

遺跡探査法による削平を受けた古墳の形状復元

Shape reconstruction of the leveled mound using archaeological prospection

岸田 徹, 酒井英男

Toru Kishida, Hideo Sakai

天理大学 文学部, 天理市杣之内町 1050

Tenri University, 1050 somanouchi-cho, Tenri, Nara

富山大学大学院 理工学研究部, 富山市五福 3190 番地

Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama, Toyama

あらまし: GPR 探査と高密度電気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ており、徳島県の円墳では、両探査において、地中 1m までの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 番目の規模であり、2 重の周濠を持つ可能性あることを明らかにした。

また、探査では、古墳築造当時の地形（旧地表面）が南北に緩やかに傾斜していたことや、尼塚古墳が完全には削平されておらず、盛土が多少残っている可能性があることも示していた。GPR 探査と電気探査の 2 種類の探査法を併用する調査により、周濠の異常応答の要因を多面的に検討できた。

Summary : Ground penetrating radar (GPR) and electric resistivity surveys were conducted on *kofun* (mounded tombs) in Tokushima Prefecture. One purpose was to reconstruct tombs presently undetectable from the surface. Applying both survey methods to an area where a destroyed *kofun* was inferred to exist, we successfully detected the circular moat surrounding the mound below the surface. The reconstructed tomb (Amazuka *kofun*) was determined to be the second largest circular mound in Tokushima Prefecture.

The GPR survey also indicated that the original ground level of the *kofun* sloped slightly to the south, which may be related to the topography of the area at the time. Based on the electric survey, we discovered that the presently undetectable Amazuka *kofun* was not completely destroyed, and that the lower part of the mound remains beneath the modern surface.

We were also able to clarify the reason for the anomalous response, in addition to the topography around the moat, through the parallel use of GPR and electric surveys.

キーワード: 地中レーダ探査, 電気探査, 消失古墳, 周濠

Keywords : ground penetrating radar (GPR), electric resistivity survey, leveled mound, surrounded moat

1. はじめに

遺跡探査による古墳の研究は、従来は、現存する古墳の主体部の推定や周濠の有無等を目的として行われていたことが多い(西村 1993; 酒井他 1997, 1998; Kamei et al. 2000 など)。

しかし、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、復元は困難とされる場合も少なくないので、探査は有用となる。古墳の分布やその形状は、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。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、地中レーダ探査を用いて、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、地中レーダ探査と高密度電気探査を用いて、削平された古墳の形状を調査した研究を報告する。徳島県の2つの古墳において、後世の削平により縮小・消失した古墳と周濠の探査と解析による復元を目的とし、特に周濠に着目し、地中レーダ探査と高密度電気探査による異常の出現を比較し、検討した。本地域で行った地中レーダ探査の結果については、岸田・酒井 (2006) においても考察を行っている。

2. 研究概要

2-1. 調査地の概要

徳島県鳴門市(図1)のカニ塚古墳と尼塚古墳の二つの古墳を対象に研究を実施した。

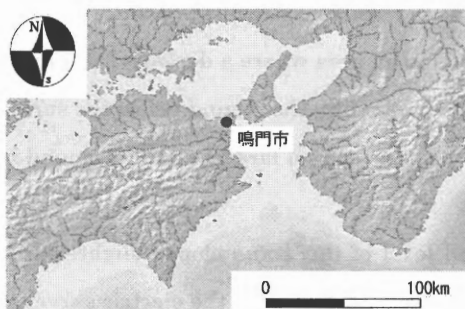


図1 調査地の位置

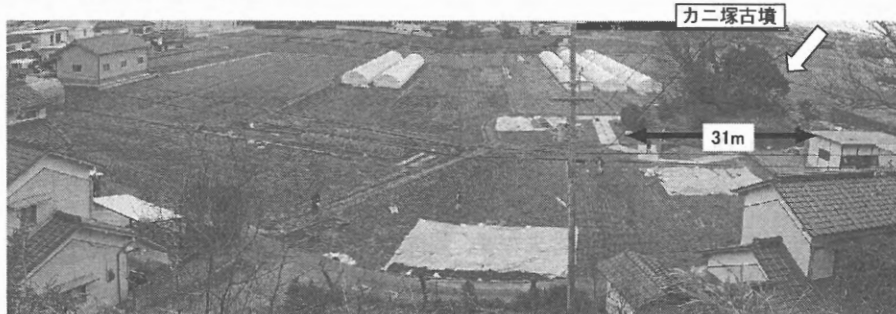


図2 調査地遠景写真(北から)

