

遺跡の3次元可視化プログラムの開発

田中, 俊昭
九州大学大学院工学研究院資源システム工学部門

水永, 秀樹
九州大学大学院工学研究院資源システム工学部門

牛島, 恵輔
九州大学大学院工学研究院資源システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7347413>

出版情報 : BUTSURI-TANSA(Geophysical Exploration). 60 (3), pp.235-244, 2007. 物理探査学会
バージョン :
権利関係 : © 2007 SEGJ



遺跡の 3 次元可視化プログラムの開発

田中俊昭*・水永秀樹*・牛島恵輔*

要 旨

九州大学は、福岡市西部に新しく造成された新キャンパス(伊都キャンパス)へ、2005 年 10 月から工学部を皮切りに大学の統合移転を行っている。新キャンパス内およびその周辺には、前方後円墳や円墳などの多数の埋蔵文化財が確認されており、福岡市教育委員会によって大規模な事前発掘調査が行われている。新キャンパス内には 6 基の前方後円墳が確認され、そのうち 5 基が九州大学によって保存が確定している。これまで、保存が確定している古墳の測量調査が九州大学の考古学研究室によって行われ、また電気探査が物理探査学研究室によって実施された。

前方後円墳を対象にした電気探査結果の解釈を行う際には、築造された地域や時代の特色を持つ古墳の外形や内部構造などの考古学的な見識に基づいた解釈を行う必要があり、考古学者の協力が重要となる。

本報告では、まず九州大学の新キャンパス内に存在する前方後円墳のひとつである塩除古墳について、2 極法電極配置による 2 次元電気探査を実施した結果について報告した。次いで、インバージョン解析によって得られた比抵抗分布を考古学者にもわかり易く表示するために比抵抗 3 次元イメージングソフトウェアを新たに開発し、そのイメージング手法について詳述した。

開発したソフトウェアを使用して、九州大学の新キャンパス内に存在し、保存が確定している前方後円墳の一つである塩除古墳で実施した電気探査結果を表示すると、後円部中央付近で認められた粘土礫と推定される低比抵抗異常の分布形状や、測線の端点に位置する墳丘斜面付近で認められた高比抵抗異常と古墳の墳丘斜面のほぼ全体にわたり残存が認められた葺石との位置関係が、手軽な操作と現実感のある 3 次元画像により確認でき、本ソフトウェアが探査結果を評価解釈する上で有効であることが確認できた。

キーワード：電気探査・遺跡探査・3 次元イメージング・OpenGL

1. はじめに

九州大学は、福岡市西部に新しく造成された新キャンパス(伊都キャンパス)へ、2005 年 10 月から工学部を皮切りに大学の統合移転を行っている。新キャンパス内およびその周辺には、前方後円墳や円墳などの多数の埋蔵文化財が確認されており、福岡市教育委員会によって大規模な事前発掘調査が行われている(福岡市教育委員会、2001)。新キャンパス内に 6 基(当初 7 基と言われていた

が、2006 年度の福岡市教育委員会の発掘調査により 1 基は円墳の可能性が高まった)の前方後円墳が確認され、そのうち 5 基が九州大学によって保存が確定している(宮本ほか、2006)。これまで、保存が確定している古墳の測量調査が九州大学の考古学研究室によって行われ、また電気探査が物理探査学研究室によって実施された(宮本ほか、2005; 宮本ほか、2006; 田中ほか、2006a; 田中ほか、2006b)。

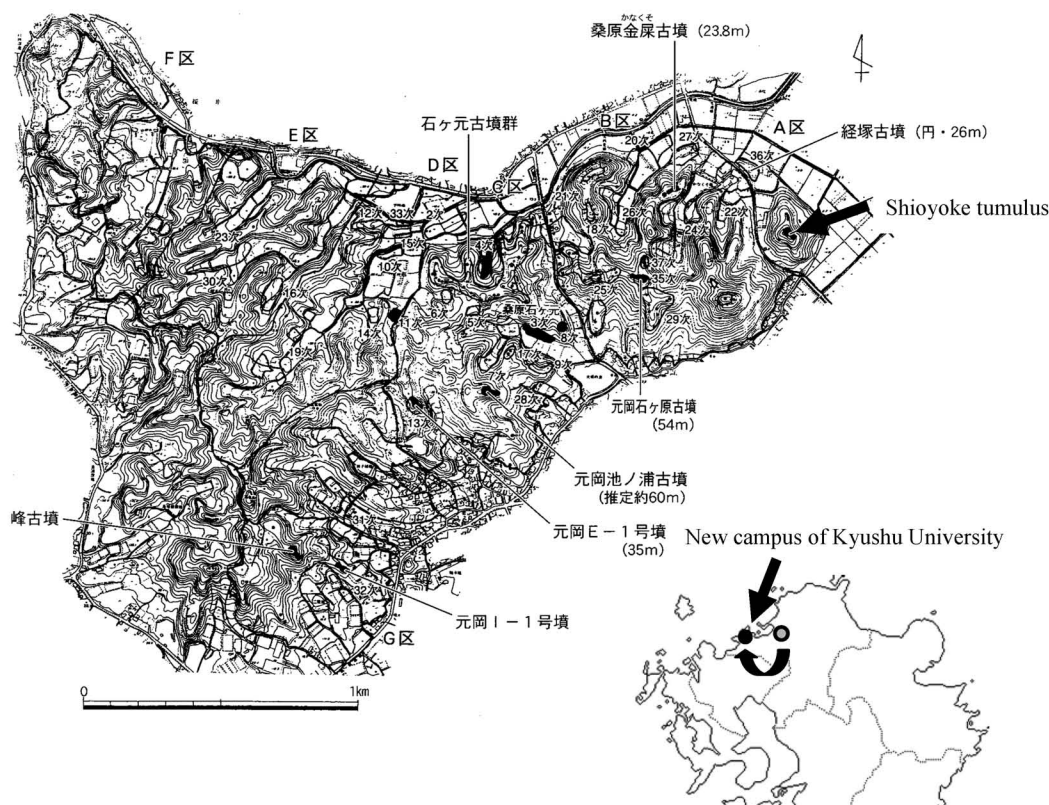


Fig. 1 Location of Shioyoke tumulus in the new campus of Kyushu University, Fukuoka, Japan.

