

遺跡レンガの物理性の測定： II. サーモ TDR プローブによる熱・誘電特性の同時測定

登尾浩助*, 鈴木葉子*, 石崎武志**

1. はじめに

タイ国のアユタヤ遺跡のようにレンガやモルタル等の多孔質体で作られた遺跡の風化が深刻な問題となっている。石崎ら(1999, 2000)は、風化対策のためには遺跡の多孔質体内部における水分・溶質・熱の移動を定量的に把握することが重要であり、そのためには数値モデルによるコンピュータシミュレーションを使うことが有効であることを示した。

レンガの熱的性質(熱伝導率, 体積熱容量, 熱拡散係数)は、数値モデルを利用してレンガ内部の温度分布を予測したり、温度勾配によって移動する水分および水分移動に伴う可溶性塩類の輸送を把握する際に必要となるパラメーターである。単一の金属円筒にヒーターと温度計の両方を封入し、ヒーターに通電中あるいは通電後のプローブの温度変化を測定することにより、熱伝導率を測定する単一プローブ法は、1930～40年代に原型が発表されて以来今日でも広く用いられている。しかしこの方法は、熱伝導率のみを測定するもので、レンガ内部の熱移動を解析するためには、熱容量を別の方法で推定する必要がある。乾燥レンガの熱容量に対するデータは見受けられるが、レンガの水分量と熱容量の関係に関する研究は極めて稀である。これはこのような関係を容易に測定できる装置がこれまで紹介されてなかったことも一因と考えられる。近年開発された双子プローブ熱パルス(Dual Probe Heat Pulse, DPHP)法を使うと、単一のプローブで熱拡散係数, 熱容量, 熱伝導率を同時に測定可能である(Bristowら, 1994; Noborioら, 1996; Renら, 1999; 登尾ら, 2002b)。

また、水の誘電率($\epsilon \approx 80$)が土壌を構成する他の物質である空気($\epsilon \approx 1$)や土粒子($\epsilon \approx 3 \sim 7$)の誘電率に比較して極めて大きい性質を利用して土壌の含水率を推定する方法が近年注目を集めている。特にToppら(1980)が、電磁波を利用した時間領域反射(Time Domain Reflectometry, TDR)法を使って土壌の見かけの誘電率を測定することにより、土壌の含水率を推定する方法を紹介して以来、土壌の含水率測定にTDR法が広く用いられるようになってきている。従来、土壌含

*岩手大学農学部 〒020-8550 盛岡市上田3丁目18-8

** (独)東京文化財研究所保存科学部 〒110-8713 台東区上野公園13-43

キーワード：熱伝導率 (thermal conductivity), 体積熱容量 (volumetric heat capacity), 誘電率 (dielectric constant), 水分量 (water content), TDR法 (time domain reflectometry)

水率の測定には、採取した試料を使った炉乾燥法、中性子法、ガンマ線法等が使われているが、破壊的な測定法であったり、その土壌毎に校正が必要であったり、取り扱いに許可が必要(人体の健康に悪影響の可能性)などの制約があった。しかしTDR法による含水率の測定は、概ね非破壊的な測定法で、一般的な土壌に対しては校正の必要がなく、測定に対して温度・可溶性塩類による影響をほとんど受けないなどの特徴がある(Toppら, 1980)。さらに、TDR法は、含水率と電気伝導度を単一のプローブを使うことによって同時に測定可能であり(Daltonら, 1984)、多点自動測定を比較的容易に構築できる(Baker and Allmaras, 1990)などの特徴も有する。TDR法による土壌含水率と電気伝導度の測定に関しては、Noborio(2001)に詳細な解説がある。TDR法を使った土壌の含水率測定に対してはこれまでに多くの研究がなされてきたが、レンガの含水率測定にはほとんど関心が払われてこなかったのが実情である。レンガやモルタル造りの遺跡建造物の風化状況を把握する際には、これら材料中の水分状態を正確に把握する必要があるので、TDR法によるレンガ含水率測定法の確立が望まれる。

本報では、前報で報告したタイ国アユタヤ遺跡の補修用レンガの水理特性(登尾ら, 2002a)に続いて、前報で使用したのと同じレンガに対して熱的性質と誘電特性を測定したのでその結果を報告する。測定には、単一のプローブで熱的性質と誘電率の同時測定が可能なサーモTDRプローブ(Noborioら, 1996; Renら, 1999)を使用した。

