

〔報文〕 石造建造物の壁面の劣化に関わる水分、塩分分布の測定

ルドルフ プラーゲ*・石崎 武志

1. はじめに

石造建造物の調査を行ったマリョルカ島は、スペイン東部、地中海にあるバレアレス諸島でもっとも大きな島である。この地域は、年間を通して温暖な地中海性気候である。このマリョルカ島の石造建造物フィンカ・マリナ・マンレーザは、15世紀に、海賊からの防衛のために1階建て要塞として作られた。壁は、多孔質なその地域のマレッツ砂岩 (Marez) からできている。19世紀に建物は2階建ての住居として改築された。2000年には、さらに改修された。この建物は海岸の近くにあるので、120cmの厚さの石壁の水分や塩類による劣化が繰り返し起こっている。専門家は、現在までにこの劣化は、海風により運ばれた海塩粒子が建物に入り込むことにより生じていると考えている。この劣化の原因を明らかにするために、TDR (Time Domain Reflectometry, 時間領域誘電率測定法) を用いた水分・塩分の測定を行った。このTDR法は、壁の水分量、塩分量などを測定するのに、壁にプローブを差し込むことにより測定する簡易な方法である。このTDR装置を用いて、石造建造物フィンカ・マリナ・マンレーザの北壁の水分量、塩分量を測定し、水分分布図、塩分量分布図を作成した。また、水分、塩分による被害の原因とその対策方法について検討を行った。

2. 測定方法

TDR法は、建築部材の含水率を測る上で有効な方法である。測定原理は図2に示す。2つの金属線を測定対象物内に挿入し、その金属線を伝わる電磁波の速度を測定し、その速度から対象物内の含水率を求めるものである。ここで使われた金属線の太さは2mm、間隔は16mm、長さは100mmである。これらの金属線は、同軸ケーブルを通して計測装置に繋いでいる。TDR測定装置としては、室内実験用に登尾らにより作られたプローブ長が5cmのもの^{1,2)}や、農場の土中の水分量を測定するために使われる、長さ30cmのものがあり、プローブ長が短ければ狭い範囲の含水率の平均値を、プローブ長が長い場合は広い範囲の含水率の平均値を示す。

多孔質体中の2つの金属線内の電磁波の伝わる時間から、プローブ周囲の多孔質体中の誘電



図1 測定を行った石造建造物
(フィンカ・マリナ・マンレーザ)



図2 TDRプローブ、プローブ長:100mm

*ドレスデン工科大学建築環境研究所

率は、以下の式で求められる。

$$\sqrt{\epsilon_a} = \frac{c \Delta t_m}{2l_p} \quad (1)$$

ここで ϵ_a は見かけ誘電率、 c は、自由空間中の光の速度、 Δt_m は、電磁波が長さ l_p の金属線に入って先端まで行き、戻ってくるまでの時間である。

物質が湿っている場合は、電磁波の伝搬速度が遅くなる。これは、物質の誘電率が大きいことを示している。電磁波のパルスが金属線を伝わる時、金属線に入る部分と金属線の先端で電磁波の反射がおり、この信号は、オシロスコープで見ることができる。これらの電圧変化の2つの信号は、TDR測定装置の内部のコンピューターに読み込まれ、解析されて、電磁波の伝搬速度が求められる。このTDR測定装置に関するより詳細な説明は、プラーゲ³⁾によって示されている。

これに加えて、TDR測定装置は、建築材料や水溶液の電気伝導率 σ_a を測定するのに使うことができる。電磁波が金属線内を伝搬する時、金属線にパルスが入り込む部分と、先端部分で、電磁波の反射がはこる。電気伝導率は、抵抗体の直接的な測定から求めることができる。この場合、全体の抵抗は、測定対象物内にあるTDRの金属線の抵抗 R_2 と金属線と直列に繋いだ標準抵抗 R_1 とからなる。標準抵抗の部分の電圧を U_1 、金属線入る部分の電圧を U_2 とすると、TDRの金属線の抵抗 R_2 は、次式で示される。

$$R_2 = \frac{U_2 R_1}{U_1 - U_2} \quad (2)$$

測定された抵抗値 R_2 は、物質の電気抵抗値に依存している。この結果はプローブの形状などにもよるので、プローブの形状に関しても考慮して、物質の電気伝導率を見積もる。プラーゲとマリスキーは、この方法について説明している⁴⁾。塩分濃度は、プラーゲらにより提案された校正関数を用いて求められる^{5, 6)}。多くの場合この方法は、測定対象物の間隙内の塩分濃度を知る上で十分である。また、建築材料が場所によりほぼ変わらない場合は、間隙の大きさも変わらないので、この方法は測定値から直接、含水率や塩分濃度の時間変化、空間変化を調査する上で有効である。

