

土壌水分を測定するセンサー

農地基盤工学研究領域 畑整備ユニット 岩田幸良・宮本輝仁・亀山幸司

作物は根から土壌中の水を吸うため、土壌水分は作物が正常に生育するために必要不可欠です。表面の土壌が乾燥しているかどうかはある程度は色で判断できますが、表面が乾いていてもその下には水が十分にあることがあります。また、葉がしおれてくれば水が足りないと推察できますが、葉がしおれてきたときには作物にとって取り返しがつかない状態になっている場合もあります。このように、土の中は見えないので、水が十分足りているかどうかを見た目で判断することは難しい場合が多いです。さらに、農業農村工学の分野では、畑地灌漑計画をたてる際に灌漑水量を算定し、それに応じた灌漑施設を設計する必要がありますが、作物が必要とする水分量を算定する根拠として土壌水分量の測定が必要となる場合があります。土壌水分量を測定する最も確実な方法は、実際に土を採取して重さを測定し、105~110℃のオーブンで重さが変わらなくなるまで、通常1~2日程度乾燥させた後の重さを測定することですが、いちいち土壌を採取するのは面倒くさいですし、土壌を採取するときに根を傷つけてしまうリスクがあります。そこで、土壌水分を測定するセンサーが開発されました。

土壌水分センサーは、単位体積に占める土壌水分の割合である土壌水分量を測定するものと、土壌にどの程度の力で水が保持されているかを示す指標であるマトリックポテンシャルを測定するものがあります。土壌水分量に比べ、マトリックポテンシャルは聞きなれない言葉かもしれませんが。土壌水分センサーにより土壌中にどれだけ水があるかがわかりますが、水があっても粘土などに強い力で保持された水は作物が使うことができません。どの程度使えない水があるかは土壌の種類により異なります。そこで、例えば灌水のタイミングを土壌水分量から正確に知ることは難しく、マトリックポテンシャルの測定が有効になります。ここでは、土壌水分量を測定するセンサーとマトリックポテンシャルを測定するセンサーについて、今日使われているものを中心に、簡単な測定原理の説明と共に紹介します。

1. 土壌水分量を測定するセンサー

今日ではほとんどの場合、土壌の誘電特性を測定することで土壌水分量を測定するセンサーが使われています。土壌は主に、水・空気・土粒子から構成されますが、水の比誘電率が80程度なのに対し、空気は1、土粒子は2~5程度と圧倒的に小さいため、水の割合で土壌全体の比誘電率が決まってきます。そのため、誘電特性を測定することで、土壌の密度や鉱物組成が多少変わっても、土壌水分量と誘電特性の関係が変化せず、頻繁に値を補正することなく、正確な土壌水分量が計測できるようになりました。このタイプのセンサーは、誘電特性をどう測定するかにより、いくつかのタイプに分けられます。

1. 1 TDR 土壌水分計(Time Domain Reflectometry:時間領域反射法)

1970 年代にカナダで開発された土壌水分計で、誘電特性から土壌水分量を測定する方法の元祖になります。ケーブルテスターという、通信ケーブルの断線がどのあたりで発生しているかを探るための計測機器を応用したもので、土壌に埋設された金属ロッドにマイクロ波を流し、金属ロッドの根元から先端までマイクロ波が通過するのにかかる時間を測定することで土壌の比誘電率を測定します。マイクロ波の波形解析が必要なため、昔は図 1 に示すような大きくて高価なケーブルテスターを使わないと測定できませんでした。しかし、現在では図 2 に示すようなコンパクトで、従来法と比較するとずっと安価な TDR 式土壌水分計も開発されており、この方法による野外観測もだいぶやりやすくなりました。

