

古典を読む

G.C. Topp, J.L. Davis and A.P. Annan 著
「電磁波を利用した土壌水分計測：同軸導波管での測定」

宮本輝仁*

Reviewing classical studies in soil physics
“Electromagnetic Determination of Soil Water Content :
Measurements in Coaxial Transmission Lines”
By G.C. Topp, J.L. Davis and A.P. Annan
Water Resources Research, Vol. 16, 574-582 (1980)

Teruhito MIYAMOTO*

* National Institute for Rural Engineering, Kannondai 2-1-6, Tsukuba 305-8609, Japan

Key words : Time Domain Reflectometry (TDR), soil moisture, dielectric permittivity, measurement method

1. はじめに

土壌物理学で最も重要な物理量の一つに土壌水分量がある。また、土壌水分量を精度良く計測することは、土壌物理学以外にも、作物学、水文学、土木工学、環境学等をはじめとする多くの分野で、学問・研究のみならず実用的にも必要不可欠である。そのため、迅速に精度良く、簡便に土壌水分計測が可能な方法は、土壌物理学のみでなく多くの分野での悲願であった。土壌水分計測法で顕著な研究成果を残した土壌物理学者の一人に Topp がいる。現在では、TDR (Time Domain Reflectometry) は標準的な土壌水分計測法になり、TDR を使ったことのある人は、Topp 式を知っているであろう。今回の「古典を読む」では、TDR を土壌水分計測法として利用可能なことを広く知らしめた、1980 年に発表された Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) を読んでみよう。

土壌物理計測法の論文は、新しい理論や顕著な実験結果を示した論文と違い、一つの論文だけで完結しない。なぜなら、新しい計測法が自分の属する専門分野や関連分野の研究者の間で認められ、普及するためには、測定原理を示すだけでなく、計測装置の開発や絶え間ない改良と普及活動が必要であるからだ。Topp が若かった頃、どのように TDR と関わるようになったのか、そし

て、どのように TDR を土壌水分計測法として確立・普及していったのか等についても、Topp 自身が振り返った論文 (Topp *et al.*, 2003 ; Topp, 2006) をもとに紹介しよう。

2. Topp の TDR との出会い

Topp は、ウィスコンシン大に大学院生として在学中 (1960-1964 年)、Ed Miller と Champ Tanner から計測技術だけでなく、装置部品や完全な装置を自分で組み立てることを通じて、計測装置の測定原理を物理的基礎から理解を深めることの重要性について、触発と指導を受けた (Topp *et al.*, 2003)。当時、土壌水分計測法としては、重量法の他、電気抵抗法、中性子散乱法、 γ 線吸収法、テンシオメータ法が主流だった。特に圃場における土壌水分計測では、塩濃度やヒステリシスに左右されない計測法が必要で、また、健康的にも害がないものが望まれていた。そのため、彼は土壌と水分に関する計測方法を改善することに強い関心を持って国の研究機関である Agriculture Canada で働き始めた。

Topp も当時は、室内実験では γ 線吸収法を用いて土壌水分量を測定する一方で (Topp, 1969, 1971)、圃場実験用の良い土壌水分計測法を探していた。そのようなときに、Geological Survey of Canada の Davis と Annan

* 農村工学研究所 〒305-8609 つくば市観音台 2-1-6

キーワード : Time Domain Reflectometry (TDR), 土壌水分, 誘電率, 計測法

と出会う。彼らは地球物理学者であり、GPR (Ground Penetrating Rader) と一緒に TDR の研究をしていた。そして、土壌水分の物理的な挙動についてわかる研究者を探していた。