前方後円墳を対象にした電気探査結果の解釈を行う際には、築造された地域や時代の特徴を持つ古墳の外形や内部構造などの考古学的な見識に基づいた解釈を行う必要があり、考古学者の協力が重要となる。

そこで本報告では、まず九州大学の新キャンパス内に存在する前方後円墳のひとつである塩除古墳について、2極法電極配置による2次元電気探査を実施した結果について報告する。次いで、インバージョンによって得られた比抵抗分布を考古学者にもわかりやすく表示するために、探査結果の3次元イメージングを行うソフトウェアを新たに開発し、その有効性を検証する。

2. 塩除古墳の概要

福岡市西区元岡・桑原地区は、福岡市の西端、玄界灘に突出した糸島半島の東側基部付近に広がる丘陵地帯に位置する。同地区では、東西約3km、南北約2km、面積約275haの広大な敷地を九州大学の統合移転予定地として、土地の造成や新キャンパスの建設などが進められてきた (Fig.1)。元岡丘陵地は元岡・桑原遺跡群として知られており、大学移転に先立ち、福岡市教育委員会によって発掘調査が行われ、現在も継続されている (福岡市教育委員会, 2001)。発掘調査の結果、一帯には前方後円墳や円墳などの多数の埋蔵文化財の存在が確認され、縄文時代草創期以来、弥生時代・古墳時代・古代・中世

の各時代にわたる複合遺跡であることが判明している。特に古代以降では、大規模な製鉄遺構や木簡の出土などが特筆される。九州大学新キャンパス内に存在する合計6基の前方後円墳をはじめ、多数の埋蔵文化財が九州大学によって保存されることが確定している。

塩除古墳は元岡・桑原遺跡群の東端に位置する独立丘陵の頂上部に存在する前方後円墳である。宮本ほか (2005)による墳丘測量調査の結果、後円部平坦面の標高は約57mである。全長最大約53.5m、後円部直径が主軸上で約31mである (Fig.2)。前方部は後円部よりも標高

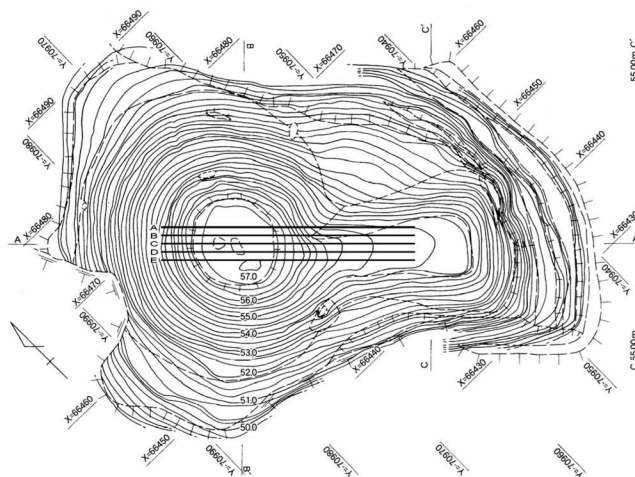


Fig. 2 Location of survey lines A to E on Shioyoke tumulus (Miyamoto et al., 2005).

が低く、その高低差は約2~2.5mである。平坦面を除く墳丘斜面のほぼ全面にわたり葺石の残存が見られる。葺石は玄武岩の角礫が主体で一部花崗岩なども含まれており、大きなものは長さ30~40cm、幅・厚さが15~20cmのものも見られる。後円部の墳丘は概ね平坦であり、明瞭な盗掘孔などは見られないが、1.5~2mの範囲で10cmほど低くなった場所が認められる。後円部平坦面から前方部平坦面にかけては緩やかな勾配が確認できる。

3. 電気探査

墳丘測量調査の最終日に合わせて、墳丘上面において電気探査を実施した(田中ほか, 2006a)。電気探査には九州大学と応用地質株式会社が共同開発した遺跡探査用の電気探査装置, Handy-ARM (Handy Archaeological Resistivity Meter)を用いた。Fig.2に示すように、測線長を31m、測線間隔を1mとし、後円部から前方部に向

かう主軸方向と平行に5本の測線(測線Aから測線E)を配置した。それぞれの測線上に測点間隔1mで測点を32点設置し、2極法電極配置により自動的に電極を切り替えて電気探査を実施した。

解析には, Handy-ARM に付属している解析ソフトウェアの ElecImager-2D/Lite を使用し、測線ごとに地形を考慮した2次元インバージョンを行った。本調査の探査深度は, Handy-ARM の仕様である約10m程度である。Fig.3に測線Aから測線Eにおける2次元インバージョン解析から得られた比抵抗断面分布を示す。解析の結果、全ての測線において、後円部中央付近の深度2~4mの広範囲に100Ωm以下を示す低比抵抗異常が認められる。

末永(1990)や白石(1985)によると、日本の古墳の内部構造は、木材や石材で作られた木棺や石棺と、その棺を納めるための施設であり、石材で造られた石槨や石室、あるいは木棺を粘土で包み込んで埋めた施設である粘土槨などがある。また、日本の古墳の墳丘には、多くの場合その斜面に葺石が施されている。

もし塩除古墳の後円部に大規模な石室や石槨、あるいは石棺が存在するとすれば、後円部中央付近に大きな高比抵抗異常が検出される可能性が高い。しかしながら、大規模な高比抵抗異常は今回の解析結果からは得られず、後円部の広範囲に低比抵抗異常が検出された。古墳の内部構造を考慮すると、検出された低比抵抗異常が粘土槨などである可能性が推察される。一方、測線端部の0m付近に500Ωm以上の小規模な高比抵抗異常が認められる。この高比抵抗異常は後円部の墳丘斜面付近に分布していることがわかる。現地踏査の結果から、墳丘斜面付近には玄武岩の角礫が主体で一部花崗岩なども含まれる葺石が広く分布していることが確認できたことから、これらの高比抵抗異常は葺石の分布を示唆するものであると考えられる。

