

# 奥の山古墳の中レーダー探査実験について

佐藤源之\*・渡邊 学\*\*・井上尚明

\*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

これまで、埼玉古墳群の中で主体部の調査が実施された古墳は、稻荷山古墳と將軍山古墳の2古墳だけである。稻荷山古墳は、さきたま風土記の丘整備事業開始に伴い、將軍山古墳については、主体部を含む墳丘東側が崩落の危機に直面していたため、主体部の調査を実施している。稻荷山古墳には、金錯銘鉄剣など国宝が出土した礫櫛と粘土櫛の屋外展示模型が設置され、將軍山古墳の後円部東側にはカプセルを被せたような展示館が造られ、古墳の内部を見学できるような施設となっている。これ以外の古墳については、鉄砲山古墳が横穴式石室であろうなどの議論はされているが、確認されてはいない。

発掘調査を伴わない地下遺構確認方法の一つとして、レーダー探査などがある。埼玉古墳群におけるレーダーや電気探査については、昭和57年7月に稻荷山古墳と丸墓山古墳を、平成10年5月には稻荷山古墳の墳頂部を実施している。これらは何れも試験的なデモンストレーションであり、事業化し予算を伴ったものではない。その結果についても簡単な報告として、内部資料的な扱いとして残されているだけであり、客観的に内容の評価・分析を行ってはいない。当館では、平成18年度に『史跡埼玉古墳群保存整備基本計画』を策定し、各古墳の主体部の確認などを調査計画に挙げている。この計画に基づき新たな整備事業を開始して以来、毎年レーダー探査などの予算要求をしてきたが、実現するには至っていない。今回の探査実験も、館の独自事業として実施したものではなく、東北大学東北アジア研究センターの全面的な協力で、「史跡埼玉古墳群の中レーダー探査実験に関する共同研究」という形で実現できたものである。

なお、レーダーなどの地中探査については、「遺跡探査実態調査」(奈良国立文化財研究所2000)によれば埼玉県内では20ヶ所ほどが記載されている。この他にも鹿島古墳群や先にあげた丸墓山古墳で実施されており、20ヶ所中古墳が5ヶ所6回となっている。

## 1 奥の山古墳の現状

奥の山古墳は、埼玉古墳群では2番目に小さな前方後円墳で、『史跡埼玉古墳群保存整備基本計画』に基づき、新たな史跡整備に伴う最初の調査・整備の対象となった古墳である。その大きな理由は、周堀が水堀となっており、水位の上下によって汀線部分が抉られ崩落の危険があったことと、何よりも見学者への安全対策のためである。墳丘崩落防止工事と安全柵設置に先立ち遺構の保存状



図1 埼玉古墳群全景（南から：写真中央左下が奥の山古墳）

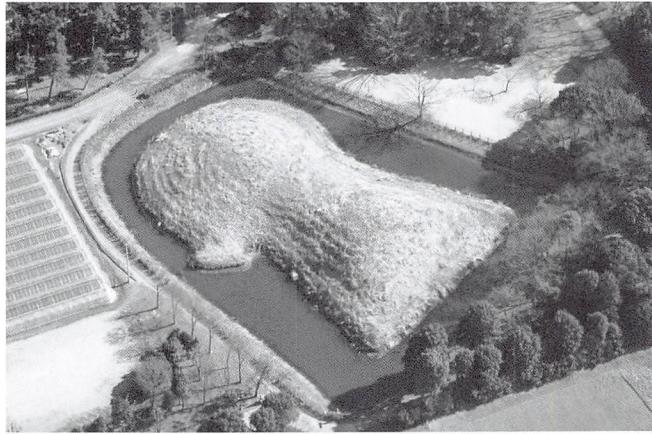


図2 奥の山古墳全景（南西から）

態を確認するため、平成19年度から発掘調査を開始したところ、新たに外堀が発見され、二重周堀の前方後円墳であることが確認できた。

奥の山古墳は、昭和43年に3本のトレンチ調査を実施し、44年度には周堀の整備を行っており、埼玉古墳群のなかでは唯一、一重で盾形の周堀を持つ前方後円墳として復原されている。現在公表されているデータは、墳丘の全長70m、後円部径30m、後円部高3.4m、

前方部幅30m、前方部高3.3mで、時期は6世紀中頃と考えられている。二子山古墳と同様に水堀にする目的で堀を掘削してしまったため(小川他2003)、堀には雨水と自然水位の上昇などで冬季の一時期を除き滯水している状態である。平成19年度からの発掘調査で、中堤を挟んで外堀を有する平面形も台形に近い長方形系統であることが判明し、珪藻分析などで常時滯水していないことなども確認された。これらの成果に基づき、21年度からは内堀を水堀から空堀へと修正し、外堀・中堤の復原整備を開始する計画で、整備の実施設計を行っている。21年9月、時期の確定や墳丘規模確認のため造出しや墳丘裾部の調査を実施しているが、これまでの認識と異なる情報も得られており、調査の進展を見つつ墳丘の整備についても検討していきたい。

