

鉄砲山古墳の地中レーダ探査実験について

佐藤源之*・横田裕也**・西口正純・末木啓介

*東北大学東北アジア研究センター長

**東北大学東北アジア研究センター

はじめに

埼玉古墳群における地中レーダ探査は、昭和57年に丸墓山古墳と稻荷山古墳、平成10年に稻荷山古墳の墳頂部で、探査を行っている。結果については、良好な結果を得ることはできなかったことと業者の試験的な探査で行われたという事もあり、十分な検討はできず報告が内部資料として残されている。その後この2回のレーダ探査に立ち会った小川は、稻荷山古墳には、五つの埋葬施設が存在する可能性があると推測している（小川2003）。

埼玉古墳群で埋葬施設の調査が行われているのは、稻荷山古墳と將軍山古墳の2基であり、その他中の山古墳については伝承で、横穴式石室であろうと予想されている。稻荷山古墳については、第三の埋葬施設の存在が論議されていることから、平成18年度に策定した『史跡埼玉古墳群保存整備基本計画』の中で、2基以外の埋葬施設確認調査の必要性が盛り込まれている。その他の古墳については、史跡であることから埋葬施設の発掘調査には慎重であらねばならず、現状では発掘調査を行える状況にはない。そんな中で、平成21年3月に、東北大学東北アジア研究センターの全面的な協力で、「史跡埼玉古墳群の地中レーダ探査実験に関する共同研究」として奥の山古墳後円部墳頂において、墳丘を非破壊で行う従来のレーダ探査システムと精密な位置計測システムを組み合わせた3DGPRシステムで計測を行うことができた。

その結果、幅50cm、長さ2mの物体が2地点で検出されるなどの成果を上げることができ、データを検討した博物館の考古学的な評価として、未盗掘の箱式石棺であることが考えられるとした見解を出している（佐藤・井上2010）。今年度も前回に引き続き、東北大学東北アジア研究センターの協力により、整備が鉄砲山古墳に移行することとなったため、同古墳でレーダ探査を行うことになった。

また、探査地点は、鉄砲山古墳墳頂部とレーダ探査の結果と発掘調査の結果を比較できる地点を選んではどうかとの「史跡埼玉古墳群保存整備協議会」で意見があったことを受けて、今年度調査を行う前方部南東コーナーで行うこととした。

1 鉄砲山古墳の現状

鉄砲山古墳は、埼玉古墳群の中では、二子山古墳、稻荷山古墳に次ぐ3番目に大きな前方後円墳で、墳丘長109mである。南にある奥の山古墳に外堀が検出されたことで、整備事業が鉄砲山古墳の南側に及び、整備完成標高に段差が生じてしまうため「史跡埼玉古墳群保存整備協議会」で承認を得て、鉄砲山古墳の整備に取り掛かることとなった。鉄砲山古墳は、昭和54・58年に調査が行われ、

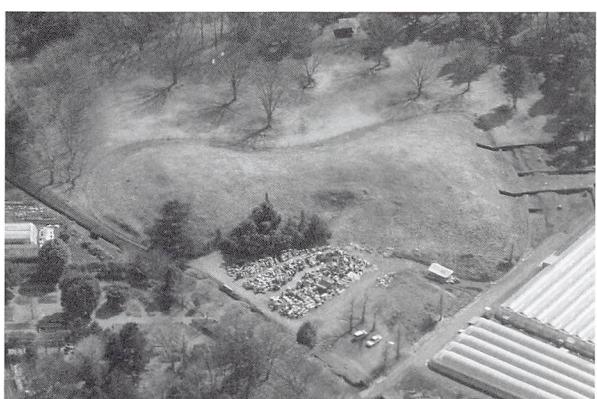


図1 鉄砲山古墳全景

古墳の東側・西側に二重周堀が存在することが知られている。さらに平成19・20年に行った奥の山古墳との関係を見るための調査では、周堀どうしの重複関係は確認されなかったが、鉄砲山古墳の中堤・内堀・外堀は奥の山古墳を避けたためか、古墳の東西で確認された中堤内・外堀に比べて幅が狭い設計となっている。