2. 理論

1. 熱的性質の測定

双子プローブ熱パルス(DPHP)法は、無限長の線熱源から短時間の熱パルスが放射状に伝導する際の熱伝導理論に基づいており、ある時刻におけるある地点での温度変化は次式で表される(Bristowら, 1994)。

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\alpha\rho C_p} \left[\text{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)}\right) - \text{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \right] \quad (1)$$

ここに、 ΔT = 温度変化 ($^{\circ}\text{C}$)、 q = ヒーターへの入力熱量 (W m^{-1})、 α = 熱拡散係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 ρC_p = 体積熱容量 ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 r = 線熱源からの放射状方向距離 (m)、 t_0 = 熱パルスの時間 (s)、 $-\text{Ei}(-x)$ = 指数積分関数である。この理論からBristowら(1995)は、無限長線熱源からある一定距離の所での温度変化を測定し、式(1)に適合することにより熱拡散係数 α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)と体積熱容量 ρC_p ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)の推定が可能である。また、熱伝導率 λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)は、熱伝導率の定義から $\lambda = \alpha \cdot \rho C_p$ として求めることができる。

式(1)が無限長線熱源に対する解で、実際のプローブの熱源は有限長であることから、熱パルスの発生から時間が経つにつれてある地点における温度変化に矛盾が生じてくる。すなわち、経過時間と共に変化する温度の低下量が理論よりも大きい場合である。この不都合を回避するために、

Bristowら(1995)は、最大温度変化が生じる付近のみのデータを使って式(1)への当てはめを行う方法を提案した。彼らは、温度変化 ΔT のうち最高温度に近い方の75%のデータを使って当てはめを行ったので、本実験でもこれにならった。

2. 誘電率と含水率の測定

TDR ケーブルテスターに内蔵されているパルス発生器から放出された電磁波は、同軸ケーブルを伝播して、インピーダンスの不整合のため測定用プローブの入り口で入力電磁波の一部は反射されるが、残りの電磁波はプローブの導線をさらに伝播してプローブ終端まで到達して反射され、ケーブルテスターに向けて戻って行き、その軌跡がオシロスコープ上に波形として表示される。この波形情報から次式によって誘電率 ϵ の計算が可能である(Noborio, 2001)。

$$\epsilon = \left(\frac{L_a}{V_p L} \right)^2 \quad (2)$$

ここに、 ϵ = 誘電率、 L_a =TDR ケーブルテスターの画面上でプローブの始端から終端までの長さ(m)、 V_p =同軸ケーブル内を伝播する電磁波の相対速度(水分量測定には $V_p = 0.99$ とする場合が多い)、 L =プローブの実長(m)である。Toppら(1980)は、さまざまな土性の土壌に対して誘電率 ϵ と体積含水率 θ の関係を次のように与えた。

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

ここに、 θ = 体積含水率($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)である。式(3)は砂質から壤質土壌に対しては良く適合するが、粘質土壌や有機質の多い土壌では体積含水率を過小評価することが知られている。したがって、土壌とは多少性質の異なるレンガについては、遺跡レンガに固有の体積含水率と誘電率の関係を求めることにより、現場での遺跡レンガの体積含水率測定をTDR法を用いて非破壊的に行うことが可能である。式(3)の関係が温度や可溶性塩類の影響をほとんど受けない(Toppら, 1980)ことから、遺跡レンガに対する関係においてもこれらの影響はほとんど受けないものと考えられる。

また、土壌の水分分布がTDRプローブの長さ方向に対して一様でない場合、TDR法はTDRプローブの長さ方向に沿った体積含水率の加重平均を測定する(Toppら, 1982)。平均体積含水率、 $\bar{\theta}$ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)、は、

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n Z_i} \quad (4)$$

と表され、ここに、 n =異なる体積含水率の土層数、 Z_i =層 i の厚さ(m)、 θ_i =層 i の体積含水率($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)である。遺跡レンガに対しても式(3)は成り立つと考えられる。

3. 実験方法と材料

タイ国アユタヤ遺跡の寺院建築に使われている補修用のレンガを、 $2.78 \times 2.93 \times 4.21\text{cm}$ の直方体に整形したものを使用し、蒸発面は $2.78 \times 2.93\text{cm}$ (面積 8.1cm^2)とした。サーモTDRプローブを挿入する穴を 0.6mm のドリルであけた。蒸留水で飽和後のレンガの質量を測り、側面と底面を、蒸発面以外からの蒸発を抑制するために、プラスチックラップで覆い、試料を実験装置にセットした。実験装置の全体図は図-1に示す。電子天秤で質量変化を、TDR ケーブルテスターで電磁パ