埼玉古墳群では、二子山古墳のように後円部墳頂にクレーター状の大きな盗掘坑があつたり、丸墓山古墳のように墳頂部が平坦に削平されているなど、主体部の保存状態が危ぶまれる古墳が少なくない。奥の山古墳の北側にある鉄砲山古墳、東側の中の山古墳なども、後円部を中心に盗掘坑が確認できるのに対して、奥の山古墳は後円部だけではなく前方部にも大きな歪みはなく、大規模に

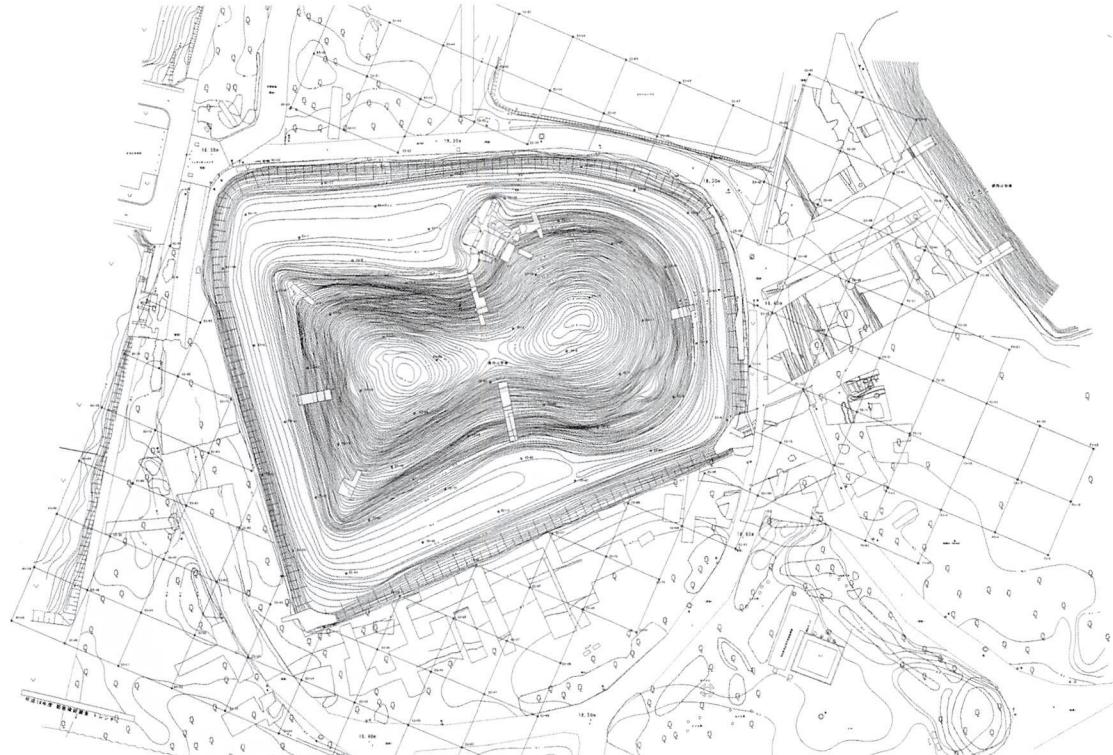


図3 奥の山古墳実測図

盗掘を受けていない可能性が高い古墳である。奥の山古墳を今回のレーダー探査の対象として選定したのは、①発掘調査中であった ②樹木などの障害物がない ③目立った盗掘坑がなく、主体部が存在する可能性が高いなどの理由によるものである。なお、稻荷山古墳や將軍山古墳の例から後円部を対象としたもので、前方部に主体部が存在する可能性を否定しているものではない。

## 2 地中レーダー (GPR) 探査の経過

地中レーダー (Ground Penetrating Radar : GPR) 探査は非開削で地下の様子を探る事が可能なため、我が国においても遺跡探査で使用される事例が増えている。しかし、従来の GPR システムを使った場合、埋設物の有無は判定できても、やや鮮明でない画像のためレーダー画像から対象物の形を推定することが難しい場合がみられた。GPR 画像が鮮明でない原因のひとつは電波を送受信するアンテナの位置が不安定であることが挙げられる。従来の方法では、測定対象領域に数cm～数十cmおきに平行な測線を巻き尺などで設定し、その上をアンテナを移動させながらデータを取得していた。しかしこの方法では地表面に起伏がある場合などにアンテナ移動位置に誤差が生じることに加え、測定時間が長くなっていた。また、古墳の頂上部のような高低差のある地形では測線の設定そのものが難しく、測定例は限られていた。

我々の研究グループはマイアミ大学 Grasmueck 博士らと共同で、3 次元地中レーダーシステム (3DGPR) の応用研究を進めてきた。3DGPR は、従来のレーダー探査システムにレーザーを用いた位置計測システムを用いることで、アンテナの位置を数mmの精度で得る事を可能にし、これにより位置精度が格段に向上するため起伏がある地表面でも鮮明なレーダー画像を得る事に成功している。今回は 3DGPR システムを奥の山古墳頂上部で利用することを試みた。