4. 3次元イメージングソフトウェアの開発

末永(1990)や白石(1985)によると、古墳の形態やその内部構造は古墳が作られた時代や地域によって大きく異なることが示されていることから、遺跡や古墳を対象とした物理探査では、古墳の主体部や墳丘の周りに施された周濠や周溝の輪郭、水路跡や住居跡などの地下に埋もれた遺構の形状把握が重要な調査目的のひとつであることがわかる。西村(1991)は考古学的調査を目的とした物理探査についてまとめ、考古学者にとって、電気探査によって得られた比抵抗分布が、遺構の平面位置や規模や形態を推定するために必要な情報であるため、比抵抗分布やその分布形状を手がかりに古墳の内部構造を推定することが、古墳が作られた時代や地域を推定する上で重要な手がかりとなることを述べている。遺跡や古墳など

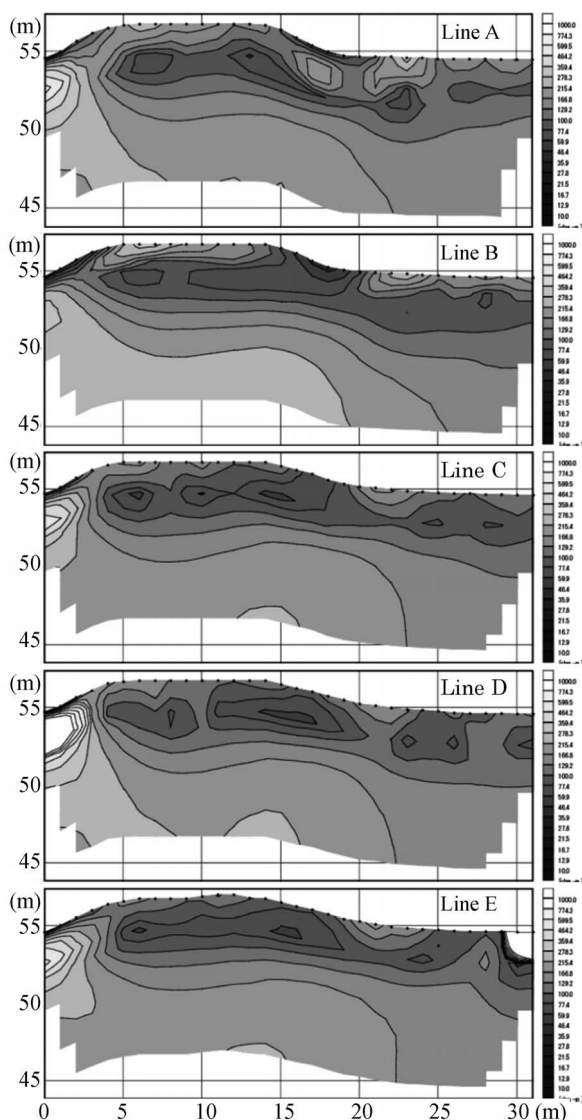


Fig. 3 Resistivity cross sections from Line A to Line E.

の埋蔵文化財を対象とした電気探査を実施して得られた多くの比抵抗断面や比抵抗平面分布などの探査結果を解釈する際には、考古学的な知見が有効であり、考古学者と協力して解釈する場合も少なくない。特に古墳を対象として実施される電気探査では、墳丘内の石室や石棺の存在が期待される高比抵抗異常体や、粘土礫の存在を示唆する低比抵抗異常体の分布形状を把握することが重要である。堅田(1996)は測量データからパソコンを利用して遺跡の 3 次元形状や透視図を復元する方法について述べ、考古学者にとってシンプルな操作で見たいところが見たい角度で素早く画面上に表示されることの必要性を示している。さらに断面図の表示や特定の地層の剥ぎ取りなど、考古学的視点からの特殊な要求があることも述べている。以上のことから、2 次元的な比抵抗断面分布や平面分布だけではなく、3 次元的な比抵抗分布や比抵抗異常体の形状を平易な操作でわかり易く表示し、その形状を任意の角度から確認できる 3 次元イメージングが電気探査結果を解釈する際には有効であることがわかる。

小澤(1988)により、当時の大型コンピュータ(FACOM M360AP)を用いて、その記憶容量と計算能力の限界に近い計算量で前方後円墳の 3 次元画像化が行われた。しかし現在では、著しく性能が向上しているパソコンを利用することで、電気探査の結果得られた比抵抗異常体の分布や形状を 3 次元的に表示する事が可能となってきた。

そこで、本研究では平行に設置した複数の測線から得られた電気探査の 2 次元インバージョンの結果を総合して、調査対象地域の 3 次元的な比抵抗異常体の分布や形状をわかり易く表示するための比抵抗 3 次元イメージングソフトウェアの開発を行った。

今回のソフトウェア開発の際に特に注意した点は次の通りである。まず調査の際に屋外で使用することを考慮し、ノートパソコンでも十分快適に操作可能とするために、必要最小限の機能に限定し、3 次元画像の高速な描画を実現するための計算アルゴリズムの工夫に努めた。次いで、パソコンの操作にあまり慣れていない者でも、インタラクティブで平易な操作によって、探査結果の任意の部分や任意の角度からの 3 次元画像を手軽に表示させて比抵抗異常体の形状を確認できるよう工夫した。さらに、3 次元コンピュータグラフィクスを駆使して 3 次元画像を表示することで、仮想的に古墳の内部を透視できるように現実感のある画像を表示させることである。その他主要な機能の一覧を以下に示す。

- 3 次元画像のインタラクティブな拡大縮小ならびに上下左右の回転
- 古墳形状（地表形状）の表示
- 古墳内部の透過
- 2 次元インバージョン結果（2 次元比抵抗分布）の測線位置の表示
- 比抵抗異常体の 3 次元形状（等値面）の表示

- 探査結果と古墳外形の合成表示

4.1 3 次元イメージングの手法

3 次元的なデータを可視化する方法には、表示対象物の表面や比抵抗境界面等だけを表示するサーフェスレンダリングと、各媒質の物性値に対応して光の放射と吸収をシミュレートするボリュームレンダリングがある（村木・喜多, 2004）。3 次元的に値が分布する場合、ある特定の値を持つ点の集合は曲面となり、等値面と呼ばれる。等値面は等高線を 3 次元化した物に他ならない。

そこで本研究では、電気探査の結果得られた 3 次元的な比抵抗分布から、ある特定の比抵抗値に着目して、等しい比抵抗値を示す等値面を生成するサーフェスレンダリングを採用する。生成される等値面により、比抵抗異常体の形状を 3 次元的にイメージングすることが可能になる。