両古墳は、徳島平野北端の阿讃山脈南縁に位置し、「鳴門・板野古墳群」に含まれる。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。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)、校地の盛土を取るために同古墳は掘削されたい。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2)。また、詳細な記録も残っておらず、古墳の形状も規模も不明とされていた(徳島県埋蔵文化財センター 2001)。

図3に、地中レーダ探査と高密度電気探査を行った範囲と測線の位置を示す。

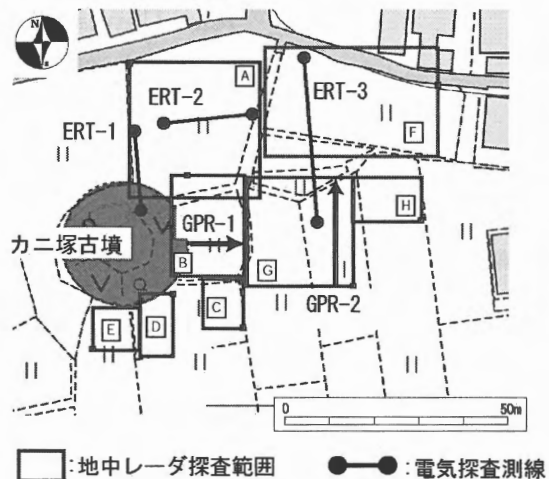


図3 カニ塚古墳の位置、探査範囲、代表的な測線

2-2. 地中レーダ探査

地中レーダ探査(GPR: ground penetrating radar)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、受信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。

探査結果は、各測線で得たデータから擬似的な地中断面図(GPR profile図)を求めて表示している。また、

全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が対象となる研究において有効である。

GPR 探査は、カナダ Sensors & Software 社製の Noggin plus を使用し、カニ塚古墳の東側と尼塚古墳の推定地域に、8つの区画 (A-H区) を設定して行った。測線の方向はBのみ東西方向であり、その他 (A区, C~H区) は南北方向である。総面積約 3,500 m² の範囲を設定して行った。アンテナ周波数は 250MHz を用いた。

2-3. 高密度電気探査

電気探査では、図4に示すように、電流電極 (C1, C2) により、人工的に電流を地下に流して、生じた電位差を電位電極 (P1, P2) で検出する。

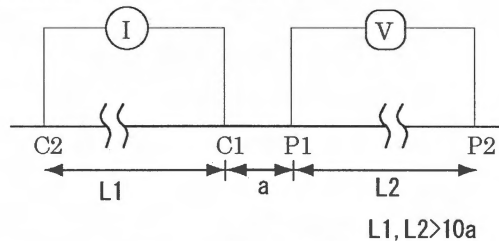


図4 二極法の電極配列

電位差から大地の見かけ比抵抗を算出し、地下の比抵抗構造を探る。電極配列は、C2, P2 電極を測線から十分離れた位置に固定し (遠電極)、C1 と P1 電極のみを移動する二極法を用いた。また、測線に沿って多数の電極を高密度に配置し、コンピューター制御により電極の組み合わせを自動的に切りかえて探査を行った。そして二次元比抵抗分布を詳細に解析するために、垂直方向の比抵抗を求める垂直探査と、水平方向の比抵抗を求める水平探査を組み合わせた 2次元探査を実施した。

次に述べる解析法については、Fujita and Ikuta (2000) を参照している。解析は、有限要素法を用いて、作成した比抵抗分布の初期モデルから計算される理論値と実測地の残差が小さくなるまで、反復計算を繰り返す逆解析手法を用い、最終的な比抵抗分布モデルを得た。信頼できる解析深度は通常、最少電極間隔の 10~15 倍である。今回の探査では最少電極間隔を 0.5m とした。

そのため 7.5m 深度までの解析を行った。

比抵抗は、電気を通しやすい鉱物 (粘土鉱物など) の含有量、間隙率、水分含有量、飽和度、間隙水の水質 (比抵抗)、温度など、多くの要因に左右される。結果の解釈では、どの要因が比抵抗に影響しているかの推定が重要になる。