次に、1970年代までの電磁波 (誘電率) を利用した土壌水分計測法の開発状況について紹介しよう。土壌の誘電率 (K_a) について、体積含水率 (θ_v) への依存性の高い周波数領域は $10^7 \sim 10^9$ Hz であることは、1960年代後半にはわかっていた。また、1971年に Lundien は、1.07 GHz における誘電率と土壌水分量の関係は土性によらないことを見つけていた (Selig and Mansukhani, 1975)。また、TDR は Fellner-Feldegg (1969) によって初めて基本原理が示された。1970年代になって TDR は土壌の誘電率測定に適用されている (Hoekstra and Delaney, 1974; Davis and Chubodiak, 1975)。Davis and Chubodiak (1975) は、土壌の誘電率と体積含水率に相関があることを示した。その後、Davis と Annan は、土壌の誘電率が体積含水率に大きく依存し、土性や密度にあまり依存しないこと、圃場における体積含水率の変動のため、誘電率が数倍異なること等を明らかにし、土壌の誘電率と体積含水率の経験的な関係を求めている (Davis and Annan, 1977)。そして、この頃から Topp と Davis, Annan の共同研究が始まったようだ。1976年、Davis は土壌水分計測への TDR の応用に関する研究結果を Remote Sensing of Soil Moisture and Groundwater と題したシンポジウムで発表した。しかし、粘土質ロームから砂質ロームまでの異なる土性において、同じ $\theta_v - K_a$ 関係が得られたという結果は、マイクロ波の研究者たちに受け入れられなかった。このときの経験をもとに Topp らはより幅広い条件で実験を繰り返し行ない、Topp は 1979年にその結果を AGU の春季大会で発表した。またしても 1976年のシンポジウムのときに批判的だったマイクロ波の研究者たちから、Topp らの実験データは捏造されたものではないかと疑われた (Topp *et al.*, 2003; Topp, 2006)。しかし、1980年に、広い範囲の土壌に単一の関係式が適用可能なことを示した Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) が Water Resources Research に掲載されると、TDR を土壌水分計測法として利用可能なことが広く知られるようになった。

以下では、1980年に発表された Topp らの TDR に関する論文 (Topp *et al.*, 1980) の内容を紹介しよう。

3. Topp らの実験

3.1 誘電率と体積含水率の測定方法

Topp らは、Davis and Chubodiak (1975) が導入した TDR に供試土壌を詰めた同軸導波管を接続して土

の誘電率を測定している。論文中に示されている TDR システムは、研究開発初期のため、パルスの送受信機とオシロスコープを組み合わせた少々物々しいものであった。また、今では土壌水分計測用の TDR プローブは 2 線式や 3 線式のものが一般的となっているが、もともと高周波における誘電率の測定では、外管の遮蔽作用により周囲への電氣的エネルギーの損失がない同軸導波管が用いられることが多い (前田ら, 1986)。Topp らの実験でも同軸導波管を用いていた。Topp らが用いた同軸導波管には水分量調節のため、両側に 5 cm 間隔で直径 1 cm の多孔質セラミック盤が複数設置されていた (Fig. 1)。土壌水分量は多孔質セラミック盤を通した浸透水量/排水量を測定して 1% 以内の精度で求めている (Fig. 2)。

1976年に行った最初の実験結果の発表後、土性や有機物含量、間隙径、電氣的特性の異なる多様な土壌や多孔質体を対象に $\theta_v - K_a$ 関係を測定することが必要であると Topp らは考えた。この目的で、4種類の鉍質土壌 (砂質ロームから粘土)、有機質土、バーミキュライト、2種類のガラスビーズを使った。そして、土性や乾燥密度、温度、塩濃度、ヒステリシスが $\theta_v - K_a$ 関係に与える影響を評価するための 18種類の実験条件を設定して、 $\theta_v - K_a$ 関係を求めた。

3.2 主な実験結果

Topp らは TDR を用いて θ_v と K_a の関係を詳細に検討した。その主な特徴は、1) 多様な土壌を対象としたこと、2) 土壌溶液の電気伝導度の影響を考慮したこと、3)

