

# 地下遺構の可視化

亀井 宏行  
東京工業大学

## 1. はじめに

発掘しないで地下の遺構を調査する技術が、「遺跡探査」と呼ばれる技術である。地下を調査する技術は、資源探査や断層などの地下構造調査のために開発されてきた。遺跡探査に用いられる技術も基本的には同じものであるが、要求される精度(分解能)が格段に高く、探査する技術者側にも考古学的な解釈に必要な考古学の知識が要求される。現在遺跡探査の中心をなす、「地中レーダ探査」「磁気探査」「電気探査」について紹介する。

## 2. 地中レーダ探査

電波を利用して地下構造を可視化する装置が地中レーダである。大地が損失媒質であり、電波の減衰や分解能を考慮し、主に遺跡探査に用いられる周波数帯域は 100MHz～500MHz である。低い周波数ほど深くまで伝搬するが、国内ではこの帯域では探査限界は高々3m ほどである。現在用いられている地中レーダはアンテナにパルス状の電圧を給電するパルスレーダで、アンテナの共振周波数が先の 100MHz～500MHz となる。アンテナを地表面に沿って走査し、各地点毎の受信波形をモニタ上に輝度変調をかけて表示することで地下の断面を直視できる。図 1 に同一測線を周波数の異なる 3 種類の地中レーダで走査したレーダ像を示す。横軸はアンテナの移動距離、縦軸は電波の反射時間(単位は nsec) である。周波数は上から、1.5GHz、900MHz、400MHz である。周波数と分解能の関係が見て取れる。図 1 では、左端から 6.5m あたりに双曲線の形をした像が見えるが、これは双曲線の頂点位置に小さな点状の物体が存在することを表している。パルスレーダでは指向性を絞ることができないので、点像分布関数が双曲線状のパターンとなる。

図 2 に、鹿児島県指宿市にある敷領遺跡のレーダ探査結果を示す。敷領遺跡は、AD874 年の開聞岳の噴火で埋もれた遺跡である。図 2(a)は一本の測線の断面図であるが、この図からどのような遺構が存

在するのか判断するのは困難である。そこで 0.5m 間隔で並行する何本もの測線のデータを集め、ある特定の時間の反射信号強度を 2 次元平面上にマッピングして地中レーダ平面図(タイムスライス)を作成する。30nsec(深度約 1m)のタイムスライス図が、図 2(b)で、網目模様が見て取れる。これは 874 年当時の水田の畦である。南北に並行する 2 本の直線状の畦とその間隔から、この時期南薩摩で条里制が施行されていたことを示す初めての物的証拠となった。

## 3. 磁気探査

磁気探査は、地磁気の乱れ(これを「磁気異常」と呼ぶ)を測定し地下遺構を推定する手法である。基本的には地中の磁化率分布が磁気異常に反映される。日本付近の地磁気の大きさは約 47, 000nT(ナノテスラ)であるが、遺構の発生する磁気異常の大きさはほとんどの場合 100nT 以下である。磁界を計測するセンサには、現在主にフラックスゲート磁力計かセシウム磁力計が使われる。フラックスゲート磁力計は、磁性体の磁化曲線の非線形性を利用したセンサで、パーマロイなどの高透磁率磁性体のコアに励磁用と検出用の 2 つのコイルを巻いた簡単な構成である。コイルに方向性があるので磁界のベクトル計測が可能であり、感度は 1nT 程度である。セシウム磁力計は、原子や分子を磁界中に置くとエネルギー順位が分裂する Zeeman 効果を利用したセンサで、分裂の幅が磁界の強さに比例するので、磁界の絶対値が計測できる。セシウム磁力計の感度は、0.01nT と高い。いずれのセンサも、通常は地表面からの高さを変えた 2 つのセンサを使い、その差分をとることで地磁気成分を除去し、磁気異常だけを取り出す方法をとる。磁界の傾きを測定していることからグラジオメータ(Gradiometer)と呼ばれる。磁性体が発生する磁界は、距離の 3 乗に逆比例するので、磁気探査での探査深度は 2m ほどが限界である。