墳丘は、西側の括れ部付近が土取りされたよう
に抉れているほかは、墳形は比較的良く残ってい
る。一方後円部墳頂よりやや下がった部分には、
数箇所の窪地が認められることから、盗掘を受け
ている可能性が考えられる。

今回探査を実施した箇所は、前方部南東コ
ーナー部と墳頂部の2ヶ所である(図4)。

2 GPR 計測と結果

地中レーダ (Ground Penetrating Radar : 以下 GPR と略す) は 5 m 程度までの比較的浅い地層中を、短時間のデータ取得で高分解能に地下構造の可視化が可能な計測手法として遺跡調査にも応用が広がりつつある。GPR は電波の反射から地中構造を推定するが、電波が土壤中を伝搬するとき、主として水分によって減衰を受けるため検知深度には限界がある。一方、土壤の湿り具合や、土質変化による不均質性と、土壤に含まれる礫のような物体による電波の散乱により、可視化される物体の形状や位置には誤差を生じる。特に、細い物体や物体の隅の形状が明瞭に捉えきれない場合が多く見られる。また通常の GPR 計測では装置に取り付けた車輪の回転から移動距離を計測するため、平坦な地表面以外での計測が難しい。例えば古墳の墳丘部のような傾斜面での GPR 計測は以上のような理由から、ほとんど成功例が見られない。

こうした問題を解決する手法が 3 DGPR である。東北大学とマイアミ大学は共同で 3 DGPR 手法の開発を行い、各種の精密な GPR 計測への応用を試みてきた。3 DGPR は、GPR 装置にレーザ位置計測システムを併用することで、GPR アンテナの位置を数 mm の精度で計測し、これにより起伏がある地表面でも鮮明なレーダ画像を得る事を可能とするシステムである。我々は、2009年度に奥の山古墳頂上部で 3 DGPR を適用することでその実用性を示すことができた。

今回計測に使用した機材は、ほぼ昨年(2009)
の奥の山古墳と同一であるが、3種類の周波数の



図2 鉄砲山古墳括れ部現況



図3 鉄砲山古後円部墳頂現況

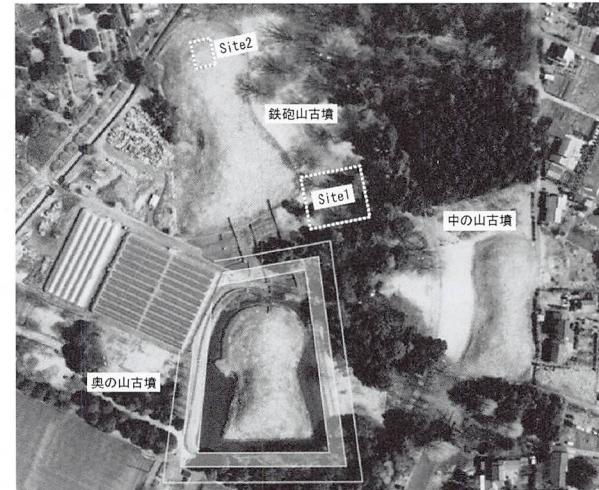


図4 計測地点
前方部南東コーナー部 (Site 1) と墳頂部 (Site 2)

GPR アンテナを利用し、結果を比較した。GPR に使用する電波の地中での減衰は周波数が高いほど強いため、深部計測が難しい。しかし周波数を下げるとき周波数帯域が狭くなるため、分解能が低下するので小さい対象物に対する焦点がぼけるような現象を避けられない。つまり GPR 計測では計測深度と計測分解能が周波数に対して相反する要素となっている。従って GPR 計測を行う上で、周波数の選択は計測対象物とその深度から慎重に選定する必要がある。

