

地中レーダ探査による古墳の研究

— 削平された古墳の復元・盛土量の推定 —

岸田 徹¹⁾・酒井英男²⁾

●キーワード：消失古墳 (destruced mounded tomb), 遺跡探査 (archaeological prospection), 地中レーダ探査 (ground penetrating radar survey), 古墳盛土 (fill of mound)

1. はじめに

遺跡探査において、地中レーダ探査は様々な遺構に適用でき、また探査の効率が高いという特徴がある。そのため、発掘の事前調査として、或いは史跡指定され、発掘が困難な遺跡の調査に有効な研究手法となっている (Malagodi ほか 1996)。本研究では、地中レーダ探査法を用いて、過去に削平を受けた古墳の復元と、非破壊による古墳の盛土量推定に関する研究を行った。

地中レーダ探査による古墳の研究は、従来は、主体部の推定等を目的として行われていることが多い (酒井他 1997; Kamei et al. 2000 など)。特に、史跡指定を受

けた古墳では、発掘調査が制限されるために概査として地中レーダ探査が行われ、埋葬施設が想定される墳頂領域のみを調査の対象とすることが多かった。探査による研究では、古墳の規模と形状の把握も目的とできる。「古墳の規模」は形状と共に、古墳の「格」を決定する要素であり、規模と分布は、その地域の当時の勢力や、社会情勢を知る上での貴重な情報源である。本稿では、地中レーダ探査を用いる古墳の研究として、削平された古墳の形状の復元および、古墳全体を対象として、特に盛土量の解析に関して行った研究を報告する。研究は、徳島県の2つの円墳および富山県の古墳 (前方後方墳と前方後円墳) を対象として実施した (図1)。

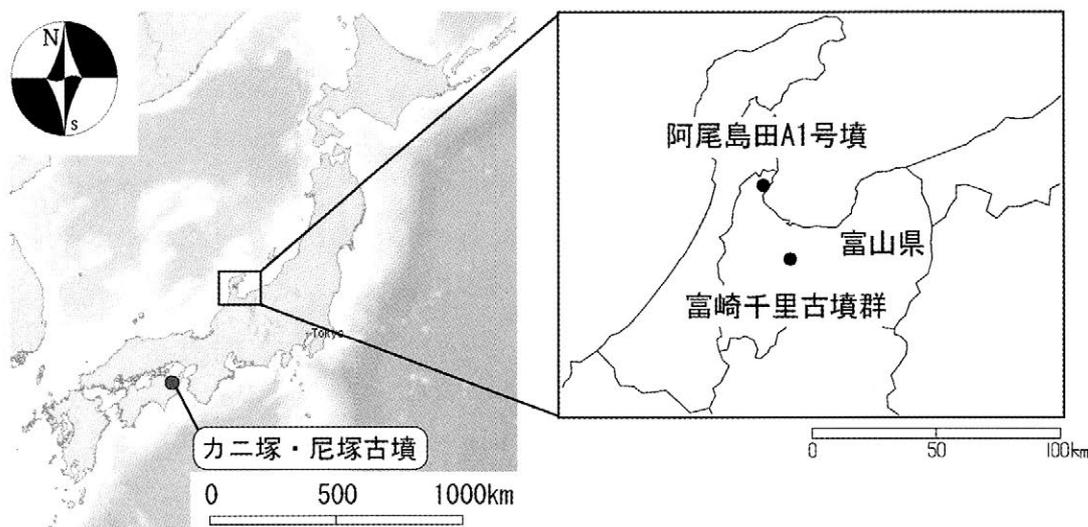


図1 研究の対象とした古墳の位置。

Fig.1 Location of *kofun* (mounded tombs) examined in this study.

¹⁾ 富山大学大学院理工学研究科 〒930-8555 富山県富山市五福 3190

²⁾ 富山大学大学院理工学研究部 〒930-8555 富山県富山市五福 3190

古墳には、度重なる開発の過程で削平されたものも多い。完全に削平された古墳は判別できず、復元が困難とされる場合も少なくないので、地中レーダ探査は有用となる。従来、地表に痕跡が認められない古墳の探査として、Edwards et al. (2000) や天理大学遺跡探査チーム (2001) では、九州の地下式横穴墓において、空洞を探査して墓室を検出している。本稿では、後世に削平を受けた徳島県内の円墳の周濠を対象に、地中レーダ探査を実施し、三次元解析により円墳がどの様に復元できるかを検討した。

また、富山県の古墳では、墳形・規模と共に、盛土量を解析する手法の開発を目的として探査を行った。古墳の盛土量には、造営に投下された労働量が反映されている。一般に平地に作られた古墳では、盛り上がり領域を全て盛土と見なし、測量図より盛土量が概算される。濠を持つ古墳の場合、古墳の基準面を汀線とするか、濠底とするかにより体積に占める地山の割合は変化するが、地山と盛土の境界面はほぼ水平であり、その境界をトレンチ調査等により把握できれば、同様にして盛土量を推算できる。この方法により、平地立地の古墳の体積に関する研究は、従来、梅原 (1995) や、小沢 (1978)、鈴木 (1981)、荒井 (1999)、大林プロジェクトチーム (2002) 等により行われてきた。

これに対して、丘陵や尾根上に作られた古墳では、地山面 (旧地表面) が平坦ではなく、凸状であるため、盛土量の推定には盛土と地山面の境界を把握する必要がある。しかし、限られたトレンチ調査では盛土の下の地山面を墳丘全体で精度良く調査することは難しい。現在までのところ、トレンチ調査を用いた研究は殆ど行われていない。原口・西谷 (1967) は丘陵上の古墳において、トレンチによる断面観察から地山の想定を試みているが、部分的な情報からの推定復元であり、その精度についても、検証する方法は無かった。また、石川 (1982) は、前期古墳の地山利用について、「前期古墳の墳丘土盛り量は高地作業の難度も加味して、一率に全体積の三割として計上」として、地山の割合を試算している。しかし、割合には明確な根拠がない。古墳体積に占める地山の割合は、古墳の形状や立地、その大きさにより大きく変化するため、精度の良い研究での検討が必要とされた。以上

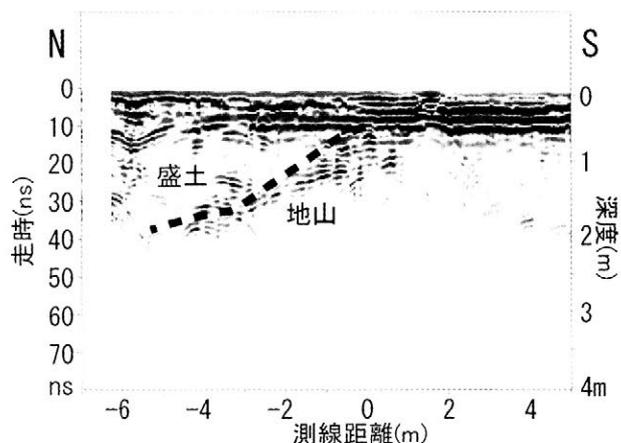


図2 探査結果を示す擬似的な地中断面図 (GPR profile) の例。
Fig. 2 Example of a GPR profile.

のように、古墳の盛土に関する研究はまだ少なく、特に丘陵や尾根上の古墳について、造営の状況と投下された労働量の把握のためにも、盛土量を精度良く求める方法が望まれている。本研究では、地中レーダ探査結果と測量結果を総合し、古墳の盛土領域を解析する方法を、富山県内の古墳を対象に研究した。

2. 調査手法

2.1 地中レーダ探査

地中レーダ (GRP: ground penetrating radar) 探査では、送信アンテナより地中にレーダ波を送りこみ、比誘電率の異なる境界面 (土層の変わり目や石・空洞など) での反射波を、別のアンテナで受信して地下を探る。地中からの反射波の強度や減衰、反射波受信までに要した時間 (走時) が計測パラメータとなり、それらの解析により、地下の地層構造、空洞や埋設物等が推定できる。

研究では、探査結果を図2のように、各測線で得たデータから擬似的な地中断面図 (GPR profile) を求めて表示している。断面図の左の縦軸には、送信されたレーダ波が反射して受信アンテナに戻るまでの走時 (単位: ns) を示しており、右側の縦軸には、走時とレーダ波の伝搬速度より計算される地表からの深度を示している。横軸は、測線の距離を表している。

また、本研究では、複数の測線で得た探査データをまとめて、Time slice 図法による解析も行った (Conyers and Goodman 1997)。この図法では、各測線のプロファイルを総合し、走時のある時間幅 (深度範囲) のデータ



図3 徳島県鳴門市のカニ塚古墳 (A) と調査区 (B) の写真。

Fig. 3 Photographs of (A) the Kanizuka tomb, and (B) a general view of the GPR survey area. Naruto city, Tokushima prefecture.