3. 水分と塩分の分布図作成

壁部分の劣化に対する水分と塩分の影響を見るために、北に面している3部屋の壁の調査を行った。水分分布、塩分分布を求めるために、壁面を図3のようにグリッドで分けた。初めに壁を測量し、50cmごとにグリッド点を壁面に記入した。壁の横の長さは23.5mで、高さは3.5

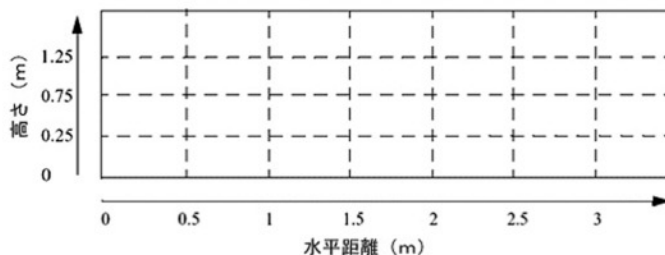


図3 水分塩分測定を行ったグリッド点の模式図

mであるので、全部で336のグリッド点になった。

壁の水分分布、塩分分布を測定するために、TDRプローブ（金属線）を壁内に挿入した。一つのグリッド点でプローブを挿入するために直径2mm長さ100mmの孔を2カ所開けた。ドリルとしては、チタニウムと亜硝酸塩でコーティングをした長さの異なるカーバイトドリルを用いた。初めに、長さの短いドリルでグリッド点に平行な孔をあけ、徐々にドリルの長さを長くし、目的の深さまで穿孔した。

壁は多孔質なその地域の砂岩でできているので、ドリリングは比較的容易であった。すべての孔は、2日で開けることができた。前もって検定をしたTDRプローブを孔に差し込み、測定を開始した。測定においては、オシロスコープで反射波の波形を見て、測定結果の妥当性をチェックした。

4. 校正関数

4-1. 混合誘電率モデル

もっとも単純なモデルとして、多孔質体を、固体、液体、気体の3相で示すことができる。水の誘電率 ϵ_{water} (~ 81)は、建築部材の誘電率より非常に大きい。例えば、レンガの誘電率 ϵ_{brick} は3 \sim 6であり、空気の誘電率 ϵ_{air} は1である。そのため建築部材の含水率は、これらの誘電率を用いた校正関数として表すことができる。ここでは、ティンガラ⁷⁾により提案された下式を用いた。

$$\epsilon_a = \left[\theta \epsilon_w^\beta + (1-\phi) \epsilon_s^\beta + (1-\phi) \epsilon_g^\beta \right]^{1/\beta} \quad (3)$$

ここで、 ϵ_w 、 ϵ_s 、 ϵ_g はそれぞれ、水、石材、気体の誘電率、 θ は体積含水率、 ϕ は空隙率である。これらから、3相の体積が決まる。 β は、電場の方向と、3相の混合における幾何学的な配置の特徴に依存した係数である。このパラメータは、既知の含水率の試料での測定を、最小二乗法で解析して求める。

この例では、TDR法による水分測定が行われた壁部分の5地点でコアボーリングを行い、採取した試料の含水率を、乾燥重量測定により求め、TDRプローブの校正を行った。コアボーリングを行った場所は、図5、6、7に、L、M₁、M₂、R₁、R₂で示す。ボーリングコアにより求めた体積含水率と深さの関係を図4 (A) に示す。2式から体積含水率を求めるためには、空隙率、密度とマレット砂岩の乾燥状態での誘電率のみが必要である。ここでは、石材表面の