(1) 前方部南東コーナー部

本サイトは土壤が湿潤であること、また周堀遺構が深さ数mに及ぶことが予想されたため、100 MHz のアンテナを使用して計測を行った。図 6 に計測した代表的な GPR プロファイル（垂直断面図）を示す。地中に水平的な地層の境界面や、孤立した反射体が存在するとき、電波はその縁端部で回折されるため、GPR プロファイルでは図中に矢印で示す双曲線として現れる。双曲線の頂点を水平面上で結べば、反射を起こす物体の形状が確認できる。現場では GPR プロファイルを直ちに確認し、異常体の見られる地点にペグを打ちながら、異常体の連続して現れる方向を予想しながら計測を進めた。図 7 に GPR 計測から得られた推定反射体の構造を示す。

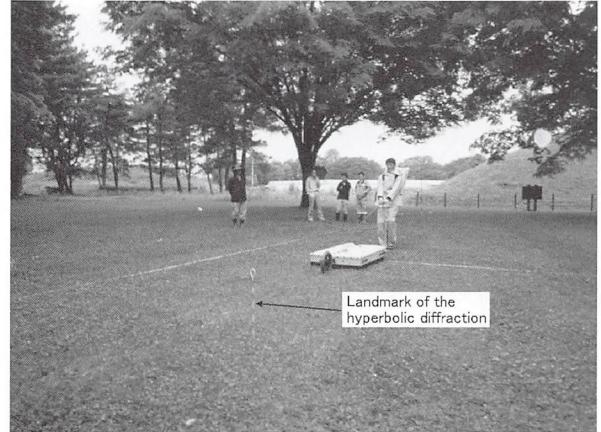


図 5 前方部南東コーナー部

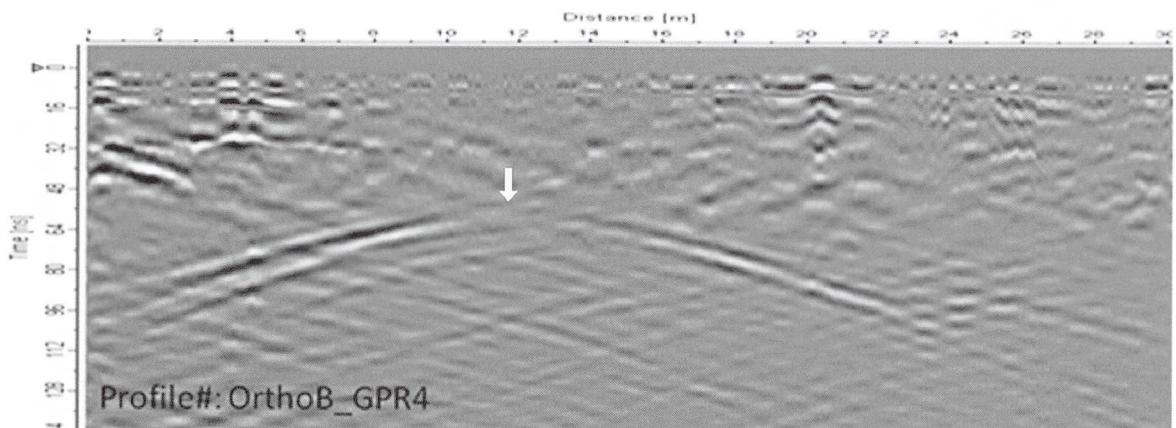


図 6 前方部南東コーナー部での GPR プロファイルの一例

矢印に双曲線頂点を示す。

横軸：距離 縦軸：時間（深度に対応）

(2) 墳頂部

墳頂部の計測は比較的平坦な区域を選んだが周端部は常に斜面にかかっていた。計測は100MHz、250MHz、500MHz のアンテナを利用したが、異なるアンテナによる計測でも同じ位置に異常体が見られており、明確に地下埋設構造の存在を示している。

図 8 に250MHz で計測した垂直断面図を示す。本図では深度約 6 mまでの範囲を示している。深度約 2 m と 4 m に、明瞭な双曲線状の反射波が捉えられている。