探査装置には、応用地質社製 McOHM (MODEL-2115) を使用した。各測線の概要を表 1 に示す。

表 1 電気探査を行った測線の概要

測線名	測線長	電極間	探査深度	測定回数
ERT-1	15.5m	0.5m	7.5m	360回
ERT-2	15.5m	0.5m	7.5m	360回
ERT-3	31.5m	0.5m	7.5m	840回

3. 結果

3-1. GPR 探査

図5に、代表的な GPR Profile を示している。上の図 (GPR-1) では、測線距離の 2~7m 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いると考えられる。反射強度も相対的に弱くなっており、この異常の下部に、船底形の構造が読み取れ、これがカニ塚古墳の周濠跡に対応する反応と推測される。

探査から得られたレーダ波の周濠底までの走時は 25ns であった。探査後の発掘調査において、探査で推定した箇所でも周濠が発見された。周濠底までの深さは地表面より約 75cm であった。この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、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。

図5下に示した GPR-2 の探査結果では、測線距離 14~21m、深度約 0.7m までの領域に異常応答が認められた。この異常は GPR-1 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が認められた。これも濠と考えられるが、カニ塚古墳から約 35m はなれており、削平された尼塚古墳に伴う周濠であると推測した。

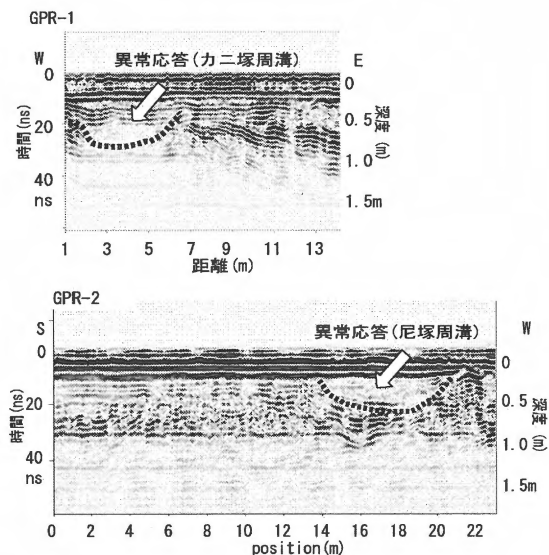


図5 カニ塚・尼塚古墳の両周濠を捉えた結果

3-2. 電気探査

以下では測線ごとの探査結果を示す。

3-2-1. ERT-1 測線

図6に比抵抗断面図を示している。水平距離5mまでの地表面付近に $150\Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗の領域が見られる。これは古墳の盛土を表している。水平距離6-13mの地表面付近には、船底形の低比抵抗の領域が認められ、周濠跡を示すと考える。また、2m以深の低比抵抗帯は地下水によって飽和されていると考えられる。

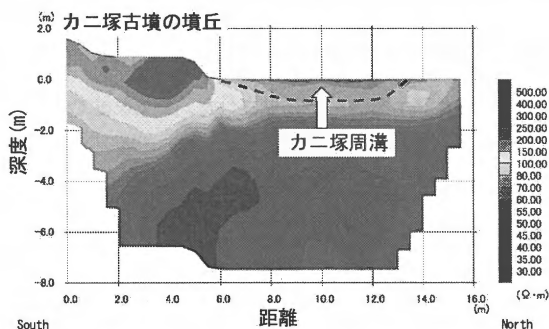


図6 ERT-1 測線における探査結果

3-2-2. ERT-2 測線

図7に比抵抗断面図を示している。水平距離9-15mの地表面付近に見られる $100\Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗域は、過去に盛土が掘削され、消滅した尼塚古墳跡と考えられる。水平距離5-8mには、船底形を示す比抵抗の領域が認められる、これは尼塚古墳に伴う周濠跡を表していると考えられる。