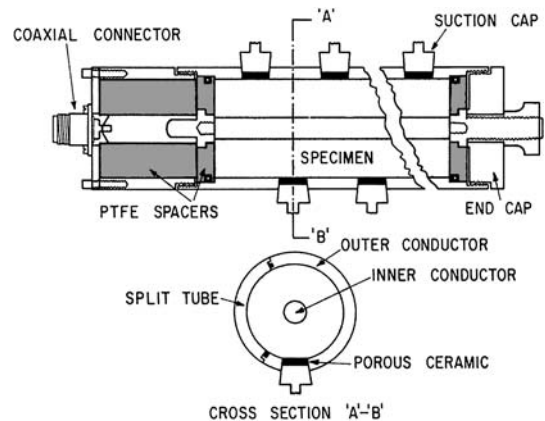


図-1 Topp 達が用いた同軸導波管。水分量調節のため、5 cm 間隔で直径 1 cm の多孔質セラミック盤が設置されていた。(Topp *et al.* 1980, Figure 2)

Fig. 1 Diagram of the coaxial transmission line soil column, showing the position relationship of the ceramic-capped cups. (Topp *et al.* 1980, Figure 2)

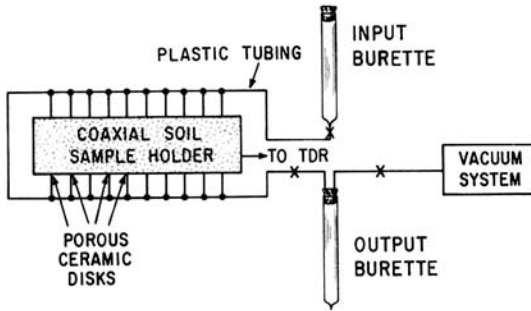


図-2 供試土壌の水分調整の概略図 (Topp *et al.* 1980, Figure 3)

Fig. 2 Diagram of the water input and removal procedure. (Topp *et al.* 1980, Figure 3)

ヒステリシスや地温の影響を検討したことが挙げられる。

Fig. 3 は、有機質含量の少ない (0~6%) 土壌の $\theta_v - K_a$ 関係である。土性 (砂質ローム, 粘土質ロームと粘土) および乾燥密度 ($1.04 \sim 1.44 \text{ g cm}^{-3}$) を変えているが、一つの曲線関係に載ることに注目しよう。この実験範囲では、 $\theta_v - K_a$ 関係は土性や乾燥密度に因らず一つの近似曲線で表現できる。

Fig. 4 は、2種類の大きさのガラスビーズ、有機質土、パーミキュライトの $\theta_v - K_a$ 関係である。また、有機質含量の少ない土壌の $\theta_v - K_a$ 関係 (近似曲線) も示してある。ガラスビーズの $\theta_v - K_a$ 関係は、土壌のものより上側にシフトしている。これはガラスビーズの誘電率が土粒子のものより高いためとしている。また、有機質土、パーミキュライトの $\theta_v - K_a$ 関係は、 $\theta_v = 0.1$ 以下ではあまり変化しないが、 $\theta_v = 0.1$ 以上では θ_v の増加に伴う K_a の増加率は他の土壌やガラスビーズより大きくなることに注目しよう。この原因として自由水とは誘電率が異なる吸着水の影響を指摘している。これらの観察結果は、この後に展開される土壌の誘電特性の研究で重要な役割を果たすことになる (例えば、Dasberg and Dirksen, 1993)。以前、ヒステリシスの研究をしていた Topp は (例えば、Topp, 1971)、土壌の $\theta_v - K_a$ 関係にはヒステリシスが生じないことはわかっていたようであるが、実験結果を元に確認している。

Fig. 5 は、 $\theta_v = 0.324$ の粘土質ロームの供試体の温度 ($10 \sim 36^\circ\text{C}$) を変えて、誘電率を測定した結果を示している。測定値の変動は縦線で示した測定誤差以内に納まっている。このため、Topp らは TDR 計測に温度の影響は無いとした。しかし、1990 年代に入って、圃場における中・長期間の土壌水分計測が盛んに行われるようになる

