

土壌水分測定のための TDR コイルプローブの開発

開発一郎*・Nissen, H. **・Moldrup, P. **・山中 勤***

はじめに

近年、不飽和土の水分量測定のために高周波誘電率を利用した TDR (Time domain reflectometry) 法が有効であることは、Topp *et al.* (1980) 以来多くの研究で認められてきている。実際、不飽和帯の水分管理や地下水涵養の水分移動観測にこの方法が標準的な方法として採用されることが多くなってきている。

TDR プローブはロッドが平行 2 線・3 線式のものが多く、現実的には電磁波の伝送エネルギーの問題から理論上ロッドの太さや長さには限界 (Tektronix, 1988) があり、またその形状は制約も受ける。例えば、市販のケーブルテスター (Tektronix 1502B) の測定分解能は 3cm であるし、測定精度を落とさないためには一般にロッド長を短くすればロッド径も小さくしなければならない。市販の TDR 平行 2 線・3 線式プローブのロッド長は大体 30cm 8cm、ロッド径は 3mm 10 数 mm であり (1 本モールド式のものもある: Hook *et al.*, (1992))、これはある程度平均的な範囲の水分を測定できるようにと配慮されているが、長さにして 10cm 前後、太さで数 mm (材質はステンレス) のものが主流である。

地表面超薄層 (深度 0-5cm の土壌空間) の土壌水分の測定は、従来からの地表面蒸発の研究や近年の大気 地表面の水分交換の解明の立場から重要であり、鉛直方向により細かくて正確な水分量を得る

ことが求められている。しかし現在、現実には上述のように従来型の水分プローブでは 1-3cm の空間で土壌水分測定をすることは非常に困難である。今までとはまったく異なる発想でより小さなプローブを作ることが不可欠と思われる。またこのようなミクロスケールの水分プローブを開発することは模型実験やミクロスケールの不飽和水分移動と物質移動研究においても意義あることと考えられる。

本研究ではこのような背景のもとに、より小さくしかも耐久性のある TDR プローブの開発を目標とし、今回は Nissen *et al.* (1998) の TDR コイルプローブに若干改良を加えたもの (感部を長くしたもの) を提案し、従来のものから感部の長さが変わるとどのような影響がでるのかを調べ、野外への適用のための基礎実験を行った。具体的には現場土壌 (モンゴル国の IHP 試験域の表層有機土壌) での誘電率と土壌水分の関係 (現場土壌キャリブレーション) および温度の影響の検討を行い、夏季に野外への実際の適用を試みたものである。

TDR コイルプローブ

TDR コイルプローブ (以下、CP とする) の概観を写真 1 に示す。この写真には CP のほかに従来型の TDR 平行 2 線プローブ (以下、2WP とする) サークットプローブ、TDT 同心円平行 2 線プローブ (日本地下水学会編、2001) が写っている。

