

TDRによる土壌水分多点同時計測技術の開発

安達 雅 浩^{*1} 梅川 豊 文^{*2}
山中 健 一^{*3} 小杉 賢一朗^{*4}
黒川 悟^{*5} 三野 徹^{*6}

[要 旨]

降雨による侵入水や堤防・堤体への浸透水は、崖くずれ、河川堤防の決壊、アースダムなどの決壊に大きく影響しているため、常時モニタリングすることが望ましい。本研究においては、体積含水率を容易に測定可能なTDR（Time Domain reflectometry：時間領域反射測定法）を用いて、多点同時に測定可能な手法の提案を行った。実際に深度方向に10cmごとにプローブを配置した土壌水分計測センサを試作し、その性能評価を実施した結果、各プローブ毎に独立した測定が可能であることを確認し、土壌水分分布測定へ利用可能であることを検証した。

1 はじめに

近年、集中豪雨や大型台風の上陸回数の増加等により、山林の崖崩れや堤防の決壊等の被害が多発しており、その脅威は計り知れない。被害を最小限にするために、降雨レーダーや気象観測所の整備が行われており、降雨予測や避難勧告発令のための情報ソースとして稼動している。今後降雨被害に対する備えとして、予測精度の向上は必至の課題となっている。現在、国土交通省では崖崩れや土砂災害が起こる危険箇所をリストアップしており、その数は15万箇所を超える。危険箇所の崩壊・決壊の予測には、主に圧力変化のモニタリングの導入が検討されているが、土壌中の各層にお

ける含水率のモニタリングを同時に行うことでその精度を向上することが期待できる。

本研究開発においては、土壌中の含水率（水分濃度）をTDR（Time Domain Reflectometry：時間領域反射測定法）を利用し、水平／垂直方向をリアルタイムに分布測定可能な手法の検討を行い、その性能評価を行った。また現地への施工性を考慮した土壌水分センサを試作し、フィールドテストを実施した。

2 提案手法

土壌水分濃度の測定は多様な方法がある中、TDRはポピュラーで実績のある方法である。従来、高周波伝送線路の特性評価に用いられていたが、比誘電率が高い水はTDR測定においてマッチングする対象であり、土壌水分濃度の定量化に有用である。TDRによる土壌水分濃度測定原理を図1に示す。TDRは高速の立ち上がりを有するステップ波の発生機構と反射波を観測するためのオシロスコープとで構成されている。発生したステップ波

-
- * 1 産学公連携推進室 技師
 - * 2 京都電子工業株式会社
 - * 3 財団法人日本気象協会
 - * 4 京都大学農学部農学研究科 助手
 - * 5 独立行政法人産業技術総合研究所
 - * 6 京都大学農学部農学研究科 教授

信号はケーブルを伝送してプローブ部分を経由し、同経路を戻り、TDR内部のオシロスコープに導かれる。このとき信号には土壌の含水状態によりプローブ部分で時間遅れが生じる。これは土壌中に水分が含まれることで比誘電率が変化するため、TDRはこの変化量から土壌含水率を求めることができる。