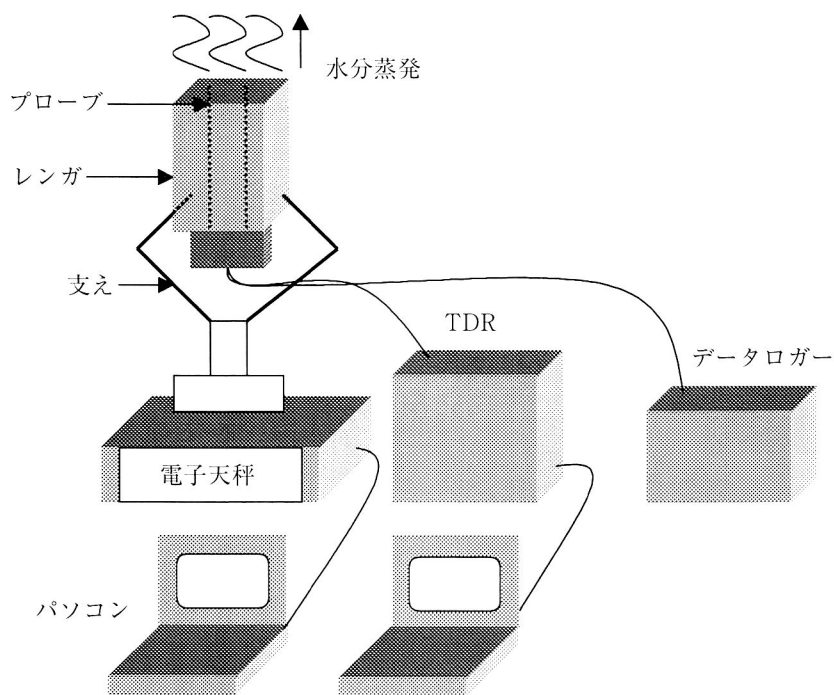


図-1 実験装置の概略図
(Figure 1. An experimental Apparatus.)

ルスの反射波形を、そして、ヒーターへ電流を13秒間流した時の温度変化を、1時間毎に測定した。電子天秤による質量(レンガ+レンガ中の水分量+支え)からレンガと支えの質量を引き蒸発量を得た。蒸発した水分の質量を体積に換算し、レンガの体積で割ってレンガの体積含水率を算出した。実験は室温を約 20°C に設定した実験室内で行った。

測定には、Noborioら(1996)とRenら(1999)が設計した3線式サーモTDRプローブを参考にして、2線式サーモTDRプローブを作成して使用した(図-2)。サーモTDRプローブは、長さ 40mm 、外径 1.3mm の注射針2本から成り、注射針を $r=6\text{mm}$ 間隔で一直線上に並べて注射針の一端をプラスチック板に穴をあけて固定した。一方の注射針には、T型(銅-コンスタンタン)熱電対を注射針の中ほどまで挿入して固定した。もう片方の注射針には、二つ折にしたヒーター用電熱線とT型熱電対とを挿入した。熱電対とヒーター挿入後の注射針内部の空隙にはエポキシ系接着

剤を充填し、電氣的絶縁と熱的接続を確保した。ヒーターには、熱パルスとして約 $q=53\text{ W m}^{-1}$ の熱量を13秒間与えた。ヒーターの制御とプローブでの温度測定には、データロガー(キャンベル社CR23X)を使用した。1時間ごとに温度変化とヒーターへの印加電流のデータを収集し、式(1)からレンガの熱的性質を推定した。測定に先立って、 2 g L^{-1} の寒天溶液中でプローブ間隔 r を校正した(Bristowら, 1994)。

さらに、このサーモTDRプローブはTDR用プローブも兼用させるために、 $75\ \Omega$ の同軸ケーブル(RG125)を注射針の上端部に半田付けした。同軸ケーブルの他端は、TDRケーブルテスター(テクトロニクス社 モデル1502C)に接続した。ケーブルテスターは、RS-232Cポートを通してコンピュータで自動制御し、1時間ごとに反射波形を収集した。収集した波形はBaker and Allmaras(1990)が提案した手法に基づいて解析し、誘電率 ϵ を決定した(登尾ら, 1997)。