*広島大学総合科学部 ** Arborg University, Netherlands ***筑波大学陸域環境研究センター

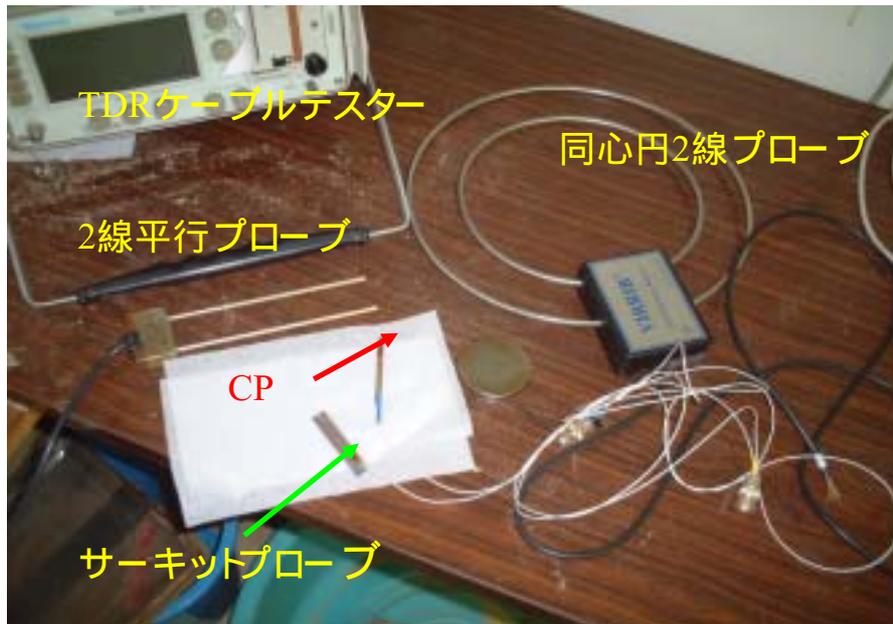


写真1 種々の TDR 水分プローブ

図1に Nissen *et al.* (1998)のプロトタイプ CP (15mm 感部型)の構造を示す。CPは同軸ケーブルの心線につながっているエナメル線を金属棒に100数十回ほぼ等間隔で巻き、その表面に特殊ラッカーを塗布(絶縁保護化)し、その上に同軸ケーブルのシールド線と繋がっている極細

の金属棒(直径 0.45mm:真鍮製)を90度毎に4本を束ねてさらに特殊ラッカーを塗ってある。直接の感部は図1(a)のエナメル線を巻いた部分(15mm)であり。その表面から極座標方向に約4mmの周囲までの土壌誘電率を測定(室内実験で確認済み)している。

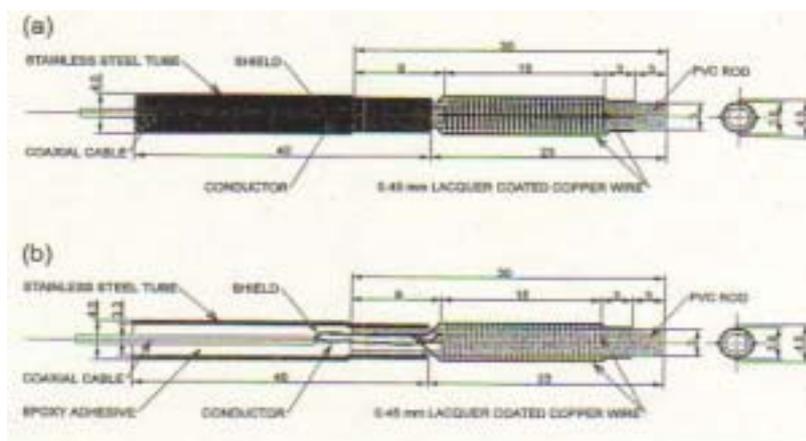


図1 15mmCPの概観(a)と断面(b)

今回は基本的には同じ素材を使い、感部を15mmから40mmに伸ばしたものを作製し、ロッド軸方向に測定範囲を大きくした。

誘電率と土壤水分の関係

まず、土壤の誘電率 D とサンプリング土壤水分量 VWC の関係があるかどうかの基本実験を実施した。実験試料は野外試験地であるモンゴル国ウランバートル市郊外のセルベ川試験流域試験地（サンザイサイト：IHP 試験地）の地表面薄層（深度 0-15cm）の有機土壌（有機分重量比：27%、間隙率：0.71、乾燥密度：0.413g/cm³、飽和透水係数：1.34 x 10⁻² cm/sec）であった。

実験は所定の PVC 容器（直径 13cm、高さ 13cm）に適度に段階的に蒸留水を加え

ながら均一に混ぜ、その都度容器にほぼ均一の密度になるように充填して CP を鉛直方向に挿入して TDR ケーブルテスターで走行時間 t_t を測定した。TDR ケーブルテスターによる既知誘電率 D_c 液体での CP での走行時間 t_t の実験式（ D_c t_t の関係式）をあらかじめ得ておき、この t_t を D t_t 関係式に入れて誘電率 D を求めれば、これとサンプリング土壤水分量 VWC との関係が明らかになる。CP との比較検討のため同時にステンレス製 2WP（ロッド径：2mm、ロッド長：10cm、ロッド間隔：2.5cm）での測定も行った。その結果が図 2 と図 3 である。

