J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 150, p.15 ～ 22 (2022)



# 論文再訪（Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1996): Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe. Soil Science, 161: 22–28.）

登尾浩助 [1]

Revisiting an article:
Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe. Soil Science, 161: 22–28 by Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1996)

Kosuke NOBORIO[1]

**Abstract:** We developed a prototype of the now-called “thermo-time domain reflectometry probe” in 1996. We revisited the article describing the prototype and explained how we thought at those moments. Let us start our visit; first met a soil water sensor at college. Later year at Texas A&M University as a graduate student, Jim Heilman and Kevin McInnes became my supervisors. They inspired me to make a multipurpose time domain reflectometry (TDR) probe by combining TDR and dual-probe heat-pulse (DPHP) sensors. Our new TDR-DPHP sensor owed the hard work of Clerk Topp, Gaylon Campbell and Keith Bristow. When we published an article on the new TDR-DPHP sensor in 1996, Robert Horton of Iowa State University might be the only one who truly understood the potential of the new probe in the world. He and his research group named our sensor a “thermo-time domain reflectometry probe” and have been pushing its limit since then.

**Key Words** : time domain reflectometry, heat pulse sensor, soil water content, thermal properties, combined sensor

## 1. はじめに

これまで様々な種類の土壌センサーが開発され，多くは市販されている（de Vries, 1952; Topp et al., 1980; Malicki and Skierucha, 1989; Campbell et al., 1991; Tarara and Ham, 1997; Campbell and Anderson, 1998; Noborio and Kubo, 2017）．その中でも，現在「サーモ TDR プローブ（thermo-TDR probe）」と呼ばれる土壌センサーの原型となったセンサーを開発したので（Noborio et al., 1996），着想から開発に至る経緯を紹介する．

土壌水分量の測定に初めて関わったのは 1980 年の夏に愛媛大学で行った卒業研究の際であった．テンシオメーターに繋いだ 20 数本の水銀マノメーターの値を毎朝読み取るのが日課であった．現在の SRI（system of rice intensification）農法に繋がる研究は，指導教授であった佐藤晃一が乾燥地農業に興味があるコースケが担当しなさいと言ってくれて始めた（木村・登尾, 2011）．そんな折，橋本 康の授業（環境計測学）で耳にした自動計測可能な静電容量式水分計が夢のようなセンサーに思えた．卒業後，太陽コンサルタンツ（現 NTC コンサルタンツ）に入社して札幌支社勤務となった．余市町のリンゴ園での環境調査でもテンシオメーターを使い続けたが，この時はテンシオメーターの圧力は圧力計で読み取ってデータロガーに記録した．この調査は，園内にスプリンクラーで冷たい水を散水すると園内微気象がどのように変化するかを調査する内容で，同期入社で東京本社勤務だった岩本 彰（後に NTC インターナショナル社長）が中心となって進めた．彼には余市の旅館で夜遅くまで熱電対の作り方からデータロガーの操作法，そして微気象学のいろはまで丁寧に教えてもらった．この時の経験が，微気象学と土壌物理学の境界領域に興味を持つ契機になった．当時（1983 年頃）はまだこの境界領域を開拓していた Gaylon Campbell の存在は知らなかった．

乾燥地農業に関わる研究に対する願望が抑えられなくなったので，1985 年に太陽コンサルタンツを退職して鳥取大学大学院に入学した．所属した農学部附属砂丘利用研究施設水文学研究室に何と学部生の時に橋本 康の講義で聞いた夢の静電容量式水分計があった．土壌水分移動

[1]School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan , Corresponding author: 登尾浩助 明治大学農学部, 〒700-8530 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
2021 年 12 月 7 日受稿　2022 年 1 月 18 日受理

を把握する実験に使えるのではないかと大喜びしたが，大きな図体の上に温度依存性が大きくて自分の実験に使えるセンサーでないことが分かった．実験室の片隅に埃をかぶって放置してあったわけである．水銀マノメーターに繋いだテンシオメーターを使って土壌水分と溶質移動の研究をすることにした（矢野ら, 1988）．この研究室で使っていた水銀マノメーターは，全て手作りで極めて機能的であった．当時の農学部教員（井上光弘，筑紫二郎，山本太平，矢野友久，小谷佳人）と学生らの何年にも渡る改良の賜物であることがよく分かった．

そんなある日，研究室でアメリカ土壌科学会誌（SSSAJ）をめくっていたら，Dasberg and Dalton（1985）の論文が目に留まった．当時は研究室や図書館が購入している学会誌を含む科学雑誌の最新号やバックナンバーを一日中読み漁るのが文献検索法の主流であった．Dasberg and Dalton（1985）の論文は，TDR（time domain reflectometry）法を使うと体積含水率と電気伝導度を 1 本のプローブで独立に測定できるというとんでもない内容であった．引用文献を見てみると G.C. Topp らが 1980 年に発表した電磁波を使った測定法が元になっていた．Topp et al.（1980）は，TDR 法による土壌水分量測定には，地温，塩分の存在，センサーと土壌の接触具合がほとんど影響を与えないと報告していた．これこそずっと探していた土壌水分測定用のセンサーであった．早速，大阪のジャンク屋に出かけて中古の交流発信器（上限が数百 Hz 程度）と交流電圧計を購入した．アクリルカラムに 4 電極を外側から挿入して，その中に水を入れて発信器の電源を入れたが，電圧計には何も変化が無かった．発信器の出力電圧を上げると電極から気泡が発生し始めた．電気と TDR に関する知識が無いままに無謀に挑んだ実験は大失敗に終わった．しかし，テキサス A&M 大学に進学の際の推薦書に，指導教授だった小谷佳人は，TDR 装置を自作した学生であると話を大盛してくれたことは後年になって知った．