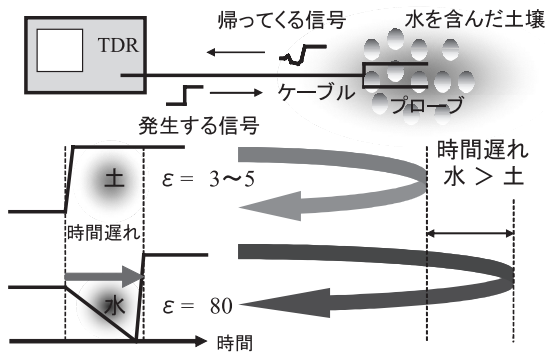


図1 TDRによる土壌水分濃度測定原理

ところでTDRを土壌水分分布測定に用いるためには、TDR本体から測定する位置まで、それぞれケーブルを引き回す必要があるうえ、配線が多くなり、施工面・運用面において工夫を凝らす必要がある。また深さ方向の分布測定に関して、センサは複数プローブを配列しやすく、土中へ貫入しやすい形状にする必要がある。このような課題を克服するために、従来のTDR測定に改良を加え、図2に示すような手法の考案を行った。提案手法では、パルス波と方向性結合器 (Directional Coupler:DC) を組み合わせることで複数プローブからの反射信号を分離することが可能となるため、その位置ごとでの土壌水分濃度をリアルタイムに測定することが可能である。従来なら信号源からプローブまでは1対1でないと測定不可能であるが、本手法であれば、1本のケーブルから延縄 (はえなわ) のように延長可能であるため、省配線で整理がしやすくなり、従来のTDRの課題であ

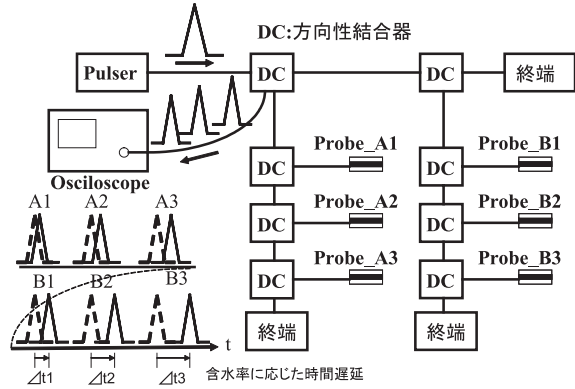


図2 考案したTDRによる土壌水分分布測定手法

る施工面・運用面において改善を図れると考えられる。

3 実験及び結果

3-1 提案手法の性能評価

本提案手法を用いた測定構成により、複数プローブからの反射信号の計測を行った結果を図3に示す。

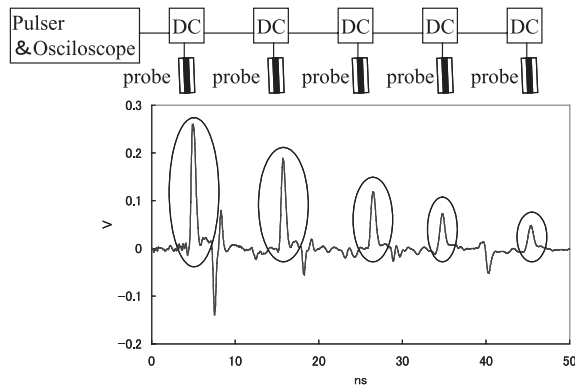


図3 提案手法による測定構成と波形

丸印で囲まれたピークが各プローブからの反射信号であり、それぞれ分離独立した信号として観測されている。レベルが徐々に下がっているのは、方向性結合器の結合効率の影響であり、これはオシロスコープの直前に増幅器を挿入すればレベルの調整が可能である。TDR手法は信号強度の測定ではなく、時間遅延量の測定が重要である。水分

濃度の測定感度は、遅延量をいかに大きくできるか、時間分解能を上げられるかによる。そのためには、土壌水分の反応部分となるプローブ部分の検討が必要である。図4に基礎的検討を行ったプローブを示す。



(a) 3平行線路型プローブ



(b) マイクロストリップ線路型プローブ



(c) コプレーナ線路型プローブ

図4 検討したプローブモデル

(a)は従来から用いられているTDR用プローブで土壌に差し込んだり、埋め込んだりして配置する。単体で利用するには最も手軽であるが、深度方向の分布測定には不向きで施工性も悪い。(b)、(c)は電極部分が誘電体にめっきされており、構造体の形状を自由にできるため、本手法には最適なプローブであると考えられる。(a)を用いて本提案手法による土壌水分濃度変化による波形変化を図5に示す。