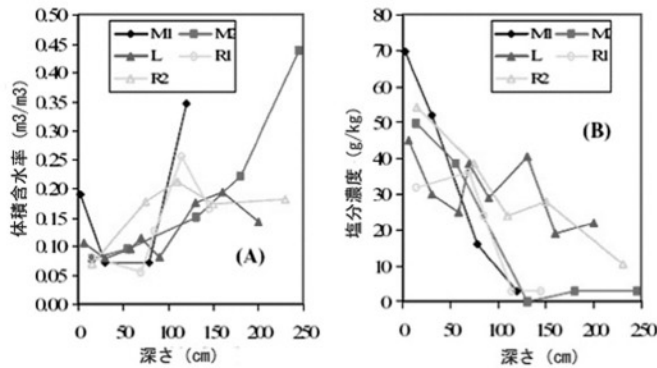


図4 L、M、Rの5点のボーリングコアによる体積含水率(A)と塩分濃度(B)と壁表面からの距離の関係

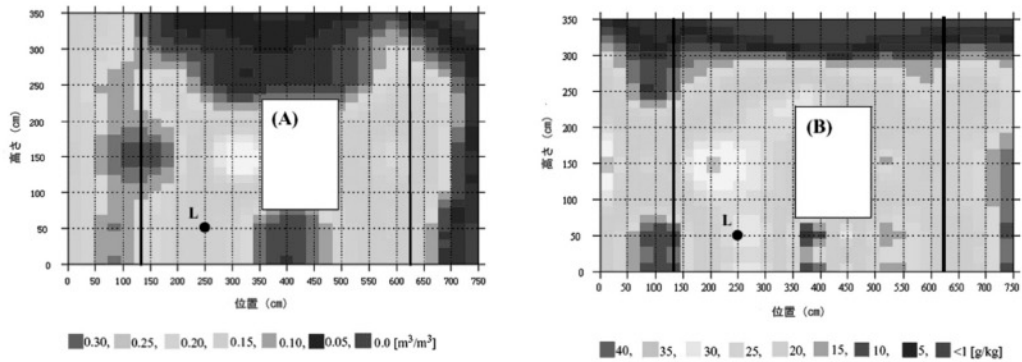


図5 暖炉のある部屋の北壁の体積含水率分布 (A) と塩分濃度分布 (B)

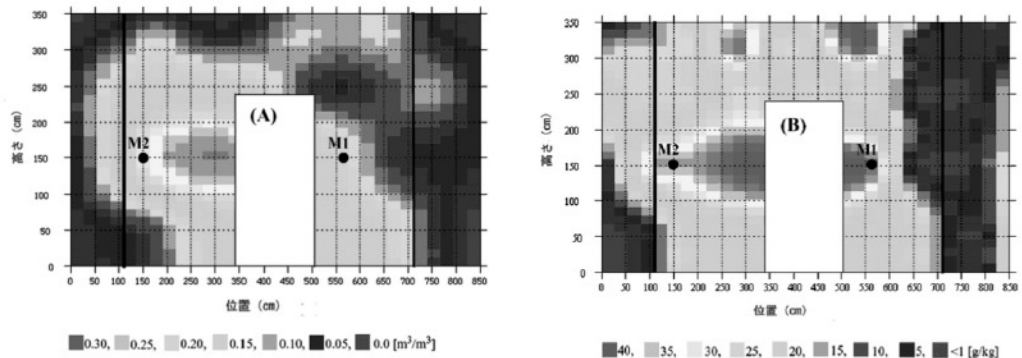


図6 エントランスホールの北壁の体積含水率分布 (A) と塩分濃度分布 (B)

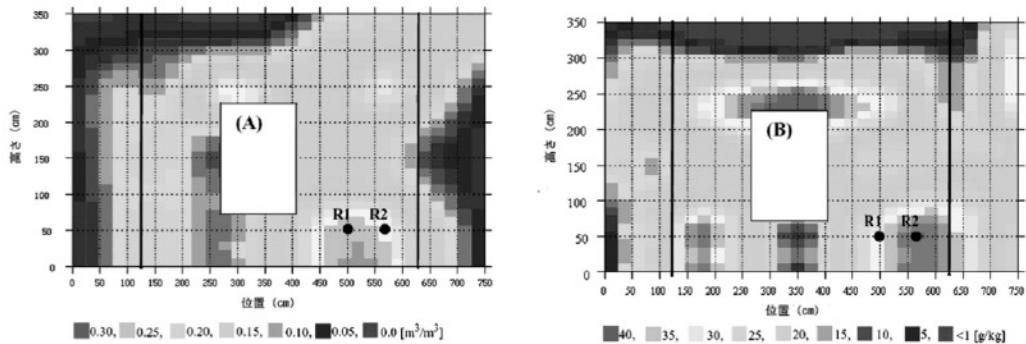


図7 食堂の北壁の体積含水率分布 (A) と塩分濃度分布 (B)

石膏層の物性値は、その結果に与える影響が小さいと判断された。

4-2. 塩分濃度

物質の電気伝導率は、間隙水の電気伝導率と石材の骨格部分の電気伝導率から決まる。間隙水の電気伝導度を求めるために、プラーゲによる次の式が使われた。

$$\sqrt{\sigma_a} = \sqrt{\sigma_\theta} \theta C + \sqrt{\sigma_s} \quad (4)$$

ここで、 σ_s は、砂岩 (Marez) の乾燥状態での骨格部分の電気伝導度である。 θ は、TDR装置でそれぞれのポイントで測定される体積含水率である。また、 C は、ボーリングで採取した試料により求めた校正係数である。

