

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14545

研究課題名（和文）音響インピーダンス測定を利用した土壌からのガスフラックス測定法（勾配法）の改良

研究課題名（英文）Improvement of gradient method for soil gas flux by acoustic impedance measurement

研究代表者

深田 耕太郎（Fukada, Kotaro）

島根大学・学術研究院環境システム科学系・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）：土壌からのガスフラックス測定法の一つである勾配法には、土壌の拡散係数を土壌水分測定と拡散係数のモデルによって推定しなければならないという課題がある。そこで本研究では、土壌の非破壊測定法である音響インピーダンス測定を利用して拡散係数を推定する方法を提案し、推定精度を明らかにすることを目的とした。3～15%の所定の含水比に調整した鳥取砂丘砂を円筒容器に充填し、音響試験、通気試験、ガス拡散試験を行った。その結果、音響測定はガス拡散係数を0.001～0.03 cm<sup>2</sup>/sの範囲において、相対誤差10～50%程度で推定できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、音響測定技術が、土壌 大気とのガス交換の研究に応用可能であることが示された。土壌試料の音響インピーダンス測定技術はほぼ確立され、気相率や通気係数の測定に応用できることが分かっている。一方、ガスフラックスは、拡散現象という物理的な側面だけではなく、土壌呼吸（微生物や植物の生命活動）などの側面からも研究されている。また、大気と土壌のガス交換が陸域環境や気候変動に及ぼす影響は大きいと考えられている。今回の研究によって示された拡散係数の新しい推定方法は、土壌を扱う多くの研究分野に貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：When using gradient method for evaluating soil gas flux, we need gas diffusion coefficient of soil. We often use an empirical model and soil moisture measurement to determine gas diffusion coefficient. In this study we try acoustic impedance measurement for estimating soil gas diffusion coefficient. The purpose of study is to determine the precision of our new method. Tottori dune sand was used as soil sample adjusted 3~15% moisture content ratio and packed in cylindrical container. acoustic test, gas conductivity test, and gas diffusion test were done. We concluded that we can estimate gas diffusion coefficients within 0.001~0.03 cm<sup>2</sup>/s with 10~50% relative error by using acoustic impedance measurements.

研究分野：土壌物理

キーワード：土壌 ガス フラックス 音響測定

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球の陸域は、約 130 億 ha の広さがあり、地球表面の 3 割を占める。その表面に広く存在する土壌は、様々なスケールで、水、ガス、熱の循環に大きく影響している。

その中で、土壌 大気炭素循環過程は、地球環境問題、特に気候変動との関連から、近年関心が高い。なぜなら、土壌は植物が固定した CO<sub>2</sub> を蓄積し、微生物活動による分解と根の呼吸によって生じた CO<sub>2</sub> を大気に放出することで、大規模な炭素循環を形成しているからである (Wikamp and Frank, 1969)。この循環過程を定量的に把握する試みは、土壌 大気間の CO<sub>2</sub> フラックス測定として行われている。したがって、現状のフラックス測定法の問題点を解決し、測定精度を高めることは、陸域の炭素循環過程を把握するために重要である。

本研究で注目するフラックス測定法は「勾配法」であり、その問題点は、フラックス決定に必要なパラメータであるガス拡散係数を間接的に (例えば土壌水分と拡散係数のモデル式を用いて) 推定しなければならないという点にある。

CO<sub>2</sub> フラックスを測る方法は大きく 3 つあり、気象学的方法 (渦相関法)、チャンバー法、そして、勾配法である (Maier and Schack-Kirchner, 2014)。渦相関法は乱流輸送を推定するもので、土壌を測定対象としない。一方、チャンバー法と勾配法は土壌を対象とする。チャンバー法は地表に設置した小型容器 (チャンバー) 内の CO<sub>2</sub> 濃度変化を測定し、物質収支を考えてフラックスを推定する。一方、勾配法は土壌中の CO<sub>2</sub> 濃度を複数深度で測定し、別途推定した拡散係数から、フィックの法則 (フラックス = 拡散係数 × 濃度勾配) によりフラックスを計算する。CO<sub>2</sub> センサーの開発が進み、その土壌埋設方法が検討されるなど (加藤ら, 2013)、勾配法の利便性が向上してきている。