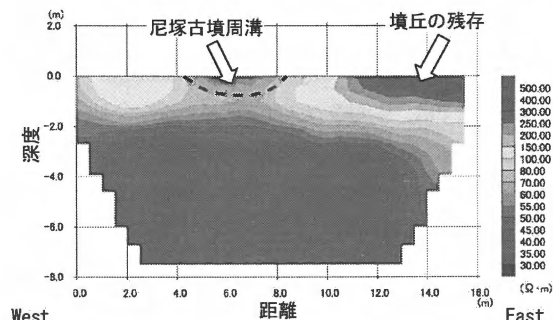


図7 ERT-2 測線における探査結果

3-2-3. ERT-3 測線

図8に比抵抗断面図を示している。水平距離22mまでの地表面付近に見られる $150\Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗域は、尼塚古墳跡と考えられる。古墳跡の高比抵抗域の中で水平距離12-16mに周囲より比抵抗値の低い部分が認められたが、現時点では遺構であるかどうかは不明である。水平距離22-31mには、船底形を示す低比抵抗の領域が認められ、周濠跡を表していると考えられる。

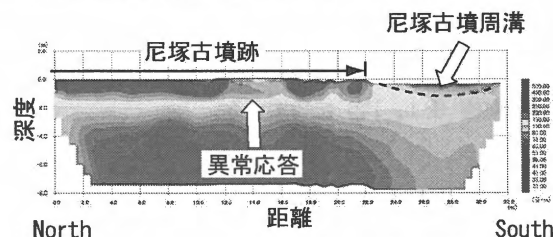


図8 ERT-3 測線における探査結果

4. 考察

4-1. GPR探査と高密度電気探査で捉えた古墳の異常

3本の測線で行った電気探査の結果は、地表面から約1mの深度までに、周濠跡と考えられる低比抵抗の異常を示している。異常の位置は、GPR探査による周濠の異常部よりやや広範囲となっている。この要因として、GPR探査に比べて、電気探査の分解能が低いことが考えられる。しかし、異常の位置は、両者ともほぼ一致しており、周濠を明確に捉えることができた結論する。

電気探査では、削平された尼塚古墳の墳丘跡が、高比抵抗の領域として認められた。カニ塚古墳の盛土も高比抵抗を示していることを考慮すると、この結果は、尼塚古墳の盛土が、完全には削平されずに残っていることを示す。

4-2. GPR 探査の Time slice による解析

全測線の探査データをもとに、Time slice 図による解析を行った。図9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(幅1-2m)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試掘調査により、探査で示した異常部分が周濠であると確認され、そして、探査から推定した墳丘は約38mの内径を持つとわかった。この結果、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番目の大きさを誇る古墳であることがわかり、県内では初めての2重周濠をもつ円墳の可能性も指摘できた。

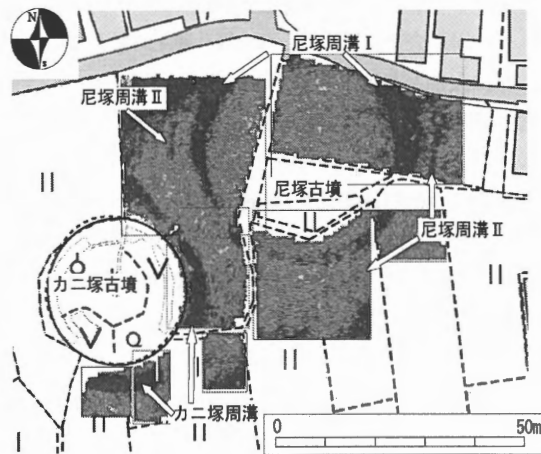


図9 深度約0.6-0.9m(走時20-30ns)におけるtime slice 図

4-3. 旧地形の傾斜

図9において、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に整地されているが、古墳の築造当時の地表面は、やや南側に傾斜していたためと考えられる。つまり、北側の方が遺構を埋める埋土が薄く、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られる。

4-4. 古墳の周濠がレーダ探査で鮮明に判別できた理由

GPR探査では、周濠は、反射の弱い領域として認められており、その要因は、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10(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。GPR探査では周濠内の埋土の比誘電率は均質であり、レーダ波が反射しなかったことが考えられた。この結果は、同時に、周濠の埋土は比誘電率が高く、レーダ波が減衰しやすい領域であったことも示している。

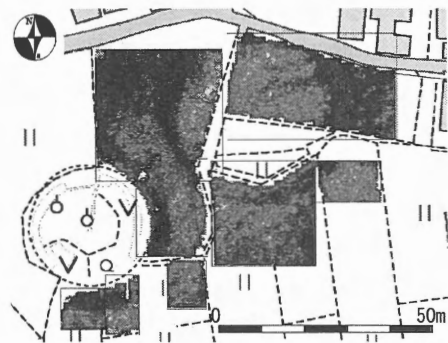


図10 深度約0.9-1.2m(走時30-40ns)におけるtime slice 図

電気探査では、周濠部は周囲に比べて低い抵抗値(40-80Ω・m)を示している。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。