採取したボーリングコア試料は切断され、純水を入れた容器内に入れて10日間振動し、十分に攪拌した。土を沈殿させた後、水溶液に溶け込んでいる塩分を分析した。分析の結果、主要な塩分は、塩化ナトリウムで、若干硫酸塩が含まれていることが分かった。図4 (b)に、L、M、R地点のボーリングコアから求めた深さ方向の塩分濃度変化を示す。

ボーリングコアによる測定結果は、深い地点ほど体積含水率が大きくなっているのを示している。体積含水率は表面での蒸発のため、壁表面では小さくなっている。壁表面近くでは、体積含水率は 0.07 から $0.17\text{m}^3/\text{m}^3$ 、壁内部は $0.17\text{m}^3/\text{m}^3$ になっている。M2点では、マレット砂岩は、ほとんど飽和状態であった。追加試験として、湿度センサーで、ボーリング孔内部の湿度を測定したところ、全ての地点ではほぼ100%であった。

表面近くで蒸発により、塩分濃度は $40 \sim 50\text{g}(\text{NaCl})/\text{kg}$ になっている。これは、砂岩の重量に対して、 $4 \sim 5\%$ に対応している。石膏層では、 7% に相当する。WTA (the International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monuments preservation) の基準では、塩素イオン濃度が重量割合で最大 0.1% となっており、塩分の除去を行って石膏層を表面に塗ることが進められている。ここでの表層の塩分濃度は、上記の推奨値の $40 \sim 70$ 倍となっている。

5. 含水率分布と塩分濃度分布の表示 (マッピング)

暖炉のある部屋、エントランスホール、食堂の北壁部分のTDR測定装置による結果を図5, 6, 7に、カラー画像で示す。この図を作成するに当たって、ガウス分布でも単調な変化を示さない測定値を、有効に外挿できる部分荷重回帰方式を用いた⁸⁾。

図において縦の太い線は、内壁の土壁の境界部分を示す。白い長方形の部分は、窓とドア部分を示す。

部分的に高い値を示している含水率は、従来専門家により指摘されたように塩化ナトリウムの吸湿性のみの結果ではないと考えられる。この壁部分の水分は、主としてバルコニー部分の



図8 バルコニー (左), 配水管部分 (右)

漏水、また外壁への風による直接の雨水の浸入、雨樋部分からの壁への水の浸入などによると考えられる。これらの原因で、雨水が壁に浸入し、塩分を溶解させ、壁表面での水の蒸発に伴って、塩類が析出し、壁の表層を劣化させていると考えられる。

水分分布の不均一性は、壁の構造によって説明されると思われる。過去に、厚い壁の建設に当たって、外壁と内壁の間に建設時に生じたモルタルの残りとか小石などを詰めて作られるようなことがあった。この建物も、ボーリングコアを採取する際に外壁と内壁の間の空間が見つかり、この方法により建設されたことが分かった。このことは、バルコニーを通して入った水が、毛管作用で壁の中に浸透していくだけではなく、壁のより厚い部分や窓の上の渡しなどに到達するまで、重力の影響で下方へ流下することを意味している。そして、そこから水が壁の内部へ浸透し、壁から水が蒸発する際に塩類風化を生じると考えられる。特に図5、図6を見ると、塩分濃度が高い部分と、体積含水率が高い部分と概ね対応しているのが分かる。これは、高い水分量の部分からの水分蒸発が大きく、表面近くでの塩類の蓄積も大きくなっているためと考えられる。塩分濃度と水分分布に関して対応していない部分も見られるが、その詳細は、現在検討中である。

壁内の塩分は海の塩分が海風で運ばれて、壁に付着し、長い間蓄積されたことに加えて、壁が作られた時に、モルタルに近く海砂が使われていたことによると考えられる。外壁と内壁の間に、貝殻を含んだ海砂や石灰石の固まりなども見られた。マレッツ砂岩も海岸から近い採石場から採取されているので、マレッツ砂岩自体も塩分を含んでいる可能性がある。

壁内の高い塩分濃度は、バルコニー部分から壁に浸透した雨水が壁内へ浸透し、壁表面で蒸発することにより生じていると考えられる。バルコニー部分での雨の浸入は、いくつかの点に限られているので、雨水の排水とバルコニー部分の防水とは、分けて考えた方がよい。バルコニー部分の水対策としては、水を排水溝へ集め外へ出すことである。しかし、ここでは排水に関していくつかの問題がある。ひとつは、配水管の容量が、この降水量を考慮すると小さすぎることである。配水管の直径は3cmであったが、ここで必要とされるものより小さく、落ち葉によって簡単に塞がれる状況にある。さらに、排水管の先は東西の壁の上になっており、外部へ有効に排水されていない。2番目としてバルコニー上部のゴムの防水シートは、高さが足りないこと、床面との接着が不十分であることにより防水シート周辺から漏水していると考えられる。