1988 年にテキサス A&M 大学 Ph.D. 課程に進学後は，1 年間ほど紆余曲折の後，期せずして微気象学の Jim Heilman と土壌物理学の Kevin McInnes がいる Environmental Physics Laboratory に所属することになった．彼らはカンザス州立大学の Evapotranspiration Laboratory で Ed Kanemasu から Ph.D. を取得した中堅と若手の研究者であった．特に，McInnes はワシントン州立大学の Gaylon Campbell のもとで修士課程を修了したので，当時の土壌物理学の新刊書であった Soil Physics with BASIC（Campbell, 1985）の内容を熟知していた．

## 2. 土壌水分 · 電気伝導度 · 地温測定

Ph.D. 研究の圃場実験に TDR 装置が必須だと McInnes に言ったら，学科長から資金を調達して 1 台購入してくれた．長年の夢であった念願の TDR 装置をやっと手にすることができた．しかし当時は，同軸ケーブルマルチプレクサーから TDR 制御プログラム，TDR 波形解析プログラムまで全て自分で作る必要があった（登尾ら, 1997）．Baker and Allmaras（1990）を参考にして同軸マルチプレクサーと TDR 波形解析プログラム，そして TDR 制御プログラムを試行錯誤で完成させるために約 1 年間を要した．圃場実験では，3 線式 TDR プローブの外側の電極の一本に熱電対を挿入して，体積含水率，電気伝導度，地温を同一場所で測定することに成功した（Noborio et al., 1994）（Fig. 1）．子供の頃に独学で学んだアマチュア無線の知識が活かされた：高周波は導線の表面を伝播する．ということは，導線内に異物を入れても高周波伝播には影響がないはずである．実際，同軸ケーブルの編み線に接続した中空ロッド内に熱電対を挿入しても TDR 波形はほとんど乱れなかった．この成功が TDR プローブと他の機能を融合したセンサーを開発するきっかけとなった．後に，同軸ケーブルの芯線に接続した中空ロッドに異物を挿入すると TDR 波形が乱れるが，信号の反射位置はほぼ変化しないことが分かった．

## 3. 熱的性質測定

塩分の熱伝導率への影響に関する研究は，McInnes が担当した大学院講義の Advanced Soil Physics を私が受講した際に提出したレポートが元になって始まった．この McInnes の講義で使った教科書は，もちろん，Soil Physics with BASIC であった．この教科書では熱伝導方程式を差分法で解く方法が丁寧に解説されている．熱

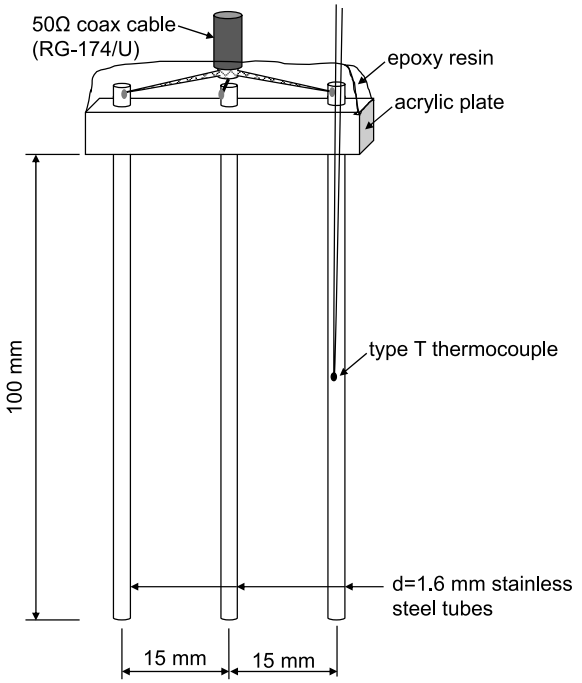



**Fig. 1** 外側電極に熱電対を挿入した最初の複合式 TDR プローブ（Noborio et al., 1994 の Fig. 1A を一部改変）．
The first combined TDR probe with a thermocouple inserted in the outer electrode (partly modified Fig. 1A of Noborio et al., 1994).