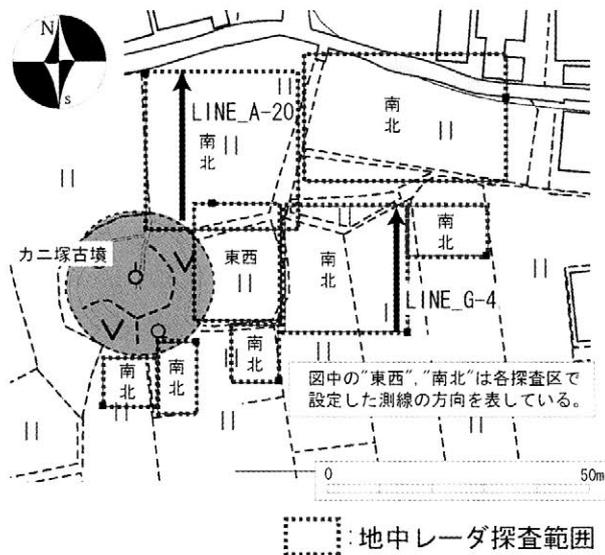


図4 カニ塚古墳の位置，探査範囲，代表的な測線を示す。

Fig. 4 Schematic map of the Kanizuka tomb, also showing the survey area and representative survey lines.

を選別する。そして、レーダ反射波の相対強度の平均化と内挿により、設定した深度範囲での地下構造を図化する。具体的には、三次元で整理した解析結果をもとに、反射の強弱を色分けしながら様々な深度での平面図を作成し、異常応答の変化を検討する。この Time slice 図法は遺構や遺物の平面分布を対象とする研究において有効である。

古墳は起伏と傾斜を持つ遺跡であり、探査において、測線距離は斜距離となる。そのため、測量図に合わせて結果を解析すると誤差が生じるので、トータルステーションを用いて 5 m 毎に測線距離の補正を行い精度の向上を図った。

探査に用いた装置は、カナダ Sensors & Software 社製の Noggin plus, pulse EKKO IV および pulse EKKO1000 であり、各遺構の状況、探査対象にあわせて機種を選択して用いた。

3. 消失古墳の復元研究

3.1 研究の対象と概要

研究は、徳島県鳴門市のカニ塚古墳と尼塚古墳の二つの円墳を対象として行った。

カニ塚古墳は、6 世紀後半に築造されたと考えられる円墳である (図 3 A)。尼塚古墳は、カニ塚古墳に隣接して存在していたが、近傍の天津西小学校の改築時 (1926 年頃) に、校地の盛土を取るために掘削されたい。そのため、現時点では、地表で古墳を確認することは難しい状況であった (図 3 B)。また、詳細な記録も残っておらず、古墳の形状、規模ともに不明とされていた (徳島県埋蔵文化財センター 2001)。

探査は、カニ塚古墳の東側および尼塚古墳の推定地域において、総面積約 3,500m² の範囲を設定して行った (図 4)。装置には、Noggin plus を使用し、走査測線間隔は 0.5m、アンテナ周波数は 250MHz を用いた。

3.2 結果

図 5 に、代表的な探査結果 (GPR profile) を示している。左図 (LINE_A-20) では、測線距離の 2 - 8 m の位置に異常応答が認められる。この領域では周囲に認められる成層構造が鮮明ではなく、地層が改変を受けて

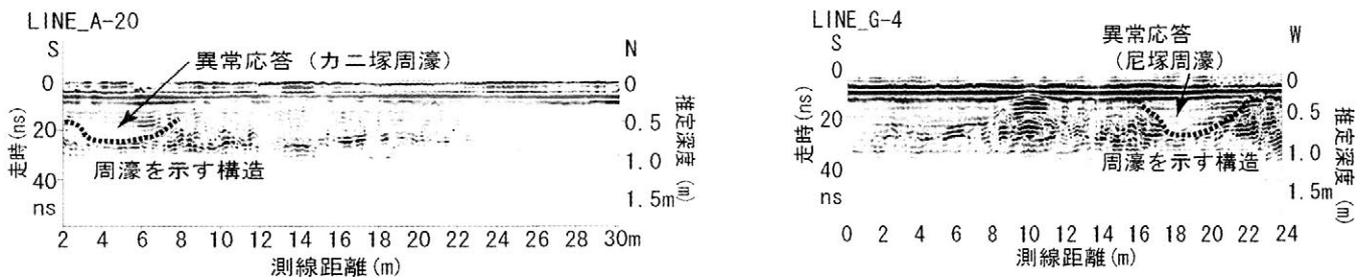


図5 カニ塚・尼塚古墳における周濠を捉えた代表的な測線における探査結果。

Fig. 5 Representative GPR profiles for the Kanizuka and Amazuka tombs, showing the moats surrounding the mounds.

いると考えられる。また、反射強度も相対的に弱くなっている。この異常の下部に、船底形の構造が読み取れる。これがカニ塚古墳の周濠跡に対応する応答と推測される。

探査から得られたレーダ波の周濠底までの走時は約25nsであった。発掘調査において、探査で推定した箇所周濠が発見され、地表から周濠底までの深さは約75cmであった。この発掘で得られた深度と探査による走時から、レーダ波の遺構中での伝搬速度 (v) は $v \approx 0.06\text{m/ns}$ と算出され、速度から計算される土壌の比誘電率は約25となった。一般に水田土壌は粘土質で保水性が高く、含水率が高い。湿潤な粘土の比誘電率は15–40 (物理探査学会 2005) であり、求められた値は妥当である。探査データの深度の解析は速度 0.06m/ns を用いて行った。

図5右に示したLINE_G-4の探査結果では、測線距離16–22m、深度約0.8mまでの領域に異常応答が認められた。この異常はLINE_A-20と同様に周囲よりも反射の弱い領域であり、その下には船底形の構造も認められた。これも濠と考えられるが、カニ塚古墳から約35m離れた位置にあるため、カニ塚古墳ではなく削平された尼塚古墳に伴う周濠であると推測した。

3.3 消失古墳の復元に関する考察

全測線の探査データをもとに、Time slice による解析を行った。図6には、深度0.6–0.9m (走時20–30ns) において、反射強度を平均化した平面図 (Time slice 図) を示している。図にはカニ塚古墳の周濠が明確に現れており、周濠の幅は約5mと推測された。

カニ塚古墳の北東領域にも、円形を示す異常部分が認められる。これは、削平されて消失した尼塚古墳に伴う周濠を示している。周濠は幅3–6mの周濠Iとその

外側に表れている周濠IIの、2本が存在すると推測された。

探査結果をもとに行われた尼塚古墳の発掘調査により、探査で示した異常部分が周濠であると確認された。探査から推定した墳丘内径は約38mであり、その結果、削平されて現地形では確認が困難であった尼塚古墳は、徳島県内の円墳として2番目の大きさであり、県内では初めての2重周濠をもつ円墳の可能性があると判明した。

また、周濠の幅は、北側のほうが広く見える。これは、探査地区は水田であり、現在の地表面はほぼ水平であるが、古墳の築造当時の周濠を掘削した地形は、やや南側に傾斜していたためと考えられる。つまり、北側の方が遺構までの深度が浅く、現地表面を水平面としてTime slice 処理を行う際に浅い深度で異常が表れ、北側の周濠が広く見えたと考える。