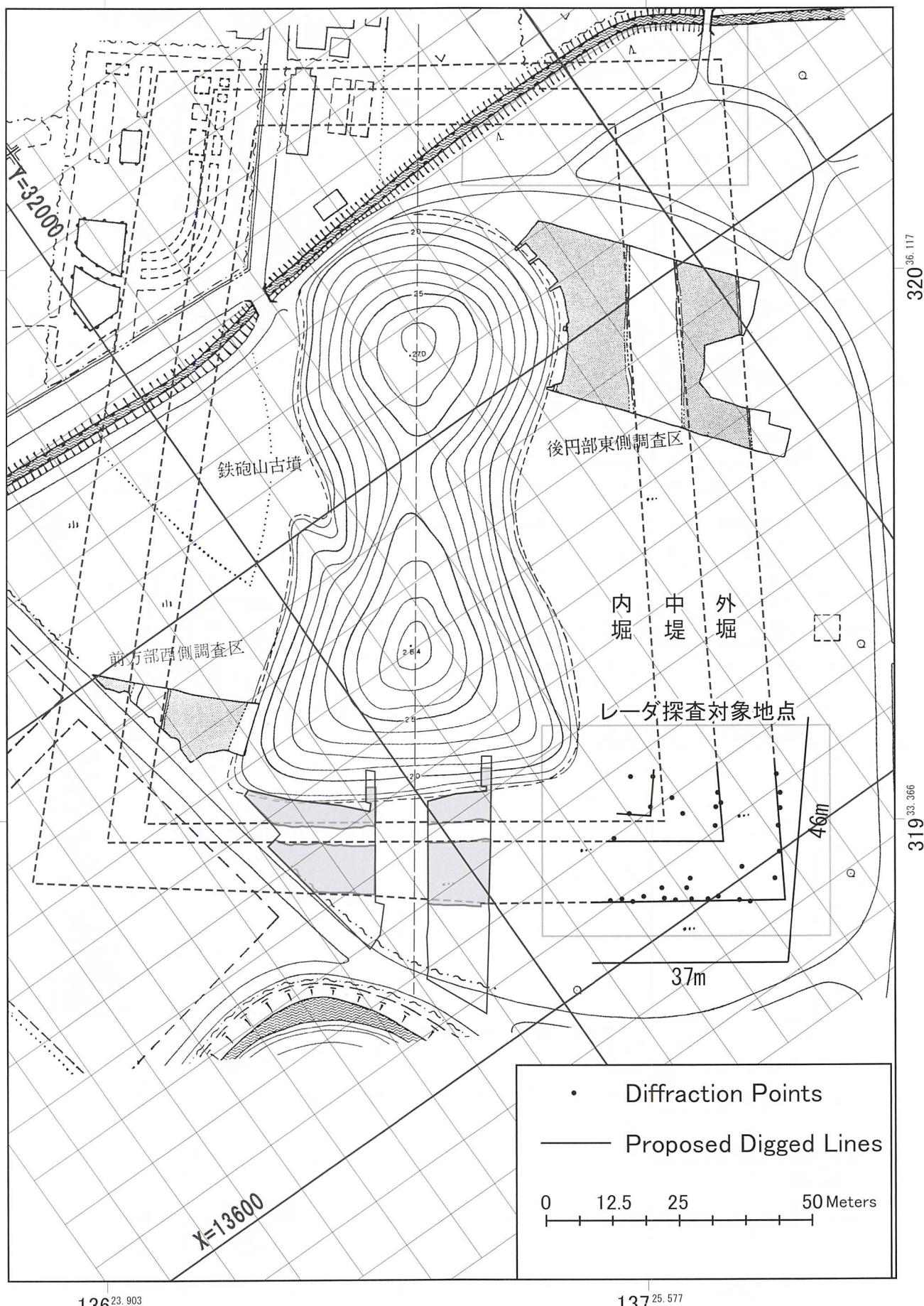


図7 GPR 計測から推定される反射体構造
点が双曲線の頂点位置を示す

図9に250MHzで3DGPRにより得られた水平断面図を示す。深度2.52mでは細長い形状の物体が確認できるのに対して深度3.93mでは1m四方程度の大きさを持つ物体が数個存在するようにも見える。