4.2 Kriging を用いた比抵抗値の補間

複数の測線で実施した 2 次元電気探査で得られた 2 次元の比抵抗分布を総合し、3 次元的な比抵抗分布に近似するために、比抵抗分布の 3 次元的な補間を行う。本研究では、地球統計学のみならず、幅広い分野に適用され、汎用性が高い補間法である Ordinary Kriging（例えば Cressie, 1991; Wackernagel, 1998 等）を採用する。

Ordinary Kriging では、任意の点 P における推定値 V_P^* は、 n 個の既知の点の値 V_i の重みを W_i として次のような線形結合として計算される。

$$V_P^* = \sum_{i=1}^n W_i V_i \quad (1)$$

点 P における真値を V_P とすると、推定値 V_P^* との推定偏差 δ と推定分散 σ^2 はそれぞれ

$$\delta = V_P^* - V_P \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_P^* - V_P)^2}{n} \quad (3)$$

と表される。

Kriging では一般に推定分散を最小にするように次の連立方程式を解くことにより最適な重み W を選択する。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n W_j \gamma(d_{1j}) &= \gamma(d_{1P}) \\ &\vdots \\ \sum_{j=1}^n W_j \gamma(d_{nj}) &= \gamma(d_{nP}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\gamma(d_{ij})$ は値が距離に対してどのような空間的相関を持つかを表すバリオグラムであり、 i 番目の点と j 番目

の点の間の距離 d_{ij} に依存する。バリオグラムは空間データの特徴を検討するために用いられ、データの異質性やトレンド、不均質性や測定誤差などを調べることができる。バリオグラムとしてはデータの空間的相関に基づき次のような指数型 γ_E 、球型 γ_S 、線形 γ_L 、べき乗型 γ_P など多数のモデルが提案されている。

$$\begin{aligned}\gamma_E(d) &= a(1 - e^{-d}) \\ \gamma_S(d) &= \begin{cases} a(1.5d - 0.5d^3) & d < 1 \\ a & d \geq 1 \end{cases} \\ \gamma_L(d) &= ad \\ \gamma_P(d) &= ad^n \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 a はスケールファクタを表す。

Ordinary Kriging では、真値 V_P と推定値 V_P^* との間に推定偏差（バイアス）が無いことを保証するために次の条件を追加する。

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (6)$$

(4)式と(6)式を同時に解くために、ラグランジ乗数 λ を導入して以下のような行列式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \cdots & \gamma(d_{1n}) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ \gamma(d_{n1}) & \cdots & \gamma(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(d_{1P}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{nP}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

この行列を解くことにより最適な重み行列が得られる。

ここで、(7)式の左辺の係数行列は既知の点のそれぞれ2点間の距離のみから計算でき、右辺の値のみ推定点と既知の点の距離の関数であることがわかる。同一なデータを用いて複数の点の値を推定する場合には、左辺の係数行列の逆行列をあらかじめ計算しておくことで、推定点と既知の点の距離から右辺を計算し、それに係数行列の逆行列を左側から掛けることで簡単に重み行列を計算できる。

得られた重みを用いて(1)式より点 P における推定値 V_P が得られる。

4.3 サーフェスレンダリングについて

3次元格子状に配置された直方体の頂点に比抵抗値が与えられている場合に、ある特定の比抵抗値の等値面を生成するためには、それぞれの直方体で等値面を生成することをすべての直方体で繰り返すことで、等値面全体を生成することができる。直方体に対して等値面を直接生成する方法は、そのアルゴリズムの簡潔さからマーチングキューブ法(Lorensen and Cline, 1987)が現在最も

多く用いられている(中嶋・藤代, 2000)。マーチングキューブ法では、それぞれの直方体ごとに8個の頂点の値と等値面の値の大小関係を調べて符号化し256通りの符号パターンが得られる。得られた符号パターンの回転や鏡像関係をひとつの種類にまとめると、最終的に Fig.4 のような15種類の符号パターンに分類できる。等値面と直方体の辺が交差する点の座標(図中白丸○)は、交差する辺の両端の値と等値面の値とを利用して次のように線形補間で決定する。

$$\mathbf{P}_i = \frac{V_i - V_a}{V_b - V_a} (\mathbf{P}_b - \mathbf{P}_a) + \mathbf{P}_a \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{P}_a$, $\mathbf{P}_b$, $\mathbf{P}_i$ はそれぞれ等値面が交差する辺の両端の位置ベクトルと交点の位置ベクトルを示し、 V_a , V_b , V_i はそれぞれ等値面が交差する辺の両端の値と等値面の値を示す。

マーチングキューブ法では、より複雑な値の分布に対しては曖昧な面が生成され、隣接する直方体との間に等値面に不連続な隙間ができる問題点も指摘されている。直方体のある面の対角の頂点の値が0と1のとき、0より大きく1未満の任意の値 t の等値面を生成する場合は、交差する辺の組み合わせが Fig.5 のように二通り考えられ、一意に決まらず、隣接する等値面の連続性が失われる恐れがある。その問題点に対して漸近線判定法(Nielson, 1991)や勾配一貫性ヒューリスティックス

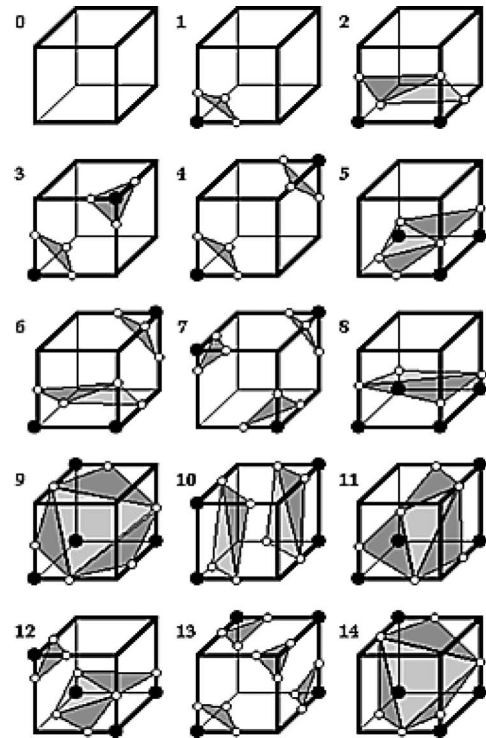


Fig.4 14 Basic patterns of triangulated cubes by Marching Cubes Method (William and Harvey, 1987).