次に、カニ塚古墳と尼塚古墳の周濠がレーダ探査で鮮明に判別できた理由について考える。両古墳において、周濠は、反射の弱い領域として認められており、その要因として、周濠内の埋土層の比誘電率にあまり差が無く均質であり、レーダ波が反射しなかったことが考えられる。図7 (深度約0.9–1.2m) に見られる様に、周濠の底面より少し深い領域で解析したTime slice 図においても、周濠は反射の弱い領域として表れている。これは周濠の埋土は比誘電率が高く、レーダ波が減衰し易い領域であったことを示している。同時に実施した高密度電気探査では、周濠部は周囲に比べて低比抵抗 ($40\text{--}80\ \Omega \cdot \text{m}$) を示す (Kishida and Sakai 2006)。この結果を考慮すると、周濠内の埋土は周囲土壌より含水率の高い領域となっており、レーダ波が減衰しやすい状況であったと考えられる。

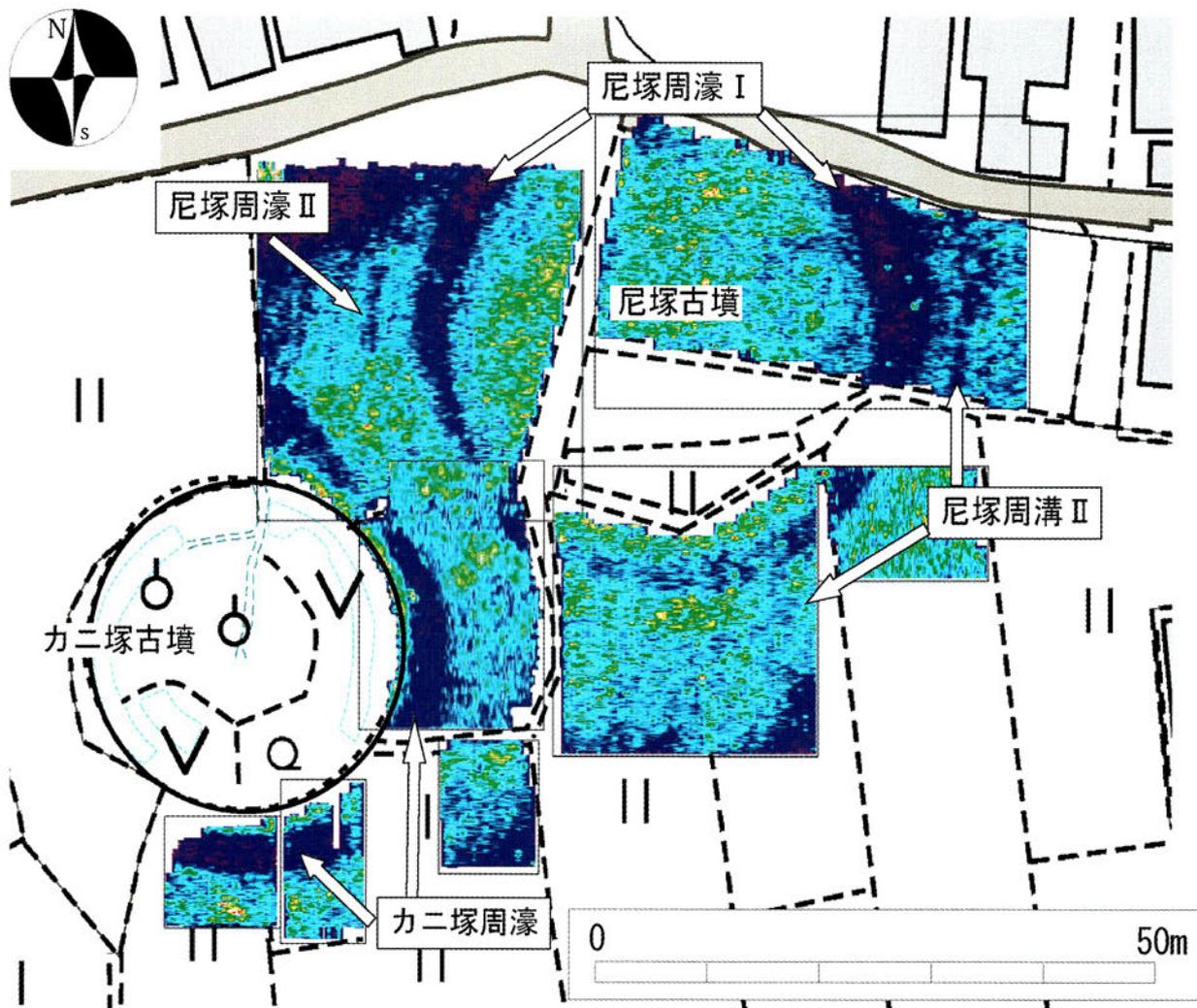


図6 深度約0.6-0.9m(走時20-30ns)におけるレーダ波の反射強度を平面分布として示した(Time slice図)。反射強度の分布は色分けして表示している。反射の強い領域は黄色で、弱い領域は紺色で表現している。

Fig.6 Horizontal distribution (time-slice) maps of the reflection amplitude, at the depth of 0.6-0.9 m (corresponding to a signal travel time of 20-30 ns). The relative intensity of reflection is shown by a color gradation, with strong reflections represented as yellow and weak reflections as dark blue.

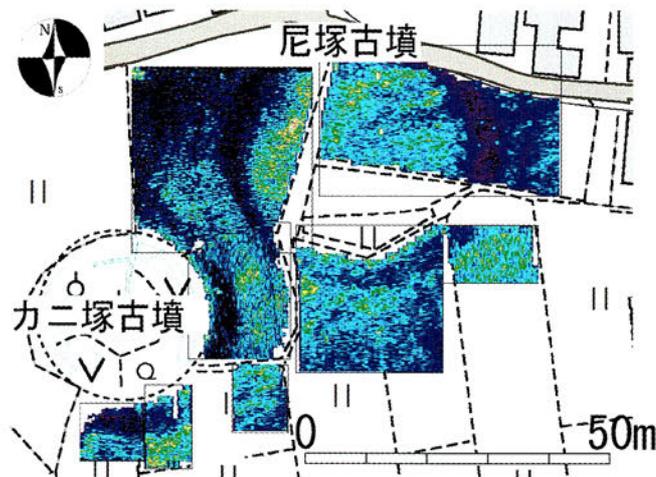


図7 深度約0.9-1.2m(走時30-40ns)におけるレーダ波の反射強度を平面分布として示した。

Fig.7 Horizontal distribution maps of the reflection amplitude at the depth of 0.9-1.2 m (corresponding to a signal travel time of 30-40 ns).

4. 古墳の盛土量推定

4.1 研究の対象と概要

(1) 富山市富崎千里古墳群 9号墳

盛土量推定に関する研究は、富山市の富崎千里古墳群 9号墳と氷見市の阿尾島田 A 1号墳を対象に行った。

富崎千里古墳群 9号墳は、古墳時代前期（3世紀末～4世紀末）の造営と推定される 17基からなる古墳群の一つである。古墳群は標高約 56m の丘陵東端に立地している。古墳全長が 34m を測る古墳群中唯一の前方後方墳であり、本古墳群で最大の規模である。

図 8 に本古墳の測量図、発掘トレンチ及び代表的な測線の位置を示している。探査では、pulse EKKO IV を使用し、周波数 200MHz のアンテナを用いた。探査深度の精度を上げるため、レーダ波の地中伝搬速度を直接解析する Common mid point (CMP) 探査 (Annan and Cosway 1992) を行い、解析に用いた。探査結果の解析では、古墳の状況とともに盛土量の推定も行った。地形測量については、富山県婦中町教育委員会（現在は富山市婦中町）による測量結果を利用した。

(2) 氷見市阿尾島田 A 1号墳

阿尾島田 A 1号墳は、古墳時代前期の築造と考えられる全長約 70m の前方後円墳である。古墳に伴う平坦面、段築及び葺石、埴輪等の外表施設は確認されていない。崩落や山道の掘込等により改変を受けており、後円部の中央北側には後世の築造と考えられる「コ」字形を

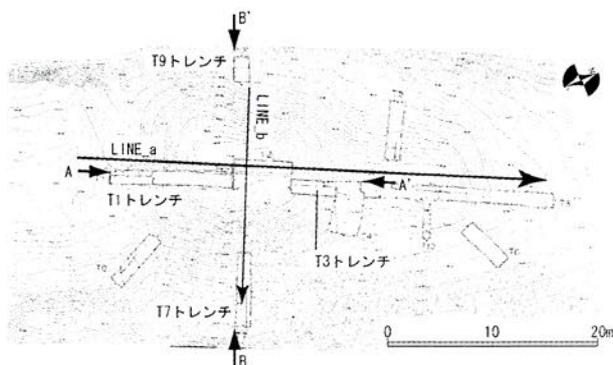


図 8 富山市富崎千里古墳群 9号墳の測量図、発掘トレンチ及び代表的な測線位置を示す。

Fig. 8 The topographic map of Tomisaki Chisato No. 9 tomb, also showing trenches and representative GPR survey lines.