両者の方法とも一長一短がある。勾配法は、チャンバー法の欠点 (チャンバーの存在自体がフラックスに影響する) を克服している。しかし、勾配法にも問題があり、それは、拡散係数を別途求めなければならない点にある。

拡散係数は、現場での直接測定ができないため、普通、土壌サンプルを採取して実験室で測定しなければならない (遅沢, 1994)。したがって勾配法を現場で実施する場合は次のようにする。まず、可能な場合は、水分量と拡散係数の関係 (校正式) を用意する。あるいは汎用的とされる拡散係数モデル (例えば Moldrup et al., 2013) を用いる。そして、フラックス測定点の近くで水分センサーによる現場の土壌水分測定を行う。水分量とモデルからガス拡散係数を推定する。この方法の問題点は、土壌水分量の測定精度とモデルの正しさの両方が、拡散係数の推定精度に影響すること、この方法しかないこと、である。そこで、もし、ガス拡散係数を推定する別の方法があれば、勾配法の発展を促し、(将来的には) 精度向上にも貢献できる可能性がある。

そのために本研究で試みるアイデアは、土壌の非破壊測定法である音響インピーダンス測定を利用するというものである。

音響インピーダンスは「音圧に対する振動速度の比」で定義される物理量で、位相速度とともに、音の伝わり方 (速さや減衰の程度) を記述する量である。土壌の音響インピーダンスは土壌の気相率や通気係数によって異なるため、音響インピーダンスを測定することで、逆に気相率や通気係数を推定できる (深田ら, 2010; 深田と中村, 2011; 2013; 深田と木原, 2016)。音波を用いる利点は、現位置での非破壊測定である。また、土壌の拡散係数は通気係数と類似の物理性であるため、音響インピーダンスから拡散係数を推定できると考えられる。つまり音響測定法を勾配法のための拡散係数の新しい推定方法として使えるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

鳥取砂丘砂を用いた場合の音響インピーダンスとガス拡散係数の関係、および、音響インピーダンス測定を利用したガス拡散係数の推定精度について明らかにする。それにより、音響インピーダンスが勾配法による CO<sub>2</sub> フラックス推定のためのパラメータとして使えるということを示す。

### 3. 研究の方法

音響測定用のステンレス製円筒容器 (内径 8.5cm、長さ 2cm) に合わせてガス拡散係数測定装置を作製した。3~15%の所定の含水比に調整した鳥取砂丘砂を円筒容器に充填し、音響試験、通気試験、ガス拡散試験を行った。1つの調整含水比につき 2~3個の試料を作製し、合計で 32個の試料について調べた。土壌の音響モデルにしたがって、音響インピーダンスから通気係数を推定し、通気試験の結果と比較した。また、通気係数とガス拡散係数の関係を調べた。

本研究で用いた音響測定の方法は、過去のもの (深田ら, 2010; 深田と中村) と同じである。ただし、共鳴周波数を以前よりも小さくしたかったので、共鳴筒を変更した。内径 25mm、長さ 25cm の塩ビパイプと内径 16mm、長さ 1 m の塩ビパイプをつないだものを共鳴筒として用いた。この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とき、最低モードの共鳴周波数は 51.6~52.0 Hz、共鳴幅は 1.9~2.1 Hz である。実験室の気温は 12~16 だった。試料と共鳴筒をつなぎ、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。同時に共鳴筒の側面に設置したマイクを用いて録音した。録音した音のデータをフリーソフトを用いて高速フーリエ変換し、周波数と音波強度の関係 (共鳴曲線) を求めた。共鳴筒の一端を塩ビ板で閉じたときの共鳴曲線と、試料で閉じたときの共鳴曲