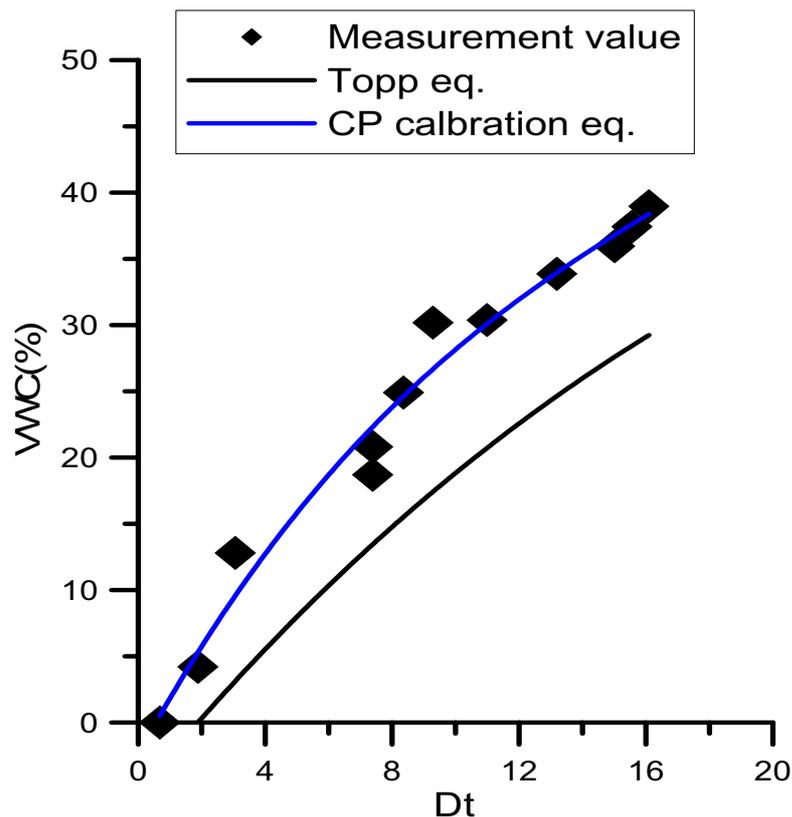


図 2 2WP の誘電率 D_t と土壤水分 VWC の関係

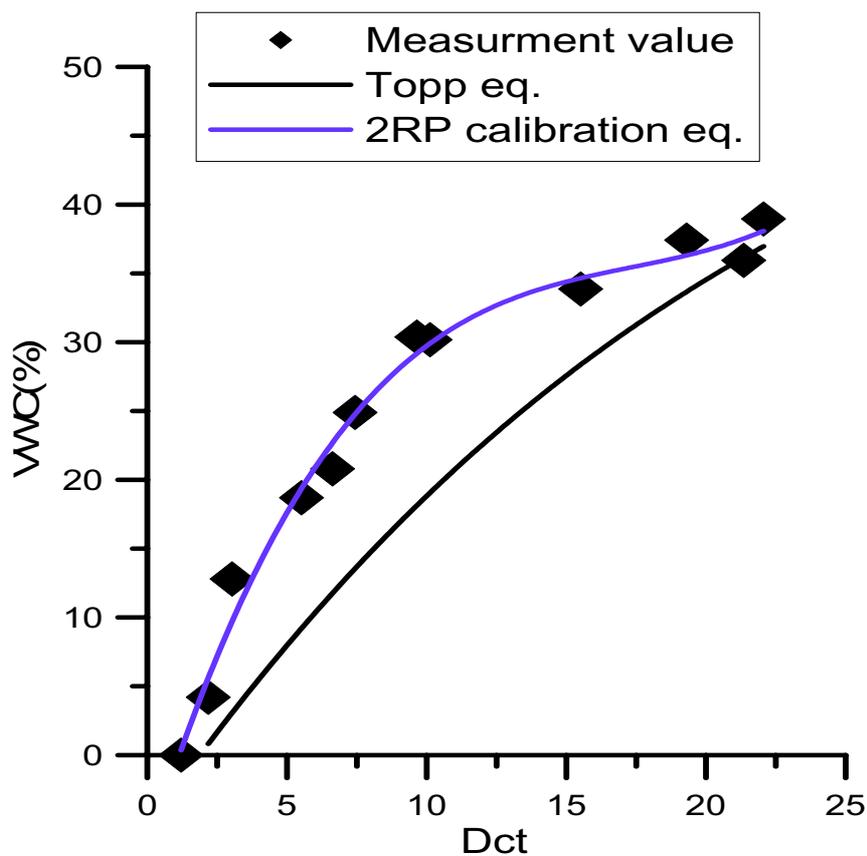


図3 CPの誘電率 D_{ct} と土壌水分 VWC の関係

いずれの図においても鉱物系土壌のユニバーサル式である Topp *et al.* (1980) の式を示してあるが、どちらの誘電率も VWC と一価の関係があることが分かる。ただ明らかに鉱物系土壌の結果とは量的には異なり、本試料について独自の関係があるといえる。結果として図3の結果は 40mmCP でも走行時間を測定すれば土壌水分量が得られることを示唆している。

温度の影響

Nissen *et al.* (1998) のプロトタイプ CP では温度の影響についての議論がなされていない。水の誘電率は、そもそも温度の関数で表されており (例えば、Eisenberg and Kauzmann, 1969)、誘電率

が温度の影響をある程度受けることは分かっている。従って、TDR 水分測定でもその影響が出てもおかしくなく、実験的には高温になるにつれ、特に 40 から 50 以上になると測定精度が明らかに影響してくる (例えば、Or and Wraith, 1999)。市販の TDR 水分計でもメーカーによってその違いは歴然としており、仕様範囲内で収まらないものもある。夏季の地表面での地温日変化の激しいところでは、TDR 測定水分にも日変化の影響が顕著に出る。山中他 (2003) はモンゴル高原での TDR 水分センサーの温度ノイズを除去する現地での方法を提案し、良好な結果を得ている。

本研究では、恒温槽 (内寸: 40cm 幅、45cm 高、40cm 奥行) 内で一定の温度下で

前述と同様の手順で実験を行ったが、試料は豊浦標準砂（空隙率：0.429、乾燥密度：1.455g/cm³、飽和透水係数：1.36 × 10⁻² cm/sec）を用いた。尚、温度は所定温度の±1～2 以内で制御された。図 4 はそ