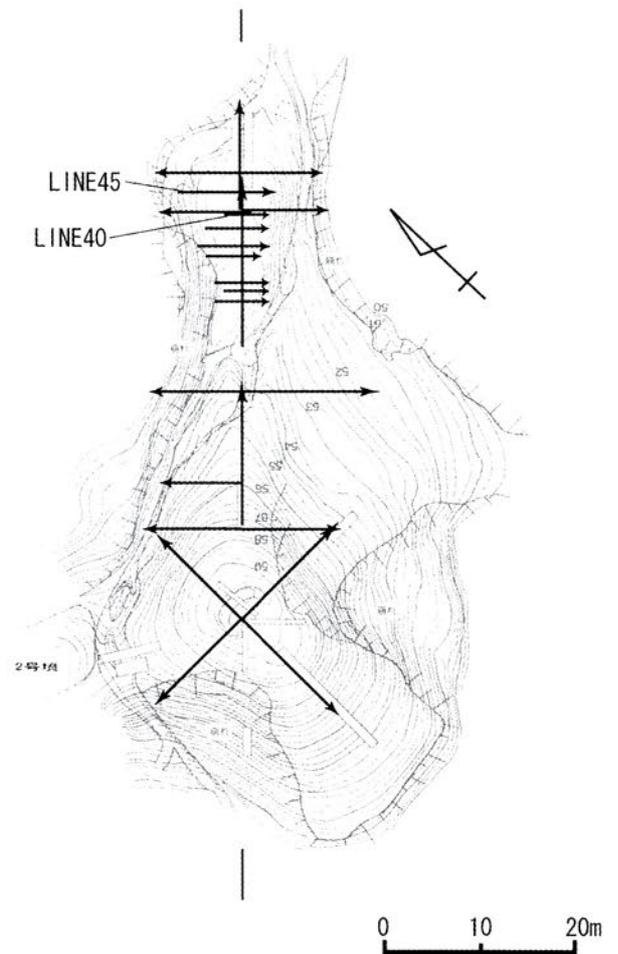


図 9 氷見市阿尾島田 A 1号墳の測量図および探査測線を示す。
Fig. 9 Topographic map of the Aoshimada A1 tomb, showing the survey lines.

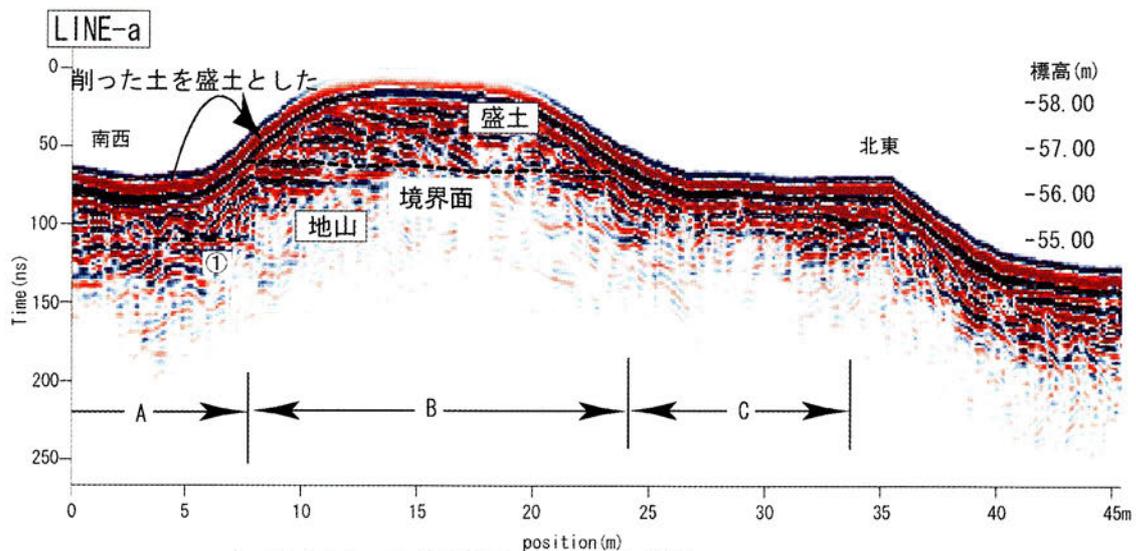
した土塁が存在する（富山大学人文学部考古学研究室 2002, 2003）。

同古墳においても、盛土量の算出を目的として地中レーダ探査による研究を行った。図 9 に探査測線を示している。装置には pulse EKKO1000 を使用し、450MHz のアンテナ周波数を用いた。また、CMP 探査を実施して、探査深度を検討した。

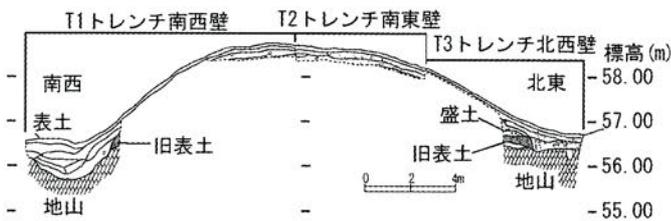
4.2 結果

(1) 富崎千里古墳群 9号墳における探査結果

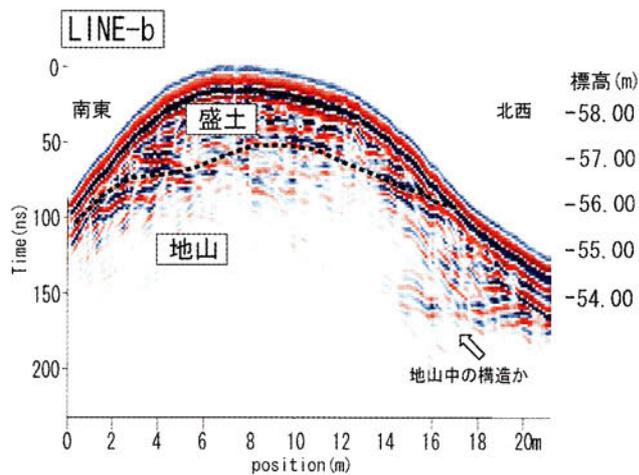
正確な深度解析を行うために CMP 探査を行った結果、レーダ波の伝搬速度は約 0.06m/ns、比誘電率は約 25 と求まった。婦中町教育委員会による発掘の結果では、盛土は砂礫混じりの粘質土であり（婦中町教育委員会 2002）、探査時は雪解け水で探査区の土壌は湿潤であったと考えられ、比誘電率は妥当である（湿潤な粘土の比誘電率 15-40：物理探査学会 2005）。



A: 盛土として古墳築造時に削られた範囲
 B: 旧表土上に盛土を施工した範囲
 C: ほとんど盛土がされていないか、削りだして成形していると考えられる範囲



A



B

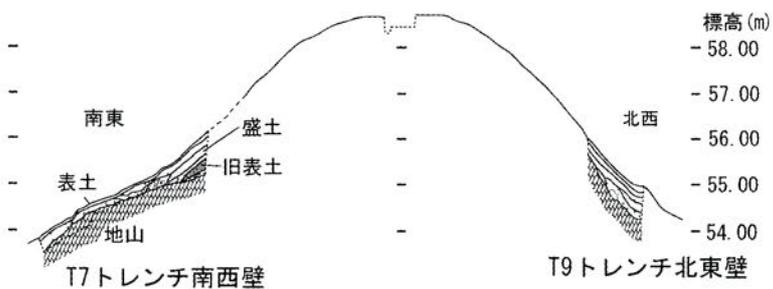


図10 富崎千里古墳群第9号墳における地中レーダ探査の代表的な探査断面図と発掘調査結果。
 Fig. 10 Representative GPR profiles and cross sections from the Tomisaki Chisato No.9 tomb.