伝導率の測定には，熱伝導率測定の常道であった単一プローブではなく，シリンダー法を使った（Noborio and McInnes, 1993）．シリンダー法で得たデータの差分法による解析（Riha et al., 1980）は，McInnes の元指導教授であった Campbell らが開発した方法である．McInnes は Riha et al.（1980）の論文では 2 番目の著者として名を連ねているので，実際に多くの実験をしたのではないかと推察される．ただ，Noborio and McInnes（1993）では Riha et al.（1980）と異なり，Parikh et al.（1979）と同様に充填した土壌試料の中心部に熱電対温度計を挿入し，シリンダー全体を 30 °C 程度のお湯に浸けて中心部の温度変化を記録した．この時の経験から，後年 Carslaw and Jaeger（1959）の解析解を使った論文（登尾ら, 2005）を出すことになった．

熱的性質には，熱伝導率（$\lambda$），体積熱容量（$\rho_c$）と熱拡散係数（$\kappa$）が含まれ，それぞれは $\lambda = \kappa\rho_c$ で関係付けられる．1990 年当時，$\lambda$ は単一プローブ法（de Vries, 1952; Shiozawa and Campbell, 1990）で，$\rho_c$ はカロリメーター法（Taylor and Jackson, 1986）で測定するのが一般的であり，恐らく唯一であった．カロリメーター法では，お湯を入れた魔法瓶に土壌試料を投入してお湯の温度変化を測定するので，原位置での測定ができない特徴がある．そんな時代に現れた画期的な測定法が熱パルス法（heat-pulse method）であった（Campbell et al., 1991）．この熱パルス法センサーは，直径 0.8 mm，長さ 28 mm の注射針 2 本で構成されていた．片方の注射針にヒーターを，もう片方の注射針に熱電対温度計を封入して 6 mm 間隔で固定した斬新なデザインのセンサーであった．この論文を見た瞬間に，外見が TDR プローブとよく似ていることに気がついた．

## 4. 多目的 TDR プローブの開発

1991 年 1 月頃に Campbell et al.（1991）の熱パルス法が掲載されたアメリカ土壌科学会（SSSAJ）誌の最新号が届いてからほどなくして，熱パルス法センサーと TDR プローブの機能を同時に満たす多目的 TDR プローブを作ることにした．土壌の熱的性質の体積含水率依存データを一本の 3 線式 TDR プローブで測定できたら良いな…程度の動機であったので，この多目的 TDR プローブが持つ潜在能力に思いが至るはずもなかった．Fig. 2 に当時の研究ノートの一部を示す．構想から約半年後の 1991 年 9 月に試作プローブを使った実験に到達したことがうかがえる．

熱パルス法センサーのオリジナルロッド寸法（長さ 28 mm，間隔 6 mm）を TDR プローブとして使用するには，ロッド長が短すぎるし，ロッド間隔が狭すぎる．当時，既に TDR プローブの制限寸法に関する論文が出ていたので，それらを参考にして，ロッド長さ 75 mm，ロッド間隔 10 mm と決定した（Fig. 3）．中空ロッドに使用した注射針は，Campbell の熱パルス法センサー（21 gauge, 外径 0.81 mm）より長くする必要があるので，1 ゲージ

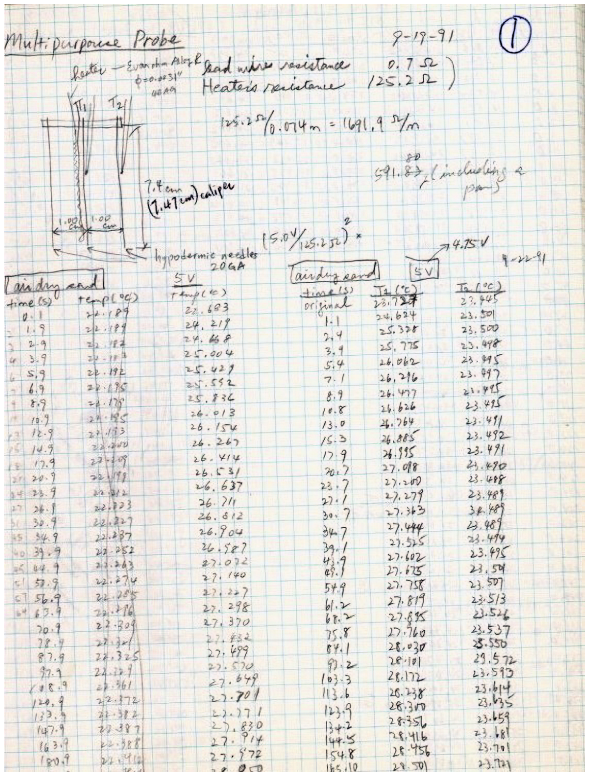



**Fig. 2** 多目的 TDR プローブを描いた 1991 年 9 月 19 日付研究ノートの一部.
Part of a research note depicting a multipurpose TDR probe dated on September 19, 1991.