これらの排水システムの問題から満足なバルコニー部分の排水が望めない。そのため、標準的な降雨の場合でも、バルコニー部分の水は、下の壁部分へと浸透する。1時間に10mmの雨が降った場合には、配水管は一杯になり、あふれた水は、1階の壁に浸透する。また、1時間に50mmの雨が降った場合には、より多くの雨が1階の外壁に浸透すると推測される。

海岸近くでも、雨にはそれほど多くの塩分は含まれていない。しかし、雨は海塩粒子を取り込んで建物の外壁に浸透する。この効果は比較的小さいものなので、バルコニーの排水施設が不十分であることのみが、壁内の高い塩分濃度の原因になっているとは言えない。しかし、この浸透した水が、壁内に溶け込んでいる塩分を表面に移動させ劣化を起こしていると考えられるので、やはり、バルコニー部分の排水施設の修理は必要である。

5. まとめ

著者らの作成したTDR水分測定装置を用いて、石造建造物壁面の水分分布、塩分濃度分布を測定した。測定結果から石壁の塩分濃度が高い部分と体積含水率の高い部分との対応が見られた。これは、高い水分量の部分からの水分蒸発が大きく表面近くの塩類の蓄積も大きくなっ

ているためと考えられる。壁面の水分分布、塩分濃度分布を測定することにより、水や塩分による劣化の原因を明らかにすることができ、保存対策を立てる上で、本測定方法が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 登尾浩助, 君島章太郎, 石崎武志, 武田一夫: 20GHz-TDR装置を使った比誘電率測定の特徴, 保存科学, 44, 97-102 (2004).
- 2) Ishizaki, T., J. Grunewald, R. Plagge & H. Fechner: *Experimental study of water redistribution measurement in the model earthen wall and its numerical analysis*. Symposium on: Measurement of water flow in porous material and its numerical simulation, National Research Institute of Cultural Properties, Tokyo, Japan. 1-15 (2002).
- 3) Plagge, R., C.H. Roth & M. Renger : *Dielectric soil water content determination using time-domain reflectometry (TDR)*. In : A. Kraszewski (ed.): Second Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances at the 1996 IEEE Microwave Theory and Techniques Society International Microwave symposium in San Francisco, CA, 17. June, 16-21, 59-62 (1996).
- 4) Plagge, R. & M. A. Malicki : *Application of TDR to Determine Water Content and Electrical Conductivity of Capillary Porous Media*. „Fourth International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances“ in Weimar, Germany May 13-16, 2001, 469-476 (2001).
- 5) Plagge, R., P. Häupl & J. Grunewald: *TDR-SS-Methode, ein Meßverfahren zur kombinierten Bestimmung der Materialfeuchte und der elektrischen Leitfähigkeit kapillar poröser Medien*. 9. Feuchtetag am 17./18. September 1997 in Weimar. 9, 161-173 (1997).
- 6) Plagge, R.: *Bestimmung von Materialfeuchte und Salzgehalt in kapillar porösen Materialien mit TDR*. Kolloquium mit Workshop Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Karlsruhe, 3.-4. Juli 2003, pp28 (2003).
- 7) Tinga, W.R., W.A.G. Voss & D.F. Blossey : *Generalized approach to multiphase dielectric mixture theorie*. J. Appl. Phys. 44, 3897-3902 (1973).
- 8) Cleveland, W.S. : *Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots*. Journal of the American Statistical Association, 74, 829-836 (1979).

キーワード : 石造建造物(stone building); 塩類風化(salt damage); TDR水分測定(moisture measurement by TDR method); マッピング(mapping)

Moisture and Salt Mapping by TDR in a Historical Stone Building

Rudolf PLAGGE^{*} and Takeshi ISHIZAKI

The moisture and salt content of Finca Marina Manresa (historical stone building) were measured by TDR-technique at numerous locations along a masonry transect and used for mapping. Time domain reflectometry (TDR) is a non-destructive measurement method to determine dielectric water content. In this paper, the different steps of measurement, including sensor installation and the development of suitable calibration functions, are presented. The measured moisture and salt contents along the masonry transect were used for masonry mapping. Their spatial distribution showed that damage to this building was caused by salt and moisture. As a result of this investigation, suggestions were made for restoration.

^{*}Dresden University of Technology, Institute of Building Climatology, Dresden, Germany