図10に、3DGPRで得られた信号にマイグレーション処理を施して得られた水平断面図を示す。マイグレーションは電磁波の回折効果を相殺し、本来の地下構造をより正確に再現するために利用される。

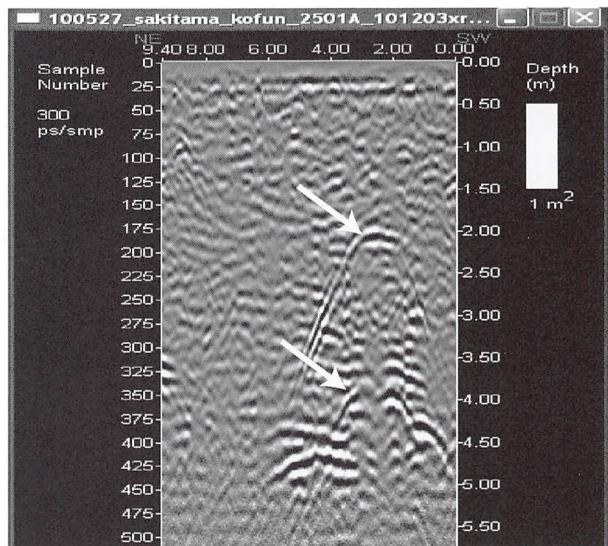


図8 墳頂部の垂直断面 (250MHz)

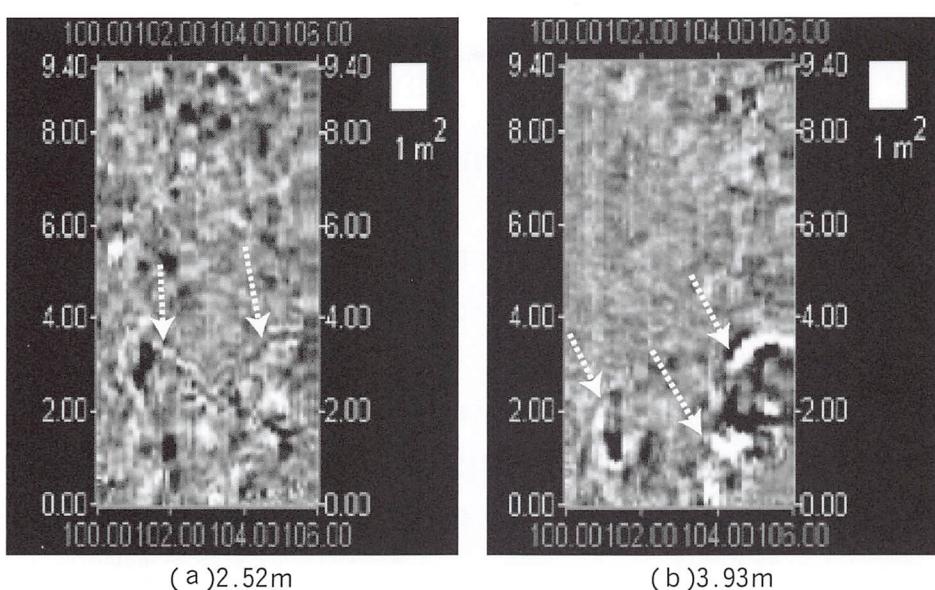


図9 3DGPRによる墳頂部の水平断面 (250MHz)