図 10 に、代表的な 2 測線における探査断面図（GPR profile）と発掘調査の結果を示している。両図とも高さを距離の 2 倍のスケールで表現し、発掘結果は図 8 に示した A-A'、B-B' ライン上でのエレベーション図に投影している。A 図上の LINE-a の探査結果では、範囲 B（8-24m）に、ほぼ水平方向に延びる土層の境界が認められる。この境界層は、北側の範囲 C の前方部上面とほぼ平行であり、また範囲 A（0-8m）の層理面①とも平行である（境界層は層理面①より 1.5m 上位に位置する）。

B 図上に示す LINE-b の探査結果では、距離 0-17m の範囲に緩やかな放物線状に延びる境界（破線で示している）が存在し、同境界面の約 2.5m 深部、距離 14-20m の領域には、地山中の層理面を示す応答が認められる。この深度の異なる 2 つの地層の境界面はほぼ並行して存在するとみられ、破線で示す境界面は旧表土（地山面）を捉えたものと考えられる。

LINE-a の探査結果は、範囲 B で得られた境界面（範囲 C では古墳上面）が古墳構築時の地表面であること、および範囲 A では旧表土の上部領域を層理面①まで削っていることを示している。範囲 A から削り出した土が範囲 B の盛土に使用された可能性が高い。これにより、境界層より上部の盛土については、旧表土の上にそのまま積み上げられていると考えられる。また盛土中にも、距離 12-17m にかけて、北東下がりの境界面が認められる。これは、まず南西部に盛土が施工され、その後北東部に盛土されたことを示している。また、盛土中に明瞭な境界が認められた要因としては、墳丘の構築において、土質の違う土壌が利用された可能性も推測される。図の北東側の前方部では、明確な盛土構造は認められなかった。この結果は、前方部では盛土を施工していないか、前方部の殆どは地山を削りだして成型されていることを示している。

次に、それぞれの探査結果を発掘結果と比較した。T1 トレンチでは、LINE-a の距離 8m 付近で、旧表土層を検出している。そのため、この地点から南西側は削り出して成形し、旧表土の残る北東に盛土を施工したと考えられる。また、後方部北東の T3 トレンチでの盛土が開始される地点は、探査距離の 25m 付近であった。こ

れらの結果は、探査で認められた境界面の南西端、北東端とほぼ合致している。T7 トレンチで確認された南東側の盛土の開始点は LINE-b 測線外にあり、探査で捉えてはいないが、旧表土層が北西へと続く様子を読み取れる。T9 トレンチでは盛土、旧表土層共に検出されていない。探査結果では、境界面は T9 トレンチのやや上方、標高約 56m 付近に存在しており、探査結果は発掘結果と矛盾しないと考える。

探査から見積もられた盛土は、後方部頂で約 1.9m 厚である。後方部の中央部に設定されたトレンチ（T1、T2）は、地山の深さまで掘削しておらず、実際の盛土厚は不明である。

（2）阿尾島田 A1 号墳における探査結果

地中レーダ探査を用いて古墳の盛土量を探る調査は、阿尾島田 A1 号墳でも実施した。探査後に、CMP 探査を行い、レーダ波の地中伝搬速度を求めた結果、速度は約 0.06m/ns、土壌の比誘電率は約 25 と求められた。この値を用いて、深度解析を行った。富山大学考古学研究室の発掘調査によると、本古墳の盛土と地山は共に粘質土であり、今回推定した比誘電率 25 は、粘質土の比誘電率（15-40、物理探査学会 2005）として妥当である。

図 11 には、古墳前方部で得た代表的な探査結果を示している。左図の LINE45 の結果には、距離 6-8m までに、地表から約 0.6m の深度まで東方へ下がる構造が認められる。同測線より 2.5m 南西の LINE40 の結果（右図）にも、距離 2-4m に東下がりの構造が現れている。探査前に行われた発掘調査（富山大学人文学部考古学研究室 2002）から、前方部の一部は盛土で形成されていることが指摘されており、探査で捉えた東方へ下がる構造は盛土と地山の境界面であると推定した。

4.3 古墳の盛土量推定に関する考察

探査で得た盛土と地山の境界をもとに、富崎千里古墳群 9 号墳の盛土量を計算した。図 12A は測量図より描画した富崎千里 9 号墳の三次元図であり、比高を見やすくするため Z 軸のスケールを XY 軸の 1.25 倍にして表現している。また図 12B では後方部を取り出しており、探査から推定した地山との境界面も示している。この図

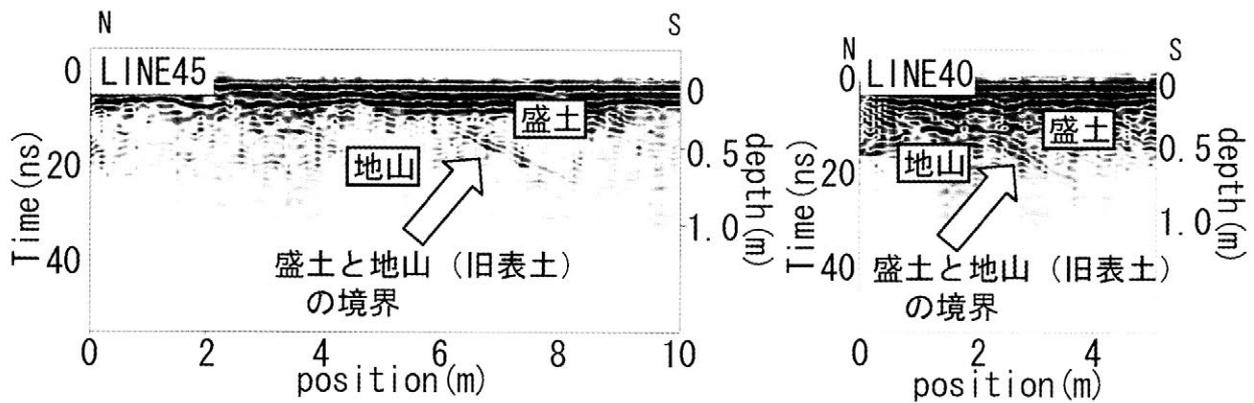


図 11 阿尾島田 A1 号墳の前方部で得た代表的な探査結果。図左は LINE45、図右は LINE40 で得られた探査断面図を示している。
 Fig. 11 Representative GPR profiles of the Aoshimada A1 tomb. The figure on the left is the GPR profile of Line 45 and one on the right is the profile of Line 40.