の結果である。一見して、CP の測定誘電率が、少なくとも室内実験ではどの水分状態でも温度による影響を受けないと認められる。

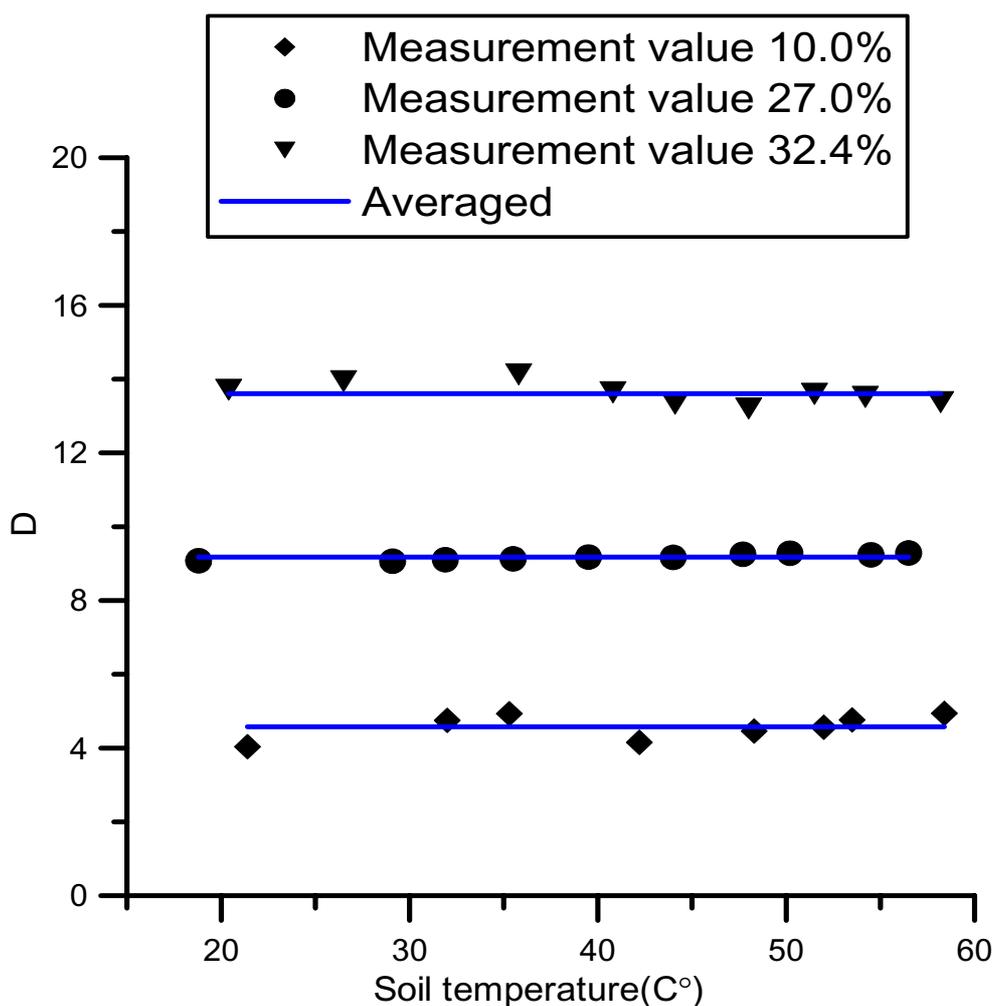


図 4 CP の測定誘電率と試料温度の関係

CP の野外測定

CP を実際に野外でどの程度使えるか、モンゴル国の IHP 試験地（サンザイサイト）で試験を行った。サンザイサイトはセルベ川の氾濫原にあり、地表面は一面

牧草で覆われ、比高にして 10cm-20cm、直径にして 30-50cm のアースハンモックが数十 cm 離れて点在している。ここに水循環ステーション（WaCS:Water Cycle Station）を設置し、前述の 2WP と CP を平面的に 10cm-15cm 離して同深度に水平

に挿入しながら埋設した。深度 3cm には CP2 本を約 10cm 離してそれぞれ埋設した。測定は WaCS のデータ収録システム (Campbell CR10X) と TDR 水分測定システム (Campbell TDR100) およびマルチプレクサー (Campbell SDMX50) を用いて 1 時間毎に実施した。図 5 は CP によるサンザイサイトでの 2001 年 7 月から 9 月までの観測結果例である。

この結果を見ると、まず CP の降雨に対する応答は明確であることが分かる。また深度 3cm の 2 つの CP の測定結果では、降雨に対しての水分変化および蒸発・排水過程での水分変化に差があるが、これは土壌構造や細かな降雨分布の違いに依存しているものと思われる。少なくとも、

ここでは土壌水分測定には土壌の代表性の問題から単一の CP の測定値のみでは問題があると考えられる。

3cm 深度 CP の水分測定値に降雨後毎日小さな日変化 (日平均値の $\pm 0.8\%$ 以下) がみられ、8 月中旬から下旬 (蒸発・排水過程) にかけてわずかに増加傾向にある。これに対して 3cm 深度地温が期間中 2.5 から 23.4 まで変化し、降雨後微小な日変化がみられ、観測期間の終わりにかけてやはり日変化の幅は極微小ながら増加傾向にあった。しかし実際の測定精度から考えると、日平均的データの取得が目的ならばそれは問題になるとは思われない。

