

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05830

研究課題名(和文) 土壌を極板とする平行板コンデンサーを利用した新しい土壌水分測定法の開発

研究課題名(英文) Development of a New Soil Moisture Measurement Method Using a Parallel Plate Condenser with Soil as the Polar Plate

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)：本研究では、土壌が平行板コンデンサーの極板となるシステムを作製し、土壌水分の量や水分分布の変化を、コンデンサーの誘電率の変化としてではなく、コンデンサーの極板面積の変化として測定できることを明らかにした。ステンレス板とプラスチックシートと湿潤状態のまさ土を用いて平行板コンデンサーを作成した。このシステムでは、まさ土の体積含水率が4～5%以上で、まさ土が極板として機能することが分かった。この測定システムを利用して、乾燥土壌が毛管上昇によって濡れる過程を極板面積が増加する過程として調べられることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の静電容量タイプと呼ばれる土壌水分計は、水分量が変化すると誘電率が変化することで静電容量が変化するという原理を用いて土壌水分を測定している。この研究は、静電容量を変化させる別の方法があることを示した。ここで示した以外にも、二つの極板の距離が変化することで静電容量が変化するようなシステムを作ることでもできる。いくつかの原理を組み合わせることで、土壌水分量や水分分布の変化を、実験者の目的に合った測定システムにカスタマイズすることができる。この研究成果は、汎用性のある水分センサーの選択肢を増やすことにつながる。また、複雑な土壌を物理的により深く理解することにつながる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a system in which soil serves as the plate of a parallel plate condenser was fabricated, and it was found that changes in the amount and distribution of soil moisture can be measured not as changes in the dielectric constant of the condenser, but as changes in the plate area of the condenser. A parallel-plate condenser was created using stainless steel plates, plastic sheets, and wet masa-soil. In this system, it was found that the masa-soil functioned as a plate when the volumetric moisture content of the masa-soil was greater than 4-5%. Using this measurement system, it was shown that the process of wetting of dry soil by capillary rise can be studied as a process of increasing the plate area.

研究分野：土壌物理学

キーワード：土壌物理学 土壌水分 測定方法 平行板コンデンサー

1. 研究開始当初の背景

近年、衛星リモートセンシング技術の農業分野への利用が精力的に研究されている。例えば、農地や休耕地の植生や水分量を短時間で調べるのに衛星を利用する。衛星観測の分解能は現在、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度にまで向上している。

こうした技術は、日本における農地の利用方法の変化にともない、ますます重要になっている。例えば、イネを作らなくなった水田で薬草を育てたり、牧草を育てて牛を放牧したりする。このとき、農地の水分量や排水性が問題になる。水田は水を貯めるように作られた場所であるため、降雨後に高い水分量が維持される。しかし、水田でイネ以外のものを育てようとしたとき、その作物には高水分が適さない場合が多い。そこで、衛星を使って、乾田や湿田を見分け、適地を探す。あるいは排水改良を行う。このような状況の中で、比較的広範囲の土壌の状態を知る必要性が生まれ、現在の農地工学における重要な課題となっている。

現地では $1 \sim 10\text{m}$ の範囲にわたって土壌水分量を調べるのは容易ではない。サンプリングは確実な方法であるが時間と労力がかかる。また測定値が全体を代表するかどうか不明である。近年使われるようになった土壌水分センサーの測定範囲は 30cm 程度であり、多点での測定が欠かれない。また、水分センサーは実験室での需要が高く、むしろ小型化する傾向がある。

もし、 1m 程度の測定範囲で土壌水分量を一つの測定値で簡単に表すことができれば、適地適作への利用、作物の育成管理、衛星センサーのキャリブレーション、土砂災害予測など様々な場面で使えるだろう。そこで、本研究では、コンデンサーを利用した新しい測定方法を試みる。これは、土壌水分が電気を通す（導体である）ことを利用して、土壌をコンデンサーの極板として機能させる、というものである。

