

## 20GHz-TDR 装置を使った比誘電率測定の特徴

登尾 浩助\*・君島 章太郎\*・石崎 武志・武田 一夫\*\*

### 1. はじめに

文化財の中でも特にレンガや土のような多孔質体によって作られて屋外に存在する建造物は、直接屋外環境に暴露されていることから比較的速く風化する危険にさらされている。例えば、タイ国アユタヤの歴史的レンガ建造物では、塩類析出によるレンガの劣化が見られる<sup>1)</sup>。また、盛岡市の志波城跡に再建された築地塀では、冬期の低温に起因する凍結とその後に起こる融解による著しい劣化が観察されている<sup>2)</sup>。このような文化財の適切な保存法を構築するためには、劣化の実態と過程を理解する必要があるが、文化財のレンガや土構造物に含まれる水分量の経時的な変化を把握することが求められる。

レンガや築地壁の水分量を測定するには、試料を破壊的に取り出して重量法で求めるのが一般的である。非破壊的な測定法としては、電気抵抗法や静電容量法があるが、測定時の試料の温度や溶存塩類の影響を大きく受けるため、正確な測定を行うのは極めて困難である。非破壊測定法の中でも中性子散乱法とガンマ線吸収法は、事前に較正を行うことによって比較的正確な水分量測定が可能であるが、放射線を使用するので人体の健康への影響に十分な注意を払う必要がある。このように多孔質体中の水分量の非破壊測定はこれまで技術的に困難であったが、1980年にToppらが紹介したTDR (time domain reflectometry)法<sup>3)</sup>によって、安全でしかも正確な水分量の測定が可能となった。TDR法を使う大きな利点の一つは、単一のプローブを用いて水分量と同時に電気伝導度の測定も可能なことである<sup>4)</sup>。一般に広く使われているTDR装置(例、テクトロニクス社製1502C、キャンベル・サイエンティフィック社製TDR100など)は周波数帯域が1GHz程度であるので<sup>5)</sup>、レンガ表面や築地壁表面といった小さな部位の水分量の変化を測るために使いたい短いTDRプローブ(例えば、長さ50mm以下)を使用すると水分量が小さくなった時に測定精度が低下することが知られている<sup>6)</sup>。

塩類析出によるレンガの劣化や凍結・融解による築地塀の劣化現象は、特に低水分状態における多孔質体中の物質と熱移動が関係しているため、劣化防止策を提案するためには低水分状態における水分量変化を精度良く測定する必要がある。しかし、上述のように短いTDRプローブを使っての低水分量測定には精度的な問題がある。そこで、周波数帯域の広い20GHz-TDR装置と従来型の1GHz-TDR装置を使って比誘電率測定の比較をしたので報告する。

### 2. 実験方法と材料

実験には長さ約40mmで直径1.6mmのステンレス鋼棒を使って作成した2線式TDRプローブを使用した(写真1)。ステンレス鋼棒2本の間隔を15mmにしてPVC製台座に穴をあけて差し込み、エポキシ系接着剤で固定した。鋼棒の片方を50 同軸ケーブルの芯線に、もう片方を編線に接続するようSMAコネクタに半田付けした。編線に接続する方の鋼棒は中空で、長さ方向の中程に温度測定用のT型熱電対を挿入して固定した。中空の残りの部分には熱伝導性シリコンを充填した。TDR装置には周波数帯域20GHzの86100B+54754A(アジレント・テクノロジー社)と周波数帯域約1GHzの1502C(テクトロニクス社)を使った。室温を約20 に保った実験

\*岩手大学, \*\*帯広畜産大学

室において、作成した2線式TDRプローブを大気、風乾した豊浦標準砂、蒸留水で飽和した豊浦標準砂、そして蒸留水に挿入して反射波形を測定した。この反射波形を解析してそれぞれの測定物の比誘電率を決定した。