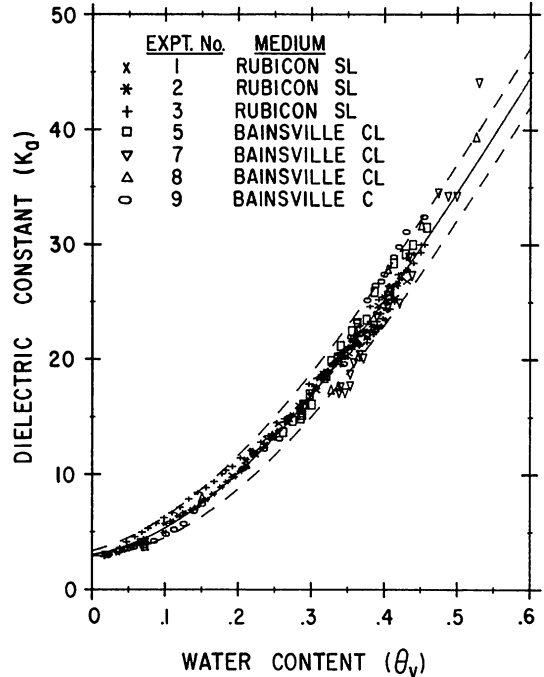


図-3 4種類の鉱質土壌で求めた $\theta_v - K_a$ 関係。図中の実線は実測値をもとに得られた近似曲線、破線は体積含水率で ± 0.025 移動させて得られた曲線。実験番号は Topp *et al.* (1980) 中の Table 2 を参照。(Topp *et al.* 1980, Figure 4)

Fig. 3 The measured relationship between K_a and θ_v for the four mineral soils. The solid line is the empirical best-fit equation and the dashed lines are shifted ± 0.025 in θ_v . The experimental numbers refer to those used in Table 2. (Topp *et al.* 1980, Figure 4)

と、地温の変化に呼応した土壌水分量の日変化が観察され (Wrath and Or, 1999)、その発生機構の解明とモデル化が行われている (Or and Wraith, 1999)。

TDR を用いた土壌水分計測の圃場での使用が念頭にあったため、Topp らは塩濃度の影響についても検討している。Fig. 6 は、0.01 N の CaSO_4 で土壌水分量を変化させた場合と 2,000 ppm の NaCl を用いて土壌水分量を変化させた場合の Rubicon 土壌の $\theta_v - K_a$ 関係である。Topp らは土壌溶液中の塩濃度が高くなっても伝播速度にはほとんど影響を及ぼさないが、土壌中を伝播する間の電圧ステップの減衰が大きくなることを指摘している。Topp らが観察した電気的特性は、TDR で電気伝導度を計測する際の測定原理となる (Dalton *et al.*, 1984)。

3.3 Topp 式の誕生

Topp らは得られた $\theta_v - K_a$ 関係の近似曲線を実験ご

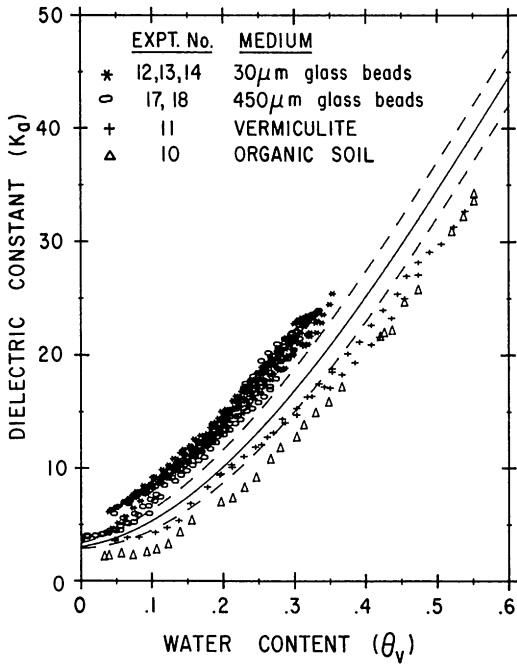


図-4 鉱質土壌, ガラスビーズ (30 μm), パーミキュライト, 有機質土で求めた θ_v - K_a 関係. 破線は硬質土壌で得られた近似曲線を体積含水率で ± 0.025 移動させて得られた曲線. (Topp *et al.* 1980, Figure 6)