コンデンサーとは、コイル、抵抗と並ぶ電気回路の 3 要素の一つで、電気を貯める能力を持つ。単純な例として平行板コンデンサーがある。これは、2 枚の金属板を接触しないように平行に近づけたものである。このとき、コンデンサーの性能は静電容量 C で表され、 $C=eS/d$ により、誘電率 e 、極板の面積 S 、極板の間隔 d で決まる。土壌科学分野でよく使われる水分センサーは、高周波数の電磁波を用いて、土壌の誘電率 e を測定している。その背景にあるアイデアは、土壌水分が多いほど、土壌全体の誘電率が大きくなるというものである。

コンデンサーを利用する方法はおそらくもう一つある。それは、土壌を平行板コンデンサーの極板として使うというものである。水分を含む土壌は導体として機能する。よって、別の誘電体を使って土壌を 2 つに絶縁することができれば、土壌を両極板とするコンデンサーを作ることができる。ただし、このコンデンサーは、土壌が完全に乾いた状態では機能しない。土壌を導体とするための水がないからである。

2. 研究の目的

上記のようなアイデアに基づき、土壌がコンデンサーの極板として機能するシステムを作る。このシステムを用いて得られた結果を、既存の測定方法と比較することで、新しい測定方法の可能性を示すことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

3.1 平行板コンデンサーの作製

縦 18cm 、横 32cm 、厚さ 1mm のステンレス板の上に、ステンレス板と縦横のサイズが同じで厚さ 0.2mm の OHP シートを置いた。そして OHP シートの上から、中心のラインに合わせて幅 1cm 、長さ 29cm の銅箔テープを貼った。これが、OHP シートを誘電体とし、銅箔テープとステンレス板を上下の極板とする平行板コンデンサーとなる。

風乾状態のまさ土を初期含水比 9% に調整し、塩ビ製の型を使って、縦 13cm 、横 27cm 、厚さ 6mm の平板に整形した。これを銅箔テープを貼った OHP シートの上に置いた。銅箔テープとまさ土が電氣的につながれば、まさ土が上側の極板を広げる効果を期待できる。つまり、静電容量が増加する。銅箔テープとまさ土が電氣的につながっていないければ、コンデンサーの上にまさ土が載っているだけで、静電容量は変わらない。この状態の試料を 7 つ用意し、5 つは部屋に静置し自然乾燥させた。そして、1 日に 1 回、試料の質量と静電容量を測定した。静電容量の測定には、エヌエフ回路設計ブロックの C/V コンバータ (CV-242M3) を使用した。この装置は静電容量を電圧に変換するモジュールである。変換された電圧値をデジタルマルチメータで測定した。残り 2 つの試料は、蓋のあるアクリル容器の中に入れて静置し、1 日 1 回、容器から取り出して試料の質量と静電容量を測定した。容器の中に入れることで試料の乾燥をできるだけ遅くした。また、おんどとり (T&D、tr-72wf) を用いて、1 日 1 回、容器を開けたタイミングで容器の中の相対湿度を測定した。室内で自然乾燥させた試料は約 2 週間で風乾状態となった。一方、容器の中に入れた試料は約 3 か月で風乾状態となった。これらの段階で試験を終了し、まさ土を炉乾燥させて、乾燥質量を求めた。質量から体積含水率を計算し、静電容量との関係を調べた。

3.2 毛管上昇の測定

内径 46mm 、高さ 100mm (体積 166cm^3) の透明アクリル円筒容器の中に、含水比 9% に調整したまさ土を充填した。これを 70°C のオープンで 3 日かけて乾燥させ、さらに 1 日室内に