プローブを挿入した物質の比誘電率  $\bar{\kappa}$  は、

$$\bar{\kappa} = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad [1]$$

と計算される<sup>3)</sup>。ここに、 $L$ はプローブの物理長さ(m)、 $c$ は電磁波の真空中での

伝播速度(=0.3m/ns)、 $t$ は電磁波がプローブ長さ $L$ の往復移動に要する時間(ns)である。TDR装置では式[1]中の $t$ を測定する。 $t$ を測定するために、写真1に示されるプローブ入口とプローブ終端をTDR装置上で決定する(図1)。プローブ入口は、プローブ入口でステンレス鋼棒を短絡させて決定した。ここで決定したプローブ入口の位置は、同軸ケーブルの長さが変わらない限り変化しない。また、プローブ終端の位置はBakerとAllmaras<sup>7)</sup>が提案した反射波形の1次微分を利用する方法に準拠して決定した<sup>8)</sup>。TDR法に関する詳しい説明は他の論文<sup>4)</sup>を参照されたい。土壌などの多孔質体の体積含水率 $\gamma$ ( $m^3/m^3$ )と比誘電率 $\bar{\kappa}$ との間には、実験的な関係が見いだされていて、この関係は土壌とプローブの接触具合、温度、溶質の存在、乾燥密度、土壌構造、土性、ヒステリシスの影響をほとんど受けないことが報告されている<sup>3)</sup>。

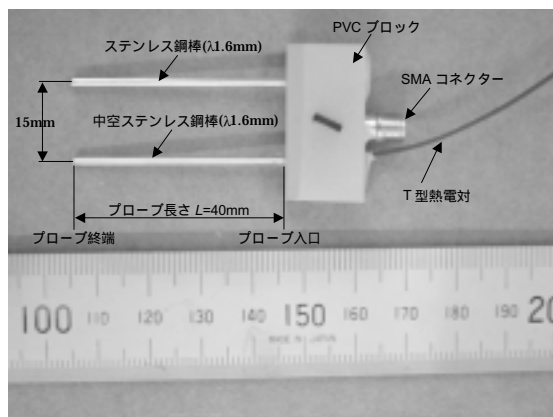


写真1 長さ40mmの2線式TDRプローブ。

### 3. 結果と考察

図1に20GHz-TDR装置と1GHz-TDR装置によって測定した電磁波の反射波形を示す。蒸留水の中での反射波形からは、プローブの入口と終端から反射が明瞭に分かり、どちらのTDR装置を使ってもほぼ同じ形状であった(図1(B))。また、蒸留水の比誘電率は、どちらのTDR装置を使っても測定しても理科年表の値と近似していた(表1)。理科年表に示されている蒸留水の真値80.4に対する測定誤差は、20GHz-TDR装置では0.9%、1GHz-TDR装置では2.4%であった。水分飽和砂に対しても両方のTDR装置において類似の結果が得られた。水分量が多いとき、即ち比誘電率が大きいときは、いずれのTDR装置を使っても数%以下の測定誤差で比誘電率の測定が可能であった。これは、式[1]を見ると明らかで、 $\bar{\kappa}$ が大きいときには $L$ に対して十分な大きな $t$ が測定されるためである。即ち、 $t$ の測定誤差が $\bar{\kappa}$ の計算結果に大きな影響を与えないことを示している。

しかし、水分量が少なくなるとプローブ入口を反射波形から決定するのは、特に1GHz-TDR装置では困難になった(図1(A))。プローブ終端からの反射も20GHz-TDR装置に比較すると不明瞭である。特に大気中ではプローブ終端を特定するのが極めて困難であった。理科年表<sup>9)</sup>に示されている大気の実値1に対する測定誤差は、20GHz-TDR装置では10%、1GHz-TDR装置では20%であった。風乾砂に対して、両TDR装置においてプローブ終端の決定位置が異なったのは、1GHz-TDR装置による反射波形が不明瞭なことに起因する。これは、 $\bar{\kappa}$ が小さいときには式[1]において $L$ に対して $t$ の測定精度が極めて重要であることを示している。そのため、20GHz-TDR装置ではその特性のために特に低水分領域において明瞭な反射波形を得ることができるので