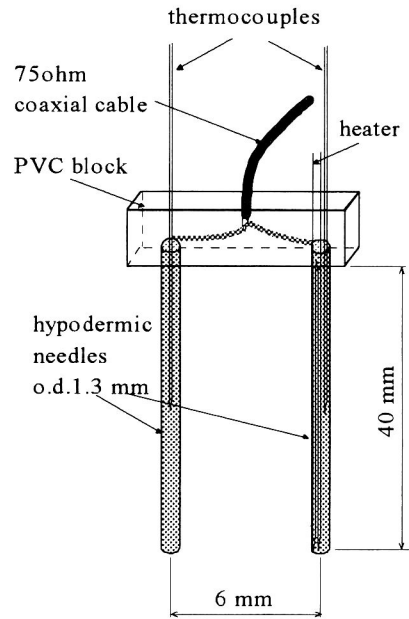


図-2 サーモTDRプローブの構造図(Noborioら, 2000より)。(Figure 2. A thermo-time domain reflectometry probe. After Noborio et al., 2000.)

4. 結果と考察

レンガの体積含水率 θ の変化に伴って変化する体積熱容量 ρC_p が図-3に示される。 θ - ρC_p 間には、有意な線形関係があった($P < 0.001$)。乾燥領域では、他のレンガの熱容量に対する値($1.42\text{ MJ m}^{-3}\text{ K}^{-1}$)とほぼ同程度であった(tak2000, 2001)。土壌では θ - ρC_p の関係は、図-3に示されるように傾きが水の体積熱容量である $4.18\text{ MJ m}^{-3}\text{ K}^{-1}$ を持つ直線式で近似されることがよく知られている(Campbell, 1985)。本実験で使用したレンガも $\theta < 0.12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ では、傾きが水の体積熱容量に等しいと見なしても差し支えないと思われる。しかし、 $\theta > 0.12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ の多水分領域においては、従来言われている土壌の θ - ρC_p 関係と比較すると、体積含水率の増加に伴うレンガ熱容量の増加割合は自由水の熱容量の約半分であった。同様に多水分領域において水分量の増加に伴う熱容量の増加割合が自由水の半分程度である傾向は、ピーナッツの水分量と熱容量にも見られる(Wright and Porterfield, 1970)。このような土壌と異なる θ - ρC_p の関係がレンガに対する普遍的な現象かどうかは、今後の研究を待つ必要がある。

次に図-4には、レンガの熱伝導率 λ が体積含水率 θ の変化と共に変化する様子が示される。体積含水率の増加と共に熱伝導率も増加した。特に、 $\theta \approx 0.07\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ を境界に、体積含水率の増加に対する熱伝導率の増加具合が変化した。このような現象は土壌においても観察されており、Campbell(1985)は θ - λ 関係をMcInnesの経験式によってあらわすことを提案した。図-4に示すように、本実験で測定したレンガの θ - λ 関係にもMcInnesの経験式を適合することが可能であっ

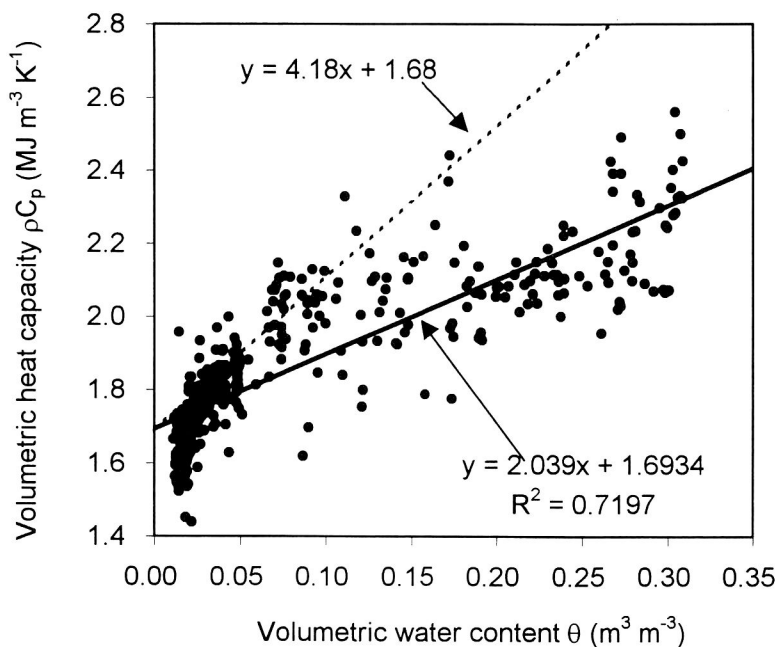


図-3 レンガの体積熱容量 ρC_p と体積含水率 θ の関係。実線は、実測値を直線回帰した。破線は、水の体積熱容量 ($4.18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$) を直線の傾きと仮定した。

(Figure 3. Volumetric heat capacity, ρC_p , of a brick relates to volumetric water content, θ . The solid line indicates a linear regression line, and the broken line showed the ρC_p - θ relationship assuming that its slope was equal to ρC_p of water ($4.18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$).