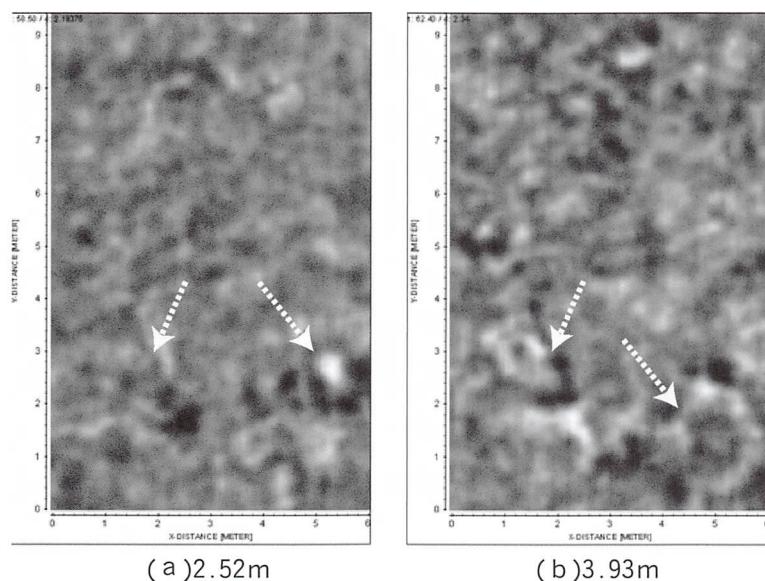


図10 マイグレーション処理後の墳頂部の水平断面 (250MHz)

3 計測結果の考古学的知見

前方部南東コーナー周堀部分のレーダ探査範囲（図7）は、今年度発掘調査の対象となっている箇所であり、レーダ探査と発掘調査の成果を比較検討することが可能となった。

鉄砲山古墳の周堀については、昭和54・58年度、平成20年度に発掘調査が行われており、図7に示したように復原プランが想定されている。

なお、鉄砲山古墳の周堀底の標高は昭和58年度調査によると約17.3m、平成20年度の調査によると約17.2mである。また、探査範囲を含め鉄砲山古墳周辺は、昭和40年代の公園整備により、現地表から50cmほどの深さまでは客土である。

今年度の発掘調査はレーダ探査終了後の7月6日から開始した。外堀、中堤、内堀の位置関係を把握するため、東西方向、南北方向に細長いトレンチを設定したほか、外堀と内堀のコーナーが想定される箇所にもトレンチを設定した（図11）。

レーダ探査結果によると特に外堀推定プランに対応する双曲線の頂点が地表から1m付近で検出されている（図6）。今年度の発掘調査の知見では、地表下1m前後でローム層となることから、ローム層に掘りこまれている遺構等に反応したものと考えられる。しかし、外堀の検出が予想された第1・2・3・4トレンチでは、ローム層検出面（標高約17.1m）まで近世以降の耕作、特に昭和初期の耕地整理などが及んでいて、外堀プランは検出できなかった。わずかに第1・2・4トレンチで外堀の覆土が検出され第2・4トレンチでは覆土内から埴輪がまとまって出土している。

双曲線の頂点は推定外堀プランに沿うようにプロットされている（図7）。第3・4トレンチでは、この部分でローム層を掘りこむ近代の耕作に伴う溝が検出され、地表下1mを越えると湧水する。レーダは土中の水分率の変化点に反応するという特性があることから、この溝をとらえたものと思われる（図11）。

また、内堀は第1・5トレンチで確認できたが、中堤側は内堀の肩を破壊するように近世の溝が並行して走っている。レーダ探査によるとこの部分でも双曲線の頂点が見られたが、これはこの溝に反応した可能性がある（図7、11）。

後円部墳頂部の探査では、墳頂より深度2mと4m付近で反応があった。深度2m付近の反応は、長さ約2～3mの棒状の反応でその周囲には構造物等の反応は無く、単体で埋まっているようである。材質は不明であり、遺構らしき反応も認められることから埋葬物あるいは副葬品との判断はできない。

