

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18046

研究課題名(和文) 伝送線路理論に基づく土壌成分測定技術の研究

研究課題名(英文) Study on soil water content measurement technique based on transmission line theory

研究代表者

伊藤 浩之 (Ito, Hiroyuki)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：40451992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：土中の水分量を立体的に計測可能なセンサ技術，ならびに分解能や精度の向上手法，複素誘電率の周波数依存性に着目した土中イオン濃度の測定技術の研究を行った．透過波と土壌の影響を受けた反射波を干渉させる薄型プローブ技術を考案し，20～35%の水分量で2.3%以内の小さなばらつきで測定できた．高精度化や土中イオンの影響を検討するための測定を行い，およそ10GHz～25GHzの周波数帯において複素誘電率が肥料の影響を受けにくいことが分かった．

研究成果の概要(英文)：This work has studied sensor technology to measure water content of soil, improvement method of resolution and accuracy, and ion-concentration measurement technique for soil by exploiting frequency dependence of complex permittivity. We have proposed the new thin probe technique which uses interference between transmitted waves and reflected waves with soil influence. In our measurement, variation was 2.3% in the range of 20% to 35% water content. Measurements to improve accuracy and to consider influence of soil ions were conducted. The complex permittivity is hardly affected by fertilizer from 10GHz to 25GHz in our measurement.

研究分野：電子回路

キーワード：センサ技術 IoT

1. 研究開始当初の背景

センサは、実世界と情報空間を結ぶ媒体であり、すべてのインターネット化(Internet of Everything)が進む現在・将来において新しい価値を生み出す重要な技術であることは疑いの余地がない。本申請では、ITを駆使して農業の安定化・生産性向上を図るスマートアグリ技術のキーデバイスになり得る、土壌水分量や土壌成分を立体的(平面方向と深さ方向)に高精度・高分解能で測定するセンサ技術の創出を目指す。特に土壌水分量は農作物の発育や品質に大きく影響するため、これが数cm程度の空間分解能で立体計測できると、ITによる自動制御によって、これまでベテラン農家のノウハウに頼っていたトマト等の深根性野菜の発育制御や、農地の位置に依存した品質・収穫量ばらつきの改善に大きく貢献できる。スマートアグリが盛んな米国と比較して降雨量が多い日本の農地では土壌水分量が過剰になりやすく、これを測定・制御できるようにすることは特に日本でスマートアグリを行う際の特有かつ重要な課題である。

土壌水分量の測定技術は、特に1990年から2000年代に国内外で盛んに工学的研究が行われ、含まれる水分量(体積含水率)によって土壌の電気伝導度あるいは誘電率が異なることを利用している。土に差し込んだプローブに交流信号を入力し、土壌の誘電率の影響を受けた反射波の時間応答(TDR法)や周波数依存性(FDR法)、反射係数(ADR法)から誘電率を測定する方法が、比較的高い精度で水分量を計測できる。これらのセンサは商品化され、環境モニタリングなどで利用されている。しかしながら、測定される土壌水分量は土と接するプローブ電極の平均値であり、高くても10cm程度の分解能しか得られていない。立体的に測定しようとする数十センチ以上の棒状プローブを平面方向と深さ方向に多数埋め込まなければならないため、設備が数十万円以上の非常に高価なものとなり、さらに根が発育する際の障害物となることが問題である。この課題を認識したきっかけは植物工場視察や代表者グループ主催の研究会等の際の農学研究者との技術討論にあるが、代表者がこれまで行ってきた高周波回路技術を応用することによって解決できると考えた。上述した水分量測定技術はマイクロ波回路で一般的に用いられている評価技術に類似しており、プローブ部分は、TDR法・FDR法で使われている金属単線や、ADR法と同軸伝送線以外にも、誘電率の影響を受けるマイクロ波素子であれば利用できるはずである。代表者は、伝送線路理論を応用することでプローブ長さ方向の誘電率が測定できることに気づき、これによって立体計測の際のプローブ数削減と形状の細線化が可能になると考えた。さらに、近年の集積回路技術の進歩により60GHz以上のミリ波帯やサブテラヘルツ帯が高価な設備を用いなく

