

# 比抵抗法による岩原双子塚古墳の内部構造の三次元可視化

水永 秀樹<sup>1)</sup>・山口 盛一<sup>2)</sup>・田中 俊昭<sup>1)</sup>・牛島 恵輔<sup>3)</sup>

●キーワード：比抵抗法 (resistivity method), 電気探査 (electrical prospecting), インバージョン (inversion), 三次元可視化 (3-D visualization), 前方後円墳 (keyhole-shaped mounded tomb)

## 1. はじめに

近年、考古学の分野においても、各種の物理探査法を用いた遺跡探査が行なわれるようになってきた(西村：1991)。特に国や地方の史跡に指定されている貴重な遺跡では、発掘調査が実施できない場合が多いため、非破壊で地中内部を調査できる物理探査の役割は大きい。深度2m程度までの比較的浅部の遺跡調査には、電磁波の反射応答を利用した地中レーダ探査が用いられている。電磁波は、土質の違いにより、反射・屈折・減衰などの度合いが異なるので、地層境界や遺物の存在が推定できる。地中レーダは、数百MHz程度の高周波の電磁波を用いるために空間分解能が高く、地中に埋没している遺物や、失われた建築物の柱跡等の調査で成果を挙げている(西村：2001)。また、得られた複数の反射断面から深度毎の平面図(深度スライス図)などを作成することも可能である。

しかし、深度5m以深の比較的深部の遺跡探査では、高周波の電磁波の振幅の減衰が激しく、地中レーダが成果を発揮しない場合も多い。日本のような湿潤な気候では、乾燥した気候のエジプトなどと比べると、特にその傾向が強い。このような比較的深部の遺跡探査では、能動的な電気探査法である比抵抗法が用いられることが多い。比抵抗法は地下に電流を流して、電流の流れ難さを

表わす比抵抗(resistivity: 単位は $\Omega\text{m}$ )という物性値の分布を測定する。一般に濠や溝などは周囲と比較すると水分が多く電気が流れ易いため比抵抗が小さく、石組や砂利などでは電気が流れ難いため比抵抗が大きくなる傾向がある。比抵抗法では、このような比抵抗の違いにより、自然の堆積層と人工の遺構との違いを判別する。比抵抗法は地中レーダと較べると、空間分解能で劣るものの、探査深度が大きいという特徴がある。

著者らは、地方自治体等からの依頼により、主に電気探査を用いた遺跡探査を、古墳を含む多くの遺跡で実施してきた(例えば水永ら：2001)。前述のように、貴重な古墳になればなるほど発掘は困難となるため、発掘せずに古墳の内部構造を詳細に把握したいという要求が、文化財科学の関係者の間で高まっている。また発掘を実施する場合でも、物理探査により発掘前に石室等の埋設施設の存在可能性を検討できるし、石室等の埋設施設が存在する場合には、その位置や規模に関する事前情報を提供できるため、古墳調査における遺跡探査の重要性は益々高まっていると言える。

考古学的な古墳の内部構造の詳細については専門書に譲るとして、ここでは古墳の内部構造、特に埋葬施設について簡単に概説する。古墳の埋葬施設としては、竪穴式石室、粘土槨、横穴式石室、横口式石槨、地下式横穴、横穴式木槨、横穴等が示されている(白石：1985)。この

<sup>1)</sup> 九州大学大学院工学研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡744番地

<sup>2)</sup> 元九州大学大学院工学府 現TIS(株)

<sup>3)</sup> 元九州大学大学院工学研究院 現九州大学名誉教授

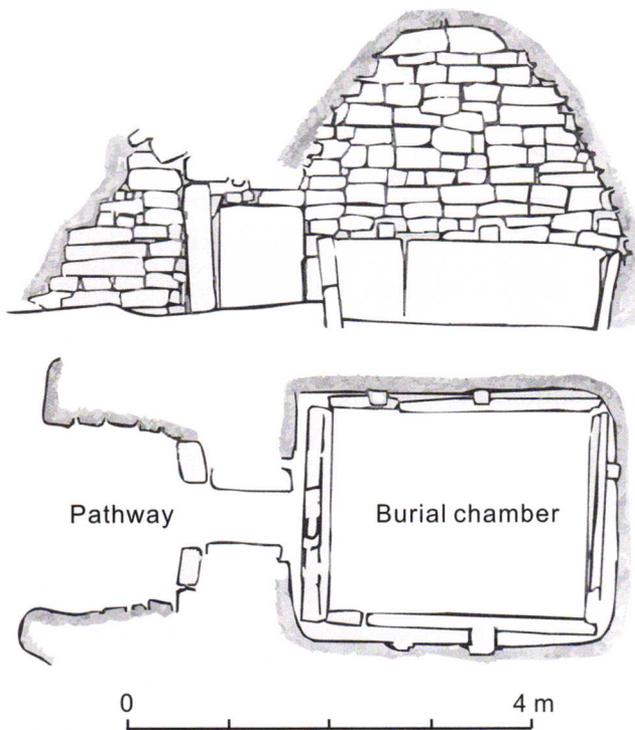


図1 熊本県嘉島町の井寺古墳の横穴式石室（白石：1985を改変）  
 Fig. 1 The burial stone chamber of Idera Kofun in Kashima town, Kumamoto Prefecture, Japan (modified from Shiraiishi: 1985)

うち比抵抗法による探査が可能な探査対象としては、他の埋葬施設と比較して規模の大きな竪穴式石室と横穴式石室が考えられる。竪穴式石室は、古墳の中央部に竪穴を掘り、その竪穴に石室を安置して埋設したものである。横穴式石室は、古墳側面に続いた横穴で中央部の石室とつながっており、石室の再利用が可能な点で竪穴式石室と大きく異なる。図1に熊本県に多い横穴式石室の例として、熊本県嘉島町の井寺古墳の横穴式石室を簡略化した模式図（白石：1985の図67-3を改変）を示す。

竪穴式石室と横穴式石室が存在する古墳は、その歴史的背景や築造法が異なるものの、いずれも古墳中央部に大きな石室が存在しており、石室等による古墳中央部の大きな比抵抗異常が期待できる。そこで本研究では、熊本県山鹿市の岩原双子塚古墳を調査地として実施した比抵抗探査データの三次元解析を実施し、前方後円墳の後円部中央に存在する可能性が高い石室の三次元可視化を試みた。

## 2. 比抵抗法による遺跡探査の概要

比抵抗法では、地表に設置した一対の電流電極から地下に電流を流して、もう一対の電位電極間の電位差を測

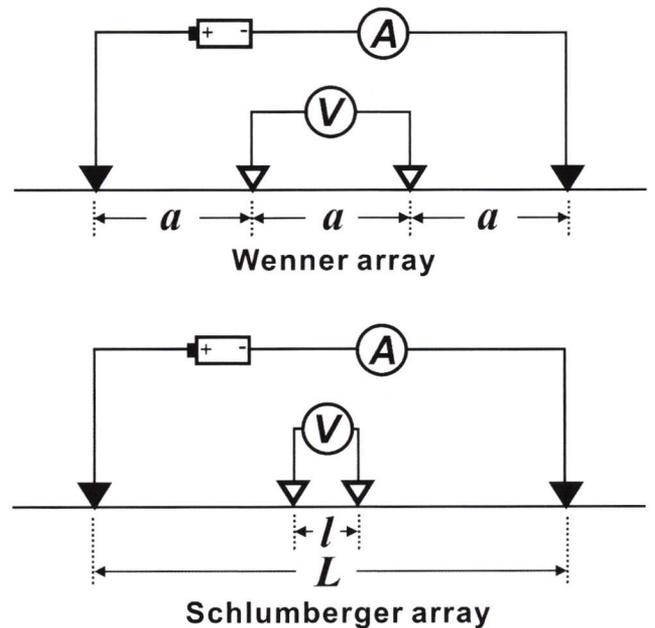


図2 比抵抗法の典型的な電極配置  
 Fig. 2 The typical electrode configurations.