深度4m付近では、大な石状の物体が同じ深さで4・5個ばらばらに反応している。これらは、

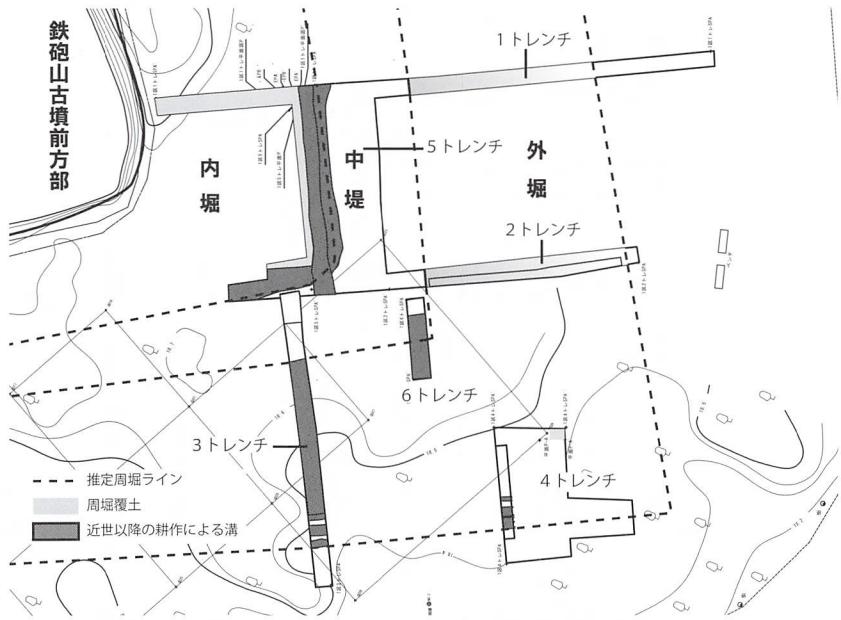


図11 前方部南東コーナー全体図

連續はせず単体で反応している。なお、四隅が反応する場合もあるという事であったが、現状では情報量が少なく構造物とは判断できない。

鉄砲山古墳の埋葬施設形態については、鉄砲山古墳に隣接して近い時期とされる瓦塚古墳において、横穴式石室の開口が予想される後円部墳丘東側が、かなり削平されていたにもかかわらず、石材の痕跡が見当たらないことから、鉄砲山古墳についても主体部は堅穴系の埋葬施設で、いまだ横穴式石室を採用していない可能性があると指摘がある(増田1995)。また、一方では横穴式石室であろうとする考えもあり、現状では判断が付いていない。

今回の探査では、墳頂下4mまでは均質な土で墳丘が構築されていることがわかり、奥の山古墳で見られたような反応は確認されていない。しかし4m付近では、比較的大きな物体の反応を得ていることから、埋葬施設の一部をかすっている可能性は否定できない。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(S)18106008ならびにJST戦略的国際科学技術協力推進事業(日米研究交流)「地中レーダ(GPR)による高精度地下3次元可視化」によるものである。3DGPR信号処理は佐藤研究室 Ahmed Gaberによるものである。

《引用・参考文献》

小川 良祐 2003 『ワカタケル大王とその時代』山川出版社

佐藤源之・井上尚明 2009 「奥の山古墳の地中レーダ探査実験について」『埼玉県立史跡の博物館紀要』第4号

増田 逸朗 1995 「北武藏における初期横穴式石室導入期の様相」『調査研究報告』第8号



鉄砲山古墳南東コーナー（レーダ探査箇所）

日誌抄

1 期 間 平成22年5月25日～28日

2 メンバー 東北大学東北アジア研究センター

佐藤源之・横田裕也・松本正芳・Ahmed Gaber

埼玉県立さきたま史跡の博物館

西口正純・末木啓介・佐藤康二

3 日 程 5月25日（午後）：鉄砲山古墳前方部南東コーナーで計測範囲の確認。

5月26日（終日）：鉄砲山古墳前方部南東コーナーでレーダ探査実験を行うが、途中
雨で中断。NHKの撮影取材があったが、撮影はできなかった。

5月27日（終日）：鉄砲山後円部墳頂のレーダ探査実験、同時にNHKにより撮影
取材。

5月27日（午前）：鉄砲山古墳前方部南東コーナーでレーダ探査実験。



器材の準備



前方部南東コーナー部の計測



NHK の取材撮影



後円部墳頂部の計測