

「石の宝殿」の内部構造探査結果

報 告

探査実施日：平成20年1月12, 13日

実施団体：日本文化財探査学会（会長；亀井宏行）

兵庫県考古科学談話会

高砂市教育委員会

実施協力：生石神社

報 告 内 容

地中レーダによる石の宝殿の構造調査

齋藤健太郎、折下伸也、河原健一郎、

阿児雄之、亀井宏行（東京工業大学）

「石の宝殿」の超音波探査の試み

足立和成、藤塚淳（山形大学）、杉本恒美（桐蔭学園横浜大学）、

森永速男（兵庫県立大学）

開催日時：平成20年6月21日 10時より

地中レーダによる石の宝殿の構造調査

齋藤健太郎、折下伸也、河原健一郎、阿児雄之、○亀井宏行
(東京工業大学)

kamei@archaeo.cs.titech.ac.jp

1. はじめに

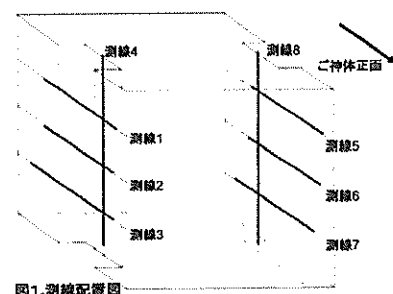
兵庫県高砂市の生石神社に「石の宝殿」とよばれる石造のご神体がある。石の宝殿は「竜山石」とよばれる溶結凝灰岩の山体から切り出され、その形は一辺約 6m の直方体で左右に幅 1.6m の溝が縦に入っている。また石の宝殿の下部は周囲をえぐられ池の中に鎮座しており、水上に浮いたように見えるため「浮石」とも称される。この不安定な構造のため内部に亀裂など生じている恐れも心配されている。また宝殿の形状が、奈良県橿原市にある史跡「益田の岩舟」と似ており、益田の岩舟と同様に上部から方形の穴が掘り込まれている可能性も指摘されている。しかし、石の宝殿上部は草木に覆われその有無を確認できない。そこで、石の宝殿内部の亀裂や掘込みの有無を明らかにするために、地中レーダによる内部構造調査が計画された。

2. 調査方法

石の宝殿のご神体であることを鑑み、調査期間は 2008 年 1 月 12 日 18:00 から翌朝 6:00 に設定された。足場も宝殿の左右にのみ、幅約 2m、高さ間隔 1.5m の 3 段が設置された。さらにこの時間帯にレーダ探査と音響探査の 2 種類の調査を実施しなければならないという時間制限もあり、レーダを走査する測線は、図 1 に示すように、左右水平に足場の踏み板に立ってアンテナを保持できる高さで 3 本ずつ、垂直に溝の中央部左右 1 本ずつの計 8 本とした。

測定方法は、送受アンテナを一体で走査するモノスタティック法と、送信アンテナと受信アンテナを別々に走査するバイスタティック法を採用した。モノスタティック法では、亀裂や空洞などの境界からの反射を直視できる。バイスタティック法では、宝殿を左右から送受アンテナで挟み込み、内部の電波速度（誘電率）分布が求められる。

厚さ 6m の凝灰岩内部を電波が透過できるような比較的低い周波数が必要であることから、レーダは Sensor&Software 社製 PulseEKKO1000（周波数 225MHz）を採用した。アンテナの走査は、壁面にアンテナを押し付け引きずると傷をつける恐れがあるので、引きずらず 0.1m ごと押し付ける方法を採用した。



3. 調査結果

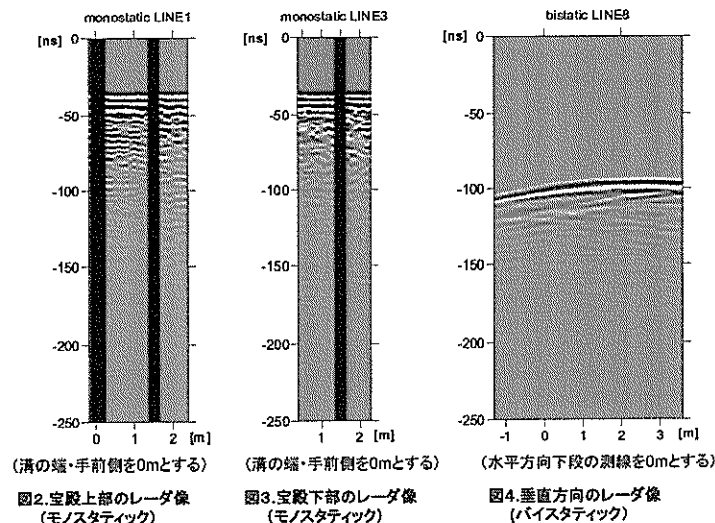
3. 1 モノスタティック法

測線 1 のレーダ像を図 2 に、測線 3 のレーダ像を図 3 に示す。図は横軸が測定位置で左が宝殿正面側を表す。縦軸は反射波の受信時間を表し、下に行くほど遅い時間に受信された反射波を示す。もし宝殿上部から測線 1 の深さまで掘込みがあれば測線 1 で反射がとらえられる可能