(Wilhelms, 1994) などの改善法が提案されている。

曖昧な面が発生し隣接直方体間で等値面の連続性が失われる恐れがあるマーチングキューブ法に対して、Fig.6 のように直方体をさらに単純な 5 個の四面体要素に分割し (Shireley and Tuchman, 1990; Pascucci, 2004), それぞれの四面体に対して曖昧さを排除し一意に等値面を生成する四面体分割法がマーチングキューブ法の代用法として多く用いられている。

Fig.7(a)のように四面体を構成する 4 個の頂点を P_1 から P_4 とする。さらに頂点 P_1 から P_4 における値をそれぞれ V_1 から V_4 とする。ここで、一般性を失うこと無しに $V_1 \leq V_2 \leq V_3 \leq V_4$ と仮定する。Fig.7(b)は、四面体を構成する頂点とその値の大小関係、さらに頂点と頂点の間の

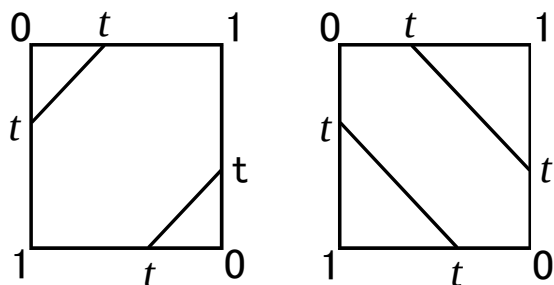


Fig.5 An example of the marching cubes problem.

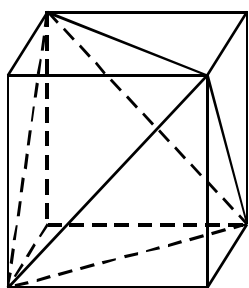


Fig. 6 Decomposition of a cube into five tetrahedra.

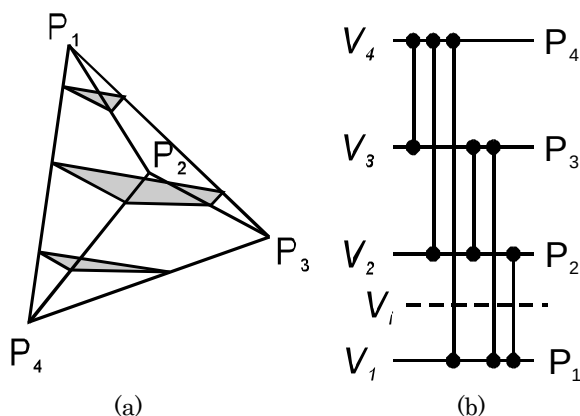


Fig.7 (a) A tetrahedron with three possible isosurfaces (gray polygon) and (b) its conceptual diagram of connections among vertices with their function values.

辺の接続を示しており、四面体の特徴である各頂点から残りの 3 個すべての頂点にそれぞれ辺が存在することがわかる。四面体に等値面が存在する場合は、その形状は三角形と四角形の 2 種類に限定される。今等値面の値を V_i とすると、 $V_1 \leq V_i \leq V_2$ の場合と $V_3 \leq V_i \leq V_4$ の場合は、四面体を構成する辺 P_1P_2 , 辺 P_1P_3 , 辺 P_1P_4 および辺 P_3P_4 , 辺 P_2P_4 , 辺 P_1P_4 の 3 辺とそれぞれ交差することから、生成される等値面の形状は三角形であることがわかる。同様に、 $V_2 \leq V_i \leq V_3$ の場合は、四面体を構成する辺 P_2P_4 , 辺 P_1P_4 , 辺 P_2P_3 , 辺 P_1P_3 の 4 本の辺と交差することから、等値面の形状は四角形となる。以上のように、直方体を 5 個の四面体に分割する四面体分割法では、等値面の形状が二種類のみに分類されて一意に決定されるため、等値面生成の手続きが非常に簡素化できる。また、直方体内に生成される微小な三角形や四角形が複数存在し、必要以上に細かく分割される傾向があるものの、直方体の大きさをあまり細かくしなくても等値面の細かな形状を近似できる利点もある。生成される三角形は全ての辺を含む平面が必ず存在する平面図形となるが、生成される四角形は全ての辺を含む平面が存在しない場合もあり、例えば向かい合う辺がねじれの位置関係になる場合が考えられる。そのような四角形をそのまま描画すると、不自然な画像になることが考えられる。そこで、

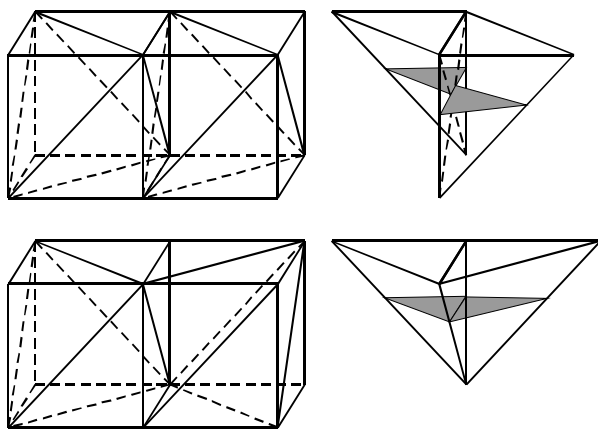


Fig.8 Examples of isosurface connection depending on the decomposition pattern.

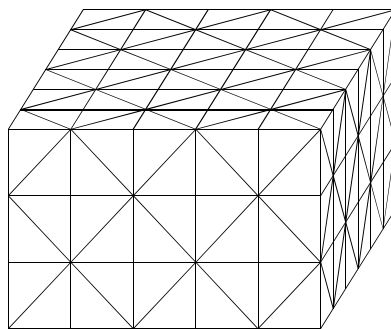


Fig.9 Decomposition pattern for three dimensional volume data.