定することによって、地下の平均的な比抵抗（見掛け比抵抗）を計算する。見掛け比抵抗は、測定された電位差と各電極の位置によって決まる電極間係数から計算できる。岩石や地層の比抵抗は、その構成鉱物の種類、乾湿の状態、風化・変質の状態、温度などによって変わるので、地下の比抵抗分布から地下構造を推定することができる。遺跡探査では、二極法による比抵抗探査が実施されることもあるが、四極法に比べて比抵抗の検出感度が劣るので、本研究では四極法を採用した。図2に本研究で用いたウェンナー法とシュランベルジャー法の電極配置を示す。

ウェンナー法やシュランベルジャー法では、外側の電極対から電流を流し、内側の電極対で電位差を測定する。これらの電極配置で、ウェンナー法の電極間隔が全て同じなのに対し、シュランベルジャー法では内側の電位電極間の間隔が短く ( $L \geq 5l$ ) になっている。それぞれの方法の見掛け比抵抗は電極間隔の違いによって異なり、観測電位差  $\Delta V$  (V) と通電電流  $I$  (A) の比から次式のように計算できる。

ウェンナー法：

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

シュランベルジャー法：

$$\rho_a = \pi \frac{L^2 - l^2}{4l} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

ここで、 $a$  はウェンナー法の電極間隔 (m)、 $L$  と  $l$  はシュ

ランベルジャー法の電極間隔 (m) である。

また比抵抗法では、着目する比抵抗分布によって、水平探査と垂直探査に分類できる。水平探査はその名の通り比抵抗の水平分布を調べる方法で、電極系の位置関係を固定して測線に沿って移動しながら測定を行なう。こうすることで、その測線に沿った見掛比抵抗のプロファイルが得られる。また複数の測線で同様の測定を実施すれば、全測線のデータを使って面的な見掛比抵抗分布が得られる。イギリスでは磁気探査による遺跡探査の例が多いが、比抵抗法による遺跡探査の原理や実例がクラーク (1996) により詳しく紹介されている。本研究では、調査の初期段階でウェンナー法による水平探査を実施した。

水平探査では埋設遺構の水平的な分布や規模は推定できるが、詳しい深度情報は得られない。ウェンナー法の探査深度は、電極間隔  $a$  とほぼ同じと考えられているので、 $a$  を 1 m にすれば深度 1 m までの平均的な比抵抗を測定したことになる。また  $a$  を 2 m にすれば深度 2 m までの平均的な比抵抗を測定したことになる。このような電極間隔の違いを利用して比抵抗の深度分布を調べる方法が垂直探査である。垂直探査では電極系の中心を固定して、電極間隔を広げて見掛比抵抗を測定する。ウェンナー法による垂直探査では、 $a$  を変えるたびに全ての電極を移動しなければならないが、シュランベルジャー法による垂直探査では内側の電位電極は動かさないのでウェンナー法に比べて作業効率がよい。そのため、特に深部を対象とした垂直探査ではシュランベルジャー法が採用される場合が多い。本研究では、三次元比抵抗分布を得る目的のため、後円部を中心にしたシュランベルジャーによる高測点密度の垂直探査を実施した。

### 3. 垂直探査データの解析法

物理探査では、あらかじめ与えられた地下構造モデル (例えば比抵抗モデル) に対して、既に知られた物理法則にしたがって、その応答値 (例えば見掛比抵抗) を求める問題を順問題と呼び、それを解くことを順解析 (フォワードモデリングまたはシミュレーション) と呼ぶ。これに対して、観測データ (例えば見掛比抵抗) を基にして地下構造モデル (例えば比抵抗モデル) を決定する問

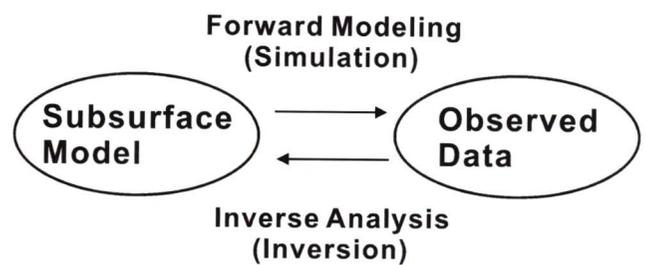


図3 順解析と逆解析の関係

Fig. 3 The relationship between simulation and inversion

題を逆問題と呼び、それを解くことを逆解析 (インバージョン) と呼ぶ。図3に順解析と逆解析の関係を示す。ただし、逆解析は順解析と独立した方法ではなく、非線形最小二乗法などを使って順解析を繰り返すことで実現できる。

比抵抗法を実施した後に得られる見掛比抵抗から最終的に求めたいものは、地下の比抵抗分布である。この比抵抗分布を推定するために様々なインバージョン手法が考案されてきた。最も単純なインバージョンは、地下の比抵抗分布が深度方向にだけ変化する水平多層構造を仮定して行なわれる。この場合、ある観測点での垂直探査データだけから、地下の各層の比抵抗値と厚さを求めることができる (牛島ら:1987)。このような構造を物理探査では一次元構造と呼び、このような解析法を一次元解析と呼んでいる。ただし、実際の地下の比抵抗分布は単純ではなく、水平方向にも変化するため、比抵抗の水平方向の不均一性が強い場合には解析結果にその影響が現れる。

一般に垂直探査は、直線的に設定された測線に沿って行なわれることが多い。そこで、測線方向の比抵抗変化も考慮した二次元解析法が開発された。二次元解析では、深度方向と共に水平方向 (測線方向) にも比抵抗が変化する二次元構造を考え、測線上の全垂直探査データを同時に解析することで二次元構造を計算する。二次元構造のシミュレーションには、主として有限要素法や有限差分法などが使われている。またインバージョンのアルゴリズムには、非線形最小二乗法の他にヒューリスティックな方法も使われている。現在では、二次元インバージョンの市販プログラムやフリーのソフトウェアも存在し、二次元インバージョンは以前に比べて、より一般的な解析手法になっている。

しかし、実際には地下構造はさらに複雑で、測線に直交する奥行き方向にも比抵抗が変化しており、ある地点での見掛比抵抗曲線は、その周辺地域の比抵抗構造の影響を強く受ける。このような場合に一次元解析および二次元解析を行なうと、実際には存在しない地層を検出したり、三次元的な地層の連続性が不明瞭になることが考えられる。したがって、より精度の高いデータ解析を行なうためには、三次元インバージョンを行なう必要がある。

そこで、本研究では、シュランベルジャー法の垂直探査データから地下の三次元比抵抗分布を計算するインバージョンプログラムを開発した(水永ら:2002)。図4に今回開発した三次元インバージョンの流れ図を示す。三次元インバージョンではフォワード計算で推定モデルの見掛比抵抗を計算し、実際の観測値との差が小さくなるように、最小二乗法を用いて推定モデルの修正を繰り返す。このプログラムのフォワード計算部分には有限差分法(FDM:Finite Difference Method)を使い、非線形最小二乗法に必要な地下比抵抗の感度行列(ヤコビアン)の計算にはPark and Van(1991)のSingle Scattering理

論を用いた。図5には、今回開発した三次元インバージョンプログラムのメイン画面を示す。

この三次元インバージョンプログラムの解析精度を、種々の比抵抗モデルに適用して評価した。ここではその一例として、古墳の石室を想定した高比抵抗異常体が存在するモデルの解析例を示す。図6は、解析精度の検討に用いた高比抵抗体モデルである。図6の上図が高比抵抗モデルのX-Y平面図、下図がX-Z断面図である。このモデルでは、比抵抗値100 Ωmの均質媒質中に、比