TDR 土壌水分計は水分量だけではなく、同時に土壌の電気伝導度を測定できるという特徴があります。

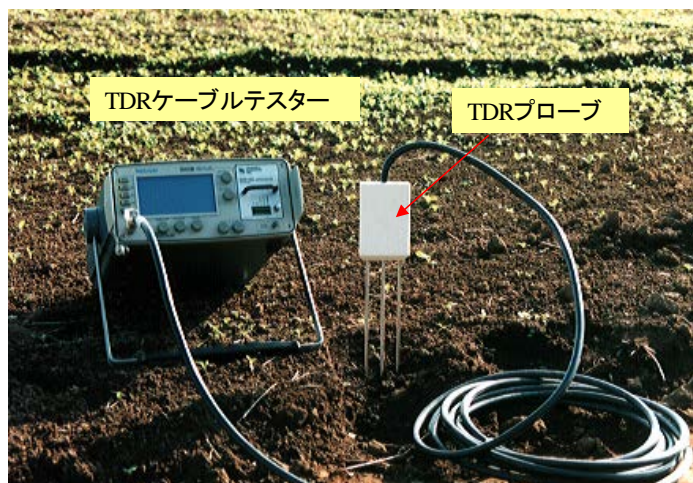


図 1 TDR 方式による土壌水分量の測定システム



図 2 近年開発されたコンパクトな TDR 土壌水分計。図 1 のケーブルテスターに相当するものが、アンテナの根元の黒い部分に収まっている。

1. 2 TDT 土壌水分計(Time Domain Transmission:時間領域透過法)

TDR 土壌水分計と同様にマイクロ波を照射して土壌の比誘電率を測定しますが、図 3 のようにアンテナ部分がループしていて、片側から照射されたマイクロ波が検出器に戻ってきます。TDR 土壌水分計と同様に土壌の電気伝導度も測定できます。図 3 の水分計は、図 2 の TDR 土壌水分計よりも若干安いですが、アンテナの形状から土壌に挿すことが難しいため、耕起直後の作土層や砂などでしか使用できず、TDR 土壌水分計と比べると使用場面が限られると考えられます。



図 3 TDT 土壌水分計

1. 3 WCR 土壌水分計(Water Content Reflectometer)

WCR 土壌水分計も TDR 土壌水分計と同様にマイクロ波を照射し、金属ロッド部分の伝達速度を評価することで誘電特性を測定するのですが、このセンサーは波形を直接みることができず、単位時間にマイクロ波が金属ロッド先端で反射して戻ってきた回数をもとに伝達速度を算定します。WCR 土壌水分計では、メーカーが作成した校正式で土壌水分量に計算された値のみが出力されます。図 4 のような形状のものが多く、土壌水分量のみを測定できるものと、別の計測機器をセンサーに組み込んで電気伝導度や温度も同時に測定できるようにしたもの 2 つのタイプが市販されています。また、畑で簡単に土壌水分量が測定できるように、水分計のアンテナ部分を太くし、かつ腰を屈めなくても土壤にアンテナ部を挿しやすいうに工夫したものも市販されています(図 5)。

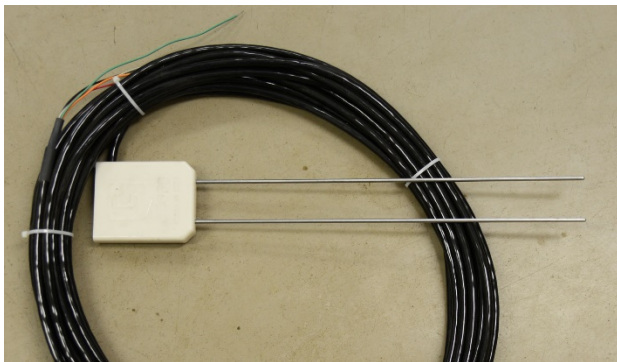


図 4 WCR 土壌水分計



図 5 畑で簡単に水分量を測定できるように工夫した WCR 土壌水分計

1. 4 キャパシタンス式土壌水分計

この水分計は、センサーに電圧をかけ、センサー内のコンデンサーの充電時間から静電容量を測定します。静電容量が比誘電率の影響を受けることから、比誘電率を測定する TDR 土壌水分計などのセンサーと同様に土壤の誘電特性が測定され、土壌水分量が計測できます。