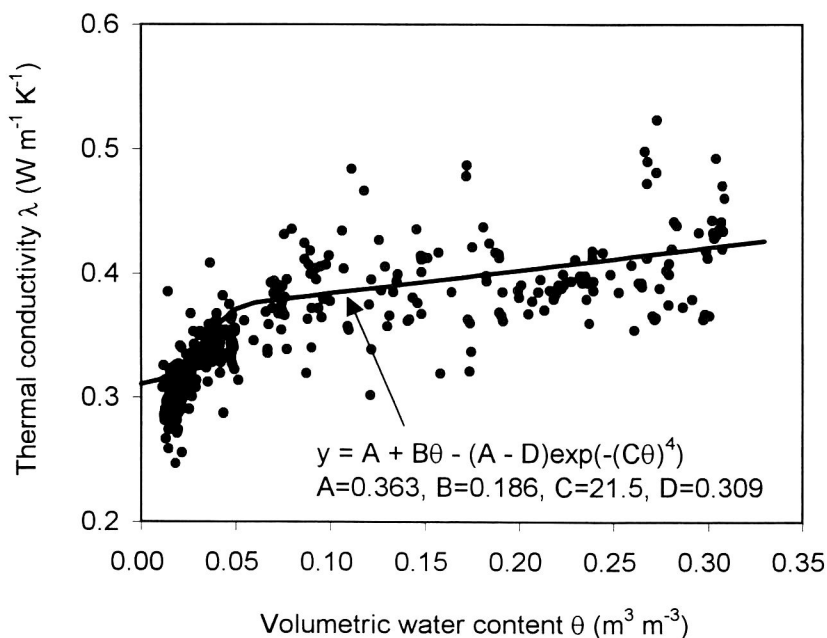


図-4 レンガの熱伝導率 λ と体積含水率 θ の関係。実線は、実測値に当てはめた McInnes の式 (Campbell, 1985) を表す。

(Figure 4. Thermal conductivity, λ , of a brick relates to volumetric water content, θ . The solid line indicates McInnes' equation (Campbell, 1985) fitted to measured values.)

た。Maurenbrecherら(1998)は、粘土製レンガの熱伝導率を、炉乾燥時($\theta = 0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)で $\lambda = 0.44 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、飽和水分量時($\theta = 0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)で $\lambda = 0.78 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と報告している。本実験で使用したレンガは、彼らのレンガに比較して全体的に小さな値であり、特に湿潤状態では小さい性質を示した。

本実験で使用したレンガに対して測定した熱伝導率は、他で報告されている建築用レンガの測定値と比較すると、特に多水分領域で小さい傾向が見られた。サーモTDRプローブは、注射針に内蔵したヒーターの熱が測定対象物内のある地点まで移動することによって変化する温度をある地点において測定することによって熱的性質を測定する。従って、ヒーターを内蔵している注射針と測定対象物間の大きな空隙はヒーターの温度上昇と熱の移動具合に影響を与え、その結果、熱伝導率の過小評価につながる(Noborioら, 1996)。しかし、ヒーターの過剰熱に起因する水分の蒸発による接触具合の低下による熱的性質測定への影響に対しては、従来の単一プローブ法に比べて極めて小さいことが双子プローブ熱パルス(DPHP)法の特徴であると言われている(Bilskie, 1994; 登尾ら, 2002b)。

一方、熱容量の測定値は、接触の不具合よりも、ヒーターと熱電対を内蔵した注射針の間隔に大きく影響を受ける。例えば、プローブのキャリブレーションを行った時と、レンガにプローブを挿入した時の注射針の間隔が10%異なると熱容量の測定値に最大20%の誤差を生ずる可能性がある(Noborioら, 1996)。本実験のように実験開始時に一旦注射針を挿入したあとは、注射針の間隔が変化しないことを考えると、広範囲の体積含水率において全体的に過小・過大評価が起こることが予想されるが、ある水分領域においてのみ過小・過大評価が発生することは考え難い。