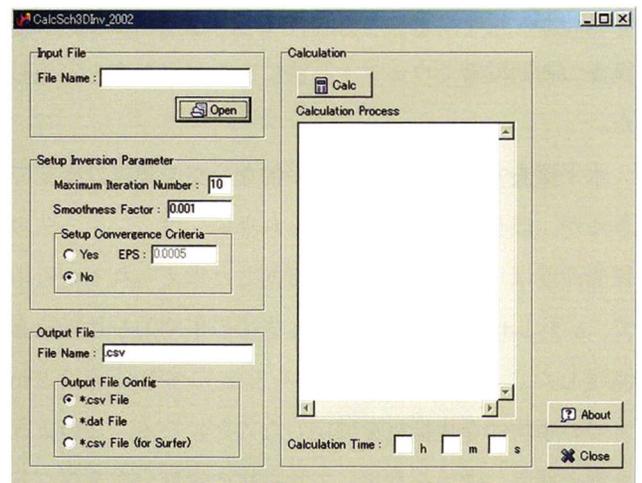


図5 三次元インバージョンプログラムのメイン画面  
Fig. 5 The main display of 3-D inversion program

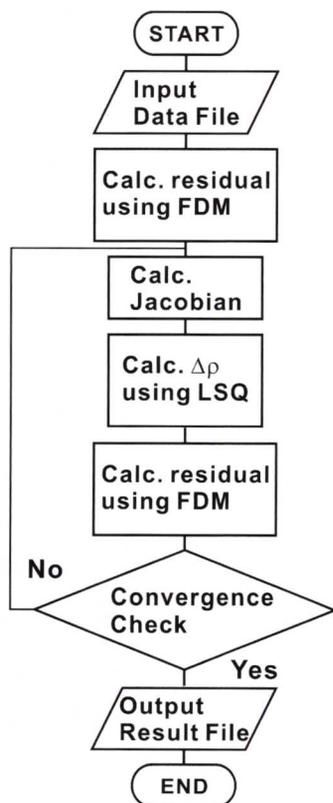


図4 三次元インバージョンの流れ図  
Fig. 4 The flowchart of a 3-D inversion

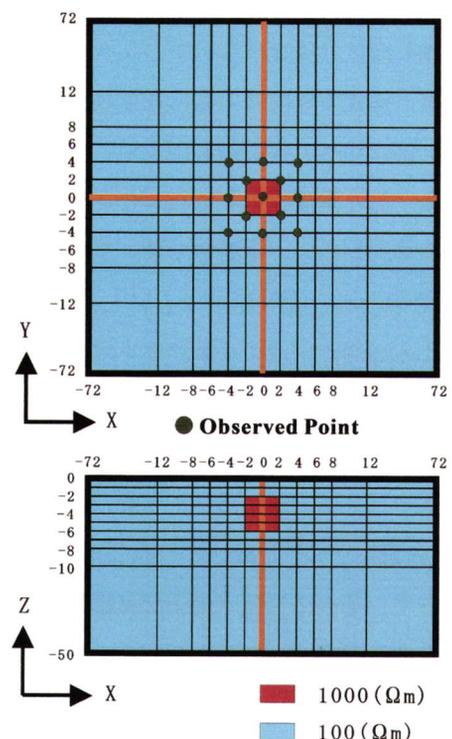


図6 三次元インバージョンに用いた高比抵抗モデル  
Fig. 6 The high resistivity block model for 3-D inversion

抵抗値  $1000 \Omega\text{m}$  の高比抵抗異常体を計算領域の中央部、すなわち X 座標は  $-2$  から  $2\text{m}$ 、Y 座標は  $-2$  から  $2\text{m}$ 、Z 座標は  $-2$  から  $-6\text{m}$  の範囲に設定した。

見掛比抵抗を計算する測点は、図 6 の平面図の●印で示した 13 点である。なおこの計算では、シュランベルジャー法の電極間隔  $l/2$  が  $0.2\text{m}$  の場合には、 $L/2$  を  $1, 2, 3, 4, 5\text{m}$  とし、 $l/2$  が  $1\text{m}$  の場合には、 $L/2$  を  $6, 7, 8, 9, 10, 15\text{m}$  とした。つまり、各測点での見掛比抵抗のデータ数は 11 個となる。ただし、この数値実験での垂

直探査の電極の展開方向は X 方向だけである。この 13 (測点)  $\times$  11 (個) = 143 個の全データを三次元インバージョンに使用した。三次元インバージョンに要した反復計算の回数は 5 回であった。

最終結果である反復計算 5 回目の Y 座標が  $-8$  から  $8\text{m}$  での各ブロックにおける X - Z 断面の比抵抗分布を、図 7 に示す。この図を見ると、モデルで設定した位置に実際の比抵抗値である  $1000 \Omega\text{m}$  には届かないが  $170 \Omega\text{m}$  程度の高比抵抗異常体が現れていることがわか

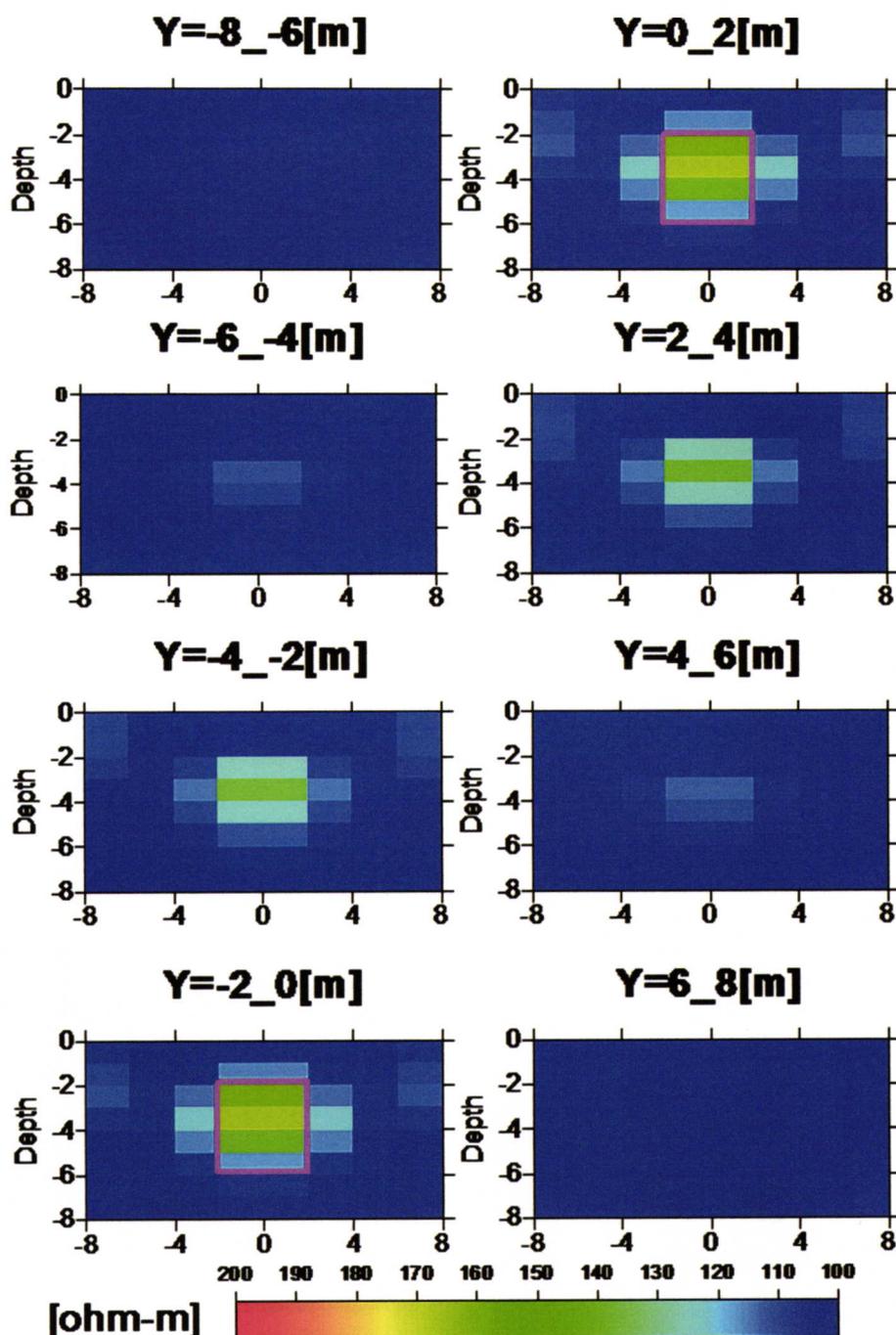


図 7 三次元インバージョンで求めた高比抵抗体モデルの 2 次元比抵抗断面図  
 Fig. 7 The 2-D resistivity sections after 3-D inversion in case of high resistivity model

る。しかし、高比抵抗異常体の影響を受けて、実際には存在していないY座標の-4から-2mの範囲と2から4mの範囲の比抵抗断面図にも高比抵抗異常体が存在するように解析された。これは非線形最小二乗法を用いて計算する際に、比抵抗分布の平滑化拘束を計算条件に与えたためである。ただし、この解析結果を全体的に見れば、高比抵抗異常体が存在する中央部に比抵抗異常が解析されており、この位置に高比抵抗体が存在することは明確に判断できる。本研究では、このプログラムを使用して、フィールドデータの三次元インバージョンを実施した。