性がある。構造上ストレスのかかりやすい下部に亀裂があれば測線3で何らかの反射がとらえられる可能性がある。両図において強い反射は見られないので、掘込みや亀裂の存在は確認できていない。ただし、掘込みの中を埋めている土壌の電気的性質が周囲の凝灰岩と近ければ反射は生じないので、この結果で掘込みがないと断言はできない。

3.2 バイスタティック法

水平測線1と垂直測線4の交点に送信アンテナを置き、反対側の面の垂直測線8上を、受信アンテナを0.1mごと上から下へ移動しながら測定したレーダ像を図4に示す。送受信アンテナ間の距離に応じて電波の直接到達時間が変化して行く様子がわかる。送信アンテナを反対側の面に置き同様の測定を行い、両者のそれぞれの測定点での電波の直接到達時間を用いトモグラフィ解析を行い宝殿内部の垂直方向の比誘電率2次元分布を求めたものを図5に示す。左右方向は2分割でしか求められていない。図5より宝殿は上部の比誘電率が高いこと、すなわち含水率が高いことが分かる。これは上部に積もる土に浸透した雨水と、そこに茂る草木の水分が宝殿に浸み込んだ結果と考えられる。また、宝殿最下部で僅かに誘電率が上昇するのは、宝殿下に湛えられた水が浸み込んだためと考えられる。



4. まとめ

今回の調査では、亀裂の存在や掘込みの存在の証拠となるような情報は得られなかった。バイスタティック法で非常に単純ながらも石の宝殿の比誘電率2次元分布が求められたことから、石の宝殿周囲に足場を設置し、アンテナの設置位置の自由度を上げることができ、十分な調査時間を取ることができれば、石の宝殿の詳細な比誘電率の3次元分布が求められる可能性がある。そうすれば反射が起こりにくい境界面も検出できる可能性があり、掘込みの有無などもより詳細な検証ができると思われる。

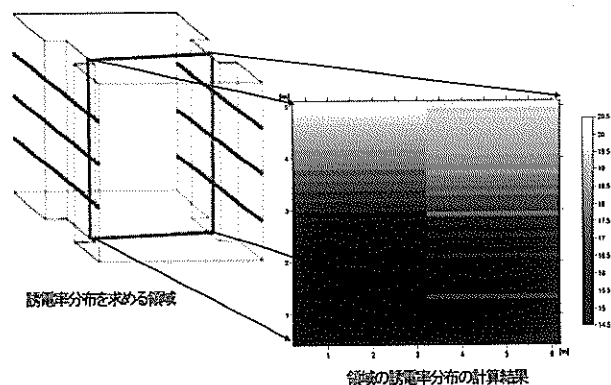


図5.垂直方向の比誘電率分布

「石の宝殿」の超音波探査の試み

○足立和成、藤塚淳（山形大学）、杉本恒美（桐蔭学園横浜大）、森永速男（兵庫県立大学）

1. はじめに

兵庫県高砂市にある生石神社のご神体である「石の宝殿」の内部構造を調べるべく、超音波探査を試みた。結果として内部構造に関する知見は全く得られなかったが、その表面の劣化は深刻なものであると推察されたので、ここに報告する。

2. 超音波探査の手法について

ここで行おうとした超音波音速探査は、石の宝殿本体の表面に押し当てた超音波プローブ（送受波器）から強力な超音波パルスを打ち込み、それが同様に表面に押し当てられた他の超音波プローブに到達する様子を観察することで、その内部構造に関する知見を得ようとするものである。探査対象の内部に波長より十分大きな空洞や亀裂があれば、音波はそこを殆んど透過しないので、その存在を確認できる。この探査手法の利点は

- (1) 装置が可搬性に富んでいる
- (2) 電磁波や放射線防御を考慮する必要が無い
- (3) 構造物にダメージを与えずに使用ができる

等である。図1に測定系の概略を示す。送波用プローブに加える電圧波形は任意波形発生で作られ、パワーアンプで増幅された後、プローブ内の振動子に加えられる。超音波プローブの構造を図2と図3に示す。プローブの先端にはシリコンゴムのキャップが取り付けられており、これを探査対象表面に押しあてた時に十分な密着が得られるよう工夫されている。送波器として用いた場合、露天の高強度用コンクリート（骨材（石）入り）スラブ