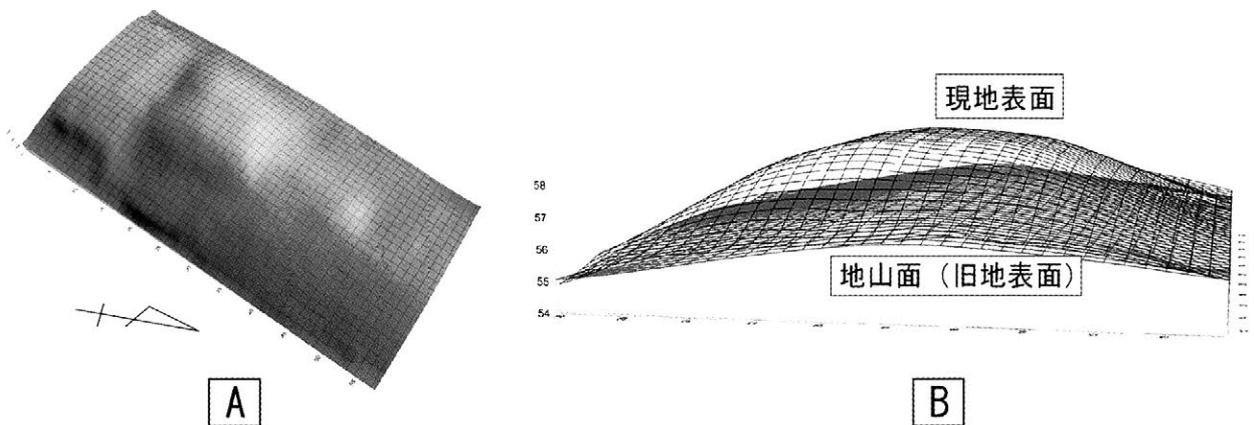


図 12 A：測量図より描画した富崎千里 9 号墳の三次元図。B：上面は現在の地表面を表している。下面は探査結果より推定した旧表土面を表している。後方部南側から見た図。
 Fig. 12 Tomisaki Chisato No.9 tomb. A: Three-dimensional topography drawn from the contour map, and B: curves of the present ground surface of the mound (above), and the original ground surface as estimated with GPR (below), as seen from the south (rear part of the mound).

において、コンピュータ処理により古墳表面と地山面とにはさまれる領域の体積を計算することで、盛土の体積が求められる。以上の様にして、富崎千里古墳群 9 号墳では、後方部の盛土量は約 374m³という結果が得られた。

富崎千里古墳群 9 号墳において、発掘調査から盛土もしくは旧表土が確認されているトレンチは T1, T3, T7 の 3 箇所であるが、いずれも盛土、旧表土の一端を認めただけで、後方部中央での盛土の厚さは判明していない。そのため発掘結果から盛土量を推算することは困難であるが、可能な限り、地山面・旧表土面の復元を試み、探査で求めた盛土量との対比を行った。

復元方法は、後方部を挟んで直線状に位置するトレンチ壁面で検出された旧表土面を、直線状にお互いが交差

するところまで延ばし、そのラインを旧表土面とした。実際には、この方法は多少の誤差が含まれるが、概算の値としては利用できると判断した。

図 13A に A-A' ライン上のエレベーション図と発掘結果を示した。T1 トレンチにおいて検出された旧表土層は南西端を古墳構築時に削られており、旧表土層の上面の傾斜角度を求めるのは困難であったため、旧表土層下面の傾斜角をもとめ (約 12 度)、それを上面に平行移動させて、旧表土面を北東へ延長した。また T3 トレンチでは旧表土層が 1.2m 程度検出されており、その上面の傾斜角を測り (約 2 度)、南西へ延長した。発掘調査による墳丘中央部での正確な盛土厚は不明なため、前述の 2 本の直線が交わる点を、地山の最高地点とした。

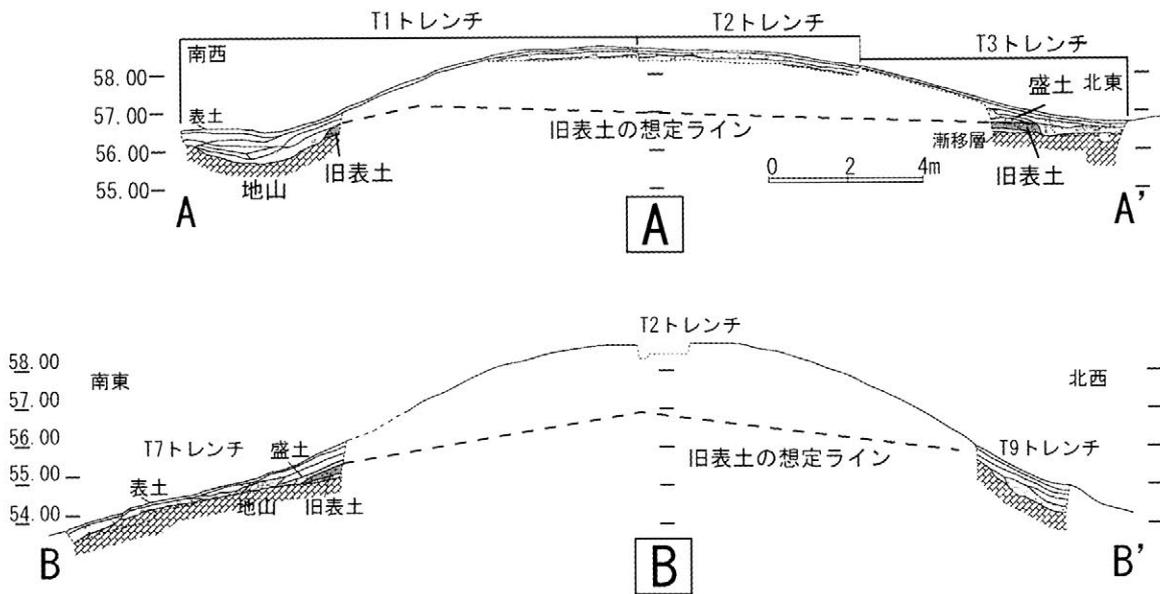


図13 A-A'ラインとB-B'ラインにおける富崎千古墳群9号墳のエレベーション図と推定された旧表土面。

Fig. 13 Elevation view and estimated original ground surface on A - A' line (A) and on B - B' line (B) for the Tomisaki Chisato No.9 tomb.

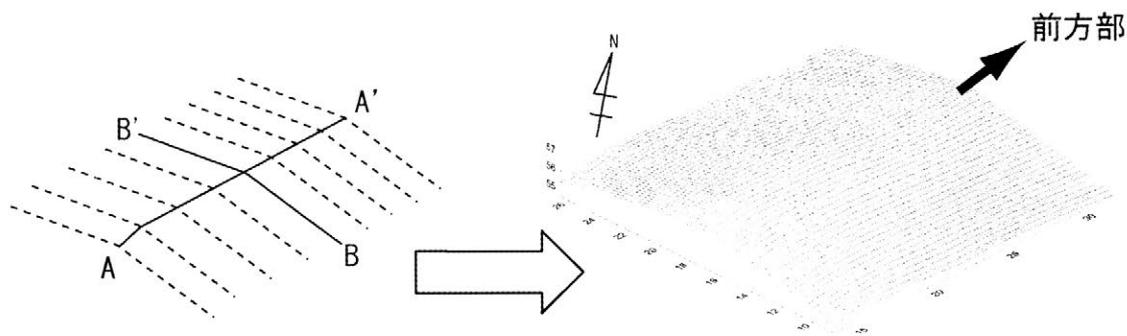


図14 富崎千古墳群9号墳で推定した旧表土面モデル。

Fig. 14 Assumptive model of original ground surface for the Tomisaki Chisato No.9 tomb.