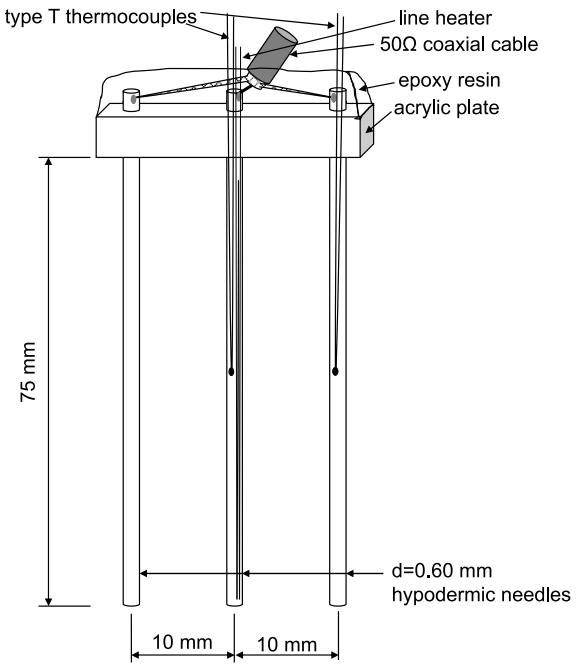
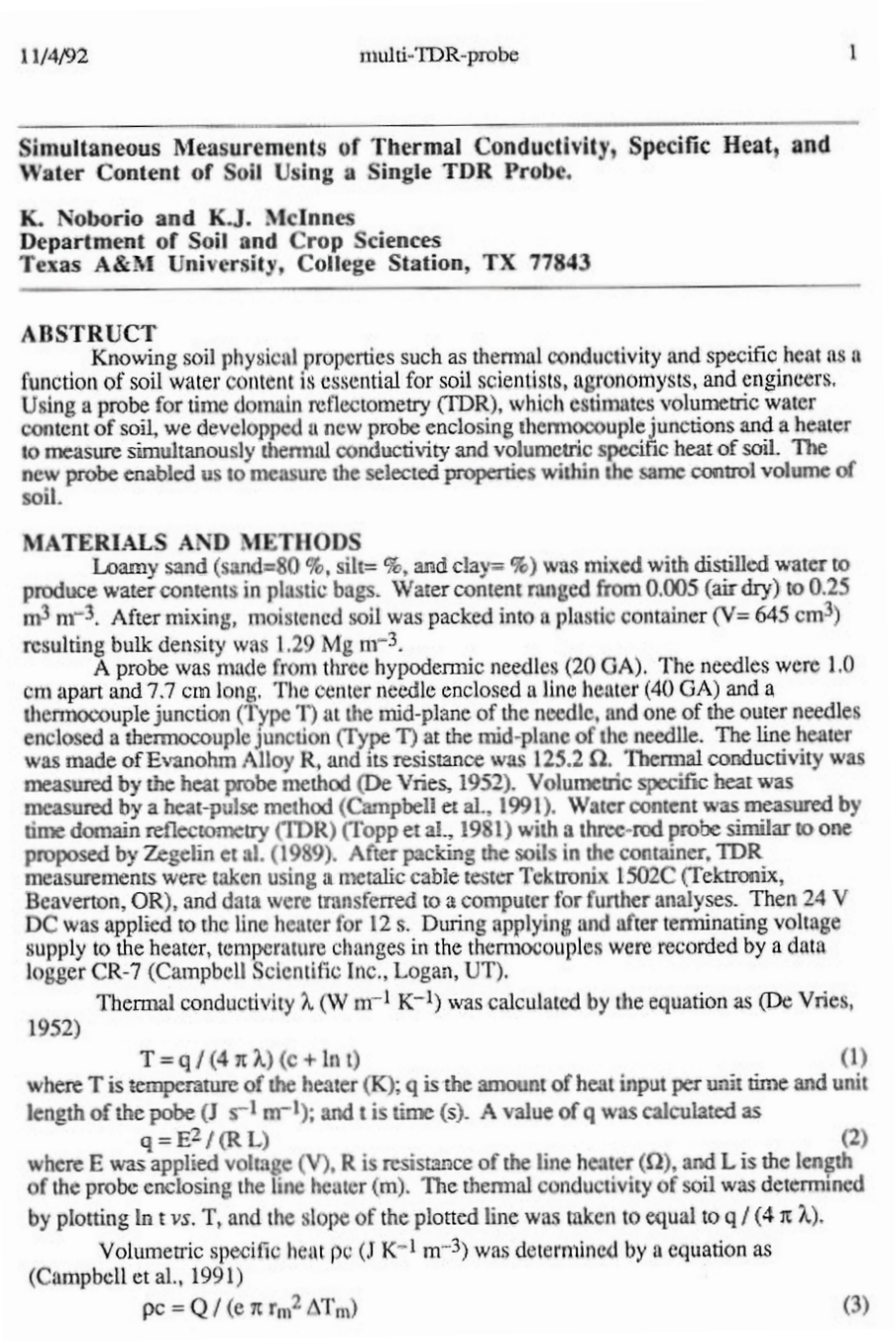



**Fig. 3** 完成した多目的 TDR プローブ（Noborio et al., 1996 の Fig. 1 を一部改変）.
Completed multipurpose TDR probe (partly modified Fig. 1 of Noborio et al., 1996).



11/4/92 multi-TDR-probe 1

**Simultaneous Measurements of Thermal Conductivity, Specific Heat, and Water Content of Soil Using a Single TDR Probe.**

**K. Noborio and K.J. McInnes**
**Department of Soil and Crop Sciences**
**Texas A&M University, College Station, TX 77843**

**ABSTRUCT**

Knowing soil physical properties such as thermal conductivity and specific heat as a function of soil water content is essential for soil scientists, agronomysts, and engineers. Using a probe for time domain reflectometry (TDR), which estimates volumetric water content of soil, we developped a new probe enclosing thermocouple junctions and a heater to measure simultanously thermal conductivity and volumetric specific heat of soil. The new probe enabled us to measure the selected properties within the same control volume of soil.

**MATERIALS AND METHODS**

Loamy sand (sand=80 %, silt= %, and clay= %) was mixed with distilled water to produce water contents in plastic bags. Water content ranged from 0.005 (air dry) to 0.25 $m^3\ m^{-3}$. After mixing, moistened soil was packed into a plastic container (V= 645 $cm^3$) resulting bulk density was 1.29 $Mg\ m^{-3}$.