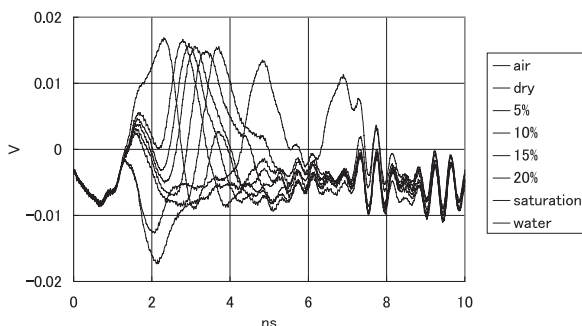


図5 (a)による土壌水分濃度測定

図5において、空気中の波形のピーク値の時間を基準とし、それぞれの土壌水分濃度による波

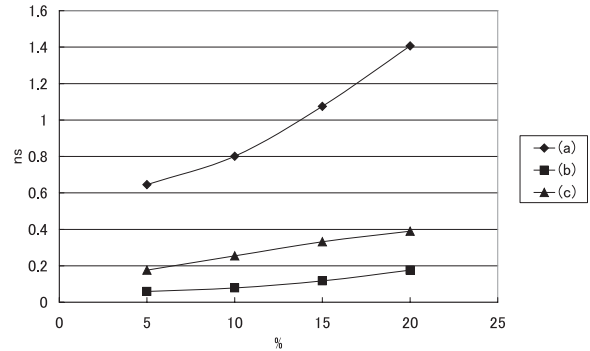


図6 プローブの違いによる土壌水分感度比較

形ピークとの時間差が遅延量となる。空気中の波形は、図5の最も左にピークがあり、凡例の上から順番に、土壌水分濃度が高くなるに従って遅延時間が生じていることがわかる。(b)、(c)においても同様の測定を行い、各プローブの違いによる土壌水分感度比較した結果を図6に示す。

土壌水分濃度 (vol%) に対する、信号遅延量変化を各プローブで比較すると、(a)が最も感度が高く、(b)、(c)はほとんど変化量が少ないことがわかる。これはプローブごとの電磁波伝送モデルにより、遅延時間が異なるためで、伝送の安定性から考えると、(a)が最も外乱を受けやすいとも言い換えられるが、本測定においては有用に作用するモデルであるといえる。また電極部分は長ければ長いほど時間遅延量は多くなり、土壌水分測定感度は向上する。これに対し構造的に有用な(b)、(c)に関しては、肝心の測定感度が低すぎるため、少々電極部分を長くしたとしても、そのまま使用しようとするれば高速測定が必要となり、装置が高価となる。この基礎実験から、高感度化のための長プローブ化、深さ方向の分布測定に最適な形状、長プローブに最適なパルス、フィールド計測のためのコンパクト化を目標として試作機製作を実施した。

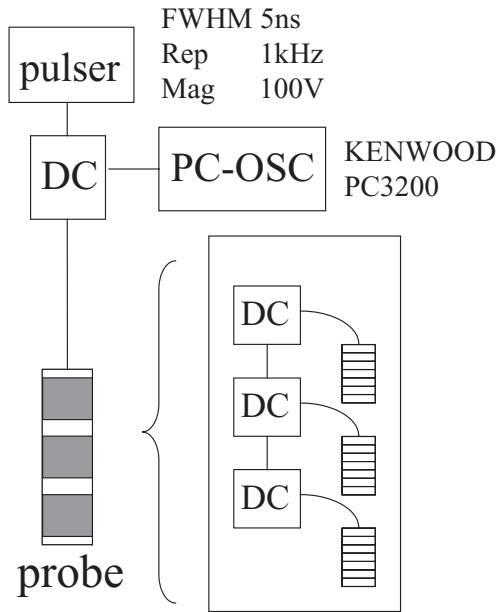


図7 試作機ブロック図



図9 センサ部

3-2 試作機製作

3-1の基礎的検討から土壤水分分布のフィールド測定機の試作を行った。試作機のブロックを図7に示す。

パルサーから発生したFWHM5nsのパルスは方向性結合器で入射/反射を制御され、各プローブ（センサ部）からの土壤水分情報をオシロスコープへ伝送する。試作機を図8に、センサ部を図9に示す。