#### 4. フィールド調査の概要

熊本県の菊池川流域は熊本県下有数の古墳の集積地帯で山鹿市の岩原古墳群、装飾古墳として有名なチブサン

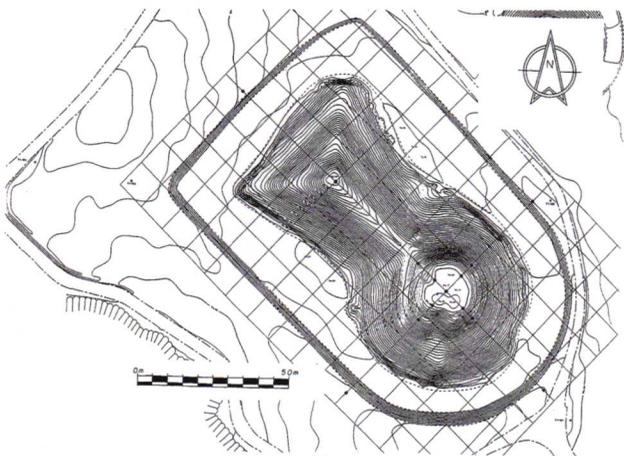


図8 岩原双子塚古墳の地形測量図

Fig. 8 The topographic map of Iwabarū-Futagozuka Kofun



図9 岩原双子塚古墳の全景

Fig. 9 A picture of Iwabarū-Futagozuka Kofun

古墳などの国指定史跡をはじめ、岩原横穴群ほか多数の熊本県指定史跡がある。熊本県山鹿市（調査実施時は鹿本郡鹿央町）の岩原双子塚古墳は、九州でも屈指の美しい前方後円墳であり、その墳丘長は107m、後円部径は57m、墳丘の高さは9mで、国指定の史跡である。図8に岩原双子塚古墳の地形図を示し、図9には岩原双子塚古墳の写真を示す。岩原双子塚古墳は、古墳時代中期（440～450年頃）に築造されたと考えられており、この主墳を中心にして周囲には8基の円墳が点在し、石棺等も多数発見されている。岩原双子塚古墳の周辺は、県立肥後古代の森として整備されている。

本研究では、岩原双子塚古墳の主体部の構造を明らかにすることを目的として、比抵抗法による遺跡探査を実施した。比抵抗の水平分布および深度方向の分布を詳細に調査するため、1998年に実施された水平探査に基づき比抵抗異常が検出された古墳後円部を中心として、シュランベルジャー法による垂直探査を高密度の測点間隔で実施した。調査は1998年10月27日から28日の2日間と、2000年12月6日の2回にわたり実施された。なお、2000年の調査では1998年の測線方向と直交する方向に測線を配置して垂直探査を実施した。図10に2000年12月6日に岩原双子塚古墳の後円部で実施した調査風景の写真を示す。

最初に、シュランベルジャー法による高密度垂直探査の予備調査として実施されたウェンナー法による水平探査の結果を示す。ウェンナー法による水平探査は、岩原



図10 岩原双子塚古墳の後円部で実施した比抵抗法探査の実施風景

Fig. 10 A picture of the resistivity survey at the top of the circular mound of Iwabarū-Futagozuka Kofun

双子塚古墳の主軸に沿った後円部から前方部に至る 100 m の測線上で実施された (図 11)。この調査のウェンナー法の電極間隔  $a$  は 2 m で、電極系の移動距離は電極間隔と同じ 2 m とした。この水平探査で得られた見掛比抵抗曲線を図 12 に示す。この見掛比抵抗曲線から、深度 2 m までの平均的な比抵抗値は 200 から 300  $\Omega\text{m}$  であることがわかる。また、後円部の中心に相当する距離程-30 m の場所で、高比抵抗異常体の存在を示唆する典型的な W 型示徴が確認できた。この高比抵抗異常体の規模や深度を調べるため、次に後円部を中心としたシュランベルジャー法による高密度垂直探査を実施した。

シュランベルジャー法による高密度探査は 2 回にわたって実施された。1 回目の探査は 1998 年に実施され、垂直探査の展開方向が主軸方向と平行となるように Line-A から Line-E までの 5 測線で実施した。各測線には 7 点の測点を設定したので、合計 35 点の垂直探査を

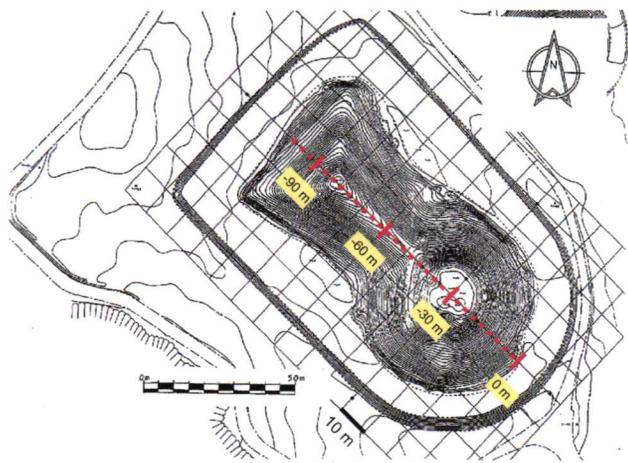


図 11 ウェンナー法による水平探査の測線

Fig. 11 The resistivity profile line using Wenner method

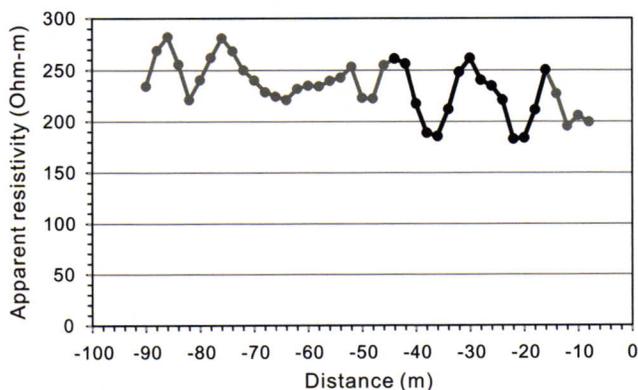


図 12 ウェンナー法による水平探査曲線

Fig. 12 The Wenner apparent resistivity profile

実施したことになる。2 回目の探査は 2000 年に実施され、垂直探査の展開方向が主軸方向と直交するように Line-1 から Line-4 までの 4 測線で垂直探査を実施した。各測線には a から h までの 8 測点を設定したので、測点の合計は 32 点となった。図 13 に、後円部で実施した垂直探査の測線および測点配置を示す。なお、各測線および各測点の間隔は 2 m とした。また、中央部の 20 測点については電極系の展開方向が異なるが、1998 年と 2000 年の測点が重なっている。シュランベルジャー法の電流電極間隔  $L/2$  は、0.5 m から 5 m までは 0.5 m 刻み (電位電極間隔  $l/2$  は 0.1 m)、5 m から 10 m までは 1 m 刻み (電位電極間隔  $l/2$  は 1 m) として 0.5 m から 10 m まで合計 16 回の電極移動を繰り返して見掛比抵抗を測定した。

次に、この垂直探査で得られた見掛比抵抗曲線 (VES 曲線) の例を図 14 と図 15 に示す。図 14 の VES 曲線は後円部のほぼ中央に位置する測点 C-4 での探査曲線である。この VES 曲線から、浅部の比抵抗は 1000  $\Omega\text{m}$  程度であり、深くなるに従って徐々に比抵抗が減少する傾向にあることがわかる。ただし VES 曲線を詳しく見ると、電極間隔が 3 から 5 m の範囲で僅かながら上昇した後、下降することがわかる。更にそこから電極間隔が 10 m となる深部に向けて見掛比抵抗が再び上昇していることがわかる。これはウェンナー法の水平探査からも示唆された、高比抵抗異常体の存在による見掛比抵抗変化であると考えることができる。図 15 は、同じ Line-C 測線上で中央部から最も離れた測点 C-7 での VES 曲線で