製鉄遺構の磁気探査例を示す。英国 Yorkshire にある Timberholm 遺跡は中世後期の製鉄遺構で、水

車の利用により溶鉱炉が大型化した時期の遺跡である。フラックスゲートグラジオメータで、測定間隔 0.5m で測定した垂直方向成分の磁気勾配分布を図 3(a)に示す。解釈結果を図 3(b)に示す。最も大きな磁気異常を示す A が溶鉱炉で、それを取り囲む壁 C が存在する。溶鉱炉 A に向かってくる二本の負の磁気異常を示す D、E は、水路で、特に D は、溶鉱炉のバックヤードに流れ込んでいるので、水車の動力として導かれた可能性がある。溶鉱炉 A と水路 E を挟み存在する大きな磁気異常を示す B は、溶鉱炉 A が崩落して倒れ込んだものと解釈されている。

#### 4. 電気探査

電気探査は、大地に電極を刺し電流を注入し、地表面に現れる電位から大地の抵抗率分布を測定する。最も一般的な電極配列は「Wenner 法」で、二本の電流電極  $C_1$ 、 $C_2$ 、二本の電位電極  $P_1$ 、 $P_2$  を、等間隔で  $C_1P_1P_2C_2$  と配列する。電極間隔を  $a$ 、電流電極に注入する電流を  $I$ 、電位電極間の電圧を  $V$  とすると、「見掛け比抵抗」と呼ばれる量  $\rho_a$  は、 $\rho_a = 2\pi aV / I$  で与えられる。もし大地が均質であれば、この見掛け比抵抗値は大地の抵抗率と一致する。この電極配置では、電極は電極配列の中心直下の深さ  $a$  付近の感度が最も高いので、この見掛け比抵抗値は電極配列直下深さ  $a$  の抵抗率を表しているとする。電極間隔を一定にして地表面を 2 次元的に走査すれば、深さ  $a$  の見掛け比抵抗の水平分布図が描ける。また一本の測線上、いろいろな間隔  $a$  で移動測定すれば、その測線直下の見掛け比抵抗断面図が得られる。見掛け比抵抗分布は実際の抵抗率分布とはかなり異なるので、最近では見掛け比抵抗分布から真の抵抗率分布を計算によって求める「逆解析」が使われる。

奈良県明日香村にある高松塚古墳は、石室内の壁画が国宝に指定されている。2002 年にはその壁画に黒カビが発生し、翌年から緊急保存対策が施されることになった。そのためにカビ発生の原因の一つと考えられる水分の墳丘内の分布を推定するために電気探査が実施された。墳丘を横断する測線を 1m 間隔で 7 本設置し、各測線上には 0.25m 間隔で電極を設置し、Wenner 配列で電極間隔を 0.25m から 5m まで 0.25m 刻みで広げていく方法で見掛け比

抵抗を測定し、それらをすべて集めて 3 次元逆解析を行った。その結果を図 4 に示す。この図は抵抗率の対数の分布を表している。図中墳丘中央部の赤い部分が石室で、石室の東側に最も抵抗率が低い部分があり、この部分の含水率が高いことが伺える。実際黒カビの発生が報告されたのは石室東壁であったことと齟齬の無い結果が得られている。電気探査はその後の防水対策実施中のモニタリングにも使われた。

#### 5. むすび

以上、地下遺構を可視化する技術の一端を紹介した。しかしまだ測定したデータをそのまま表示するだけの場合が多く、解釈に失敗する事例も多い。逆解析や信号処理の技術開発が進められている。