(図1), 1GHz-TDR装置に比べてより正確な  $\bar{\kappa}$  の測定が可能である。

$t$  の測定誤差が  $\bar{\kappa}$  の計算結果に与える影響は, 式[1]を  $t$  について微分した後,  $t$  の測定誤差  $\pm t$  を掛けることによって  $\bar{\kappa}$  の測定誤差  $\pm \bar{\kappa}$  として与えられる。さらに,  $\pm \bar{\kappa}$  の真値  $\bar{\kappa}$  に対する比を計算することによって相対評価<sup>10)</sup>, 相対測定誤差  $i$  (%) を表した。

$$i = \left| \frac{\partial \bar{\kappa}}{\partial t} \pm t \right| \left| \frac{1}{\bar{\kappa}} \Delta 100 \right| = \left| \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{R}{2L^2} \right) \pm t \right| \left| \frac{1}{\bar{\kappa}} \Delta 100 \right| \quad [2]$$

図2には40mm長さのプローブを用いた際に, 時間の測定誤差  $\pm t$  によって発生する  $\bar{\kappa}$  の相対測定誤差  $i$  を示す。比誘電率  $\bar{\kappa}$  が小さくなるにしたがって, 時間の測定誤差  $\pm t$  が同じであっても比誘電率の測定誤差  $i$  が大きくなるのが分かる。表1に示した大気に対する測定誤差から推定すると, 20GHz-TDR装置では, 時間の測定誤差が  $\pm t = 0.01 \sim 0.02 \text{ ns}$  程度であると考えられる。一方, 1 GHz-TDR装置では,  $\pm t = 0.03 \text{ ns}$  程度である。したがって, 20GHz-TDR装置の方が0.02ns程度精度良く測定可能である。測定精度の違いは, 図1(A)に示されるように20GHz-TDR装置の方がより解像度の高い反射波形を提供できることが要因である。両TDR装置による波形解像度の違いが及ぼす比誘電率測定への影響は, 特に比誘電率が小さい(即ち, 水分量が小さい)ときに顕著であった。

本実験から, 20GHz-TDR装置は反射波形の解像度が高いため, 短いプローブ

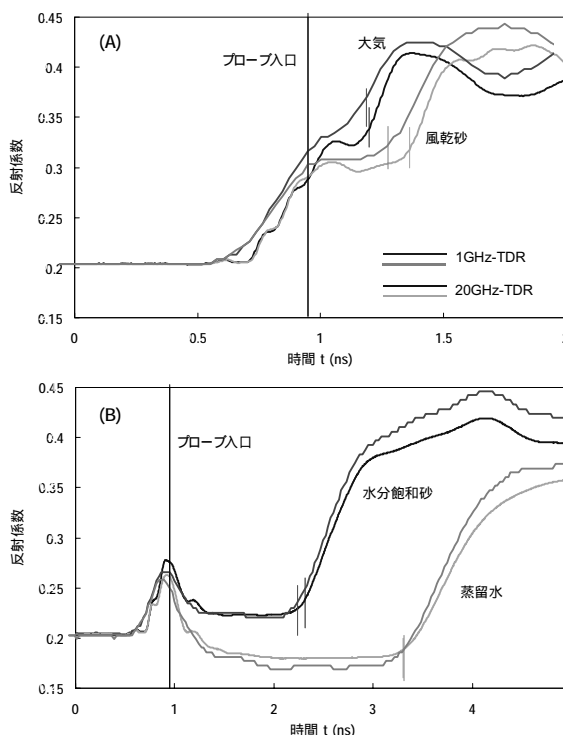


図1 40mm長のプローブを大気・風乾砂(A)と水分飽和砂・蒸留水(B)中に入れたときの電磁波の反射波形。短い縦線はプローブ終端を示す。プローブ入口からプローブ終端までの時間が[1]式中の  $t$  を示す。

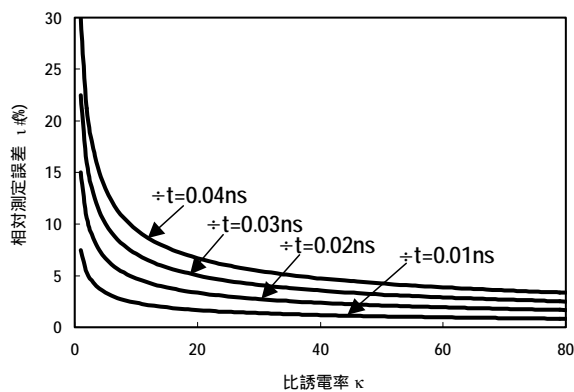


図2  $L=40 \text{ mm}$ 長のプローブを使って測定した場合の時間測定誤差  $\pm t$  が与える比誘電率  $\bar{\kappa}$  測定に対する相対誤差  $i$