ても利用できるようになってきていることに着目し、ミリ波帯までの周波数依存性の測定までを見据えることで、水分量測定精度向上と、塩分や酸素等の土中成分分析への展開も可能になると考えた。

2. 研究の目的

従来のプローブ単体では1箇所つまり0次元空間でしか土壌水分量を測定できないが、本研究ではこれを1次元以上にする手法を明らかにする。さらに、空間分解能や水分量測定精度を向上させる技術、応用として複素誘電率の周波数依存性から農業で重要な土壌中の塩分濃度やイオン濃度も同時に測定する技術の実現可能性も研究する。これらを(1)多次元化技術、(2)高性能化技術に大別して研究する。

(1)多次元化技術：土壌水分量(体積含水率)と誘電率の関係はTopp(1980)等によって定式化され、これらの関係においては土質の違いによる影響が小さいことが報告されている。そこで、まず27年度において誘電率を1次元測定する手法を明確化する。安価なプリント基板で作成可能な平面型伝送線路の伝搬特性から土壌誘電率を得る2つの新手法を研究していく。1つ目は、反射波法と名付け、伝送線路上に一定間隔で特性インピーダンス不連続点を設け、その点での反射波から電磁波速度を計算し、不連続点間の誘電率を得る方法である。2つ目は、クロストーク法とよび、結合伝送線路の一方に信号を入力したときに他方の伝送線路から出力される信号(近端クロストーク)から一定区間での誘電率を計算する方法である。本研究では、このアイデアを実現するためのハードウェア構造や信号処理方法をシミュレーションや実測を通して明らかにする。28年度は、2次元以上の物理空間で土壌水分量を測定する手法を明らかにする。少ない1次元プローブ数で目標空間分解能を達成する配置方法やデータ補間方法を検討する。さらに、プローブ単体で2次元/3次元測定する手法も研究する。

(2)高性能化技術：28年度に多次元化技術研究と並行して、空間分解能と水分量測定精度の向上を目指し、伝送線路構造と周波数の最適化を行う。また、水の緩和周波数が約20GHzであることが知られているが、GHz帯の高周波信号を用いる場合は複素誘電率で考えた方が伝搬信号の損失が考慮できるため水分量測定を高精度化できると考えられる。29年度は、土壌の損失を考慮した伝送線路モデルから土壌の複素誘電率を計算する手法を研究する。スマートアグリ用センサでは水分量と同時に土壌成分(肥料成分や塩分)も測定する必要がある。本研究では、誘電率虚部から塩分量を算出する方法が報告されていることに着目し、水分量と塩分濃度を同時検出する応用技術も研究する。ミリ波帯

以上の複素誘電率や電磁波吸収特性の周波数依存性から土壤中のイオンを測定する応用技術の実現可能性も検討する。

3. 研究の方法

【平成 27 年度】

(1) 多次元化技術：プローブ単体で誘電率を 1 次元測定する手法の明確化に注力する。まずは、基礎技術確立のために、電磁界シミュレーションを用いて誘電率の 0 次元検出を行う。マイクロストリップ線路上の誘電体の誘電率を変化させ、反射波法では誘電率と反射波の時間応答、クロストーク法では誘電率と近端クロストーク振幅の関係を得る。後者は近端クロストーク計算式とマイクロストリップ線路モデル式から誘電率を算出するため、算出した誘電率がシミュレーション上の誘電率と一致しない可能性が考えられ、モデル式のパラメータ補正も視野にいれて研究を進める。次に電磁界シミュレータ上で伝送方向に誘電率を変化させて、1 次元で測定するための基本技術を研究する。反射波法では、不連続点間の多重反射が精度を低下させる要因となりえる。配線遠端ほど反射波振幅が大きくなるように工夫することで位置分離する手法などを検討する。クロストーク法では測定位置を電磁波速度から計算する必要があるが、これが誘電率によって変化することが課題である。微小区間でのクロストークから誘電率を求め電磁波速度を計算する方法や、反射波法との組み合わせを検討する。これらの研究と並行して、プリント基板を製造して実測・比較を行うことでシミュレーション精度を高めていく。

