

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                       |    |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----|--------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 博士（農学）                                | 氏名 | 深田 耕太郎 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 土壌の連続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 |    |        |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>土壌の気相は、大気と連続した連続気相と土壌中の水分に封入された封入気相に大別される。これらの存在形態を定量的に区別できれば、気相の連続性の発現メカニズムや、気相率や通気係数などの基本的な物理性同士の関係を明らかにすることができる。また、土壌のガス吸収、放出のメカニズムを解明する点でも、通気に寄与する連続気相の物理性に注目することが重要である。本論文は、音響学的な手法を用いて、大気と連続した土壌気相の気相率と通気係数を測定する新しい方法を検討し、新しい測定法を通して得られた気相構造に関する知見を述べたものである。具体的には、音響パラメータの1つである音響インピーダンスから、連続気相率と通気係数を推定する式を導出し、主に砂に対して適用することで、その測定精度を明らかにするとともに、気相構造の一様性について議論した。</p> <p>第1章では、導入部分として、土壌気相の存在形態を区別する実験的手法が開発されていない現状について概観し、音響学的な手法が土壌連続気相の物理性測定に応用できる点を指摘することで、本論文の目的と意義を示している。</p> <p>第2章では、連続気相の物理性を測定する方法を、静的な方法（圧縮法）と動的な方法（音響法）に分け、各方法の先行研究について概観している。</p> <p>第3章では、まず、音響インピーダンスと位相速度を中心にして、音響学の基本的な枠組みを示し、次に音響理論の先行研究を整理して、この枠組みの中に、連続気相の気相率、屈曲度、通気係数を組み込む方法についてまとめている。そして、土壌物理学の先行研究に基づいた屈曲度の気相率依存性を導入することで、音響インピーダンスを用いた連続気相率と通気係数の新しい推定式を提案している。</p> <p>第4章では、音響インピーダンスの測定法の1つである共鳴法の原理、および、測定システムと測定手順について述べている。また、既存の共鳴理論を測定法に即して発展させ、共鳴曲線の特徴量である共鳴周波数および共鳴幅と音響インピーダンスの関係式を新たに導出することで、既存の共鳴理論を単純化している。</p> <p>第5、6章では、主に異なる水分量に調整した鳥取砂丘砂を用いて実験を行い、第3章で提案した推定式、および、第4章で提案した共鳴法の有効性を検証している。</p> <p>まず第5章では、音波の減衰距離に比べて長い試料を用いることで、試料内で音波が反射しない場合と、試料内のどこかで音波が反射する場合を区別している。前者の測定結果から、連続気相率が14~34%の範囲において、その推定誤差が最大15%程度、通気係数が <math>0.2\sim 3\text{cm s}^{-1}</math> の範囲において、その推定誤差が最大3倍程度であることを明らかにしている。そして後者の測定結果から、連続気相の物理性が一様とみなせる長さを <math>0.6\sim 3.7\text{cm}</math>程度と推定し、その値が全気相率に比例することを明らかにしている。</p> |                                       |    |        |

第6章では、音波の減衰距離に比べて短い試料を用いることで、音波が試料内部か底面のどちらかで必ず反射するようにしている。これにより、気相の質点モデルを用いることが可能となり、連続気相の体積の推定から連続気相率を推定できることを示している。質点モデルの有効な試料長が鳥取砂丘砂の場合に2.5cm程度であること、および、封入気相を含む試料全体の気相と連続気相の物理性に差が生じることを明らかにしている。

第7章では、短い試料の測定結果を用いて、音響測定による連続気相率と通気係数、全気相率、従来の通気試験から得られる試料の通気係数について、相互の関係を議論している。これらの関係から、連続気相と全気相の通気性に差が生じる領域と生じない領域の2つの領域が存在し、各領域で単純なべき乗則が成り立つことを明らかにしている。

終章である第8章では、以上で得られた知見を要約・整理し、今後の課題について述べている。特に、音響測定法の非破壊特性を生かした現場測定法の可能性について言及している。

(論文審査の結果の要旨)

土壌の通気性メカニズム、および、大気と土壌間で生じるガス交換のメカニズムの解明という観点から、大気と連続した土壌気相と封入気相を区別できる実験的手法の開発が重要な課題となっている。本論文は、音響測定法を用いて連続気相の気相率と通気係数を測定する方法を開発し、砂への適用から連続気相の物理性について考察を加えたものであり、評価すべき主要な点は以下の通りである。

1. 音響理論に屈曲度の気相率依存性を組み込むことによって、音響インピーダンスから連続気相の気相率と通気係数を推定する式を新たに提案している。これにより、土壌の気相構造に関する考察が音波による非破壊測定によって可能となった。また、測定原理は土性によらず、土性によると考えられる屈曲度の気相率依存性などは個別に考慮すればよいため、汎用性が高く、今後の発展が期待できる。
2. 音響インピーダンスの測定法として共鳴法を採用していることから、測定システムが、スピーカーやマイクを共鳴筒に固定した簡易なものとなり、再現性の高い測定が可能となっている。さらに、近似を含むがより単純な測定原理を新たに導出していることで、共鳴法の理解を深め、測定誤差に関する理論的な考察を可能にしている。
3. 気相の物理性が、音響学的に一様とみなせる長さを推定している。既存の土壌物理学には一様性を特徴づけるスケールの測定法は存在しないため、連続気相の平均的長さを表すと考えられるこの指標の提案の意義は大きい。土壌物理学における代表要素体積の概念への展開が期待できる。
4. 連続気相と封入気相を分離したことによって、連続気相率と通気性の関係や全気相率と連続気相率の関係を議論することを可能とした。さらに、これらの関係がべき乗則で表され、既存のモデルと対応が見られることから、既存のモデルに対する実験的検証としての価値が認められる。

以上のように、本論文は、土壌の連続気相の物理性を非破壊測定する音響手法を開発し、砂に対して適用することで、気相構造の一様性、および、連続気相の物理性に関する知見を示したものであり、土壌物理学、水文学、音響学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成24年 4月 12日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

要旨公開可能日：                      年              月              日以降