同様に、B-B'ラインで旧地表面の復元を行った。T7トレンチで発見された旧表土層は、T1トレンチと同様に南東先端が、削られている可能性があったため、旧表土層下面の傾斜角を求め(約10度)、旧表土上面から北西へ延長した。墳丘北西のT9トレンチでは、旧表土、盛土とも発見されていないが、探査結果も考慮して、T9トレンチのやや上方、標高56mの高さに旧表土が存在すると仮定した。また、測量図より本古墳の主軸は尾根筋に沿って作られたと考えられることから、B-B'ライン上における地山の最高地点は、古墳主軸(A-A'ライン)上として復元を行った(図13A)。

以上の様に、まず後部部を十字に横切るライン上で、旧表土面を復元した。その後、A-A'ラインで復元された尾根の高さに沿って、B-B'ラインで得た地山のカー

ブを平行移動させ、旧地形を平面的に復元した(図14)。

推定した旧表土面と現地表面の間に挟まれた体積を計算した結果、盛土量は約364m³と求まった。今回、発掘調査結果から求めた盛土量は概算の値ではあるが、探査から求めた盛土量(約374m³)と非常に近い値を示している。また、発掘結果から推定された地山面も墳丘中央での盛土厚が約2mと探査結果と調和的である。従って、両者の結果は共に信頼できると判断でき、探査による盛土量推定の有効性を示すものと考えられる。

図15Aには、阿尾島田A1号墳の前方部において、探査結果から推測した盛土の範囲を灰色で囲んで示している。図より、前方部の東側に多くの盛土が施工されていると考えられる。図15Bは、探査後に発掘された第4トレンチの北壁における土層断面図(富山大学人文学部

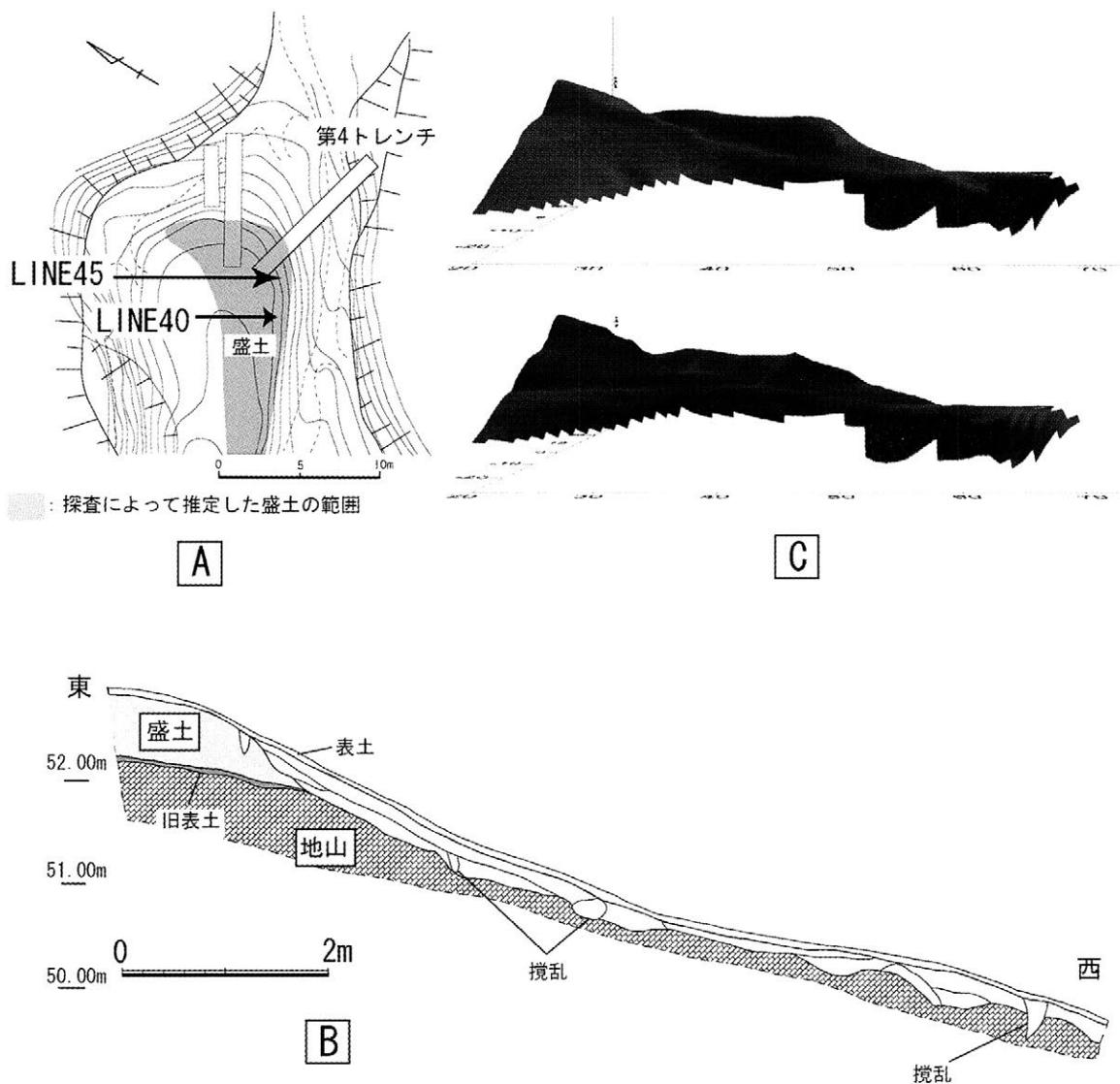


図 15 A：探査結果から推測された前方部における盛土の範囲。B：第4トレンチ北壁の土層断面図。C：図上は前方部における現在の地表面を表す。下図は探査から推定した旧表土面の地形モデルを示す。
 Fig. 15 Front portion of the tomb. A: Region of mounded earth as estimated with GPR. B: Vertical section of the east wall of the trench No.4. C: curves of the present ground surface of the mound (above), and the original ground surface as estimated with GPR (below).

考古学研究室 2003, 一部加筆)を示している。本トレンチでは、東側約2mまでの範囲に旧表土および、約70cm厚の盛土が確認されている。盛土の範囲は、探査で推定された範囲にほぼ合致している。

図15Cでは、地山面と現地表面を三次元で示している。この図をもとに、前方部の盛土量は約77m³と求められた。後円部では、自然の崩落や土塁等の後世の改変が著しく、また探査前に大部分でトレンチ調査が行われていたため、探査から地層境界の精度良い見積りが難しかった。そこで、盛土の算出は前方部のみで行った。

阿尾島田A1号墳では、地中レーダ探査による盛土の構造と盛土量の推定法の有効性が確認できた。同古墳

は、前方部は長さ約36m、高さ約2m、最小幅約10m、最大幅約20mと復元されている(富山大学考古学研究室2003)。今回判明した前方部の盛土量は、約77m³であり、前方部の体積の約7%にあたる。このことは、前方部では、自然の尾根筋を利用して削りだしており、上部平坦面の整地などの最終的な成形時に少量の盛土を施していたと解釈できる。本古墳においては、前方部に関しては盛土量を推算できる十分なトレンチが設定されておらず、発掘結果から盛土量を計算することは困難であった。しかし、探査で推定された盛土範囲はトレンチ調査で判明した盛土と整合的であり、今回求めた盛土量の信頼性は高いと考える。

5. まとめ

地中レーダ探査を用いて古墳の研究を行った。削平されて現状では確認が難しい古墳の復元を目的の一つとしたが、徳島県の円墳での探査では、地下約1mまでの尼塚古墳の周濠を明確に捉えることができた。成果は、同円墳が徳島県内2番目の規模で、県内では初めての発見となる2重の周濠を持つ可能性があることを明らかにした。周濠が何故レーダ探査で反射の弱い領域として判別できたかについては、周濠の埋土はほぼ均質であり、比誘電率の高い（含水率の高い）領域であったためと考えられた。また、古墳築造当時の地形（旧地表面）が緩やかに傾斜していることも把握できた。

各地には、古墳を削って平らにしたことからその名がついたといわれる「平塚」や、かつて古墳群があったことを思わせる「百塚」などの地名が多く見られる。このような場所を、広範囲に探査して、過去の古墳の立地や形状を復元することは考古学研究に貢献できるので、今後も活用が望まれる。

古墳の詳細な測量と、地中レーダ探査による古墳盛土と地山との境界の検出を合わせることで、盛土量を算出する方法を検討した。後世の改変や削平を受けていない富崎千里古墳群9号墳（全長34mの前方後方墳）に適用した結果、盛土量は約374m³と求まり、発掘結果から推算された盛土量とも調和的であった。また盛土の移動過程も推測された。同様な研究は、氷見市の阿尾島田A