四角形を一本の対角線で分割し、三角形を二個生成することで、四面体分割法で生成される等値面はすべて三角形によって構成することができる。

分割された5個の四面体要素は、分割する元の直方体のそれぞれの面の中心に垂直な軸に対して180度の回転対称な形状である。そのため、Fig.8(a)のように隣接する直方体を同じ方向に分割すると、隣接する四面体要素の辺が交差し、生成される等値面の連続性が失われる。

そこで Fig.8(b)のように隣接する直方体の分割の方向を、接する面に対して対称にすることで、隣接する四面体の辺が交差すること無く共有されるため、生成される等値面の連続性が保障される。最終的に Fig.9 のような3次元の直方体を一つおきに対称な形の四面体に分割することで、全体として連続性が保証される等値面の生成が容易に可能となる。

4.4 シェーディングについて

比抵抗の3次元分布から等値面を生成し、比抵抗異常体をイメージングしただけでは、等値面に陰影が無いために立体感に乏しくなってしまう(中前・西田, 1986)。等値面を生成する際に周囲の光の影響を考慮し、表面に陰影を付けることで、より現実感のある3次元画像が表現でき、比抵抗異常体の3次元の形状や立体感、およびその奥行きや広がりが見視的に把握しやすくなる。物体の可視面に陰影を付けることをシェーディングと呼ぶ。

シェーディングは物体を照らす光源と、照らされている物体表面の性質との二つの要素から成り立つ。

光源から出た光は、物体に当たって反射や透過(屈折)した後、観察者の視点へと到達する。人間の視覚で感じ取られる物体の色は、物体の表面から反射された光と透過した光である。この反射や透過の特性は、光源の種類や向き、物質表面の向きや表面特性や材質によって定まる(千葉・土井, 1997)。一般に、物体の面の明るさを表す量として輝度が用いられることから、シェーディングとは、光の反射や透過を考慮して、物体表面の輝度の色成分分布を計算することに帰着される。

光源は、基本的な光源として無限遠点に存在する平行光源と有限の距離に存在する点光源がある。その他の光源として線光源や面光源、多面体光源、立体光源などある。しかし、これらの光源には大きさがあるため、平行光源や点光源の単純な計算と比較して、シェーディングの計算が複雑になってしまう(中前・西田, 1986)。

物体の表面の輝度として観測者の目に捉えられる光を環境光、反射光、透過光の三つに分類する場合が多い。環境光は周囲の物体による相互反射によって散乱され生じる間接光である。反射光は直接光が物体の表面で反射されることによる光であり、拡散反射と鏡面反射の2種類がある。透過光は透明な物体を透過した光であり、屈

折を考慮する場合もある。シェーディングはこれらの光の要素をそれぞれ計算し、合計することによって表現される。これらの光の要素のどこまでを含むモデルを採用するかにより、イメージングの精度が大きく変化する。

本研究では、できるだけ少ない計算量で実現できる簡単なシェーディングを行うため、次の6つの仮定を行う。

1. 光源は無限遠に存在する平行光源を仮定する。
2. 光源からの光は物体表面で一度だけ拡散反射し、多重反射や鏡面反射はしない。
3. 本来複数の物体で多重反射する光は、全て一定の強さの環境光として取り扱う。
4. 光が面を透過した際に屈折しない。
5. 面の裏表を考慮せず、表裏同一輝度の同一色とする。
6. 光源からの光を物体が遮った際に生じる陰は考慮しない。

以上の仮定から、本研究では平行光源によって生じる拡散反射と周囲環境からの一定の環境光のみを考慮するシェーディングを採用する。

環境光は光源から直接物体に到達する光ではなく、光があらゆる場所で相互反射した結果散乱されて到達する光である。したがってここでは環境光の強さを物体表面の向きによらず一様かつ一定の強さとして取り扱う。環境光の強さを I_a とし、物体表面の反射係数を k_a とすると、物体表面で反射される環境光の強さ I_c は、

$$I_c = k_a I_a \quad (9)$$

のように簡単に表される。もしこの環境光がなければ、光源から光が当たらない面は真っ黒となり、画像が不自然になってしまう。

拡散反射は Fig.10 に示すように、どの角度から見ても同じ明るさ I_d であり、明るさの違いは表面への入射光の強さに比例する。拡散反射光の強さは Lambert の余弦則に従い、以下のように表される(千葉・土井, 1997)。

$$I_d = k_d I_i \cos \theta \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

ここで、 I_i 、 I_d はそれぞれ平行光源からの入射光と拡散反射光の強度、 k_d は物体表面の拡散反射係数、 θ は入射光と物体表面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ との角度である。これは、入射光をベクトル表示すると、法線ベクトル $\mathbf{n}$ との内積で表現できる。

$$I_d = -k_d \mathbf{I}_i \cdot \mathbf{n} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{I}_i$ は入射光ベクトルである。

三角形要素に対する拡散反射光の強度について検討するために、Fig.11 のように、三角形の一つの頂点を原点とした三角形 OAB を考える。頂点 A と頂点 B の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{a}$ および $\mathbf{b}$ とするとき、三角形の単

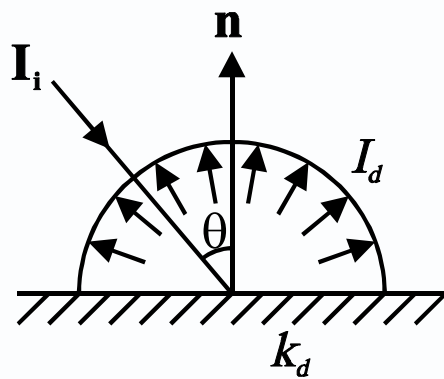


Fig.10 Lambert's cosine law of diffused reflection.

位長さの法線ベクトル $\mathbf{n}$ は,

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{|\mathbf{a} \times \mathbf{b}|} \quad (12)$$

と表される。すると、式(11)と式(12)から拡散反射光の強さ I_d は、平行光源ベクトル I_i と三角形の位置ベクトルで表され、

$$I_d = -k_d \mathbf{I}_i \cdot \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{|\mathbf{a} \times \mathbf{b}|} \quad (13)$$

となる。

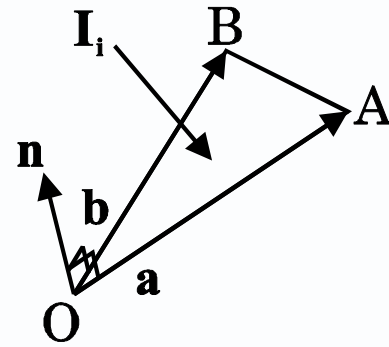


Fig.11 Diffused reflection on a triangular element.