A probe was made from three hypodermic needles (20 GA). The needles were 1.0 cm apart and 7.7 cm long. The center needle enclosed a line heater (40 GA) and a thermocouple junction (Type T) at the mid-plane of the needle, and one of the outer needles enclosed a thermocouple junction (Type T) at the mid-plane of the needlle. The line heater was made of Evanohm Alloy R, and its resistance was 125.2 Ω. Thermal conductivity was measured by the heat probe method (De Vries, 1952). Volumetric specific heat was measured by a heat-pulse method (Campbell et al., 1991). Water content was measured by time domain reflectometry (TDR) (Topp et al., 1981) with a three-rod probe similar to one proposed by Zegelin et al. (1989). After packing the soils in the container, TDR measurements were taken using a metalic cable tester Tektronix 1502C (Tektronix, Beaverton, OR), and data were transferred to a computer for further analyses. Then 24 V DC was applied to the line heater for 12 s. During applying and after terminating voltage supply to the heater, temperature changes in the thermocouples were recorded by a data logger CR-7 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT).

Thermal conductivity λ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) was calculated by the equation as (De Vries, 1952)

$$T = q / (4 \pi \lambda) (c + \ln t) \quad (1)$$

where T is temperature of the heater (K); q is the amount of heat input per unit time and unit length of the pobe ($J\ s^{-1}\ m^{-1}$); and t is time (s). A value of q was calculated as

$$q = E^2 / (R L) \quad (2)$$

where E was applied voltage (V), R is resistance of the line heater (Ω), and L is the length of the probe enclosing the line heater (m). The thermal conductivity of soil was determined by plotting ln t *vs*. T, and the slope of the plotted line was taken to equal to $q / (4 \pi \lambda)$.

Volumetric specific heat ρc ($J\ K^{-1}\ m^{-3}$) was determined by a equation as (Campbell et al., 1991)

$$\rho c = Q / (e \pi r_m^2 \Delta T_m) \quad (3)$$

**Fig. 4** 1992 年 11 月 4 日付の研究ノートには，単一プローブ法による熱伝導率測定（式 1）と DPHP 法による体積熱容量測定（式 3）が書いてある．
A research note, dated November 4, 1999, described the thermal conductivity measurement by the single probe method (Eq. 1) and the volumetric heat capacity measurement by the DPHP method (Eq. 3).

小さい 20 gauge（外径 0.91 mm）にしたが，結果的にはもっと太い，例えば 16 gauge（外径 1.65 mm）程度の注射針にすべきであった．Campbell が使ったと同じサイズ（直径 75 $\mu$m）で同じ材質（Evanohm）のヒーター線が研究室に残っていたので使うことにした．温度計には極細の T 型（銅・コンスタンタン）熱電対を使った．設計当初は，熱伝導率は単一プローブ法で，体積熱容量は熱パルス法で測定する計画であったので，温度計はヒーター線を入れた真ん中の中空ロッドと外側の 1 本の中空ロッドにのみ挿入した．20 gauge 注射針の内径が 0.60 mm なのでヒーター線と熱電対の両方を一本の中空ロッド内に挿入するのに苦労した．熱電対の先端をエポキシ接着剤で絶縁して挿入するのが精一杯であった．従って，このロッド内部にこれ以上熱伝導エポキシなど余分なものを均一に注入することができなかった．ヒーターの発熱をロッド全体に均一に伝導させる必要があったが，このせいで適わなかったのかどうかは不明である．

Fig. 4 に当時同じ研究室の先輩であった Jay Ham（現コロラド州立大学教授）がやっていたことを真似て書いた多目的 TDR プローブに関する研究ノートの一部を示