このタイプの水分計も、基本的には水分量のみが測定が可能です(図 6)、その他のセンサーと組み合わせて電気伝導度と温度を同時に測定できるように工夫したセンサーも市販されています(図 7)。図 6



図 6 キャパシタンス式土壌水分計



図7 電気伝導度や地温の同時計測が可能なキャパシタンス式土壤水分計



図8 土壌に挿しやすように改良されたキャパシタンス式土壤水分計とその場で簡便に水分量の測定が可能な読み取り機

や図7のセンサーのように、センサー全体が樹脂のタイプが多いですが、図8のように金属を使用して土壌に挿しやすくしたタイプもあります。腰を屈めなければいけませんが、この水分計を読み取り機に接続することで、野外で簡便に水分を計測することが可能になります(図8)。

キャパシタンス式土壤水分計はその他の水分計と比較して安価なため、急速に普及が進みました。このセンサーが出始めたころには耐久性の問題や電気伝導度の影響をその他の水分計よりも受けやすいなどの問題点が指摘され、“安かろう、悪かろう”などという批判もありました。しかし、近年では改良が進み、他の水分計と遜色なく土壤水分量が測定できるようになりました。

1. 5 その他の水分計

・ADR 土壤水分計(Amplitude Domain Reflectometry:振幅領域反射法)

TDR 土壤水分計等と同様に土壌の誘電特性の測定により土壤水分量を測定する計測機器です。ほかの水分計に比べ、土壌の電気伝導度の影響を受けにくく、測定精度が高いなどのメリットが指摘されていますが、他の水分計よりも高価であることや、電気伝導度の測定ができないこと、他の水分計でも十分な精度で土壤水分量の測定が可能になってきたことなどの理由から、最近では国内では使用事例があまり報告されなくなってきました。

・電極式土壤水分計

土壌の電気伝導度は水分量に依存するため、土壌に電極を挿して電気抵抗を測定することで水分量を測定する方法です。当然のことですが、電気伝導度や乾燥密度にかなり影響されます。これらの影響を緩和するために、石こうブロックやナイロンで電極を包むことで改良したセンサーが開発されました。特に、石こうブロックで包むタイプは「石こうブロック

土壌水分計」として知られていますが、やはり電気伝導度や密度の影響を大きく受けるため、誘電特性から水分量を測定するタイプのセンサーの普及と共にほとんど見なくなりました。しかし、電気抵抗や密度が大きく変わらない場合には、土壌の乾湿に関する大まかな情報は得られます。電気回路もほとんどなく、非常に安価に作成が可能なことから、使用場面によっては最近、土壌水分量の推定にこのタイプのセンサーが見直されつつあるようです。

- ・ヒートプローブ土壌水分計

ヒートプローブは、土壌の熱伝導率や比熱を測定するためのセンサーです。水の比熱は土粒子の密度より 5 倍ほど大きいことから、土壌の比熱は土壌水分量に大きく依存します。そのため、ヒートプローブで比熱を測定することで、土壌水分量の推定が可能になります。このセンサーを使って野外で長期的に土壌水分量を測定した事例もありますが、土粒子の比熱も無視できないことから、乾燥密度の影響を受けるため、正確な測定には頻繁にキャリブレーションをする必要がありました。そのため、この水分計も誘電特性を測定する水分計の普及に伴いほとんど使われなくなりました。

- ・中性子土壌水分計

放射線の一種の中性子線を照射し、その吸収量から土壌水分量を測定する水分計です。計測機器が高価であることと、安全性の面から取り扱いに注意が必要なこと、乾燥密度の影響を受けることなどの理由から、国内での使用実績はあまりありません。一方、誘電特性を測定するタイプの土壌水分計が液体の水しか測定できないのに対し、中性子水分計では氷を含んだトータルの水分量が測定できるため、土壌が凍結するような寒冷地では使用される場面が多い水分計です。