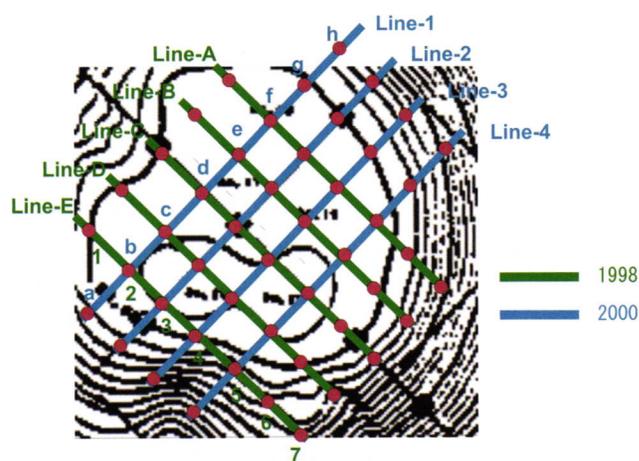


図 13 1998 年と 2000 年に実施したシュランベルジャー法による垂直探査の測点配置

Fig. 13 The Schlumberger survey points in 1998 and 2000

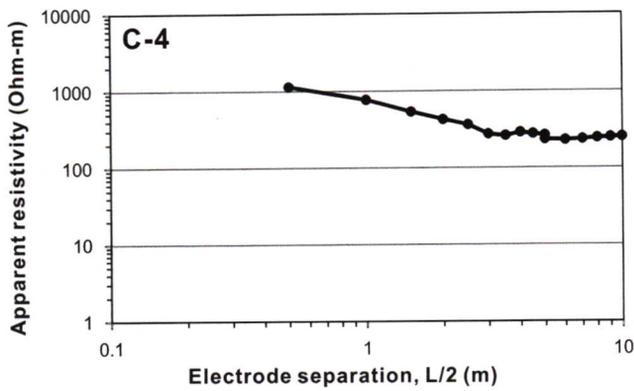


図 14 測点 C-4 での見掛比抵抗の垂直探索曲線  
Fig. 14 The vertical electric sounding curve at C-4

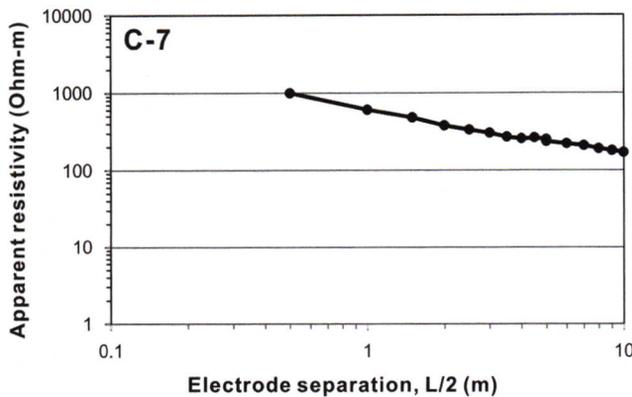


図 15 測点 C-7 での見掛比抵抗の垂直探索曲線  
Fig. 15 The vertical electric sounding curve at C-7

ある。この VES 曲線は測点 C-4 での VES 曲線の傾向とは異なり、見掛比抵抗の上昇域が見られず、見掛比抵抗は浅部から深部に向けて緩やかに減少するだけである。

## 5. 二次元インバージョンの結果

測線毎の全測点での垂直探索データを使えば、二次元インバージョンにより測線の比抵抗断面図を求めることができる。本研究では二次元インバージョンの例として、岩原双子塚古墳の主軸と重なる Line-C 測線と、その測線から 2m 離れた Line-D 測線の解析結果を示す。なお、二次元インバージョンには内田 (1993) による ABIC 最小化法を用いたインバージョンプログラムを使用した。二次元インバージョンでは、地下の比抵抗分布が矩形に分割した比抵抗ブロックの比抵抗値として解析される。

図 16 に Line-C 測線の比抵抗断面図を示す。この図を見ると、測点 3 から測点 5 の範囲の深度 3 m から 6 m の範囲に、比抵抗が 1000  $\Omega$ m を超える周囲と比べて高

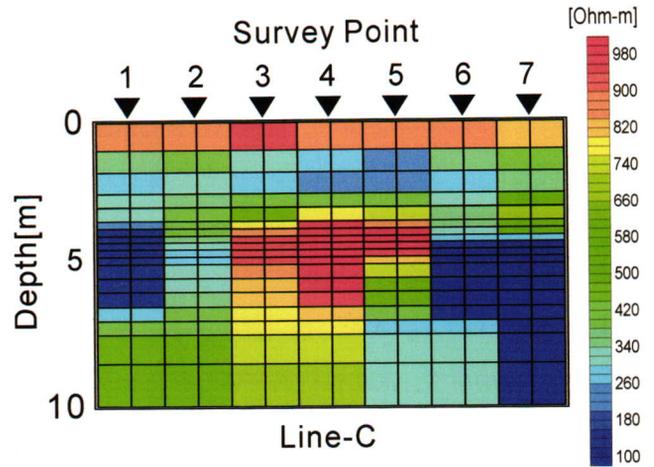


図 16 二次元インバージョンで求めた Line-C の比抵抗断面  
Fig. 16 The 2-D resistivity section beneath Line-C using 2-D inversion

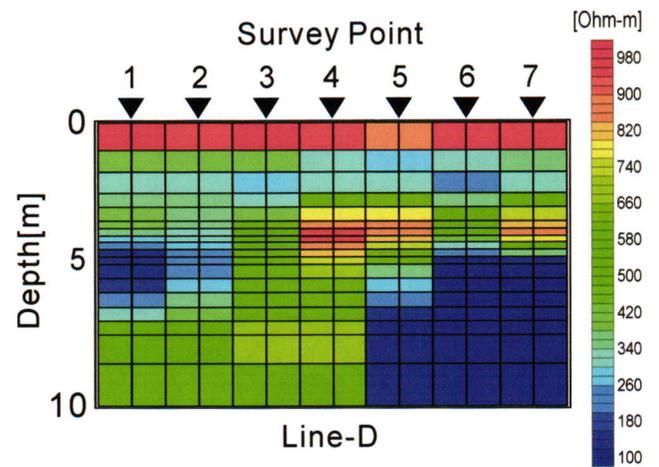


図 17 二次元インバージョンで求めた Line-D の比抵抗断面  
Fig. 17 The 2-D resistivity section beneath Line-D using 2-D inversion

比抵抗な領域が現れている。図 17 には Line-D 測線の比抵抗断面図を示す。Line-D でも高比抵抗部が現れているが、Line-C の比抵抗値と比べると値が低く、また比抵抗異常域の分布も小さくなっている。

## 6. 三次元インバージョンの結果

二次元インバージョンでは測線毎にデータ解析を実施するため、図 16 と図 17 で示したように、2m しか離れていない隣り合う測線でも比抵抗断面が大きく異なる場合がある。このような比抵抗分布の不連続性を解消するために、垂直探索の全データを一度に解析して地下の三次元比抵抗分布を計算する三次元インバージョンを試みた。三次元インバージョンでは、地下を直方体の比抵抗キューブに分割し、その比抵抗キューブの比抵抗値が求