Fig. 4 The measured relationship between K_a and θ_v for the mineral soils, 30 μm glass beads, ground vermiculite, and an organic soil. The area between the dashed lines is the same region as between the dashed lines in Figure 4. (Topp *et al.* 1980, Figure 6)

と, 土壌の種類ごと等いろいろな場合で求めている。そして, 有機質含量の少ない土壌に関する全部の実験データを元に導出した近似式が, [原著(6)式]

$$K_a = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.7\theta_v^3 \quad (1)$$

である。そのため, この式の適用範囲は, 有機質含量 0~6%, 土性は砂質ローム, 粘土質ロームと粘土, 乾燥密度 1.04~1.44 g cm^{-3} となる。実際の土壌水分計測では K_a を測定して θ_v を求めることになるため, K_a を変数とした近似式も示した [原著(7)式]。

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (2)$$

これらの近似式が現在よく知られる Topp 式である。Topp 式の発表後, 多くの土壌で θ_v - K_a 関係が測定され, Topp 式の適用性が検討された。その結果, 有機質

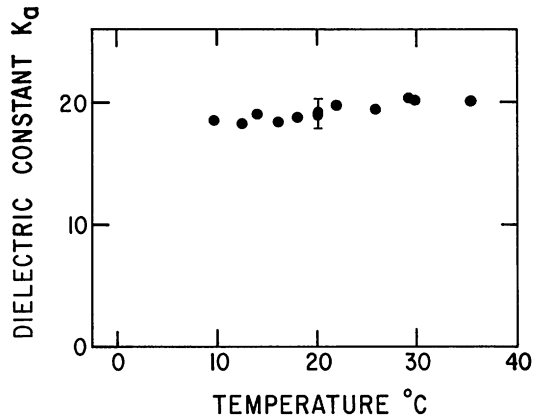


図-5 $\theta_v=0.324$ の Bainsville 粘土質ロームの供試体の温度 (10~36 $^{\circ}\text{C}$) を変えて, 誘電率を測定した結果. 縦線は測定誤差 (誘電率で ± 1) を示す. (Topp *et al.* 1980, Figure 7)

Fig. 5 K_a versus temperature from experiment 6 with Bainsville clay loam soil at $\theta_v=0.324$. The vertical bar at $T=20$ is ± 1 in K_a and represents the measurement precision. (Topp *et al.* 1980, Figure 7)

土 (Topp *et al.*, 1980 ; Herkelrath *et al.*, 1991 ; Roth *et al.*, 1992) や粘土分の多い土壌 (Dasberg and Hopman, 1992), 火山灰土壌 (Weitz *et al.*, 1997 ; Tomer *et al.*, 1999 ; 宮本・筑紫, 2000 ; Regalado *et al.*, 2003 ; Stenger *et al.*, 2007) では適用できないが, その他の多くの土壌では Topp 式が適用可能であることが確認された。そのため, Topp 式は TDR で土壌水分を計測する際の標準式として用いられるようになった。また, Topp 式が適用できない土壌についても混合誘電率モデルを用いた土壌の物理性との関連性が調べられ, 土粒子表面に強い力で拘束されている吸着水や間隙率が大きいこと等が主な原因であることが明らかにされた (例えば, Dirksen and Dasberg, 1993)。更に, わが国に広く分布する火山灰土壌は団粒構造が発達していて比表面積や間隙率が大きく, 水分分布も偏っているため, 団粒構造が θ_v - K_a 関係に影響を及ぼしていることも明らかになってきている (Miyamoto *et al.*, 2003 ; Miyamoto *et al.*, 2005)。火山灰土壌の校正式は, Topp 式とは別のものが求められており (宮本・筑紫, 2000), また, 地域が異なっても同じ火山灰土壌であれば校正式は類似のものとなることもわかってきている (Stenger *et al.*, 2007)。