線が、理論で与えられる曲線に合うようパラメータを決定した。音響インピーダンスはそのパラメータのうちの一つである。決定された音響インピーダンスの実部が通気係数と反比例するという関係（土壌の音響モデル）を用いて、音響インピーダンスから通気係数を推定した。

通気試験は Grover (1955) の原理を利用した測定器（大起理化工業）を用いた。長さ 2 cm の試料に対して、0.5 ~ 1.5 cm 水頭の気圧差を与えた。0.01 ~ 0.3 L の空気を流して、通気時間を測定した。流量と水頭勾配から通気係数を求めた。

遅沢 (1994) の方法を用いてガス拡散係数を測定した。土壌を充填した円筒容器に装着できるように、内径約 8.5 cm、高さ 5 cm のアクリル製の円筒形ガス拡散容器を制作した。リングを用いて、拡散容器と土壌試料の接合部の気密性を確保した。容器上部の中心には酸素センサー（マクセル、KE-12）を取り外しできる構造を設けた。酸素センサーはガルバニ電池式のもので、酸素濃度に比例した電圧値を返す。大気に対して 20 mV 程度の値を示し、通常の電圧計で測定できる。また、ガスポンプから拡散容器内へ窒素ガスを送り込むために、容器上部にガスチューブの出入り口を設けた。遅沢の方法は土壌試料と拡散容器をスライドさせて位置を合わせるように設計されているが、本研究では、はじめから位置を合わせて固定し、土壌試料と拡散容器の境界はステンレスの仕切り板を挿入できるようにした。

試料の上から拡散容器を被せてリングを締めた。いったん仕切り板を挿入して土壌試料と拡散容器内のガス交換を遮断した。ガスポンプから窒素ガスを拡散容器に送って酸素濃度を 6 ~ 8 mV 程度まで下げた。試料を少し持ち上げた状態で固定し、試料の底面の蓋を取った。この状態で酸素濃度の測定を開始し、仕切り板を取り外し、外気が土壌を経由して拡散容器内の空気と交換できるようにした。拡散容器内の酸素濃度をマルチメータを用いて測定し、10 秒に 1 回パソコンに記録した。10 ~ 20 分で測定を終了し、同じことを 1、2 回繰り返した。また、室内の気温、湿度、大気圧を別途測定した。

酸素濃度測定値の外気濃度との差  $y$  の対数値は、経過時間  $t$  に関して線形な関係 ( $\log y = at + b$ ) で近似できる。その傾き  $a$  は、拡散係数  $D$  ( $m^2/s$ ) と容器の形状で決まる定数 ( $1/m^2$ ) の積で与えられる。本試験の場合、この定数は 29.66 ( $1/m$ ) の 2 乗であった。よって、測定データからエクセルを使って  $a$  を求め、29.66 の 2 乗で除して、拡散係数  $D$  を決定した。

#### 4. 研究成果

鳥取砂丘砂の気相率は 16 ~ 35%、通気係数は 0.001 ~ 2.3 cm/s、ガス拡散係数は 0.0004 ~ 0.03  $cm^2/s$  の値を示した。繰り返し測定の結果から、本研究で用いた遅沢の方法によるガス拡散係数の測定精度は 10% 程度であると考えられる。

通気係数の音響推定値  $x$  と通気試験結果  $y$  との間には  $y = 0.39x^{2.8}$  ( $R^2 = 0.97$ ) のべき乗の関係が認められた (Fig.1)。通気試験結果  $y$  と拡散係数  $z$  の間には  $z = 0.013x$