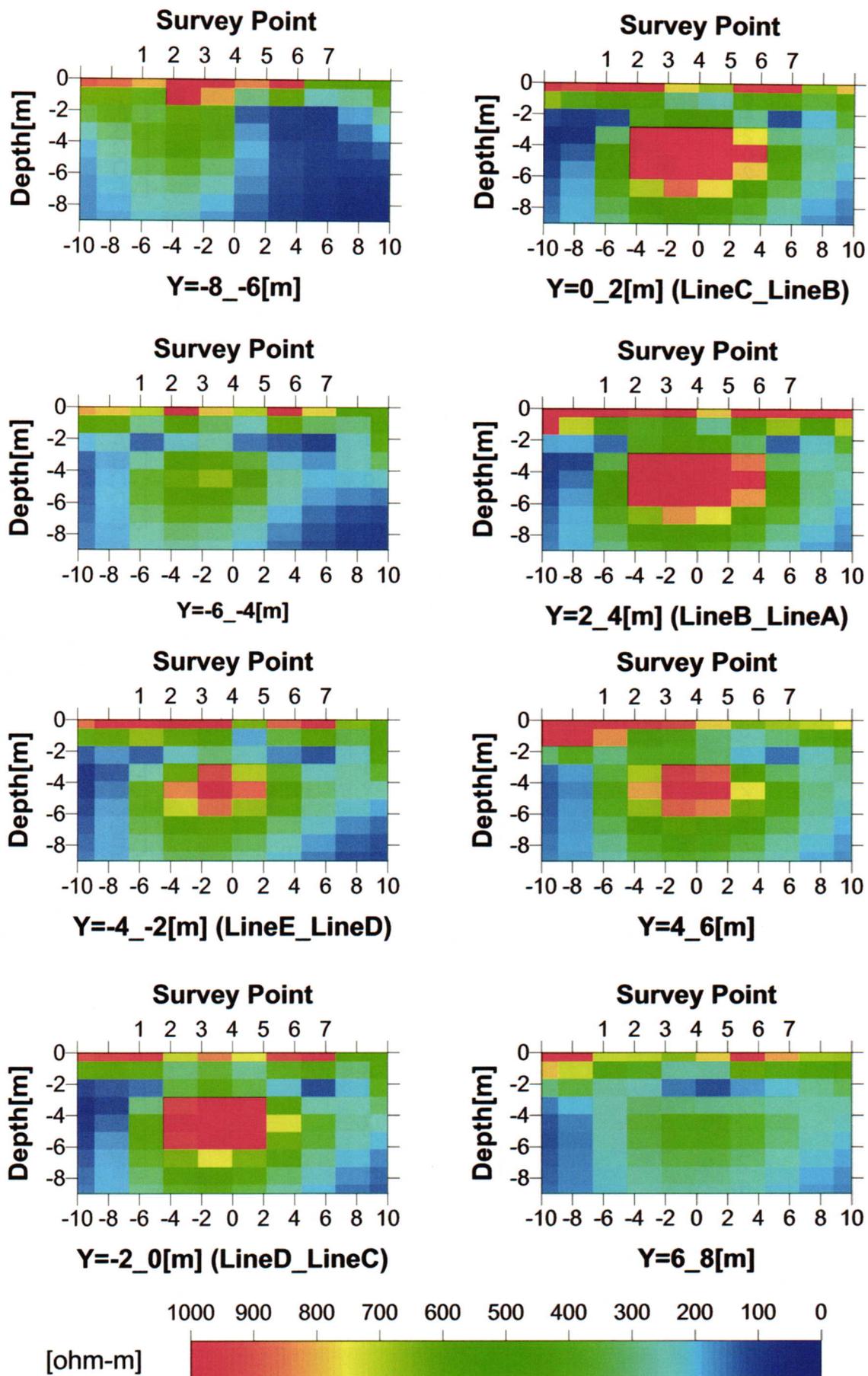


図 18 三次元インバージョンで求めた岩原双子塚古墳の後円部の比抵抗断面図

Fig. 18 The vertical resistivity sections beneath the circular mound of Iwabarū-Futagozuka Kofun using 3-D inversion

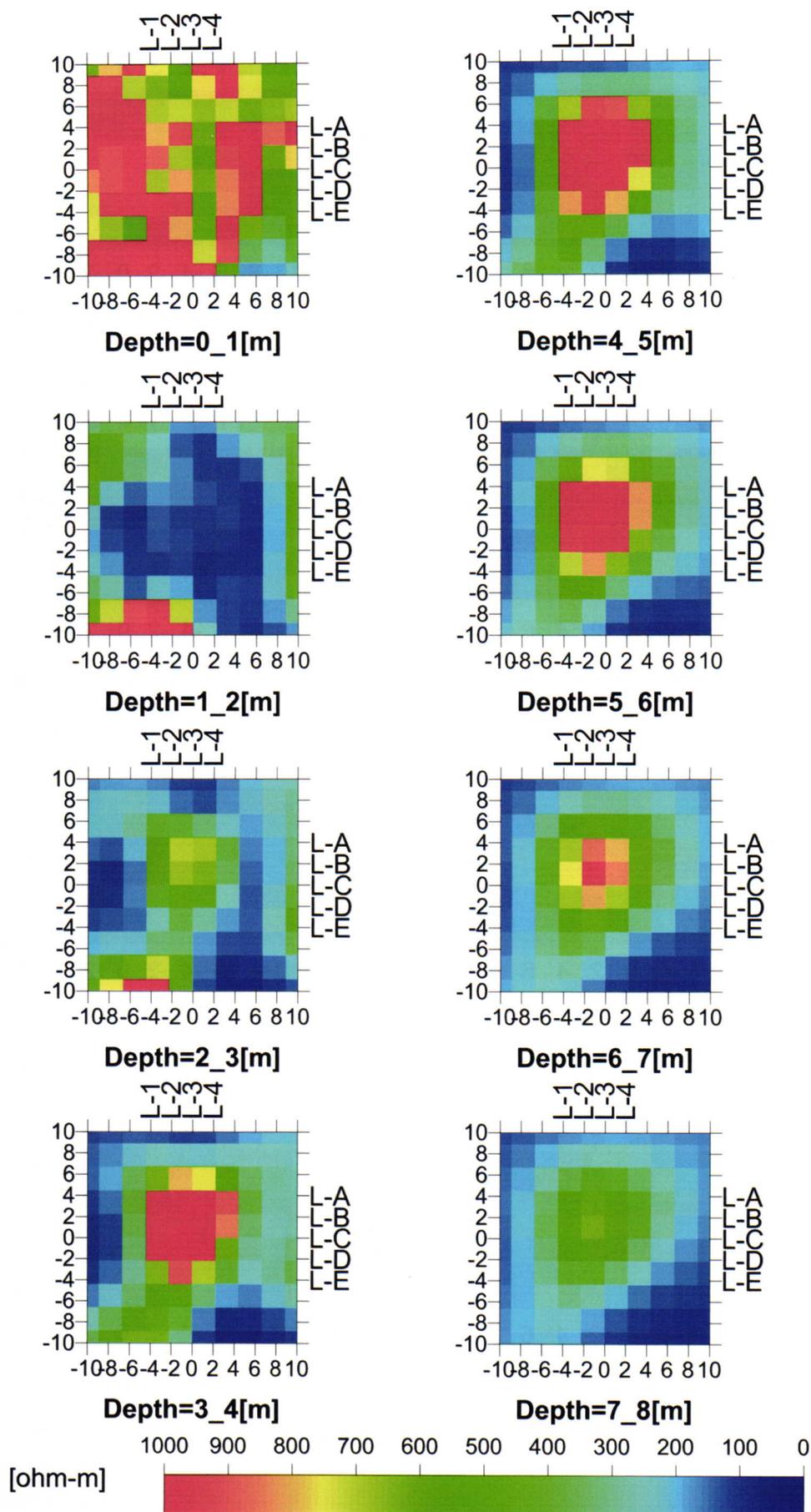


図19 三次元インバージョンで求めた岩原双子塚古墳の後円部の比抵抗深度スライス

Fig. 19 The horizontal resistivity maps of each depth beneath the circular mound of Iwabarū-Futagozuka Kofun using 3-D inversion