【平成 28 年度】

(1) 多次元化技術：2 次元以上の物理空間で土壤水分量を測定するためのハードウェア構成をシミュレーションと実測を行いながら研究する。3 次元測定は 1 次元プローブを剣山状に並べることで達成できるが、コストや農作物への影響を削減するための技術を中心に研究する。具体的には、少ないプローブ本数で空間分解能を高めるために、平成 27 年度の知見を応用して 1 次元プローブ間のクロストークからプローブ間の誘電率を計算する方法を検討する。この方法で検出されるクロストーク振幅が検出限界以下になる可能性があるため、プローブ間のデータの相関からプローブ間の土壤水分量データを補間する方法も研究する。これらの方法に適したプローブ配置方法を明らかにする。また、1 次元プローブ技術を発展させ、多数の伝送線路を単一プローブ内に配置することでプローブ単体で 2 次元/3 次元測定する手法も研究する。

(2) 高性能化技術：空間分解能と水分量測定精度を向上させるために伝送線路構造と周波数の最適化を行う。例えば、電界の多くが

土壌を通過する構造にし、周波数を高くした方が、土壌誘電率の影響を強く受けるため空間分解能や精度の面で有利である。一方でこのアプローチは伝送損失を高めるため、反射波やクロストークの振幅が減少する。このようなトレードオフを定量的に解析し、最適な線路構造と周波数の関係を明らかにする。

【平成 29 年度】

高性能化技術：平成 28 年度の成果を発展させ、さらなる水分量高精度測定のために、土壌の影響を考慮した有損失伝送線路モデルと土壌の複素誘電率を計算する手法を研究する。反射波法の場合は、反射波の時間領域波形が誘電緩和によって歪むことを利用して誘電率虚部を得る。クロストーク法では、これを発展させて配線微小区間ごとの 4port S 行列を得る方法を検討する。S 行列が得られれば、特性インピーダンスと伝搬定数が求まり、伝送線路モデルから土壌部分の容量と漏れコンダクタンス成分を計算することにより複素誘電率が得られるはずである。これらの知見から、複素誘電率を得る場合に適したプローブ構造と周波数帯域を明らかにする。次に、周波数と誘電率虚部の関係から土壌成分を分析する技術に挑戦する。まずは誘電率虚部が土壌塩分濃度に依存することを利用して、水分量と塩分濃度を同時に測定する手法を検討する。さらに、ミリ波帯以上の周波数における複素誘電率や電磁波吸収特性から土壌成分濃度を測定する技術の実現可能性を研究する。例えば土壌中の酸素含有量は根の育成に関する重要なパラメータであるが、60GHz 付近に酸素による電磁波減衰量のピークがあることを活用することで定量的な測定が可能であると考えられる。この測定方法の実現可能性や精度を電磁界解析や実測から明らかにする。

4. 研究成果

【平成 27 年度】

基礎技術確立のために、まずは誘電率の検出を目指して電磁界シミュレーションの利用を検討した。誘電率の虚部の影響により信号が大きく減衰するため、これを考慮する必要があるが、土壌水分量毎に周波数依存性を持つ複素誘電率を正確に電磁界シミュレータで考慮することが困難であったため、プリント基板を製造して実測で検討を行うこととした。特性インピーダンスが 50Ω であるコプレーナ型伝送線路を防水加工し、体積含水率を変えた土サンプルに伝送線路を挿入してネットワークアナライザ (Agilent 社, E8361A) で S パラメータを測定した。S パラメータの周波数特性や、伝搬定数、RLGC パラメータの体積含水率依存性を評価した。また、S パラメータからパルス応答を計算し、TDR 法の評価も行った。35%以上の体積含水率では、高周波での信号減衰が大きくなり反射波の立ち上がり時間が変化するため、遅延時間