2. マトリックポテンシャルを測定するセンサー

スポンジのように、土壌中にはたくさんの隙間があります。スポンジが水を吸う力(毛管力)に相当する力がマトリックポテンシャルです。作物根はこの力に負けない力で土壌から水を吸収するため、マトリックポテンシャルを測定することで灌水のタイミングを知ることができます。また、飽和に近い場合にはマトリックポテンシャルがほぼゼロになるため、湿害のリスクの指標とする場合もあります。

2. 1 テンシオメータ

20 世紀の初めに開発されてから今日でも使われている、土壌水分測定用のロングセラー機です。図 9 に示すように、素焼きのカップ(陶芸のように、粘土を焼いて作成したもの)とパイプを接着し、中を水で満たして密閉したものです。素焼きカップが水は通すけれど空気は通さないため、容器内の水の圧力(負圧)を圧力センサーで測定することでマトリックポテンシャルが測定できます。

土壌が乾燥すると(圧力水頭で-700 cm 以下、pF 値では pF2.8 以上)、素焼きカップやち

よった容器の隙間から空気が入ってしまい、正確な測定が困難になります。作物が水ストレスを受け始めるのが圧力水頭で $-1,000\text{ cm(pF3.0)}$ 、作物が枯れてしまうのが $-10,000\text{ cm}$ 以下(pF4.2 以上)とされているため、灌水のタイミングを正確に知りたい場合にはあまり適したセンサーとは言えません。さらに、土壌が乾燥するとテンシオメータの中の水が減ってしまうため、水がなくなったかどうかを定期的にチェックし、必要に応じて水を補充しなければならぬため、観測の手間がかかります。

これらの弱点はありますが、比較的湿潤な場合には正確にマトリックポテンシャルが測定できるため、湿害が生じるリスクを評価する場合や、表層よりも湿潤な下層のマトリックポテンシャルを測定する場合などにテンシオメータが使われます。

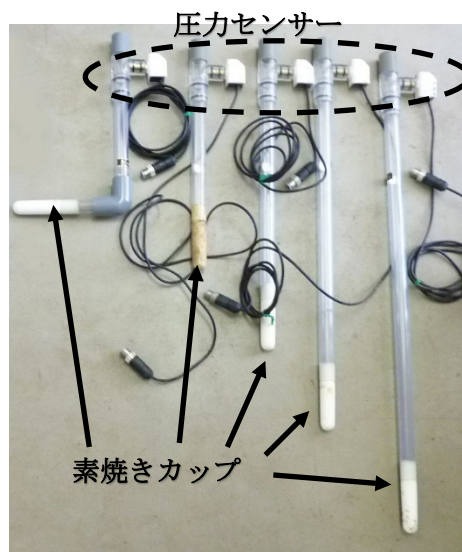


図9 テンシオメータ

図9に示した圧力センサーを使用したタイプ他、アナログ式の圧力計がついたものも市販されています。圧力センサーはデータロガー等に接続すれば連続データが得られますが、アナログ式に比べると高価になります。その場で乾燥程度がわかるという気軽さもあり、アナログ式のテンシオメータは農業現場で使われています。その他、先端に素焼きカップのついたパイプに水を入れ、ゴム栓で蓋をして畑に設置し、注射針のついたデジタル式の圧力計を測定時にゴム栓に挿してマトリックポテンシャルを測定するタイプもあります。圧力計を携帯しなければならないため、気軽さではアナログ式のテンシオメータには劣りますが、圧力計が1つあれば良いため、多点で測定する場合にはトータルコストを抑えることができます。この方法はメルマガでも過去に詳しく紹介されていますので、興味をお持ちの方はこちらも参照いただければ幸いです(<http://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/m/34/04-01.pdf>)。