放置した。これでほぼ風乾状態となった。

幅 1.5 cm、長さ 9 cm のアルミテープを 2 枚用意し、一枚を円筒容器の側面内側に、もう一枚を側面外側に貼り付けた。これで平行板コンデンサーの 2 枚の極板とした。毛管上昇により試料が濡れると、内側の極板と湿潤試料が通電し、極板面積の増加により静電容量が増加することが期待できる。極板を試料より 1 cm 短くすることで、試料の下側に 1 cm の余白を残した。これは、試料が濡れるときに、極板同士が水を介して通電するのを防ぐためである。アルミ極板を CV コンバータ (エヌエフ回路設計ブロック、CV-242M3) につなぎ、これにより静電容量から変換された電圧値をデジタルマルチメータ (エヌエフ回路設計ブロック、DM2571) で測定した。2.5 秒間隔で測定し、PC に記録した。

試料の底面にナイロンメッシュを被せ、土壌が落ちないようにした。試料を空中で支えながら、支えも含めて全体の質量を測定できるように、アクリル板を組み合わせた治具を作った。毛管上昇のときは、試料の底面から水を供給するため、水を入れた容器を試料の下側に置く。このとき、治具を利用することで、水と水を受けている容器の質量は質量計にカウントされない。ただし、試料は 1~3 mm だけ水に沈んでいるので浮力が生じる。そこで、できるだけ水受けの水面高さを維持して、質量測定への影響が小さくなるように、マリオット管を利用した。質量の測定結果を 5 秒間隔でロガーに記録した。

4. 研究成果

4.1 土壌極板の乾燥過程における静電容量の変化

Fig.1 は 7 つの試料から得た体積含水率と静電容量の関係である。実験開始時の体積含水率は 12~14%、静電容量は 1.0~1.3nF だった。試料の乾燥とともに静電容量はほとんど変化しないか、緩やかに減少した。体積含水率が 4%あたりで静電容量の減少割合が増加し、最終的に風乾状態では体積含水率が約 2%、静電容量が約 0.7nF となった。試料の違いによる静電容量のばらつきは、乾燥とともに減少した。

まさ土試料と縦横サイズが同じステンレス板を、まさ土試料の代わりに銅箔テープに接触させると、静電容量は約 1.4nF となった。そして、銅箔テープの上に何も置かない場合の静電容量は約 0.4nF となった。よってまさ土は、銅箔テープと接触することで極板面積を広げたことが分かる。仮に 0.4nF をまさ土による極板面積の拡大がない状態 (0%)、1.4nF を極板面積の拡大が最大の状態 (100%) とすると、初期に 50~90%以上の面が極板として機能し、体積含水率 4%程度までその状態を維持するか、体積含水率の減少量と等しい程度に極板面積を減少させた。その後、体積含水率 0%で極板面積 0%になるような変化率 (体積含水率 1%あたり極板面積 15%の減少率) で風乾状態まで減少した。体積含水率 4~6%における静電容量は極板面積 50~70%に相当する。この数字は、固相率と体積含水率の合計に近いが、これより若干大きい。以上より、まさ土の土粒子表面に存在する水が極板全体に広がり、銅箔テープと電気的につながりながら、乾燥に対して極板面積を維持した、といった状況をイメージできる。

試料を容器内でゆっくり乾燥させた実験では、容器内の相対湿度は約 95%からスタートした。一月後に 100%に達した後、減少に転じ、最終的に 86%となった。体積含水率 4%のときの相対湿度は 96%となった。よって、本研究で調べた現象は pF4~5 の範囲で起きていると考えられる。

4.2 毛管上昇によって濡れるまさ土の質量及び静電容量の変化

試料の乾燥密度は 1.69 g/cm³、風乾試料の体積含水率は 1.6%だった。風乾試料の底面が水に触れた瞬間、水が土壌中を上昇しはじめた。濡れ前線が最初の 1 cm を上昇する時間は感覚的に一瞬である。濡れ前線は速度を落としながらも上昇を続け、高さ 5 cm 以降ではほぼ等速で上昇しているように見えた。約 15 分で試料高さまで上昇し、試料上側の表面が濡れていくのが見えた。毛管上昇終了後の試料の体積含水率は 27%だった。