よって、平行光源からの光によって三角形要素で近似された物体表面で反射される光の強さ I は、式(9)と式(13)より

$$I = I_c + I_d = k_a I_a - k_d \mathbf{I}_i \cdot \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{|\mathbf{a} \times \mathbf{b}|} \quad (14)$$

と表される。

4.5 適用事例

3次元イメージングソフトウェアは、オブジェクト指向プログラミング技法に従い C++言語を用いて開発を

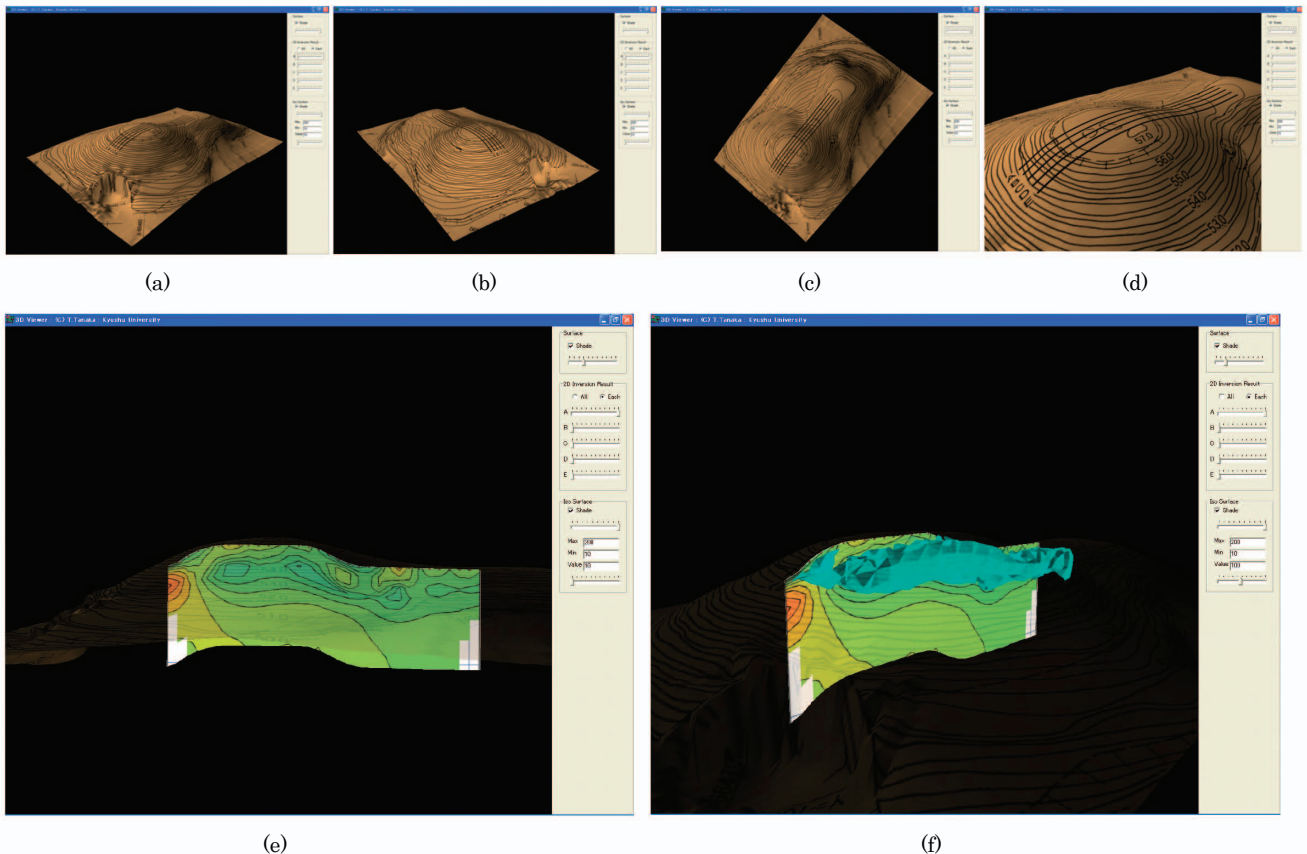


Fig.12 Examples of three-dimensional imaging program showing (a) normal view, (b) rotate view, (c) tilt view, (d) zoom in, (e) cross section of resistivity distribution along the line A through translucent surface of the circular mound and (f) low resistivity anomalous body imaged by shaded isosurface (light blue region).

行い、Windows上で利用可能である。3次元グラフィックスの表示には、シリコングラフィクス社が中心となって開発され無償公開されている OpenGL(Open Graphics Library, 例えばエンジェル, 2002; OpenGL ARB, 1999; OpenGL ARB et. al., 2002) を利用した。

開発したソフトウェアを使用し、探査結果を表示した例を Fig.12 に示す。塩除古墳の外形は、宮本ほか(2005)の測量結果(Fig.2)をデジタイズした標高データを用いて3次元形状を作製した。さらに、現実感を出すために、3次元形状の表面に Fig.2 をテクスチャマッピング(OpenGL ARB, 1999)により貼り付けた。古墳表面の等高線や側線位置などの情報を画像データとしてあらかじめ準備しておくことで、等高線や測線の描画のための計算時間が節約できる。同様のテクスチャマッピングの手法は、古墳表面に加えて比抵抗断面分布の結果表示にも使用している。

表示された3次元画像はパソコンに接続されたマウスを操作することにより簡単に上下左右の回転(Fig.12(a)~(c))や拡大縮小(Fig.12(d))が可能である。また、表示画面の右側にある操作パネルにより、古墳表面や比抵抗断面分布などを個別に、表示から非表示へと連続的に、表示強度(透過度)を変更できるよう工夫した。Fig.12(e)の表示例は、測線Aで得られた比抵抗断面分布を測線位置と探査深度に正確に合わせて表示し、水平方向から見た様子を示している。古墳表面を透過率50%の半透明にすることで、古墳内部が外部からあたかも透視しているように、古墳墳丘の形状と古墳内部の比抵抗分布の位置関係を明確に把握することができる。Fig.12(f)は低比抵抗異常体の分布形状を把握するために、100Ωmの等値面を表示した例である。表示する等値面の値は操作パネルのスライダーで連続的に変更でき、墳丘頂部の地下2から4mに分布する粘土礫と思われる低比抵抗異常体の形状や広がりを簡単に把握することができる。高比抵抗異常体の分布も低比抵抗異常体と同様に表示可能である。

