土に対する、5～100 Hz の音波を用いた場合の伝播距離は、およそ3～7.5 cm であることが分かった。伝播距離は気相率 20 % あたりで最大になった。試料高さを 1.3 cm とし、試料の底面を閉じて共鳴法を用いた場合、まさ土の気相率を 10～36 % の範囲で ±0.9 %、通気係数を 0.05～0.65 cm s⁻¹ の範囲で ±0.05 cm s⁻¹ の精度で音響測定できることが明らかとなった。

キーワード：共鳴法，気相率，通気係数，減衰距離