図8 試作機

図9において、円筒状の樹脂に1対のステンレスの針金を数ミリ間隔でコイル状に巻いたパイプを直径2cmのステンレスパイプに3個縦列して取り付けられている。ステンレスパイプの中空部分には、同軸ケーブルが挿入され、3個のプローブは接続されている。図10にコイル状プローブのモデルを示す。3-1の(a)のグランド電極を1本省略したプローブにおいて、60cmの電極長をコイル状に巻くことで長さが10cm程度となり複数プローブを配置でき、土中への貫入も容易となる。

本試作機及びコイル状プローブの性能について、比誘電率が擬似的に土壤含水率に換算できる液体

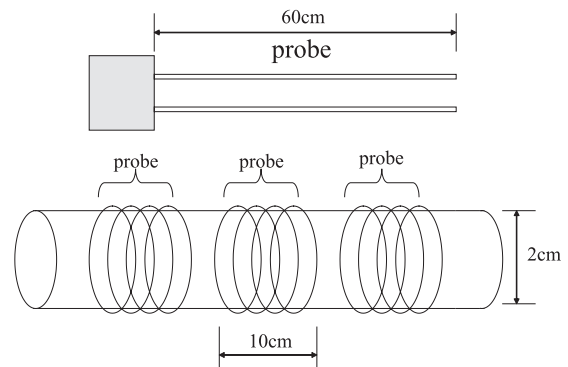


図10 コイル状プローブのモデル

を用いて評価を行った。表1に評価に使用した液体の比誘電率-土壌含水率換算表を示す。

表1 比誘電率-土壌含水率換算表

対象物	比誘電率	等価水分濃度(%)
空気	1.0	0.0
シクロヘキサン	1.4	5.1
ベンゼン	1.5	6.3
酢酸エチル	2.5	19.0
エタノール	5.0	44.3
水50% エタノール 50%	7.3	79.7
水	8.9	100.0

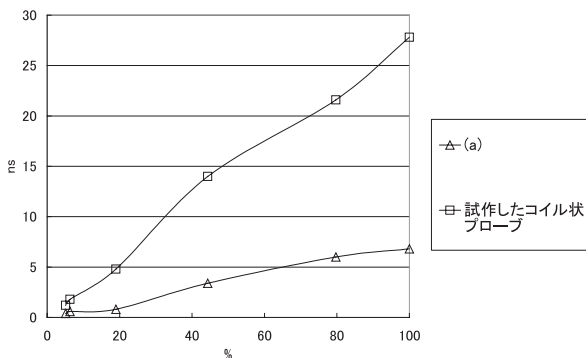


図11 表1液体を用いた試作機でのプローブ感度比較

本試作機を用いたコイル状プローブと3-1(a)のプローブとの感度比較を行った結果を図11に示す。プローブ長は約7.5倍に対し、感度は約4倍となっており、コイル状プローブにより高感度化を図ることができた。またこのことから、遅延時間を多くすることができることから、測定システムの低速化が可能であるため、測定器の低価格化も実現することが可能であることを示唆している。

センサ部（コイル状プローブを3つ縦列配置したとき）の空気中での測定波形を図12に示す。そ

れぞれ独立したパルス波形が確認できる。

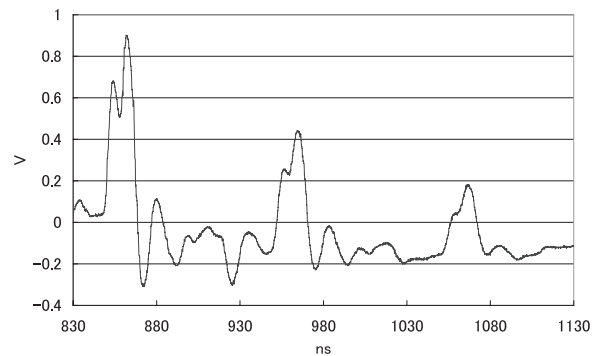


図12 センサ部の測定波形

4 フィールドテスト

製作した試作機を用いて、実地でのフィールドテストを実施した。土質は柔らかく、畑の土に似ていた。センサ部先端には円錐状の突起を付しており、土壌への貫入を考慮した形状にはしているが、このような土質でもそのままでは貫入せず、センサと同径の穴あけパイプを用いて事前に穴あけを行った。すぐそばには、市販の静電容量式の土壌水分計を設置し、比較対象とした。比較対象となる静電容量式は塩分濃度に影響されるというデメリットがある上、高価である。両者の距離は30cm以内で、同等の土質であると考えられる。3つのプローブの深さは、10cm、20cm、30cmとし、比較用測定器の深度も合わせて設置した。センサ設置状況を図13に示す。右が今回試作したセンサである。