このように, 標準式としての Topp 式の発表は, TDR による土壌水分計測の普及に対する貢献にとどまらず, 土壌の θ_v - K_a 関係に及ぼす各種の物理化学性について

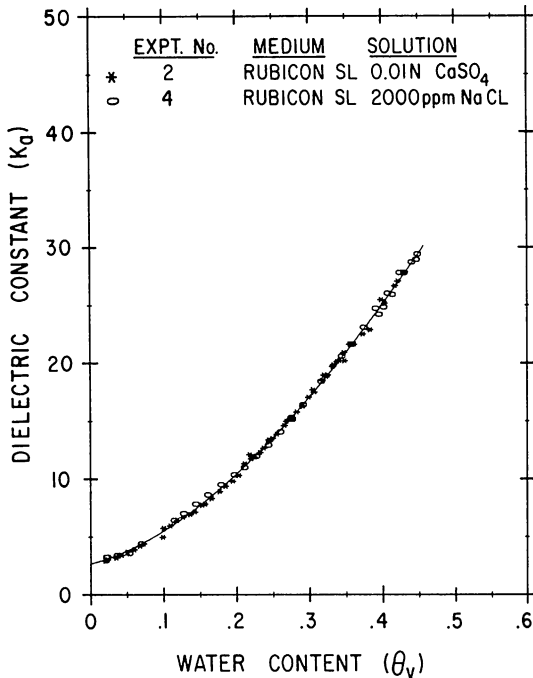


図-6 0.01NのCaSO₄と2,000 ppmのNaClを用いて土壌水分量を変化させた場合のRubicon土壌の θ_v - K_a 関係 (Topp *et al.* 1980, Figure 8)

Fig. 6 The measured relationship between K_a and θ_v for the Rubicon soil, where the water solution (0.01N CaSO₄) for experiment 2 was replaced by 2,000 ppm NaCl in experiment 4. (Topp *et al.* 1980, Figure 8)

の私達の理解を急速に深める契機となった。

4. 論文発表後のToppの活躍

Topp *et al.* (1980) の論文発表後、この新しい測定原理に基づく土壌水分計測法が同じ分野の研究者達に受け入れられるよう、Topp は土壌水分計測に特化した計測器の開発とTDRの理論的側面からの充実のための研究に精力を注いだ。

1970年代後半、バッテリー駆動のTektronix社製のTDRケーブルテスター(model 1502)が圃場での計測に向いていた。しかし、TDR波形データの保存と解析に難があり、ToppらはボラロイドカメラでTDR波形を撮影して波形解析を行っていた(Topp, 2006)。そのため、ToppとDavisはケーブル長の伝播時間を記録する代わりに直接土壌水分量計測ができるTDR計測器の必要性を感じていた。1981年、ToppはオタワのFoundation Instrumentsという民間会社とTDR計測器を

共同開発することになる。しかし、その頃にはDavisとAnnanはGPRの開発に専念していたため、Toppは一人でTDR計測器の開発を行なうことになった。ToppはFoundation Instrumentsの開発担当者に、土壌の電気的特性についての詳細を教え、それにより、開発担当者は設計に必要なパラメーターを決めることができた。ToppはFoundation Instruments社製の計測器を土壌に適用可能なようにプローブの開発も行なった。更に、Foundation Instrumentsは製品のマーケティング調査も要求してきたため、ToppはAgriculture Canadaの農業経済学者の助けを得ながらマーケティング調査も行なった。1983年には、プロトタイプが完成したが、翌年までに更に改良を行なった。そして、IRAMS (Instrument for Reflectometry Analysis of Moisture in Soil)と名付けて、Soil Science Society of Americaの年次大会における企業展示ブースでも紹介した。しかし、Foundation Instrumentsの経営不振や売却先のCampbell Pacific Nuclearの技術力不足により、IRAMSの開発・改良はストップしてしまった。IRAMSの技術はSoilmoisture Equipment社によって開発されたTRASEに引き継がれることになった(Topp, 2006)。後にToppはこの経験を振り返り、“共同研究によって新しい技術開発を行なうことは、新しい技術を製品化して科学・技術者集団に利用してもらうまでにするのに比べたら、容易なことである。”と述べている(Topp *et al.*, 2003)。