を測定する TDR 法では高い精度が得られないことが分かった。

土壌の水分量の影響を受けた信号を高 SNR で測定するという観点で検出方法と伝送線路構造の検討を行った。伝送線路の中間にスタブを取り付けた T 型の構造として、端子間を伝搬する信号とスタブ端で反射した信号を干渉させ、信号のピークあるいはノッチの周波数から水分量を計算する手法を開発した。この手法における水分量毎の測定値のばらつきは 2.3% であり、市販品と同程度の精度が実現できた。以上により、土壌水分量の部分測定 (0 次元測定) に成功し、深さ方向の測定 (1 次元以上の測定) に向けた基礎技術を確認した。

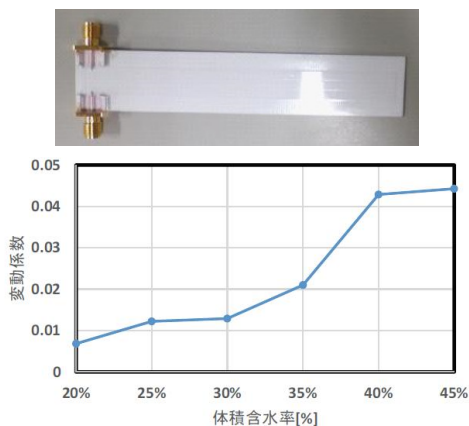


図 1: 試作したプローブと水分量の測定ばらつき (変動係数)

【平成 28 年度】

2 次元以上の物理空間で土壌水分量を測定するためのハードウェア構成をシミュレーションと実測を行いながら研究した。空間分解能と水分量測定精度を向上させるために、伝送線路構造と周波数の最適化手法の検討を開始した。まずは、その過程で再現性が高い土サンプルの作成が重要であることが分かった。そこで、任意の水分量のサンプルを作成するための方法自体を見直した。土の乾燥方法を調査し、電子レンジやオーブントースター、天日干しといった方法によって乾燥させる方法を検討し、オーブントースターを利用する方法を採用することとした。土体積の測定方法を検討し、体積を乾燥土の比重の統計データから計測する方法などを考案した。

次に、保有設備のベクトルネットワークアナライザ (Agilent 社 N5245A) を拡張して、誘電体プローブ法ソフトウェア (Keysight 社 N1500A) と誘電体プローブキット (Keysight 社 N1501A) を導入した。これにより、200MHz から 20GHz という広い周波数帯において、水分量ごとの土の複素誘電率が測定できるようになった。これらの成果をもとに、複素誘電率の実測を行い、土中イオンの影響を受け

にくい周波数帯を検討した。およそ 10GHz 以上の周波数帯において影響が小さくなる実測結果が得られたことから、平成 27 年度に開発したスタブ型センサにおいては、この周波数帯でピークあるいはノッチが生じるように長さや構造を決定すれば良いことが分かった。以上により、空間分解能と水分量測定精度を向上させるための、伝送線路構造と最適な周波数帯に関して知見が得られた。

【平成 29 年度】

さらなる水分量高精度測定に向けた検討を前年度から継続して進めた。まず、プローブと土壌の接触状態によって測定結果が大きく変動することが問題であることが判明したため、測定の再現性等を評価するために昨年度導入した誘電体プローブキット (Keysight 社 N1501A) を利用した測定を 60 回程度行った。その結果、測定した複素誘電率が正規分布でばらつくことが分かったため、誘電率の平均値や分散を利用して測定結果を評価することとした。土壌中のイオンの影響と水分量を分離して測定する必要があるため、純水と、液体肥料を 250 倍希釈したもの (規定濃度の 2 倍)、液体肥料を 500 倍希釈したもの (規定濃度) の複素誘電率を誘電体プローブキットで計測した。図 2 のように、およそ 5GHz 以下では肥料の有無によって誘電率虚部に差が見られるのに対して、これ以上の周波数帯では実部・虚部ともに差が見られなかった。