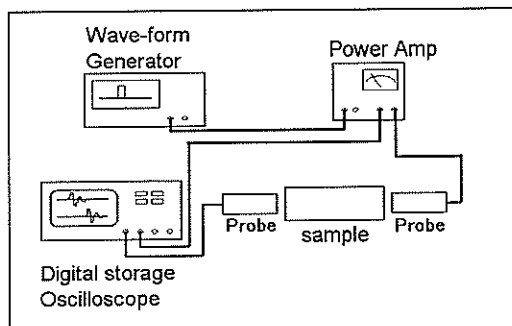


図1 超音波探査装置の概略図

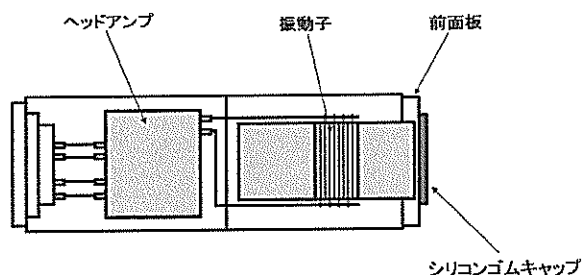


図2 送受波器一体型超音波プローブの内部構造

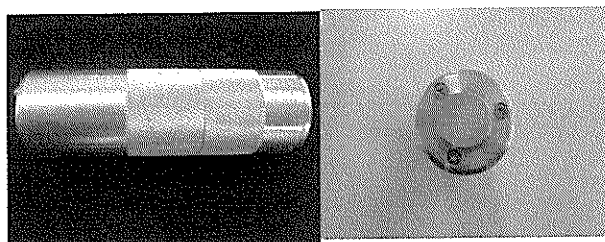


図3 超音波プローブの写真。左が側面、右が先端部を正面から見た図。探査対象表面に先端部を押し当てるため、すべり止め加工が側面に施されている。

内部を2 m以上の伝搬距離にわたって透過するような強力な超音波パルス（中心周波数60～70 kHz）を探查対象に打ち込むことができる。プローブを受波用に使用する際には、振動子が受信した信号を内臓するヘッドアンプで1000倍に増幅して出力するようになっている。図1では省いたが、プローブの送受の切替はプローブ外部のスイッチボックスで切り替えるようになっている。振動子には、直径20 mm厚さ1 mmの圧電セラミックスの円板8枚の間に銅電極を挿入して、一對のジュラルミンブロックで挟みステンレスボルトで締め付けて一体化したボルト締めランジュバン型振動子を採用している。

さらに現場の状況によっては、低い可聴域の音波を使用したほうが良い場合もあると考えて、送波専用音源として桐蔭学園横浜大学の杉本恒美の研究室で開発された超磁歪素子音源も用意した。

3. 予備実験

兵庫県立大学の森永速男が入手した現場近隣の地区で切り出された「石の宝殿」と同じ材質の流紋岩質熔結凝灰岩のサンプルを用いて、その内部を超音波パルスが容易に透過するか否かの確認を行った。凝灰岩はその内部に細かい気泡を含む場合が多く、超音波の伝搬減衰が大きくなると予測されたからだ。簡単な実験の結果、プローブに数十V_{0-p}程度のパルス状入力電圧加えた時の超音波パルスが、凝灰岩内部の20 cm程度の伝搬経路を透過するのを受波器で容易に確認できた。この超音波探查装置では送波時に最大300 V_{p-p}のパルス状電圧をプローブ内部の振動子に加えられるので、「石の宝殿」の探查にも使用できる可能性は高いと判断して、現場での探查実験に臨んだ。

4. 探查を試みた部位とその結果

「石の宝殿」表面上に設定したさまざまな測定点間の超音波パルスの伝搬の様子を調べたが、予備実験の結果からは予測できないほど音波の減衰が大きく、最大電圧をプローブ内の振動子に加えた場合でも、宝殿正面に向かって左側の角の地上約1 mの高さの水平方向に15 cm程度はなれた送受点間で、辛うじて表面波の伝搬が確認できただけだった。そこで超磁歪素子を駆動して、中心周波数にして百Hz～1 kHz程度の可聴音のパルスを宝殿内部に打ち込んでみたが、宝殿内部への音波の伝搬は全く観察できなかった。

予備実験では、超音波パルスが健全な凝灰岩中を比較的容易に伝搬することが確かめられていることから考えると、表面波の波長などから考えて少なくとも表面から5 cm以内の深さまでに激甚な異常部が広く存在している可能性は高い。

5. 終わりに

「石の宝殿」の内部構造に関しては何の知見も得られなかったが、超音波の減衰があまりにも大きかったことから、その表面の劣化は相当に進んでいると考えるのが至当だろう。何らかの保存処置がなされることが望ましい。探查対象内部の音波伝搬はその材質の機械的な性質をよく反映しているから、超音波探查はこうした特殊な文化財構造物の保存・修復の時期を判断する際にも有効だと考えられる。