2. 2 誘電特性を測定する土壌水分計を応用したタイプ

しばらくの間、マトリックポテンシャルを測定するセンサーはテンシオメータくらいしかなかったのですが、誘電率を測定する土壌水分計が開発されたことから、20世紀の終わりくらいからようやく新しい計測機器が開発されました。最初に開発されたのは、ADR土壌水分計のアンテナ部分を多孔質の素材でつつみ、素材部分の水分量の測定値をマトリックポテンシャルに換算するというものです。テンシオメータの弱点であった、乾燥した土壌のマトリックポテンシャルがうまく測定できないという点を克服しており、灌水のタイミングを知る目的には適したセンサーです。テンシオメータのように定期的に水を補充する必要もありません。これらのメリットがありますが、ADR土壌水分計が高価なこともあり、

このセンサーも高価になってしまい、今一つ普及が進みませんでした。

これと似た原理で、より安価なセンサーがキャパシタンス式土壌水分計をベースに開発されました(図 10)。このセンサーは、土壌水分計を素焼きの板でサンドイッチして、素焼きの中の水分量(誘電特性)を測定し、これをマトリックポテンシャルに換算します。キャパシタンス式土壌水分計よりも高価になりますが、ADR 方式のセンサーよりもずっと安価なため、このセンサーを使った事例がいくつか報告されています。このセンサーも、テンシオメータが苦手とする比較的乾燥した土壌のマトリックポテンシャルが測定可能ですし、メンテナンスのわずらわしさもありません。



図 10 キャパシタンス式土壌水分計をベースにしたマトリックポテンシャルを測定するセンサー

これらのセンサーは、乾燥した土壌で有効に使用できる反面、圧力水頭が -100 cm(pF2.0) よりも土壌が湿潤な場合にはマトリックポテンシャルをうまく測定できないという特徴があります。残念ながら、マトリックポテンシャルについては、1 台で乾燥から湿潤まで測定できるようなセンサーは現時点ではありません。

2. 3 電極式ポテンシャル計

ナイロンのような繊維質の素材で電極を包み、素材の中の電気抵抗を測定するタイプのセンサーです(図 11)。石こうブロック土壌水分計など、過去に土壌水分量を測定する目的で同様のセンサーが検討されましたが、誘電特性を測定するタイプの土壌水分計の開発により廃れていったこの方式が、今度はマトリックポテンシャルの測定に応用されているのが興味深いです。テンシオメータと同様に、パイプ(図 11 は内径 18mm、肉厚 2mm のパイプ)の先端に接着し、ドリルで穴を開けて土壌に挿入することで畑に設置します。

電極を包む素材の特性を工夫した結果だと思いますが、このセンサーは比較的湿潤な土壌のマトリックポテンシャルの測定に適しています。原理上、土壌の電気伝導度の影響を受けるため、テンシオメータに比べて測定精度は落ちるはずですが、安価であることとメンテナンスがいらぬことから、栽培分野では普及が進んでいるようです。



図 11 電極式ポテンシャル計

3. おわりに

野外で土壌水分を測定する際には、その目的に応じて、求められる測定精度を考慮し、最適な土壌水分計や個数を与えられた予算内で決定する必要があります。ここでは触れませんでした、畑の土壌水分は均一でない場合が多く、平均的な土壌水分量を測定したい場合

には何点か測定する必要がある場合があります。あるいは、深さ方向の土壌水分量の変化を知りたい場合にも、土壌水分計が複数必要になります。求められる測定精度を満たしていることは重要ですが、このような場合には予算の制約も考えながら使用するセンサーを選ばなければなりません。また、日本に多く分布する黒ボク土など、いくつかの土壌ではメーカーが提供する校正式が使用できず、センサーの出力値から土壌毎の校正式を用いて土壌水分量を計算する必要があります。これらいくつかの注意事項はありますが、今日ではデータの記録デバイスなどの周辺機器の操作性を含め、初めての人でも比較的簡単に土壌水分量やマトリックポテンシャルが測定できるようになりました。土壌水分の測定の必要性を感じているようでしたら、ぜひトライしてみてください。