1号墳（全長約70mの前方後円墳）でも実施し、盛土量は約77m³と得られ、上部平坦面の整地などの最終的な成形時に少量の盛土を施していたと解釈した。

従来、古墳も含めて遺跡・遺構の盛土量について、探査法により非破壊で求めた研究は行われていない。そうした中で、広範囲を迅速に探査できる地中レーダ探査を適用して丘陵地に構築された古墳の盛土量を高精度で推定する本研究手法は、今後の考古学における新たな手法として活用できると考える。古墳の盛土量を求める研究では、古墳構築における労働力の研究も次の課題となるが、古墳の時期、立地や形状、内・外部施設等様々な要素が複雑に絡み合うと考えられる。そうした情報も入れて、古墳構築における労働力を計算し、複数の古墳の結果を比較することを今後の研究課題と考えている。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、多くの方々にご指導、ご助力を賜りました。特に、調査対象とした遺跡については、藤川智之氏（徳島県埋蔵文化財センター）、辻佳伸氏（徳島県教育委員会）、大野英子氏（富山市埋蔵文化財センター）、高橋浩二助教授（富山大学）にお世話になりました。また、置田雅昭教授（天理大学）、Walter Edwards教授（天理大学）、二宮修治教授（東京学芸大学）からは多くの有益なご助言とご指導をいただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- 足立和成・中條利一郎・西村 康 1999『文化財探査の手法と実際』真陽社
- 荒井 仁 1999「峰ヶ塚古墳の土木工学的調査」『河内古市古墳群峰ヶ塚古墳概報』pp.65-71 羽曳野市教育委員会
- 石川 昇 1982「大阪に築かれた古墳の総体積と労働力」『考古学研究』29-3 pp.99-114 考古学研究会
- 梅原末治 1955「応神・仁徳・履中三天皇陵の規模と造営」『書陵部紀要』5 pp.1-15 宮内庁書陵部
- 大林プロジェクトチーム編 2002「仁徳天皇陵の建設」『よみがえる古代大建設時代：巨大建造物を復元する』pp.74-106 東京書籍
- 小沢一雅 1978「前方後円墳の形態研究とその計数的方法の試み」『考古学研究』25-2 pp.29-46 考古学研究会
- 岸田 徹・酒井英男 2001「若王子塚古墳における地中レーダ探査」『富山市水橋金広・中馬場遺跡発掘調

- 査報告書 富山市埋蔵文化財調査報告』113 p.99 富山市教育委員会
- 岸田 徹・酒井英男 2005「小里城山城跡（御殿場跡）における地中レーダ探査」『小里城山城跡－御殿場跡発掘調査報告書』pp.80-87 瑞浪市教育委員会
- 岸田 徹・酒井英男 2006「徳島県尼塚古墳・カニ塚古墳における地中レーダ探査」『指定史跡等保存活用事業埋蔵文化財発掘調査報告書 徳島県埋蔵文化財センター発掘調査報告書』66 徳島県教育委員会・財団法人徳島県埋蔵文化財センター（印刷中）
- 酒井英男・黒沢尚美・田中保士・宇野隆夫 1997「岐阜県養老町象鼻山1号前方後円墳の電磁気探査」『象鼻山1号古墳－第1次発掘調査の成果－養老町埋蔵文化財調査報告』1（富山大学人文学部考古学研究室）pp.53-64 養老町教育委員会
- 酒井英男・小島信人・宇野隆夫・田中保士・アダムオニール・上坂麻子・佐藤 朗 1998「岐阜県養老町象鼻山1号前方後円墳の電磁気探査－地下レーダ探査と高密度電気探査」『象鼻山1号古墳－第2次発掘調査の成果－養老町埋蔵文化財調査報告』2（富山大学人文学部考古学研究室）pp.103-116 養老町教育委員会
- 鈴木 啓 1981「史跡 亀ヶ森古墳の土量と労働量」『福大史学』31 pp.115-118 福島大学史学会
- 天理大学遺跡探査チーム 2001『墳丘のない墓の探査研究 平成9－12年度科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））実績報告書』（補訂）天理大学遺跡探査チーム
- 徳島県埋蔵文化財センター 2001「阿讃山脈東南縁の古墳群－四国横断自動車道建設に伴う埋蔵文化財調査概報」『徳島県埋蔵文化財センター調査概報』3 pp.2-9 財団法人徳島県埋蔵文化財センター
- 富山大学人文学部考古学研究室 2002「阿尾島田 A1号墳」『第1次・第2次発掘調査報告書』富山大学人文学部考古学研究室
- 富山大学人文学部考古学研究室 2003『阿尾島田 A1号墳－第3次発掘調査報告書』富山大学人文学部考古学研究室
- 原口正三・西谷 正 1967「弁天山 C1号墳」『弁天山古墳群の調査 大阪府文化財調査報告』17 pp.46-130 大阪府教育委員会
- 婦中町教育委員会 2002『富山県婦中町千坊山遺跡群試掘調査報告書』婦中町教育委員会
- 物理探査学会 2005『新版物理探査用語辞典』愛智出版
- Annan, A. P. and Cosway, S. W. 1992 Ground Penetrating Radar survey design. *Annual meeting of SAGEEP*, pp.1-12
- Conyers, L. B. and Goodman, D. 1997 *Ground-Penetrating Radar-An Introduction for Archaeologists*. ALTAMIRA PRESS
- Edwards, W. 2006 Japan's Oldest Keyhole Tomb (?): The Prospection Program at Tenri University and GPR Results from the Do-no-ushiro Mound. *Journal of Archaeological Prospection Society of Japan*, 8-1, pp.9-16, Archaeological Prospection Society of Japan
- Edwards, W., Okita, M. and Goodman, D. 2000 Investigation of a Subterranean Tomb in Miyazaki, Japan. *Archaeological Prospection*, 7, pp.215-224, John Wiley & Sons, Ltd.
- Kamei, H., Marukawa, Y., Kudo, H., Nishimura, Y. and Nakai, M. 2000 Geophysical Survey of Hirui-Otsuka Mounded Tomb in Ogaki, Japan. *Archaeological Prospection*, 7, pp.225-230, John Wiley & Sons, Ltd.
- Kishida, T. and Sakai, H. 2006 Study of kofun in Tokushima prefecture using ground penetrating

radar and electric resistivity surveys: Reconstruction of the moat of the leveled mound. *Journal of Archaeological Prospection Society of Japan*, Archaeological Prospection Society of Japan (in press)

Malagodi, S., Orlando, L., Piro, S., and Rosso, F., 1996 Location of Archaeological Structures using GPR Method: Three-dimensional Data Acquisition and Radar Signal Processing. *Archaeological Prospection*, 3-1, pp.13-24, John Wiley & Sons, Ltd.

(2006年9月12日受付, 2006年10月13日受理)

Research on Kofun Using Ground Penetrating Radar Prospection : Reconstruction of Leveled Mounds and Estimations of the Mound Fill

Toru KISHIDA and Hideo SAKAI

Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama 3190 Gofuku, Toyama City,
Toyama 930-8555, Japan

We conducted research on *kofun* (mounded tombs) using ground penetrating radar (GPR) prospection. One purpose was the reconstruction of *kofun* that have been leveled and are therefore difficult to detect, but in the prospection of Amazuka, a round mound in Tokushima prefecture, we discerned clearly the moat to a depth of 1 m. The results made it clear that this tomb is the second largest circular *kofun* in the prefecture.

In research on *kofun*, in addition to the shape and size of the mound, the volume of mounded earth reflects the manpower invested in the tomb's construction and the scale of the engineering task involved, providing important information for probing relations of power of the time. We accordingly developed a method for calculating the volume of fill, by combining estimates based on GPR of the boundary between the natural subsoil and the fill of the mound, with topographic surveys of *kofun*. Applying this method to the Tomisaki Chisato No. 9 tomb in Toyama city enabled surmises about the processes of constructing the mound and transporting earth. The volume of fill was found to be approximately 374 m³. Similar research was conducted for the Aoshimada A1 tomb in the city of Himi, revealing that approximately 77 m³ of fill was applied to the front portion of the mound.

Until now, little scientific research has been conducted on the volume of fill for archaeological features such as *kofun*. Based on our work, it was possible to estimate the volume of fill of *kofun* built on hilly sites using GPR. It is believed this method can provide new data for use in archaeology in the future.