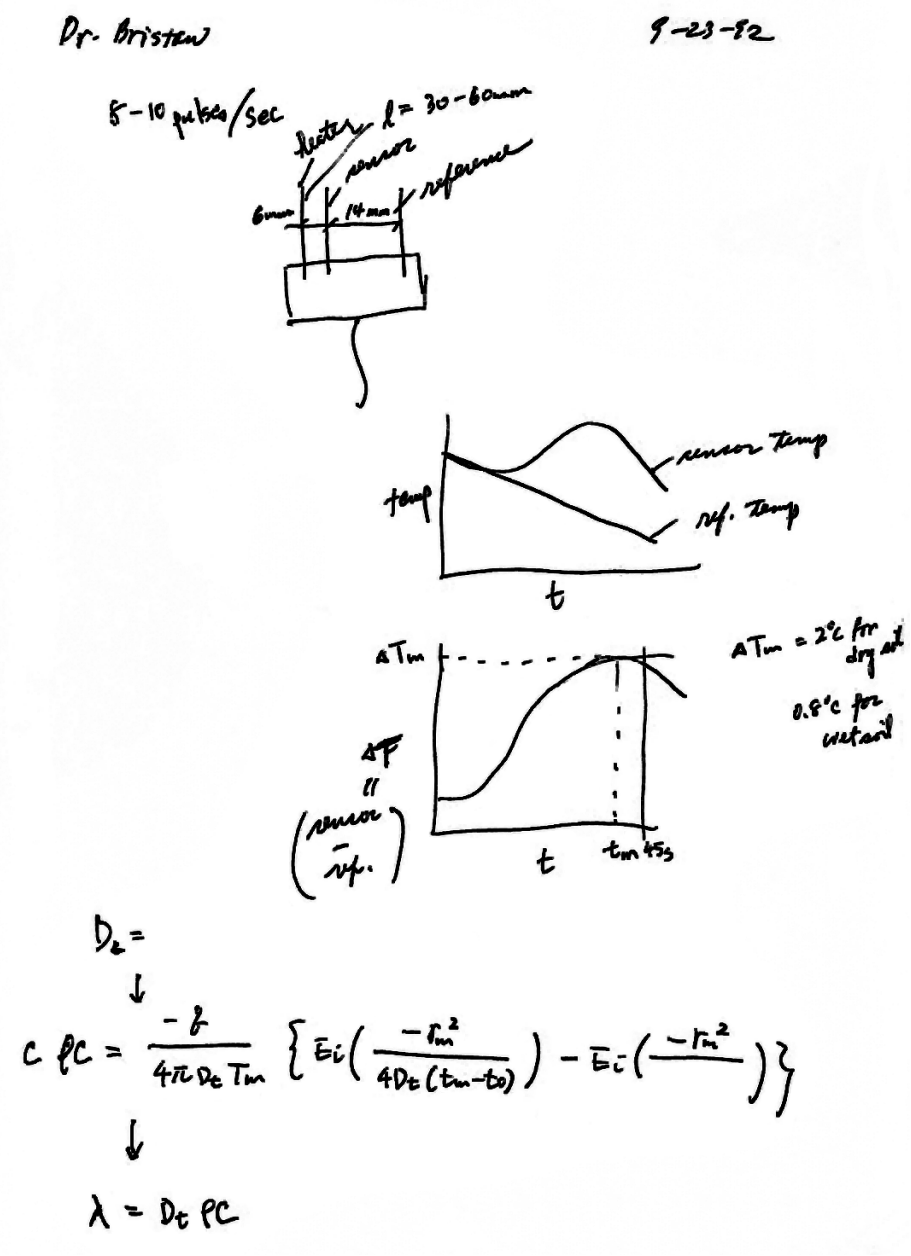



**Fig. 5** テキサス A&M 大学土壌及び作物科学科の定例セミナーで発表した CSRIO の Bristow 博士の講演に出席した 1992 年 9 月 23 日付研究ノート．この時に，DPHP 法を使って熱拡散係数（$D_t$），体積熱容量（$\rho_c$）の測定から熱伝導率（$\lambda$）を求められることを知った．
A research note, dated September 23, 1992, describing the presentation of Dr. Bristow, CSRIO, at the regular seminar of the Department of Soil and Crop Sciences, Texas A&M University. With his presentation, it was apparent that the thermal conductivity ($\lambda$) could be determined from measurements of the thermal diffusivity ($D_t$) and volumetric heat capacity ($\rho_C$) using the DPHP method.

す．Ham は小さな予備実験から大きな研究に至るまで，彼が行った全ての研究を 1 件ずつこのような研究ノートにまとめて整理していた．これは良い考えだと思って真似をすることにした．Fig. 2 の研究ノートから Fig. 4 の研究ノート作成まで 1 年以上の時間が経過したのは，この間に圃場実験をしたせいだと思われる．Fig. 4 の研究ノートでは，熱伝導率は単一プローブ法で，体積熱容量は熱パルス法で測定することが書かれている．当時はこれで論文原稿につなげようと考えていたが，問題が一つあった．それは，単一プローブ法と熱パルス法では必要とされるヒーターの上昇温度が異なるので，2 回に分けて昇温する必要があった．これでは，いかにも間抜けなセンサーである．熱伝導率測定へのヒーター昇温温度の影響はその後登尾ら（2002）の Fig. 4 にまとめた．

そんなある日，所属する土壌及び作物科学科の大学院セミナーで CSRIO の Keith Bristow の発表を聞く機会に恵まれた（Fig. 5）．この時に初めて，熱パルスセンサーのみで熱的性質の全てを測定可能なことを知った．これで間抜けなセンサーから抜け出せると思った．Campbell の熱パルス法を DPHP（dual-probe heat-pulse technique）

法と呼んだ Bristow et al.（1994）の論文が出るのを待ってデータ解析をやり直した結果，何とか論文にできそうな結果を得られた．この時 TDR プローブと単一プローブを組み合わせた複合プローブが既に発表されていた（Baker and Goodrich, 1987）が，多目的 TDR プローブの投稿原稿をまとめている時に初めてこの事実を知った．どの雑誌に出すかを McInnes と Heilman に相談したところ，当時毎月出版していた Soil Science 誌が早く出版できて良いだろうとの助言だった．出版回数が 2 ヶ月に一度の SSSAJ 誌では，誰かに先を越される恐れがあると彼らも私も考えた．

論文執筆の大部分は私が担当した．McInnes は，ヒーターの温度上昇がヒーターロッド周囲の土壌水を蒸発させることによる接触不良が熱パルス法による熱的性質測定に与える影響をシミュレーションモデルを作って解析して，その部分と熱パルス法による体積含水率測定の部分を加筆してくれた（Noborio et al., 1996）．同様の解析はアイオワ州立大学の Robert Horton の Ph.D. 課程学生であった Jim Bilskie（1994）もやっていて，ほぼ同じ結果を得ていたことを後年 Horton のポスドクになって知った．ヒーターの温度上昇に起因する土壌とヒーターロッドの接触不良問題は単一プローブ法による測定誤差として良く知られていた．ところが，熱パルス法ではこの種の問題が発生しないことが実験でもシミュレーションでも実証されたことは意義深い．