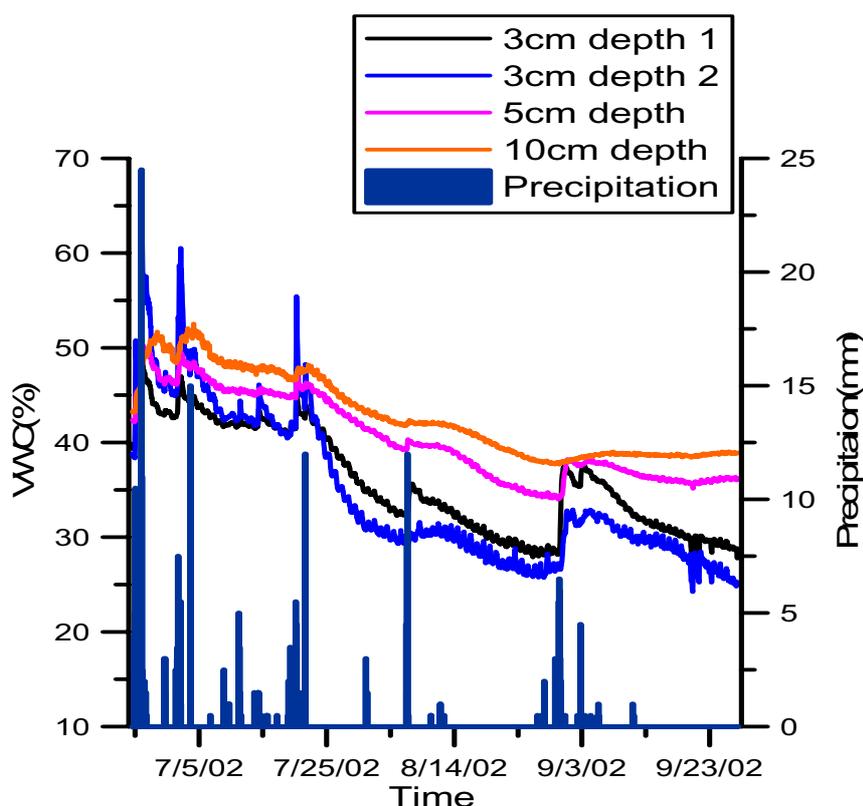


図 5 サンザイサイトでの CP による土壌水分と降水の測定結果

図6は2WPの測定結果である。CPと同様に降雨に対する応答は明確である。深度3cmCPと深度3cm2WPを比較すると、変化パターンはほぼ同じであるが、量的には降雨の多い(水分量の高い状態)観測期間前半はCP値が2WPより数%大きく、その後半は大体同じか2PWが少し大きいといえる。

各深度の2WPの測定値をみてみると、7月末以降の深度3cmと深度40cmのものが明らかに日変化を示している。深度10cmも若干その期間後半に日変化がみられる。深度40cmの地温は9月末まではほとんど

6から8の間であり、日変化はほとんどみられなかった。しかし深度40cm2WPの測定結果は観測期間の始めから日変化を示している。CPの日変化との結果も踏まえると、原因はまだよく分からないが、地温の日変化が直接CPに影響しているのではなく、測定システム自体が気温他の影響を受けている可能性がある。また、深度3cm2WPでは7月下旬から激しい日変化がみられるが、このころから気温や地温の日変化が著しくなったわけでもなく、ハード的な原因かもしれない。