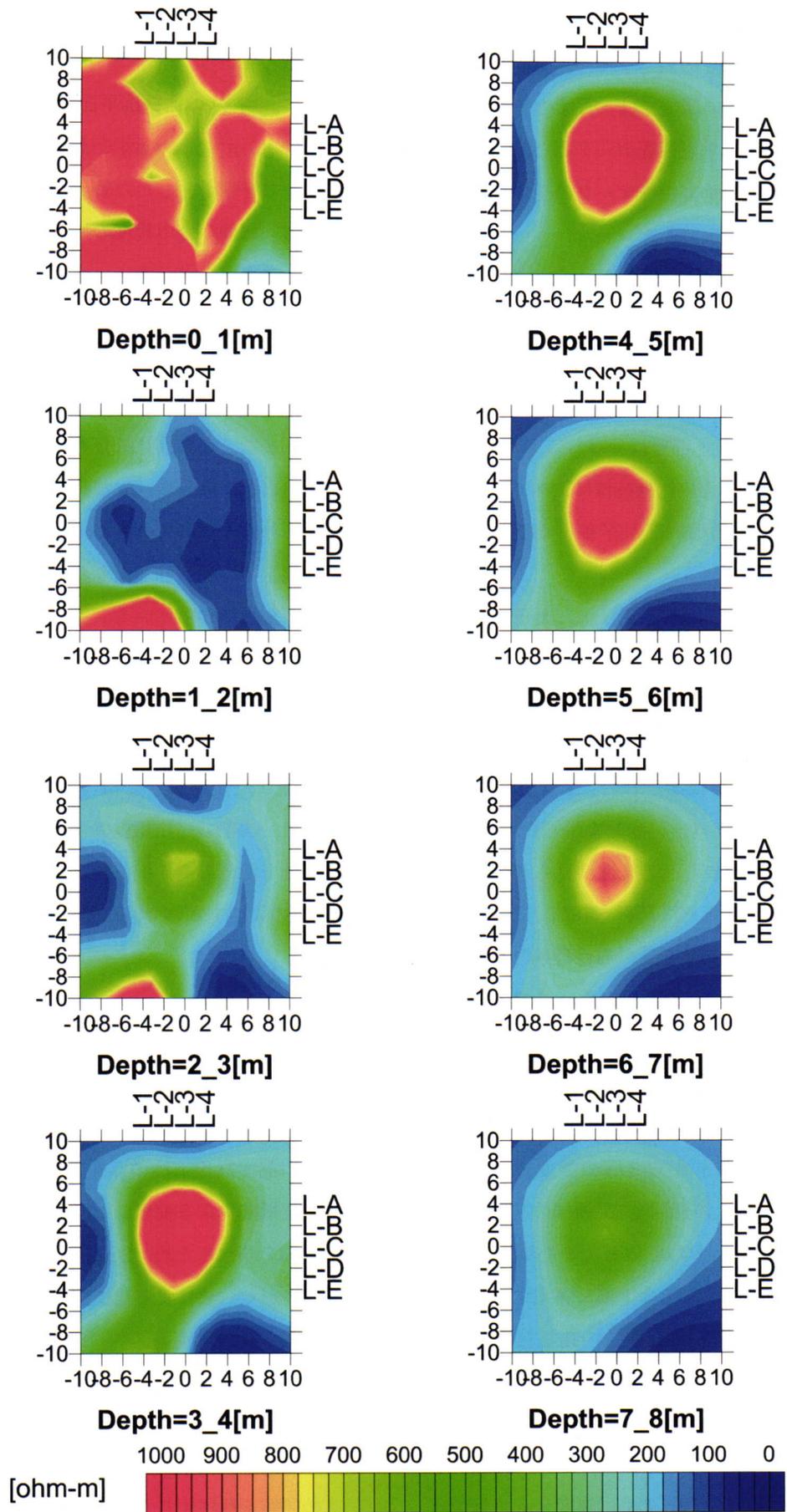


図 20 三次元インバージョンで求めた岩原双子塚古墳の後円部の比抵抗を平滑化した深度スライス

Fig. 20 The smooth resistivity contours of each depth beneath the circular mound of Iwabaru-Futagozuka Kofun using 3-D inversion

められる。なお、今回の解析モデルの比抵抗キューブの大きさは、水平方向に2mの長さを持ち、深度方向には1mの厚さを持つ。今回の研究では、古墳の主軸と平行する1998年の35測点の垂直探査データと、主軸と直交する2000年の32測点の垂直探査データの全てを使って三次元インバージョンを実施した。

図18に反復5回目の最終結果を使って作成した深度方向の比抵抗断面図を示す。これらの比抵抗断面図から地下の比抵抗分布を大別すると、1000  $\Omega\text{m}$  程度の比抵抗値を持つ深度2mまでの表層と、数100  $\Omega\text{m}$  程度の比抵抗値を持つ2m以深の下部層に分けることができる。また、下部層の中には周辺の比抵抗値に比べて高い比抵抗値を持つ局所的な高比抵抗部が存在することがわかる。

三次元インバージョンの結果でも、二次元インバージョンの結果と同様に、後円部中央での高比抵抗異常を検出することができた。特にLine-A測線からLin-D測線に挟まれた深度3mから6mの間に、1000  $\Omega\text{m}$  以上の値を持つ比抵抗異常が検出された。三次元インバージョンでは、二次元インバージョンで生じたLine-CからLine-Dへの比抵抗分布の不連続性は見られず、連続した滑らかな比抵抗分布として解析された。

次に、深度毎の平面的な比抵抗分布が理解しやすい深度スライスを図19に示す。最も浅い1mまでの深度スライスでは、1000  $\Omega\text{m}$  を超える高比抵抗が、後円部を広く覆っていることがわかる。これは、図14と図15で示したVES曲線の浅部での見掛比抵抗値である1000  $\Omega\text{m}$  と整合する。次に深度1mから3mの深度スライスでは、地図上では西に相当する比抵抗平面図の左下に局所的な高比抵抗異常が検出されている。また深度2mから3mの深度スライスには、その下部に存在する高比抵抗体の影響と思われる700  $\Omega\text{m}$  前後の比抵抗域が検出された。深度3mから7mまでの深度スライスの中央部には、周辺に比べて明らかに比抵抗が異なる1000  $\Omega\text{m}$  以上の高比抵抗領域が検出された。この高比抵抗異常体は、深度3m付近から現れ始め、深度8m付近ではほぼ消滅してしまうことがわかった。さらにこの高比抵抗異常体から、深度1mから3mの深度スライスで見られた高比抵抗異常体に向かって、500  $\Omega\text{m}$  程度の比抵抗値

を持つ領域が高比抵抗異常体を繋ぐように伸びているように分布している。

最後に、図19の比抵抗平面を平滑化した深度スライスを図20に示す。この図では、ブロック毎の離散的な比抵抗分布を平滑化したため、深度3mから6mに存在する西方向に伸びた中程度の比抵抗異常域の分布が、図19に比べて明瞭となった。

今回の三次元インバージョンで得られた高比抵抗異常部を1000  $\Omega\text{m}$  以上と考えれば、その平面分布は横幅が6m程度、長さが10m程度、高さが3m程度の大きさとなる。また、この高比抵抗異常体から図の斜め左下へ伸びる、比抵抗値500  $\Omega\text{m}$  前後の中程度の比抵抗異常域が検出された。この中程度の比抵抗異常が伸びている方向は地図上では西方向となり、前方部と後円部の境界である括れ部に向かっている。三次元インバージョンで得られた比抵抗の三次元分布から総合的に解釈すれば、1000  $\Omega\text{m}$  以上の高比抵抗異常体が被葬者が埋葬されている玄室部分に相当し、500  $\Omega\text{m}$  前後の中比抵抗域が西方向に延びた羨道部分に相当すると考えることができる。また、浅部の高比抵抗異常体は、羨道に相当する中比抵抗域で深部の高比抵抗異常体と繋がっていることから、羨道の入口を塞いでいる領域と考えることができる。

## 7. まとめ

岩原双子塚古墳の内部構造を3次元的に可視化するため、比抵抗法による電気探査を実施した。最初に実施した古墳の主軸に沿ったウェンナー法による水平探査では、後円部で高比抵抗の存在を示唆する典型的なW型の見掛比抵抗異常を検出した。この後円部での比抵抗異常の詳細を調べるため、2m格子の高密度な測点でシュランベルジャー法による比抵抗垂直探査を実施した。始めに測線毎に二次元インバージョンを実施した。その結果、後円部の中央付近で1000  $\Omega\text{m}$  を超える高比抵抗異常部を検出することができたが、隣り合う2つの測線で二次元比抵抗断面が大きく異なる場合もあった。

この問題を解決するため、垂直探査の探査で得られた全ての見掛比抵抗データを使って三次元インバージョンを実施した。その結果、二次元インバージョンの際に現れた測線間の比抵抗分布の不連続性を解消し、滑らかで