論文が Soil Science 誌 1996 年 1 月号に掲載されたのは，テキサス A&M 大学を卒業してカナダ・グエルフ大学でポスドクをしていた時であった．掲載から 1 ヶ月ほどで 100 部注文していた別刷りが全て無くなったと，日ごろは表情を余り表さない McInnes が，翌年会った時に嬉しそうに話したことは印象深い．インターネットがそれほど発達していなかった当時は，論文の別刷を郵便で要求することが一般的であった．

## 5. サーモ TDR プローブへの進化

別刷の要求人数から人々が大きな関心を持っていることが分かった．その中の一人がアイオワ州立大学の Robert Horton であった．カナダでのポスドク生活が終わりに近づいた 1997 年のある日，岩を絞るようにしてお金を工面したので，君の新しい TDR センサーに関する研究をやるからアイオワに来ないかという内容のメールが Horton から届いた．次の行き先を探していたので二つ返事で承諾した．1997 年 5 月にアイオワ州立大学に着いた時には，数ヶ月前にカナダ・アルバータ大学から到着した Tusheng Ren（現中国農業大学教授）が既にポスドクとして新 TDR センサーの研究を開始していた．

Horton，Ren，そして私の三人は週 1 回の定例会を開いて新 TDR センサーについて話し合った．先ず，センサーの大きさを再検討した．Noborio et al.（1996）の熱的性質の測定結果が変動するのはロッド間隔 $r$ が変化するせいであることは既に論文中でも述べていたので，ロッド直径を 1.3 mm，ロッド長さを 40 mm にすることで，$r$ の変化を極力抑えた（Fig. 6）．Ren の丁寧な実験を目の当たりにして，実験ではかなわないと痛感した．テキサス A&M 大学在学中に開発した Macintosh 用 TDR 波形解析プログラムを Ren に渡すと，彼は DOS 上の MS Basic に移植して使った．いよいよ新 TDR センサーの原稿を SSSAJ に投稿する手筈が整った時，Horton が多くの研究者に覚えてもらい易い “thermo-time domain reflectometry probe” と呼ぶのはどうだと我々に提案した．Ren と私は素晴らしい名前だと賛同して，Ren は 1998 年の年明け早々に SSSAJ 誌へ投稿した．この論文が世に出た 1999 年 5 月以降，サーモ TDR プローブの名前は，Horton と Ren の研究グループの精力的な研究と論文投稿のおかげで徐々に定着し，その用途は Noborio ら（1996）が考えてもいなかった方向にも大きく拡大して現在に至っている（例えば， Ocshner et al., 2001; Ren et al., 2003; Heitman et al., 2010; Tokumoto et al., 2010; Kojima et al., 2014; He et al., 2018; Tian et al., 2018）．

## 6. おわりに

多くの研究者が関わって TDR 法と DPHP 法の可能性を広げる時代が 2000 年初頭まで続いた．TDR 法と DPHP 法の黎明期と呼べる眩しい時代であった．私がこの時代に遭遇できたことは誠に幸運であった．最後に特

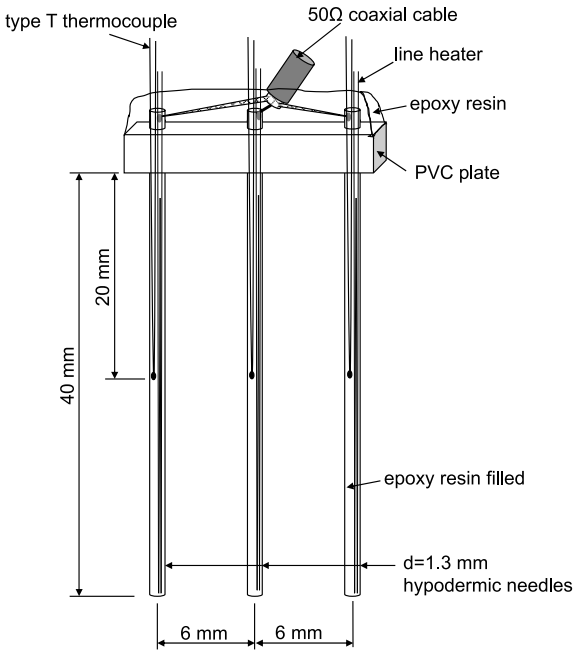



**Fig. 6** サーモ TDR プローブと呼ばれるようになった多目的 TDR プローブ（Ren et al., 1999 の Fig. 1 を一部改変）．
A multipurpose TDR probe, which have come to be called a thermo-TDR probe (partly modified Fig. 1 of Ren et al., 1999).

記しておきたいのは，サーモ TDR プローブの潜在能力にいち早く目をつけたアイオワ州立大学の Robert Horton が居なければ，この論文も多くの論文と同様に幾多の論文の山の中に埋もれて忘れ去られる運命にあったことである．サーモ TDR プローブとして更に発展させて世に広めてくれた Robert Horton と彼の研究グループに改めて感謝したい．

## 謝辞

原稿執筆の機会をいただいた編集委員会に深謝いたします．

## 引用文献


Baker, J.M. and Allmaras, R.R. (1990): System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1–6.