図13 センサ設置状況

この状態で20分間散水を行いながら、測定を実施した。また散水終了後、乾燥していく状態の測定を実施した。散水中及び散水後30分まで1分間隔で測定し、その後は変化があまり見られないため、30分間隔で3時間測定を行った。散水時は、ほとんど水浸しの状態で、水溜りができるほどであったが、散水を止めると、水は土中に沁み込み、表面部分は湿った程度の状態となった。試作したTDRと静電容量式（CON）による測定結果を図14、図15に示す。

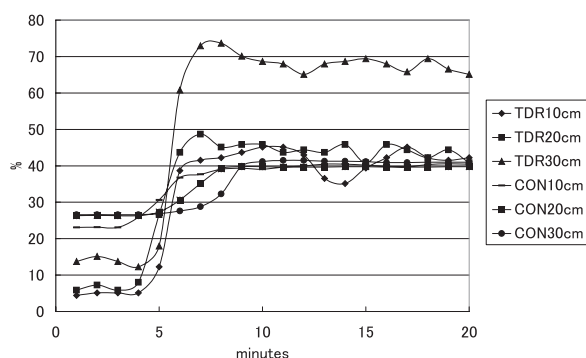


図14 試作センサ深さ方向水分分布測定
(散水時)

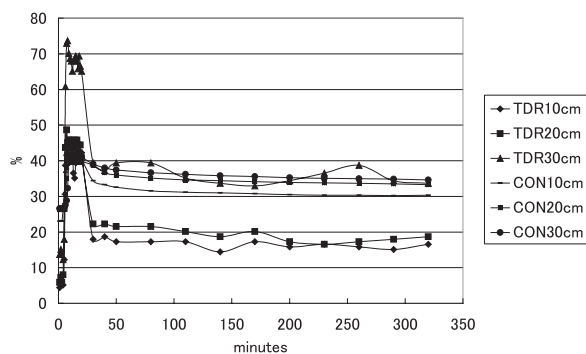


図15 試作センサ深さ方向水分分布測定
(散水時～乾燥)

TDR10cm、TDR20cmの測定値に関して、CON10cm、CON20cmと比較すると、散水時には、ほぼ同程度の水分濃度を示しているが、散水前、散水後においては低めに出力されている。またTDR30cmに関して、CON30cmの測定値と比較すると、散水時には、かなり高くなって

いるが、散水後においては、ほぼ同程度の水分濃度となっている。これはTDRのプロブと土壌との密着性の課題であると考えられる。静電容量式センサは非接触式であり、直接土壌と電極は接触していないが、TDRのプロブは接触式であるため、土壌との密着が測定には不可欠である。TDRのプロブが3個配置されたロッド状のセンサを土中に貫入する際、先端に近い方のプロブの密着性は高いが、手元の2個のプロブは土壌との間に空気が入りやすくなる。また畑のような土質であるため、散水時に土は泥状になり、先端に近い方のプロブにはまとわりつくような状態になっていることが想像される。このことからプロブと土壌との密着性を向上させるためにセンサ部をテーパ状や階段状にする等改良が必要である。

5 まとめ

本研究開発においては、TDRによる土壌水分分布測定手法の開発を行い、試作機を製作し、性能評価を実施した。また実際に農場でのフィールドテストを実施し、静電容量式測定器との比較実験を行った。性能評価においては、TDR測定の相性が良い液体では良好な結果を得たが、畑のような土壌におけるフィールドテストでは、課題が残る結果となった。

今後はセンサ部の改良が必要である。また実用化に向けて、土質の違いによる比較や塩分による影響についても検討する必要がある。