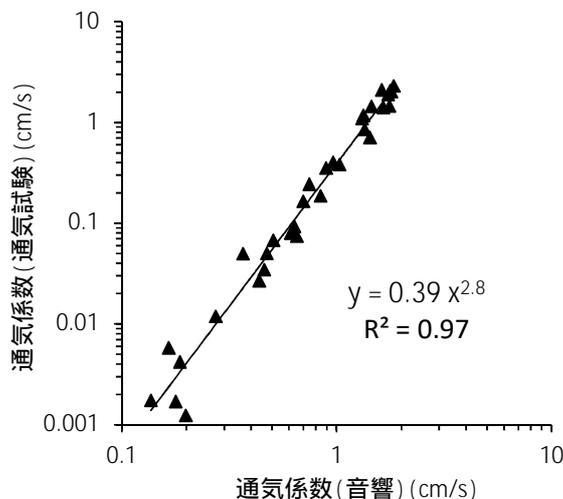


Fig.1 通気係数の音響測定による推定値と通気試験結果の比較

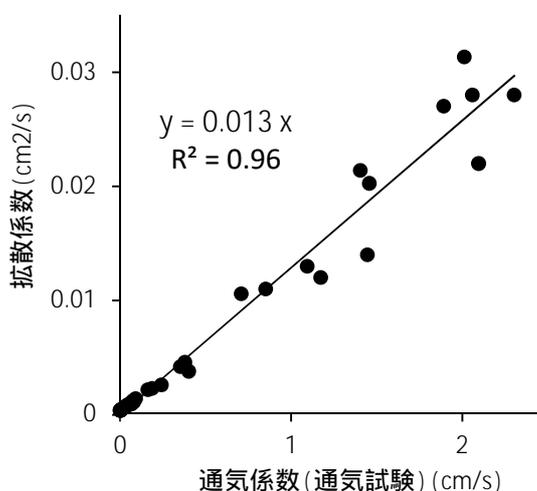


Fig.2 通気係数と拡散係数の関係

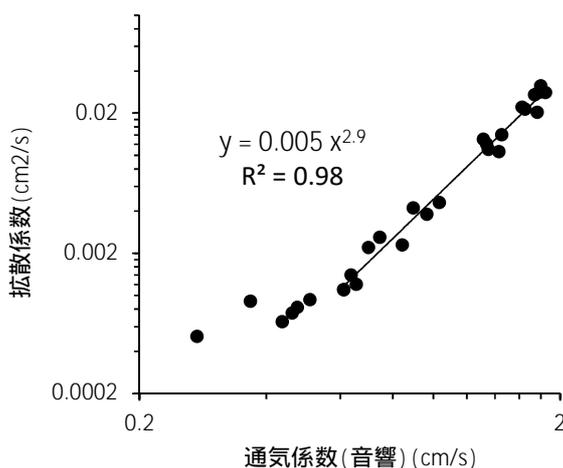


Fig.3 音響測定による通気係数の推定値と拡散係数の関係

( $R^2=0.96$ )の線形な関係が認められた (Fig.2)。そして、通気係数の音響推定値  $x$  と拡散係数  $z$  の間には  $z=0.005x2.9$  ( $R^2=0.98$ )の関係が認められた (Fig.3)。音響測定は、拡散係数を  $0.001 \sim 0.03 \text{ cm}^2/\text{s}$  の範囲において、相対誤差  $10 \sim 50\%$ 程度で推定できると考えられる。この相対誤差は、拡散係数が大きいほど大きくなる。以上により、音響を利用した土壌の非破壊測定がガス拡散係数の推定を通してガスフラックスの測定に応用できることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 畑野憲人・深田耕太郎
2. 発表標題 音波を利用した土壌の物理性測定の野外での実施
3. 学会等名 農業農村工学会中国四国支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深田耕太郎
2. 発表標題 わずかな水分を含む土壌を挿入した平行板コンデンサーの静電容量
3. 学会等名 土壌物理学学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小浦心充、釜瀬諒太、深田耕太郎
2. 発表標題 カーブした共鳴筒と共鳴曲線面積の導入による音響測定法の改良
3. 学会等名 土壌物理学学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----