Baker, T.H.W. and Goodrich, L.E. (1987): Measurement of soil water content using the combined time-domain reflectometry – thermal conductivity probe. Can. Geotech. J., 24:160–163.

Bilskie, J.R. (1994) : Dual-probe methods for determining soil thermal properties: Numerical and laboratory study. Ph.D. Dissertation, Iowa State University, Ames, IA, U.S.A. https://lib.dr.iastate.edu/rtd/10679

Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J. and Horton, R. (1994): Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1288–1294.

Campbell, G.S. (1985): Soil physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherland.

Campbell, G.S. and Anderson, R.Y. (1998): Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement. Computers and Electronics in Agriculture, 20:31–44.

Campbell, G.S., Calissendorff, C. and Williams, J.H. (1991): Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. Soil Sci. Soc. Am. J., 55: 291–293.

Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959): Conduction of heat in solids. 2nd ed. Oxford University Press, New York.

Dasberg, S. and Dalton, F.N. (1985): Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 49 :293–297.

de Vries (1952): A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. Soil Science, 73: 83–89.

He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Ren, T., Bristow, K.L., Lv, J. and Si, B. (2018): Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements. Reviews of Geophysics, 56: 567–620. https://doi.org/10.1029/2017RG000584.

Heitman, J.L., Horton, R., Sauer, T.J., Ren, T.S. and Xiao, X. (2010): Latent heat in soil heat flux measurements. Agriculture and Forest Meteorology, 150:1147–1153.

木村園子ドロテア, 登尾浩助 (2011):第 12 章 SRI と土壌環境, pp. 110–120. In J-SRI 研究会（編） 稲作革命 SRI. 日本経済新聞出版社.

Kojima, K., Heitman, J.L., Flerchinger, G.N., Ren, T., Ewing, R.P. and Horton, R. (2014): Field test and sensitivity analysis of a sensible heat balance method to determine soil ice contents. Vadose Zone J., doi: 10.2136/vzj2014.04.0036

Malicki, M.A. and Skierucha, W.M. (1989): A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. Irrigation Science, 10: 153–163.

Noborio, K. and McInnes, K.J. (1993): Thermal conductivity of salt-affected soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 57: 329–334.

Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1994): Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. Computers and Electronics in Agriculture 11: 131-142.

Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1996): Measurements of soil water content, heat capacity and thermal conductivity with a single TDR probe. Soil Science, 161: 22–28.

登尾浩助, K.J. マクイネス, J.L. ハイルマン (1997): コンピュータ制御による多点化 TDR システムの試作と応用. 農業土木学会論文集, 188: 129–135.

登尾浩助, K.J. マクイネス, J.L. ハイルマン (2002): 双子プローブ熱パルス法による土壌の熱的性質測定の比較. 土壌の物理性, 90: 3–9.

登尾浩助, 徳本家康, 向井田善朗 (2005): シリンダーに充填した土壌の熱拡散係数を簡易に推定する方法. 土壌の物理性, 101: 5–10.

Noborio, K. and Kubo, T. (2017): Evaluating a dual-frequency-phase-shift soil moisture and electrical conductivity sensor. Paddy and Water Environment, 15(3): 573–579.

Ocshner, T.E., Horton, R. and Ren, T. (2001): Simultaneous water content, air-filled porosity and bulk density measurements with thermo-time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 1618–1622.

Parikh, R.J., Havens, J.A. and Scott, H.D. (1979): Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media. Soil Sci. Soc. Am. J., 43: 1050 -1052.

Ren, T., Noborio, K. and Horton, R. (1999): Measuring soil water content, electrical conductivity and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. Soil Sci. Soc. Am. J., 63: 450–457.

Ren, T., Ocshner, T.E. and Horton, R. (2003): Development of thermo-time domain reflectometry for vadose zone measurements. Vadose Zone J., 2: 544–551.

Riha, S.J., McInnes, K.J., Childs, S.W. and Campbell, G.S. (1980): A finite element calculation for determining thermal conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 1323–1325.

Shiozawa, S. and Campbell, G.S. (1990): Soil thermal conductivity. Remote Sensing Reviews, 5(1): 301–310.

Tarara, J.M. and Ham, J.M. (1997): Measuring soil water content in the laboratory and field with dual-probe heat-capacity sensors. Agron. J., 89: 535–542.

Taylor, S.A. and Jackson, R.D. (1986): Heat capacity and specific heat, pp. 941–944. In Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods-Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition).

Tian, Z., Lu, Y., Ren, T., Horton, R. and Heitman, J.L. (2018): Improved thermo-time domain reflectometry method for continuous in-situ determination of soil bulk density. Soil & Tillage Research, 178: 118–129.

Tokumoto, I., Noborio, K. and Koga, K. (2010): Coupled water and heat flow in a grass field with aggregated Andisol during soil-freezing period. Cold Regions Science and Technology, 62: 98–10.

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16: 574–582.

矢野友久, 登尾浩助, 小谷佳人 (1988): 土中塩分管理のためのリーチングに関する研究. 鳥取大学農学部研究報告 41: 151–157.

キーワード：時間領域反射法，熱パルスセンサー，土壌水分量，熱的性質，複合センサー