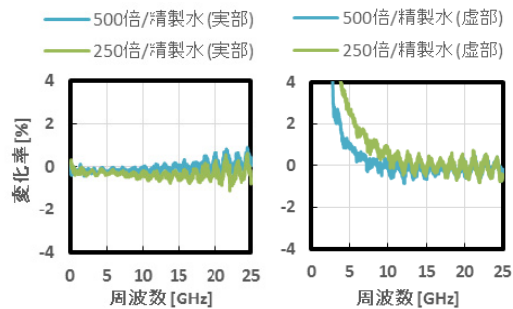


図 2: 複素誘電率に対する肥料の影響

したがって、観測する周波数帯を変えることによって、土壌の水分量や肥料濃度を分離して測定できる可能性があると考えた。精製水あるいは 50 倍希釈液体肥料 (規定濃度の 10 倍) を乾燥土に混ぜて水分量 30% とした土壌サンプルについて、0.1GHz ~ 20GHz の周波数帯において複素誘電率測定を実施した。図 3 のように、両者の誘電率の実部・虚部の差は測定誤差程度であった。明確な差が見られなかった理由については詳細な考察が必要であるが、GHz 帯の周波数を利用することで肥料の影響が少ない状態で土壌水分量測定が可能であることが分かった。

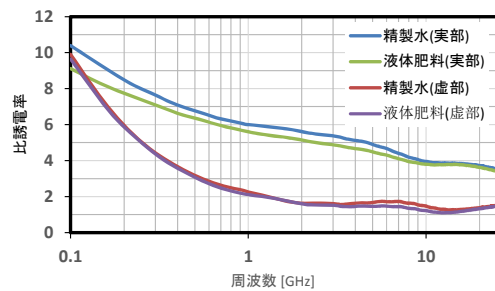


図 3: 水分量 30% の場合の複素誘電率測定結果(60 回平均)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① 小栗 豪, 伊藤 浩之, 石原 昇, 道正 志郎, 益 一哉, 「FDR 法による土壌水分量測定に適した周波数帯の検討」電子情報通信学会 集積回路研究専門委員会学生・若手研究会, 2017 年 12 月 14 日
- ② 伊藤 浩之, 石原 昇, 鹿島 光司, 深水 克郎, 道正 志郎, 大場 隆之, 益 一哉, 「東京工業大学における農業プロジェクトの紹介」, 電子情報通信学会 集積回路研究専門委員会 集積回路技術リテラシー研究会 2017 年 10 月 2 日
- ③ 伊藤 浩之, 石原 昇, 鹿島 光司, 深水 克郎, 大場 隆之, 益 一哉, 「植物のキモチセンシングを目指したアグリエレクトロニクスの研究」, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, BCS-1-6, 2017 年 9 月 15 日
- ④ Hiroyuki Ito, Sho Ikeda, Akifumi Kasamatsu, Yosuke Ishikawa, Shiro Dosho, Noboru Ishihara, and Kazuya Masu, "Piezoelectric Resonator-Based Fractional-N PLL Technology," The 18th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Nov. 2016. (Invited)
- ⑤ 富樫 祐太, 伊藤 浩之, 道正 志郎, 石原 昇, 益 一哉, 「伝送線路を用いた土壌水分量測定技術の検討」, アナログ RF 研究会, 2016 年 3 月 1 日-2 日

[その他]

- ① 伊藤 浩之, 「IoT 用センサノードの開発と応用」川崎市ナノ・マイクロ技術支援講座(ナノ茶論第 10 回セミナー), 2017 年 3 月 16 日, (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 浩之 (ITO, Hiroyuki)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号: 40451992