試料の質量と静電容量の経時変化を Fig.2 に示す。質量は、毛管上昇開始時に急激に増加し、徐々に速度を落としながら増加を続け、15 分程度で約 40 g 増加し、最大に達した。この傾向は実験の観察結果と一致している。質量が最大値に達してから測定を終了するまでの 15 分間で質量は約 1 g 減少した。その理由はおそらく、マリオット管による給水に時間の遅れがあるためである。毛管上昇終了後に遅れて行われた給水により、湛水面が上昇し、試料が水に沈んで浮力が発生したためと考えられる。試料の質量をこれ以上正確に把握するには、何か別の工夫が必要である。例えば、水受けの断面積を十分大きくすることで、水位の変動を小さくすることが考えられる。また、毛管上昇開始時の急激な変化を捉えるためには、質量測定を 1 秒以下の分解能で行う必要があると感じた。

静電容量は、毛管上昇の前後で 0.159 nF から 0.173 nF まで増加した。実験開始時に若干の

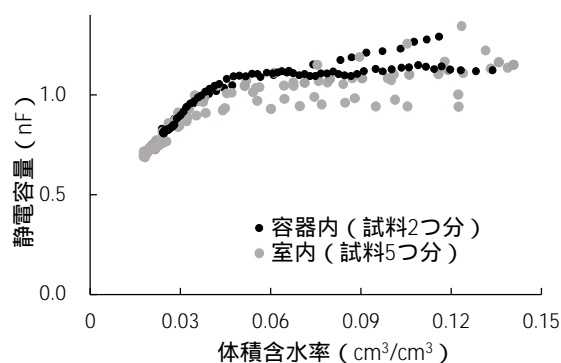


Fig.1 体積含水率と静電容量の関係

不安定な変動を示したが、その後は安定して増加しつづけた。そして、約 15 分で最大に達し、それ以降は一定値を示した。この変化の傾向は、質量の測定結果と同様に、前述の観察結果とよく一致している。

質量と静電容量の結果を比較してみると、毛管上昇開始直後の数値の増加速度は、質量測定の方が若干大きいようである。その理由はよく分からないが、毛管上昇開始時には、容器の外側に設けた極板にとっては、極板の外側から極板の真下に近づくような水の移動になるため、実験の後半で極板近傍を水分が上昇するときよりも静電容量への影響が小さかった可能性がある。また、静電容量は質量の結果とは異なり、実験の後半で減少しなかった。よって質量測定の結果からは、試料から水が抜けたように見えるが、実際には水が抜けたわけではなく、質量の減少は測定システムに原因があると推測した。以上より、毛管上昇を静電容量の変化として調べることが分かった。

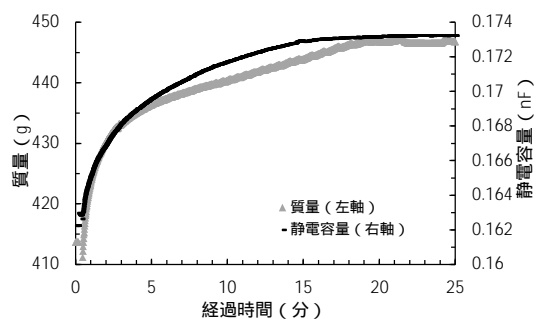


Fig.2 質量と静電容量の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 深田耕太郎, 難波将希, 木原康孝	4. 巻 149
2. 論文標題 土壌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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 13-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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 深田耕太郎
2. 発表標題 風乾土壌が毛管上昇によって濡れる過程についての質量および静電氣的測定
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 深田耕太郎
2. 発表標題 土壌を極板とする平行板コンデンサーの静電容量から見た土壌の乾燥過程
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深田耕太郎, 木原康孝
2. 発表標題 共鳴筒の非接触な配置による土壌表層の水分量の推定
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------