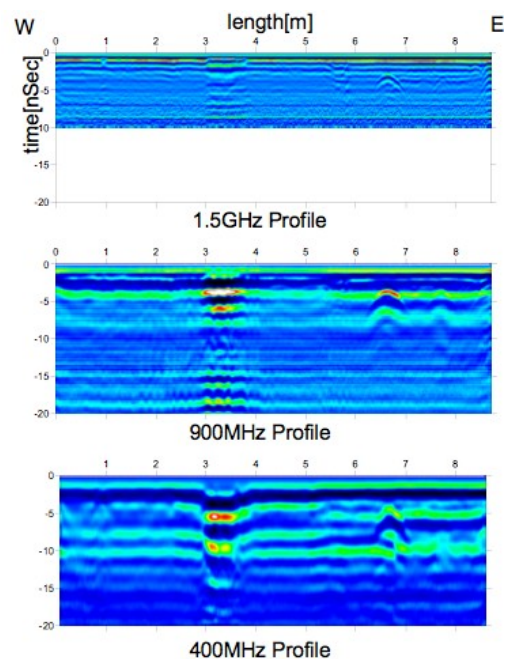
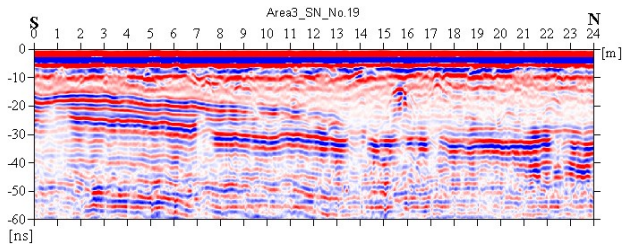
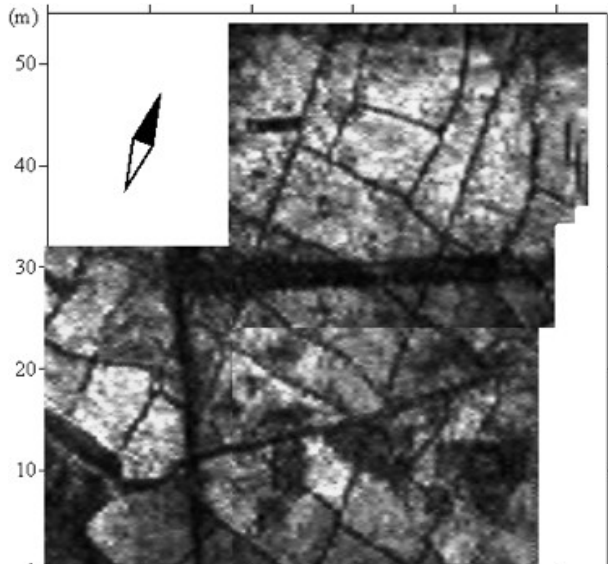


図 1: 地中レーダ像(周波数の比較)



(a) 地中レーダ断面図



(b) タイムスライス図(30nsec、深度約 1m)

図 2: 鹿児島県敷領遺跡の地中レーダ探査結果

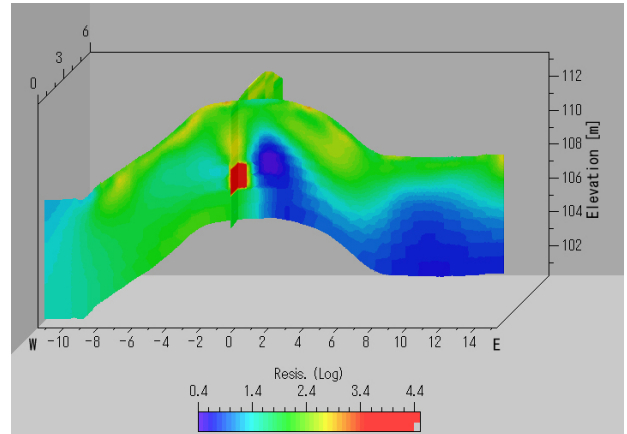
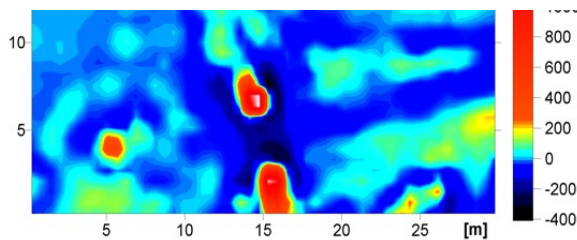
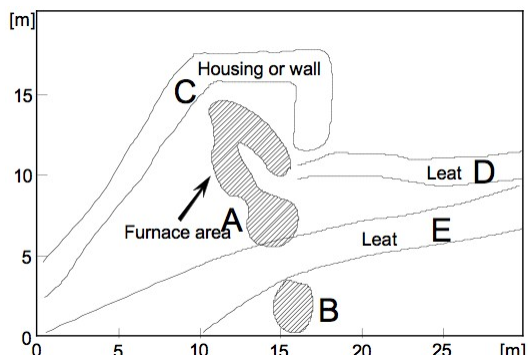


図 4: 奈良県高松塚古墳の電気探査結果  
(墳丘内の抵抗率 3 次元分布  
図中抵抗率の高い(赤い)方形の領域が石室  
表示は抵抗率の対数值)



Goemagnetic survey result ( vertical component of the 0.5-m gradient)  
of Timberholm site, Yorkshire, UK.

(a) 磁気勾配垂直方向成分分布



(b) 磁気異常分布の解釈結果

図 3: 英国 Timberholm 遺跡(中世の製鉄遺構)の磁気探査結果