5. まとめ

九州大学の新キャンパス内に位置する塩除古墳で電気探査を実施した。解析の結果、後円部の深度2から4mの間に低比抵抗異常と測線端部付近の墳丘斜面に高比抵抗異常を検出した。得られた比抵抗分布を誰にでもわかりやすく解釈するために、手軽にパソコンで探査結果を表示できる3次元イメージングソフトウェアを開発した。

開発したソフトウェアを使用して、電気探査結果を表示すると、後円部中央付近で認められた低比抵抗異常体の分布形状や、測線の端部に位置する墳丘斜面付近で認められた高比抵抗異常と、墳丘斜面のほぼ全体にわたり残存が認められた葺石との位置関係が手軽な操作で確認

できた。3次元イメージングには OpenGL を使用し、機能を必要最小限に絞ることで、ノートパソコンでも快適に使用できることが確認され、本ソフトウェアが探査結果を評価解釈する上で有効であることが確認できた。

謝 辞

本研究の一部は、九州大学教育研究プログラム・研究拠点形成プロジェクト B(3) (研究代表者: 牛島恵輔) の支援を受けて実施された。匿名の査読者からは本報告の改善にあたり有益なご教示を頂いた。ここに記して厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 千葉則茂・土井章男 (1997): 3次元 CG の基礎と応用, 新情報教育ライブラリー, **M-10**, サイエンス社, 東京, 23-28.
- Cressie, N. (1991): The Origins of Kriging, *Mathematical Geology*, **22**, 239-252.
- エドワード・エンジェル (2002): スタンダードテキスト OpenGL 入門, ピアソン・エデュケーション, 東京
- 福岡市教育委員会 (2001): 九州大学統合移転用地内埋蔵文化財発掘調査概報 1, 福岡市埋蔵文化財調査報告書, **第 693 集**.
- 堅田直 (1996): 情報考古学, ジャストシステム, 東京, 167-210.
- 川合慧 (1985): 基礎グラフィックス, 昭晃社, 東京, 174-179.
- Lorensen, W. E and Cline, H. E (1987): Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm, *Computer Graphics*, **21**, 163-169.
- 宮本一夫・辻田淳一郎・牛島恵輔・水永秀樹・田中俊昭・今井隆博(2005): 福岡市西区元岡・塩除古墳の墳丘測量調査と電気探査の成果, 九州考古学, **80**, 69-83.
- _____. _____. _____. _____. _____. 黒木貴一(2006): 福岡市西区元岡池ノ浦古墳・峰古墳の墳丘測量調査と電気探査の成果, 九州考古学, **81**, 53-70.
- 村木茂・喜多泰代 (2004): 3次元画像解析とグラフィックス技術の医学応用に関するサーベイ, 電子情報通信学会論文誌, **J87-D-II**, 1887-1920.
- 中嶋正之・藤代一成 (2000): コンピュータビジュアライゼーション, インターネット時代の数学シリーズ 4, 共立出版, 東京, 38-42.
- 中前榮八郎・西田友是 (1986): 3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃社, 東京, 149-169.
- Nielson, G. M. and Hamann, B. (1991): The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes, *Proc. IEEE Visualization '91*, 83-90.
- 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, **44**, 404-411.

- OpenGL ARB(Architecture Review Board) (1999): OpenGL リファレンスマニュアル第2版, ピアソン・エデュケーション, 東京
- , Mason Woo, Jackie Neider, Tom Davis (2002): OpenGL プログラミングガイド第2版, ピアソン・エデュケーション, 東京
- 小澤一雅 (1988): 前方後円墳の数理, 雄山閣, 東京, 148-155.
- Pascucci V. (2004): Isosurface Computation Made Simple: Hardware Acceleration, Adaptive Refinement and Tetrahedral Stripping, *Joint EUROGRAPHICS – IEEE TVCG Symposium on Visualization*.
- 白石太一郎 (1985): 古墳の知識 I 墳丘と内部構造, 考古学シリーズ, **19**, 東京美術, 東京, 49-153.
- Shirley P. and Tuchman A. (1990): A Polygonal Approximation to Direct Scalar Volume Rendering, *Computer Graphics*, **24**, 63-70.
- 末永雅雄 (1990): 古墳の外形・内部構造・副葬品, 末永雅雄著作集全5巻, **2**, 雄山閣, 東京, 153-167.
- 田中俊昭・水永秀樹・牛島恵輔(2006a): 福岡市西区元岡・塩除古墳の電気探査, 文化財探査学会第9回大会講演論文集, 30-31.
- ・——・—— (2006b): 前方後円墳の比抵抗3次元イメージング, 物理探査学会第115回(平成18年度秋季)学術講演会論文集, 282-285.
- Wackernagel, H. (1998): *Multivariate Geostatistics 2nd, completely revised edition*, Springer, Berlin, 83-91.
- Wilhelms, J. and Gelder, V. A. (1991): A coherent projection approach for direct volume rendering, *ACM Computer Graphics*, **25**, 275-284.

Development of a three-dimensional imaging program for remains

Toshiaki Tanaka*, Hideki Mizunaga* and Keisuke Ushijima*

ABSTRACT

Kyushu University is moving to a new campus located in the western part of Fukuoka city. There are many archeological remains such as keyhole shaped mound tombs around the new campus. We have developed an automatic electrical resistivity measuring system named Handy-ARM (Handy Archaeological Resistivity Meter) for archaeological prospections. We carried out electrical resistivity prospecting by Handy-ARM at the keyhole shaped tomb named Shioyoke Kofun in the new campus. After two-dimensional inversion of observed data, we have found that low resistivity anomalies were distributed from 2m to 4m deep of central part of the circular mound and high resistivity anomalies were detected at the slope of the circular mound. We have also developed three-dimensional imaging software using three-dimensional CG (Computer Graphics) to display results of an electrical resistivity survey for an archaeological prospection. It is obviously effective not only for geophysicists but also for archaeologists to evaluate survey results by using the three-dimensional imaging program.

Keywords: Electrical prospecting, Archaeological prospection, Three-dimensional imaging, OpenGL

Manuscript received January 10, 2007; Accepted March 6, 2007

* Graduate School of Engineering, Kyushu University
744, Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

A part of this paper was presented at the 115th SEGJ fall conference, 2006.