本実験ではレンガの上面からのみ水分を蒸発させているので、レンガ内部の水分分布は不均一であると予測される。小岩(2001)は、双子プローブ熱パルス法を使った実験で、組み合わせた2層の土壤の体積含水率に差がある場合、熱拡散係数、熱容量、熱伝導率のいずれでも組み合わせた上層(プローブの根元に近い方)の性質に近い値をとる傾向があると報告した。しかし、組み合わせた2層の土壤の体積含水率にあまり差がない場合は、その組み合わせ方に関わらず、熱容量と熱伝導率はほぼ平均値を取った。また、従来の単一プローブ法を使ったKasubuchi and Hasegawa(1994)の実験でも、組み合わせた2層の土壤の体積含水率にあまり差がなく、それぞれの体積含水率に対する平均の土壤熱伝導率を示している。図-3及び図-4に見られるような測定値の大きな変動は、プローブとレンガとの接触の不具合やレンガ内部の不均一な水分分布等の複合的な影響によるものと考えられる。

図-5には、レンガの体積含水率 θ の変化に対する誘電率 ε の変化が示される。一般の土壤に対して良く使われている θ - ε 関係であるToppらの式(式3)と比較すると、水分量の増加に対して緩やかな誘電率の増加傾向が見られた。このような緩やかな増加傾向は、バミキュライトや有機質土壤といった土粒子の比表面積が大きい土壤に共通に見られる(Toppら, 1980)。このような性質の

多孔質体の体積含水率を推定する場合は、Toppらの式(式3)を使うと一般に過小評価されてしまうので、個別の校正が必要である。一方、ガラスビーズは、水分量の増加に伴ってToppらの式よりも急激に誘電率が增加する。レンガを構成する固相のみの誘電率は、図中の当てはめ曲線を使って体積含水率がゼロのときを考えると $\epsilon = 3.0$ となる。この値は、Toppら(1980)が用いた乾燥土壌の平均的な値(約3)と等しく、乾燥ガラスビーズの値(約3.5)より小さいことがわかった。

レンガに物理的性質が近いと考えられる岩石に対する θ - ϵ 関係が報告されている(Hokettら, 1992; Sakakiら, 1998)。彼らの報告では、凝灰岩、砂岩、花崗岩は、全てガラスビーズのような

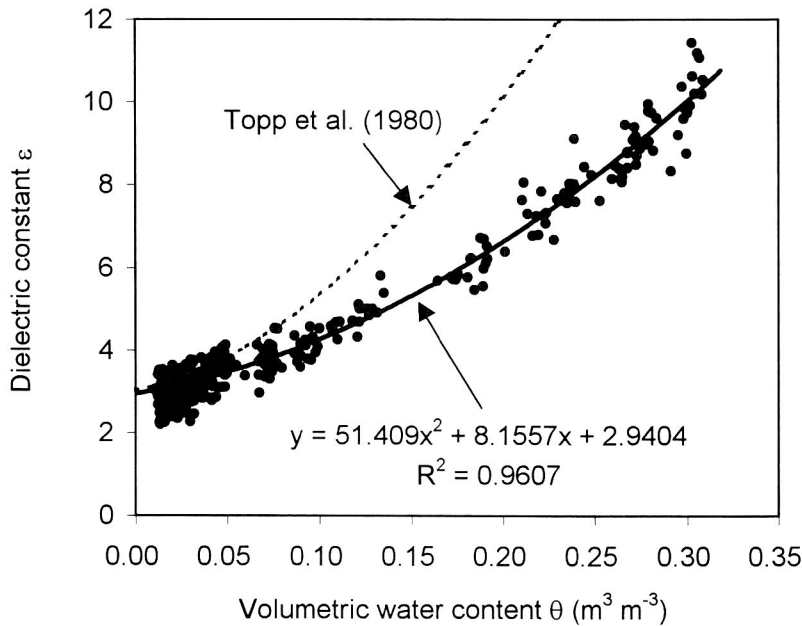


図-5 レンガの誘電率 ϵ と体積含水率 θ の関係。実線は、実測値を2次曲線で回帰した。破線は、一般的な土壌に対するTopp (1980) の較正式(式3)を示す。

(Figure 5. Dielectric constant, ϵ , of a brick relates to volumetric water content, θ . The solid line indicates a polynomial regression line, and the broken line showed a general calibration curve for soil proposed by Topp et al. (1980))

θ - ϵ 関係を示していた。すなわち、これら岩石の体積含水率をToppらの式(式3)を使って推定すると過大評価する。一方、90%が粘土質組成であった砂岩は、他の岩石とは異なって粘質土壌のような θ - ϵ 関係を示しており(Sakakiら, 1998)、本実験で使用したレンガもこの砂岩と同様な θ - ϵ 関係を示した。