ToppはTDR計測器の開発の傍ら、圃場におけるTDRを用いた土壌水分計測に関する論文を1981~1985年に多数発表している(Topp and Davis, 1981; Topp *et al.*, 1982a, 1982b; Topp and Davis, 1985a, 1985b)。また、1988年にはTDR波形に関する理論的考察(Yanuka *et al.*, 1988)や電気伝導度測定に関する研究(Topp *et al.*, 1988)、2000年には複素誘電率の虚数部がTDRで土壌水分測定を行なう際に与える影響の評価に関する論文(Topp *et al.*, 2000)を発表し、研究面からもTDRによる土壌水分計測法の開発へ多大なる貢献をした。

5. おわりに

Topp *et al.* (1980) は被引用回数1,000回を超え、Water Resources Researchにおいては106号で取り上げたMualem (1976)を凌ぐ最多の引用がなされている論文である(Koutsoyiannis and Kundzewicz, 2007)。これは、Toppらの論文が初めて土壌水分計測法としてのTDRの有用性を示すとともに、標準式の適用範囲、TDRの水分量測定の問題点を的確に指摘したこと、また電気伝導度測定のように、以降の研究の方向を与える内容も含んだものであり、まさにTDRを土壌水分計測

に用いようとする人が必要な情報がバランス良く書かれていることが多く引用されている理由かと思われる。「計測装置を使いこなすための理解とは何か」という大学時代の教えのもと、ToppがTDRの開発・普及に一貫して精力を注ぎ込んできたことも、土壌物理計測法で顕著な研究成果を残すことができた要因であろう。その一連の研究の中における Topp *et al.* (1980) の論文は、土壌物理分野で開発された計測法が関連分野に広く普及する礎となった誇れる論文である。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、三重大学の取出伸夫博士から多くの貴重なコメントをいただきました。ここに記し、謝意を表します。

引用文献

- Dalton, F.N., W.H. Herkelrath, D.S. Rawlins and J.D. Rhoades (1984) : Time domain reflectometry : Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* (Washington), **224** : 989-990.
- Dasberg, S. and J.W. Hopman (1992) : Time domain reflectometry calibration for uniformly and non-uniformly wetted sandy and clayey soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56** : 1341-1345.
- Davis, J.L. and A.P. Annan (1977) : Electromagnetic determination of soil moisture : progress report I. *Can. J. Remote Sensing*, **3** : 76-86.
- Davis, J.L. and W.J. Chudobiak (1975) : In-site meter for measuring relative permittivity of soils. *Geol. Surv. Can., Ottawa, Pep 75-1A* : 75-79.
- Dirksen, C. and S. Dasberg (1993) : Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 660-667.
- Fellner-Feldegg, H. (1969) : The measurement of dielectrics in the time domain. *J. phys. Chem.*, **73** : 616-623.
- Herkelrath, W.N., S.P. Hamburg and F. Murphy (1991) : Automatic real time monitoring of soil moisture in a remote field with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, **27** : 857-864.
- Hoekstra, P. and A. Delaney (1974) : Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys. Res.*, **79** : 1699-1708.
- Koutsoyiannis, D. and Z.W. Kundzewicz (2007) : Quantifying the impact of hydrological studies. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, **52** : 3-17.
- 前田憲一・平井平八郎・山口次郎共編 (1986) : 大学課程電気計測 (第2版), pp. 107-137, オーム社, 東京.
- 宮本輝仁・筑紫二郎 (2000) : 土壌の体積含水率一比誘電率関係への混合誘電特性モデルの適用, *農土論集*, **206** : 57-62.
- Miyamoto, T., T. Annaka and J. Chikushi (2003) : Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of an Andisol measured by time domain reflectometry. *Vadose Zone J.*, **2** : 90-97.
- Miyamoto, T., T. Annaka and J. Chikushi (2005) : Extended dual composite sphere model for determining dielectric permittivity of Andisols, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **69** : 23-29.
- Mualem, Y. (1976) : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, **12** : 513-522.
- 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** : 371-383.
- Regalado, C.M., R. Munoz Carpena, A.R. Socorro and J.M. Hernández Moreno. (2003) : Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils. *Geoderma*, **117** : 313-330.
- Roth, C.H., M.A. Malicki and R. Plagge (1992) : Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements. *J. Soil Sci.*, **43** : 1-13.
- Selig, E.T. and S. Mansukhani (1975) : Relationship of soil moisture to the dielectric property. *J. Geotech. Eng. Div. Amer. Soc. Civil. Eng.*, **GT 8** : 755-770.
- Stenger, R., Wöhling, T., Barkle, G.F. and Wall, A. (2007) : Relationship between dielectric permittivity and water content for vadose zone materials of volcanic origin, *Australian Journal of Soil Research*, **45** : 299-309.
- Tomer, M.D., B.E. Clothier, I. Vogeler and S. Green (1999) : A dielectric - water content relationship for volcanic soils in New Zealand. *Soil Sci. Soc.*