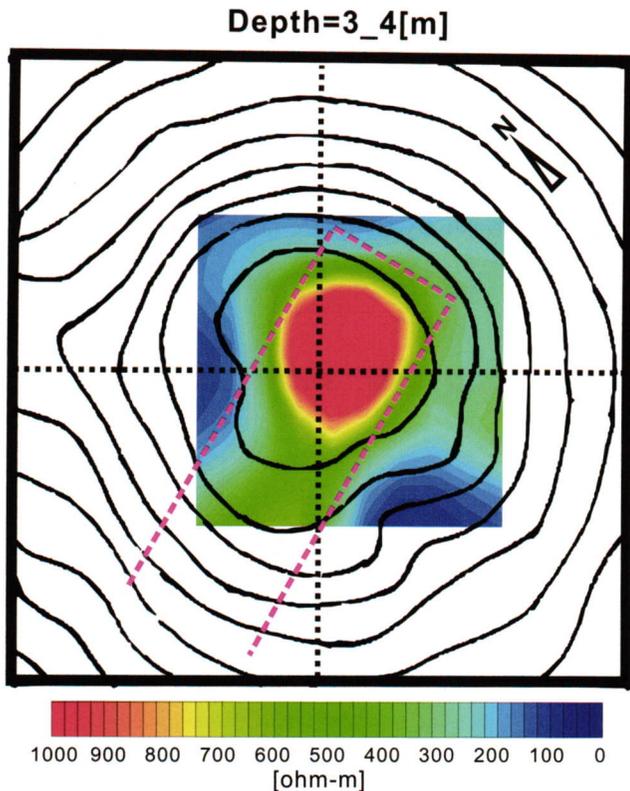


図 21 岩原双子塚古墳の後円部の石室の推定分布  
 Fig. 21 The estimated direction of stone chamber beneath the circular mound of Iwabarū-Futagozuka Kofun

連続的な比抵抗分布を得ることができた。三次元インバージョンでも二次元インバージョンと同様に、岩原双子塚古墳の後円部の下部には、1000 Ωm を超える局所的な高比抵抗異常域が存在することがわかった。また、この高比抵抗異常域から西側に延びる中程度の比抵抗異常域を検出することができた。

図 21 は、深度 3 m から 4 m までの比抵抗平面図 (20 m × 20 m) に、地形図 (40 m × 40 m) を重ねた図である。この図から、後円部中央の比抵抗異常体から西方向

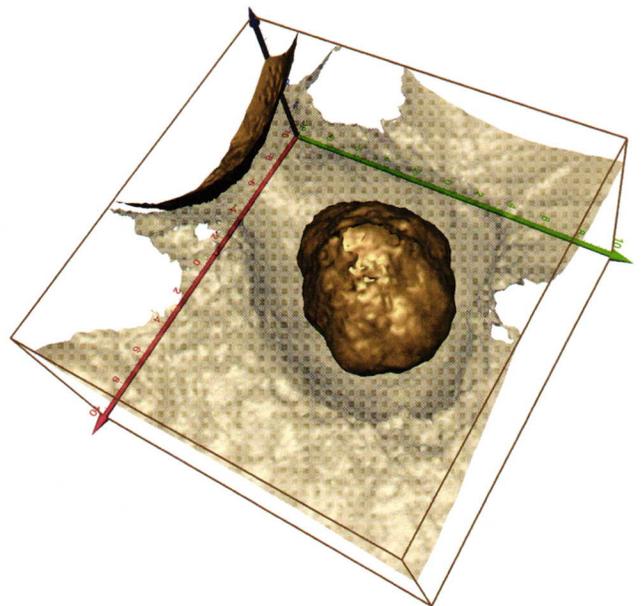


図 22 岩原双子塚古墳の後円部の石室の三次元イメージ (1000 Ωm と 500 Ωm の等値面図)  
 Fig. 22 The estimated 3-D image of a burial chamber beneath the circular mound of Iwabarū-Futagozuka Kofun (isosurface maps of 1000 Ωm and 500 Ωm)

に伸びた比抵抗異常域が、主軸から約 60 度の角度で西方向に進展している様子が良くわかる。最後に、1000 Ωm と 500 Ωm の比抵抗分布を使って作成した等値面図を図 22 に示す。この 1000 Ωm の等値面図の三次元形状は、中央部が高くなったドーム状の分布をしていることがわかる。この形状は、図 1 に示した肥後型横穴式石室の玄室の特徴をよく表わしている。また 500 Ωm の等値面図の分布からは、玄室から羨道へ方向と、その接続部がわかる。今回のデータ解析の結果から、岩原双子塚古墳の後円部には、肥後型横穴式石室が存在する可能性が高いと考えられる。

#### 引用文献

アンソニー・クラーク著 北嶋功訳 1996 『考古学のための地下探査入門』 雄山閣 pp.45-84  
 牛島恵輔・水永秀樹・加藤昭彦 1987 「パソコンによる電気探査データの解析」 物理探査 第 40 巻 pp.423-435  
 内田利弘 1993 「ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗法 2 次元インバージョン」, 物理探査 第 46 巻 pp.105-119  
 白石太一郎 1985 「第 4 章 古墳の埋葬施設」 『古墳の知識 I 墳丘と内部構造』 東京美術 pp.73-122  
 西村 康 1991 「考古学における物理探査の利用の現状 - 探査の歴史を中心に -」 物理探査 第 44 巻 pp.404-411  
 西村 康 2001 『日本の美術 7 (No.422 遺跡の探査)』 至文堂 pp.39-45

- 水永秀樹・山口盛一・牛島恵輔 2002 「シュランベルジャー法の3次元インバージョン」 物理探査学会  
第106回学術講演会講演論文集 pp.162-165
- 水永秀樹・牛島恵輔・青野哲雄・川崎 譲 2001 「太宰府水城跡の遺跡調査」 物理探査学会第105回学  
術講演会講演論文集 pp.248-251
- S. K. Park and G. P. Van 1991 "Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of  
electrodes" Geophysics Vol. 56 pp.951-960

(2017年4月7日受付, 2017年7月11日受理)

# Three-dimensional Visualization of the Inner Structure of Iwabarufutagozuka Kofun Using Resistivity Method

Hideki MIZUNAGA<sup>1)</sup>, Seiichi YAMAGUCHI<sup>2)</sup>, Toshiaki TANAKA<sup>1)</sup>, and Keisuke USHIJIMA<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

<sup>2)</sup> Former Graduate School of Engineering, Kyushu University, TIS Inc., Sumitomo Fudosan Shinjuku Grand Tower, 17-1, Nishishinjuku 8-chome, Shinjuku-ku, Tokyo, 160-0023, Japan

<sup>3)</sup> Emeritus Professor, Kyushu University, Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

In order to visualize the 3-D structure of a stone chamber which was buried in the Iwabarufutagozuka Kofun, the high-density resistivity surveys of the Schlumberger method were carried out in Yamaga city, Kumamoto prefecture, Japan. The Iwabarufutagozuka Kofun is a large "keyhole-shaped mounded tomb" with a length and height of 107 m and 9 m, respectively. It is considered that this mounded tomb was constructed in the middle of the Kofun Era (AD 440 - 450). The resistivity surveys were carried out at the top of the circular mound of Iwabarufutagozuka Kofun in 1998 and 2000. Firstly, a resistivity profile survey using the Wenner method was carried out as a preliminary survey in 1998. As a result of the Wenner survey, a W-shaped strong resistivity anomaly indicated the existence of a high resistivity body at the center of the circular mound of Iwabarufutagozuka Kofun. So we focused on the circular mound and carried out Schlumberger resistivity soundings in 1998 and 2000. Before 3-D inversion, 2-D inversions were done at all survey lines to get a rough estimation of the high resistivity anomaly. Although the resistive anomaly was detected at the center of the circular mound, the resistivity was discontinuous between the 2-D resistivity sections of two survey lines. In order to solve this problem, we developed and used a 3-D inversion. The all apparent resistivity data were used simultaneously for a 3-D inversion to calculate the 3-D subsurface resistivity distribution. As a result of 3-D inversion, a massive resistivity anomaly over 1000  $\Omega\text{m}$  was detected at a depth of 3 m beneath the top of the circular mound. The depth to the top of the massive resistivity anomaly is approximately 3 m and its size is approximately 6 m  $\times$  10 m  $\times$  3 m. Moreover, an additional resistivity anomaly over 500  $\Omega\text{m}$  was detected. This anomaly expands westward from the massive resistivity anomaly. Finally, isosurface maps of these resistivity anomalies were made to visualize the 3-D shape of the burial stone chamber. We interpreted that the massive resistivity anomaly corresponds to the burial stone chamber in which the local king was enshrined and the additional resistivity anomaly corresponds to the passage to the burial chamber.