表1 20GHz-TDR装置と1GHz-TDR装置により測定した各試料の比誘電率  $\bar{\kappa}$ 。( )内は理科年表<sup>9)</sup>に示される真値に対する相対測定誤差  $i$  (式[2])を表す

	大気	風乾砂	水分飽和砂	蒸留水
20GHz-TDR	0.9 (10%)	2.5	27.4	81.1 (0.9%)
1GHz-TDR	0.8 (20%)	1.6	24.9	82.3 (2.4%)
理科年表 <sup>9)</sup>	1.0	-	-	80.4

ブを使っても低水分状態において明瞭な波形を提供できることが分かった。したがって、20GHz-TDR装置は、1GHz-TDR装置ではこれまで困難であった低水分状態のレンガや土構造物の水分量を短いプローブを使用してもより正確に測定することが可能であるので、文献1, 2で示されたような文化財構造物の劣化機構の解明と保存法の提案に貢献すると思われる。比誘電率が小さい場合でもプローブ入口が明瞭に分かるようなプローブの形状の検討とプローブ終端を決定するためのアルゴリズムの改良が今後の研究課題である。

#### 参考文献

- 1) 石崎武志, 朽津信明, 西浦忠輝, ユッカシムネック: タイ国アユタヤの歴史的レンガ建造物中の水分移動解析, 保存科学, 38, 154-163 (1999)
- 2) 石崎武志, 武田一夫, 登尾浩助: 史跡・志波城跡築地塀の凍結劣化に関する研究, 文化財保存修復学会誌, 47, 36-49 (2003)
- 3) Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16, 574-582 (1980)
- 4) 登尾浩助: 実践TDR法活用 - 土壌中の水分・塩分量の同時測定 - , 土壌の物理性, 93, 57-65 (2003)
- 5) Heimovaara, T.J., E.J.G. de Winter, W.K.P. van Loon, and D.C. Esveld: Frequency-dependent dielectric permittivity from 0 to 1 GHz: time domain reflectometry measurements compared with frequency domain network analyzer measurements, Water Resour. Res., 32, 3603-3610 (1996)
- 6) Amato, M., and J.T. Ritchie: Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry, Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 325-329 (1995)
- 7) Baker, J.M., and R.R. Allmaras: System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry, Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 1-6 (1990)
- 8) 登尾浩助, K.J.マクイネス, J.L.ハイルマン: 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, 農土論集, 188, 129-135 (1997)
- 9) 国立天文台編: 理科年表, 机上版, 第64冊, 丸善株式会社 (1991)
- 10) Jordan, K.A., and J.I. Sewell: Analysis of the problem, In B.W. Mitchell (ed): Instrumentation and measurement for environmental sciences, Second ed., American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 1-01-1-04 (1983)

キーワード: TDR法(time domain reflectometry); 比誘電率(dielectric constant); 豊浦標準砂(Toyoura standard sand); プローブ(probe); 水分量(water content)

## On Measuring Dielectric Constant Using a 20GHz Time Domain Reflectometry Instrument

Kosuke NOBORIO<sup>\*</sup>, Shotaro KIMIJIMA<sup>\*</sup>, Takeshi ISHIZAKI  
and Kazuo TAKEDA<sup>\*\*</sup>

Nondestructive measurements of water content in porous media, e.g., bricks, stones, and compacted soil, are required to assess the deterioration of historical buildings/structures. Unlike conventional methods, time domain reflectometry (TDR) can nondestructively and continuously measure water content by monitoring changes in dielectric constant. The popularly-used TDR instrument, e.g., 1502C of Tektronix Inc., has an effective frequency range of 1GHz while a higher-end TDR instrument, e.g., 86100B+54754A of Agilent Technologies, has that of 20GHz. The 20GHz TDR instrument provided clearer waveforms with a 4cm-long probe than did the 1GHz TDR instrument when a TDR probe was placed in conditions with less water content. Further research is needed for an appropriate design of a TDR probe and for improving a waveform analysis algorithm.

---

<sup>\*</sup>Faculty of Agriculture, Iwate University, <sup>\*\*</sup>School of Agriculture, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