しかし、富山市若王子塚の地中レーダ探査では、周濠部は周辺よりも反射が強い領域として認められている(岸田・酒井 2001)。周濠内の埋土の物性によってどのような異常応答が表れるかは様々であると考えられ、今後、研究例を増やして更に探査する必要がある。

5. まとめ

GPR探査と電気探査を用いて削平されて現状では確認が難しい古墳の復元を目的に研究した。徳島県の円墳を対象に両方の探査により、2つの円墳の周濠を明らかにすることが出来た。地表では痕跡が認められない尼塚古墳では、地下約1mまでの周濠が示され、特にGPR探査のTime sliceで明確に捉えられ、探査結果は、トレンチ調査でも確認された。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。

周濠が探査で異常として認められた理由を考察した。GPR探査で反射の弱い領域となったことは、周濠の埋土は、ほぼ均質で、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。電気探査では、周濠は低抵抗を示しており、GPR探査の異常部と整合している。また、探査結果は、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、削平された尼塚古墳でも盛土が残っていることも示していた。GPR探査と電気探査

の2種類の探査法を併用して調査することにより、探査で出現した異常応答の原因の検討も可能となり、結果の信頼性を上げることができた。

各地には、古墳を削って平らにしたことから名付けられたといわれる「平塚」や、かつての古墳群を示唆する「百塚」などの地名が多くある。この様な場所において、古墳の立地や形状を復元することは考古学研究にも重要であり、今後探査による調査の活用が望まれる。

謝辞

現地での調査において、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）には、ご指導、ご助力を賜った。新谷崇氏（株式会社村尾地研）には、電気探査についてご協力を頂いた。以上の方々に感謝申し上げます。

参考文献

足立和成, 中條利一郎, 西村康 編著 (1999) : 文化財探査の手法とその実際, 316p, 真陽社

物理探査学会 (2005) : 新版物理探査用語辞典, 279p, 愛智出版

Conyers, L. B. and D. Goodman (1997) : Ground-Penetrating Radar -An Introduction for Archaeologists, 232p, ALTAMIRA PRESS.

Edwards, W., M. Okita and D. Goodman (2000) : Investigation of a Subterranean Tomb in Miyazaki, Japan, *Archaeological Prospection*, 7, 215-224, John Wiley & Sons, Ltd.

Fujita, K. and O. Ikuta (2000) : Resistivity structure of the central part of the Yamasaki fault studied by the multiple electrodes resistivity method, *Earth Planets and Space*, 52, 567-571, The society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science.

Kamei, H., Y. Marukawa, H. Kudo, Y. Nishimura and M. Nakai (2000) : Geophysical Survey of Hirui-Otsuka Mounded Tomb in Ogaki, Japan, *Archaeological Prospection*, 7, 225-230, John Wiley & Sons, Ltd.

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第113, 99, 富山市教育委員会

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, 徳島県埋蔵文化財センタ

ー調査報告書第66集, 徳島県埋蔵文化財センター。

岸田 徹, 酒井英男 (2007) : 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, *考古学と自然科学*, 45-59, 日本文化財科学会。

Kishida, T. and H. Sakai (2006) : Study of *kofun* in Tokushima prefecture using ground penetrating radar and electric resistivity surveys: Reconstruction of the moat of the leveled mound, 15-24, *J. Archaeological Prospection Soc. Jap.*

西村 康 (1993) : 小山古墳・黒福古墳群の探査, 玉丘遺跡群II, 加西市埋蔵文化財調査報告, 15, 45-54, 加西市教育委員会

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第1冊, 53-64, 養老町教育委員会, 富山大学人文学部考古学研究室

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第2冊, 103-116, 養老町教育委員会, 富山大学人文学部考古学研究室

Tenri University Archaeological Prospection Team (2001) : Prospection of Graves Without Mounds Research, Report (Revised) 1997 — 2000 Grant-in-Aid for Scientific Research (B2), 309p, Tenri University Archaeological Prospection Team. 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第3集, 2-9, 徳島県埋蔵文化財センター。