5. まとめ

サーモTDRプローブを使ってアユタヤ遺跡補修用レンガの体積含水率によって変化する熱的性質と誘電特性を測定した。レンガの体積含水率の増加に伴って、熱容量、熱伝導率、誘電率が増加した。熱容量の体積含水率に対する関係は、土壌においてよりもピーナッツにおいて見られる関係

に近かった。すなわち、体積含水率の変化は、水の熱容量の半分程度しかレンガの熱容量変化に寄与しなかった。熱伝導率の体積含水率に対する変化は、土壤のそれに良く似ていたが、市販の建築用レンガと比較すると、特に高水分領域において値が小さかった。体積含水率と熱伝導率の関係には、McInnesの式を当てはめることができた。熱的性質の測定値のばらつきは、センサーとレンガの接触の不具合とレンガ内部の不均一な水分分布に因るのではないかと推察された。レンガの誘電率と体積含水率の関係は、粘質土壤や有機質土壤に近いことが分かった。従って、レンガの誘電率の測定値から体積含水率を推定する際に、一般の土壤に良く使われているToppの式を使うと、レンガの体積含水率を過小評価することが分かった。最後に、レンガの熱的性質と体積含水率の関係は、土壤に比較して測定が困難であり、関係そのものに未知な部分が多いので、今後更なる研究が必要である。

屋外環境下にある石造文化財、歴史的レンガ建造物、遺跡等は、様々な外的要因によって劣化する。その要因として、物理的要因、化学的要因、生物的要因が挙げられるが、その中でも物理的な要因の影響度合いが大きい。物理的要因による劣化過程として特に多孔質な石材やレンガ材料は、北海道や北東北地方のような寒冷地では凍結・融解による劣化、またタイやパキスタンなどの気温の高い乾燥地では塩類風化による劣化が顕著である。石造文化財、レンガ建造物、遺跡等の多くは、構造材料が多孔質体で内部に水を含むという特徴がある。また、塩類風化も凍結破砕も多孔質体中の結晶成長という面から見ると物理的メカニズムは共通している。これらの劣化過程を調べると、多孔質体中の熱、水分、塩分移動が重要な役割を演じていることがわかってきた。例えば、塩類風化を例にとると、多孔質体表面からの水分蒸発に伴って塩分を含んだ水分が表面近くへ吸い寄せられ、水分のみが蒸発することによって塩類が析出し、その結晶圧により多孔質体を破壊する。その際の水分移動速度は、材料の不飽和透水係数、水分特性曲線などの材料の物性値に大きく依存している。そのため、この塩類風化のプロセスを定量的にシミュレーションモデルなどによって評価するためには、これらの物性値を精度良く求めることが必要である。さらに、現実の遺跡建造物に対して行ったシミュレーション結果の妥当性を評価するためには、遺跡建造物中の水分量、塩類濃度、温度などを非破壊的に測定する必要がある。そのためにも本研究で行ったような誘電率と水分量の関係を事前に把握しておく、遺跡建造物の表面から誘電率を測定することによって、非破壊的に建造物中の水分量の推定が可能となる。

これまでは遺跡保存に対して、試行錯誤で様々な条件を設定して実験的に保存対策を立ててきていたが、これには非常に多くの時間と費用を費やす必要があった。しかし、遺跡建造物の適切なパラメーターを把握した上でシミュレーションモデルを用いてコンピュータを使った実験を行うと、様々な気象条件や保存対策条件に対する遺跡建造物の反応を比較的短時間のうちに把握することができるようになる。従って、これまで以上により適切な保存方法の開発や適用が可能となるので、適切に使用されるシミュレーションモデルは遺跡保存に対して非常に強力な道具となり得ると思わ

れる。例えば、現在の保存対策が100年先あるいは200年先の遺跡構造物に対してどのような意味を持っているのかといった事柄についての考察も可能となるであろう。そのためには、遺跡構造物の物性値を正確に把握する必要がある。

謝 辞

この研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究B(2)(課題番号：11558009, 代表：石崎武志)および科学研究費補助金基盤研究C(2)(課題番号：11650605, 代表：石崎武志)の補助を受けて行われた。深謝いたします。

(2002.2.8 受理)