- Am. J., **63** : 777-781.
- Topp, G.C. (1969) : Soil-water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteretic domain model. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33** : 645-651.
- Topp, G.C. (1971) : Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils. *Water Resour. Res.*, **7** : 914-920.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1980) : Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, **16** : 574-582.
- Topp, G.C. and J.L. Davis (1981) : Detecting infiltration of water through soil cracks by time-domain reflectometry. *Geoderma*, **26** : 13-23.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1982a) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I. Application to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 672-678.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1982b) : Electromagnetic determination of soil water content using TDR : II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 678-684.
- Topp, G.C. and J.L. Davis (1985a) : Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR) : A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49** : 19-24.
- Topp, G.C. and J.L. Davis (1985b) : Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling, In *advances in Irrigation* (Ed. D. Hillel) pp. 107-127. Academic Press, New York.
- Topp, G.C., M. Yanuka, W.D. Zebchuk and S.J. Zegelin (1988) : The determination of electrical conductivity using TDR : Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.*, **24** : 945-952.
- Topp, G.C., S.J. Zegelin and I. White (2000) : Impact of the real and imaginary components of relative permittivity on TDR measurements in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 1244-1252.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (2003) : The early development of TDR for soil measurements. *Vadose Zone J.*, **2** : 492-499.
- Topp, G.C. (2006) : Evening lecture : TDR Reflections : My thoughts and experiences on TDR. Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID B1, 7p., <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers>.
- Weitz, A.M., W.T. Grauel, M. Keller and E. Veldkamp (1997) : Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resour. Res.*, **33** : 1241-1249.
- Wraith, J.M. and D. Or (1999) : Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry : Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resour. Res.*, **35** : 361-369.
- Yanuka, M., G.C. Topp, S.J. Zegelin and W.D. Zebchuk (1988) : Multiple reflection and attenuation of TDR pulse : Theoretical considerations for application to soil water. *Water Resour. Res.*, **24** : 939-944.

要 旨

TDR を土壌水分計測法として利用可能なことを広く知らしめた、1980年に発表された Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) を紹介した。土性の影響が少なく $\theta_v - K_a$ 関係が得られたという結果や Topp らが観察した土壌の誘電特性が、その後の研究発展のための多くの示唆に富むものであったこと、温度依存性や塩濃度の影響も含め TDR を土壌水分計測に用いる際に必要な情報が適切に議論されていることを示した。また、新しい計測法が自分の専門分野や関連分野の研究者の間で認められ、普及するためには、測定原理を示すだけでなく、計測装置の開発や絶え間ない改良と普及活動が必要である。このため、Topp が TDR と関わるようになった経緯や Topp らの論文 (Topp *et al.*, 1980) 発表後の研究・普及活動についても併せて紹介した。

受稿年月日 : 2007 年 11 月 14 日
 受理年月日 : 2008 年 1 月 31 日