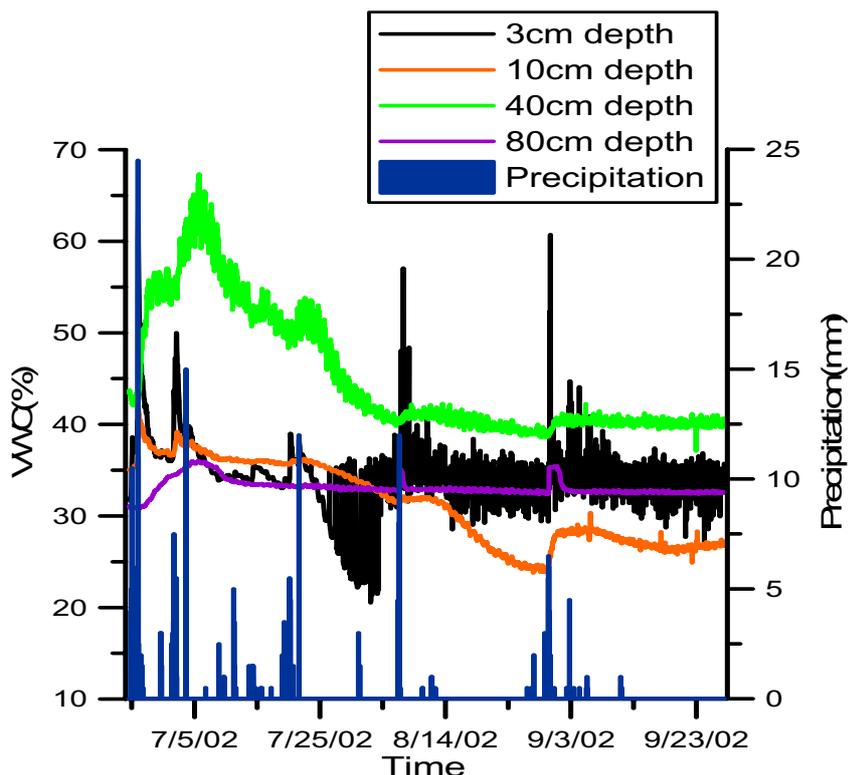


図6 サンザイトでの2PWによる土壤水分と降水の測定結果

おわりに

本研究では Nissen *et al.* (1998) の TDR

コイルプローブの感部を長くしたものについて調べ、15mm 感部のものと同様に土壤水分測定に使用できることを確認した。

またそれを実際の野外へ適用し、空間代表性の問題はあるものの野外での測定に有効であることを示唆した。また、CPの測定誘電率の温度との関係を調べ、鉱物系土壌についてはあまり影響がないという結果を得た。今後は、もう少し他の土壌でのCPの温度影響の評価や冬季での耐久性について調べる必要があると思われる。

謝辞

本研究の実験に協力いただいた岩永幸樹氏に謝意を表す。また、本研究は宇宙開発事業団(NASDA)との共同研究「モンゴル高原におけるAMSRとGLIの地表面の土壌水分と地球物理及び植生パラメータの評価のための地上検証」(研究代表者:開発一郎)の一部として行なわれた。さらに平和中島財団アジア地域重点学術研究助成金ならびに日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究C、13838009)の研究経費を一部使用した。

引用文献

- 日本地下水学会編(2001):「雨水浸透・地下水涵養」、東京、理工図書、160p.
- 山中 勤、開発一郎、Oyunbaatar、D.(2003):TDRによる水分量測定値の温度依存性とその原位置測定データに基づく補正、水文・水資源学会誌、16(3)(印刷中)
- Eisenberg, D. and W. Kauzmann(1969): *The Structure and Properties of Water*, Oxford Univ. Press, Oxford, 296p.
- Nissen, H.H., P. Moldrup, and K. Henriksen(1998):High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, 1203-1211.
- Or, D. and J.M. Wraith(1999):Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity

- measured by time domain reflectometry:A physical model, *Water Resour. Res.*, 35(2), 371-383.
- Tektronix (1988):*1502B Metallic Time Domain Reflectometer Operator Manual*
- Topp,G.C., Davis,J.L. and Annan,A.P.(1980):Electromagnetic determination of soil water content:Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16, 574-582.
- Hook, W.R., Livingston, N.J., Sun, Z. J., and Hook, P.B.(1992):Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 56, 1384-1391.