引用文献

- 石崎武志, 朽津信明, 西浦忠輝, ユッカ・シムネック. 1999. タイ国アユタヤの歴史的レンガ構造物中の水分移動解析. 保存科学 38: 154-162.
- 石崎武志, 西浦忠輝, ユッカ・シムネック, マルチヌス・ヴァンゲニヒテン. 2000. タイ国スコートイ遺跡の大仏中の水分移動解析. 保存科学 39: 43-49.
- 小岩知子. 2001. 志波城の試験堀における熱的性質の測定による凍害の研究. 卒業論文, 岩手大学農学部農業生産環境工学科.
- 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. 農土論集 188: 299-305.
- 登尾浩助, 佐々木博子, 石崎武志. 2002a. 遺跡レンガの物理性の測定: I. 水理特性. 考古学と自然科学 43: 41-50.
- 登尾浩助, K.J.マクイネス, J.L.ハイルマン. 2002b. 双子プローブ熱パルス法による土壌の熱的性質測定と比較. 土壌の物理性(掲載許可済み)
- Baker, J.M., and R.R. Allmaras. 1990. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1-6.
- 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.
- Bristow, K.L., J.R. Bilskie, G.J. Kluitenberg, and R. Horton. 1995. Comparison of techniques for extracting soil thermal properties from dual-probe heat-pulse data. Soil Sci. 160: 1-7.
- Campbell, G.S. 1985. Soil physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems. Developments in soil science 14. Elsevier Science Publish. Comp., N.Y.
- Dalton, F.N., W.N. 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* 224: 898-990.
- Hokett, S.L., J.B. Chapman, and C.E. Russell. 1992. Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock. *J. Hydrol.* 138: 89-96.
- Kasubuchi, T., and S. Hasegawa. 1994. Measurement of spatial average of field soil water content by the long heat probe method. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, 40, 565-571.
- Noborio, K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Comput. Electr. Agric.* 31: 213-237.
- Noborio, K., T. Ishizaki, and K. Takeda. 2000. Conserving compacted earth walls in a cold region. pp. 192-203. In S. Choi and M. Suh (eds.) *Proceedings of the New Millennium International Forum on Conservation of Cultural Property*, December 5-8, 2000. Institute of Conservation Science for Cultural Property, Kongju National University, Korea.
- Noborio, K., K.J. McInnes, and J.L. Heilman. 1996. Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe. *Soil Sci.* 161: 22-28.
- Ren, T., K. Noborio, and R. Horton. 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.
- Sakaki, T., K. Sugihara, T. Adachi, K. Nishida, and W. Lin. 1998. Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock. *Water Resour. Res.* 34: 2623-2631.
- tak2000. 2001. <http://www.tak2000.com>.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 672-678.
- Wright, M.E., and J.G. Porterfield. 1970. Specific heat of Spanish peanuts. *Trans. ASAE* 13: 508-510.

Measuring Physical Properties of Bricks Used for Repairing Heritage Buildings: II. Simultaneous Measurement of Thermal and Dielectric Properties with a Thermo-Time Domain Reflectometry Probe

Kosuke Noborio*, Yoko Suzuki*, and Takeshi Ishizaki**

* Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka-shi, Iwate 020-8550, Japan

** Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, 13-27 Ueno Park, Taito-ku, Tokyo 110-8713, Japan

Weathering and degrading cultural properties made of bricks such as Ayutaya Remains in Thailand have been a great concern. A numerical simulation model to analyze water and solute movement in bricks has become an effective tool for managing such cultural properties. Thermal and dielectric properties are important parameters for predicting temperature distribution and estimating water content in bricks. Those parameters are often described as functions of water content, but they have not had much attention to date. A thermo-time domain reflectometry (TDR) probe was used to measure volumetric heat capacity, thermal conductivity, and dielectric constant as functions of water content in a brick. The thermo-TDR probe was inserted in a piece of a water-saturated brick, then water was let naturally evaporate from one surface of the brick. Thermal properties and dielectric constant of the brick were measured with a dual-probe heat pulse (DPHP) technique and TDR, respectively. In addition, changes in mass of the brick due to evaporative water loss were measured with an electronic balance. Volumetric heat capacity measured linearly related to volumetric water content, but the slope of the linear regression line was approximately as half as that for general soils. A relationship between thermal conductivity and volumetric water content was fitted with McInnes' equation. The magnitude of thermal conductivity was smaller than that previously reported. Dielectric constant was also related to volumetric water content with a polynomial curve. The polynomial curve differed from a general calibration curve for soil; thus, a new relationship should be used for estimating volumetric water content of the brick using TDR. Further investigation is needed to evaluate the relationships between thermal properties and water content.