## 3 GPR 計測と結果

図 4 に計測を行った奥の山古墳頂上部を示す。計測範囲での高低差は 1 m程度であり、通常の測線の設定では大きな位置誤差が予想される。奥の山古墳では、5 m × 9 m の範囲で 500MHz, 250 MHz, 100MHz の中心周波数をもつアンテナを用いた 3 回の GPR 計測を行った。一般に、低い周波数を使用すると深い深度の物体を計測できるのに対し、画像の分解能<sup>(1)</sup> はやや低下する。高い周波数では画像分解能は高まるが深い位置の計測が難しい。そのために、今回は 3 種類の周波数のアンテナを利用して、計測結果を比較することとした。また、初めて計測を行う場所では、土壤の電気的特性が未知であるため、いくつかの周波数を利用した計測を行い、最適の周波数を選択することが、非常に大切である。

3DGPR 実験を行った場所と座標の定義を図 5 に示す。アンテナを走査した方向を Y、それと直角方向を X と定義する。また奥の山古墳の測定の様子を図 6 に示す。図中で三脚に取り付けられている装置が、GPR アンテナ位置を正確に計測するためのレーザー送信器で、探査範囲を見渡せる位置に 2 台設置してある。また、操



図 4 奥の山古墳頂上部での計測の状況

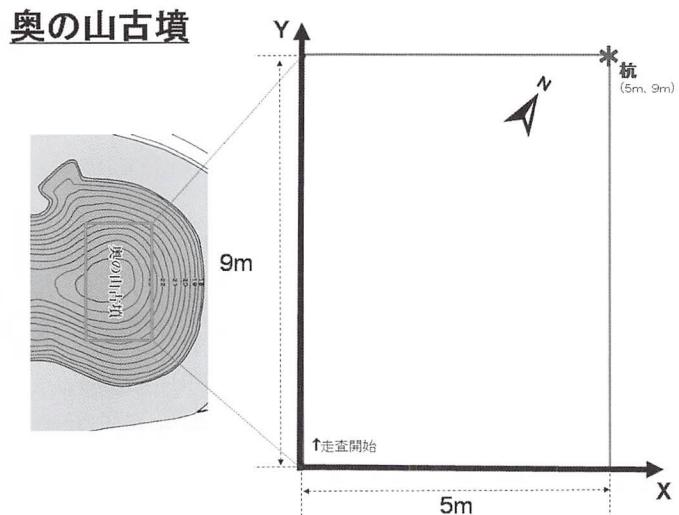


図5 奥の山古墳平面図面



図6 3DGRP用レーザー送信機と  
GPRアンテナ(100MHz)



図7 3DGPR用受信器を装着した  
GPR受信アンテナ(250MHz)

作者が牽引している装置が100MHzのGPRアンテナで、この上にレーザー受信装置が取り付けられている。レーザーの送受信で得られた位置情報とレーダーで取得されたデータは、無線LAN経由で離れた場所に固定して設置したパソコンに送られ、アンテナの位置とGPRデータが記録される。

#### 4 探査結果の評価

(1) GPRのデータ解釈にはいくつか注意すべき点がある。電波は光に比べてより回折効果<sup>(2)</sup>が強いため、地中物体の形状を明確に映し出すことはできない。そのため、画像には常に実際の形状より広がりがある。一方、GPRで捉えられた物体の材質や状態をレーダーのデータだけから正確に推定することは難しい。更に、土壤には水分が不均質に含まれるが、電波はこうした水分が不均質に分布する境界からも反射を受けるため、埋設物が実際には無い位置に虚像が現れることもある。

しかし、一般的には古墳のような人工的に土が盛られた比較的均質な土壤の場合、レーダーで捉えられる画像は土壤とは異なる天然の玉石、人工的に埋設された石材、木材、あるいは陶磁器などである可能性が高い。

100MHz, 250MHz, 500MHzの周波数のアンテナを用いて得られたGPRデータを処理した画像(GPRプロファイル)を図8-10に示す。GPRのデータはアンテナを地表面で2次元的に走査しながら、それぞれの位置で垂直方向に地下の様子を捉えている。従って、取得したデータを統合する

と地下の3次元情報が得られる。そのうえで、3DGPRでは選択した任意の深度のデータを平面図として表示できる。この図は特定深度の地下水水平断面図とみることができる。ただし土中の電波速度0.075m/nsecを仮定して深度を算定したが、実際には土壤水分率によって電波の速度は変化するため、図に示した深度は10—20%程度の誤差を含んでいる。

図8では深度1.6—1.9m付近の水平断面図を示している。横向きに広がる幅50cm(Y方向)、長さ2m(X方向)ほどの長方形の物体が100MHzのデータ(X=103, Y=6)に表れており、250MHz, 500MHzでも同一地点に影が見える。長方形の長軸はほぼ東西に沿っており、奥の山古墳全体の長軸からはやや傾いている。この物体は深度方向に50cm程度の広がりを持っている。GPR波形から、この物体の材質や性状を正確に推定することは難しいが、形状や大きさから、築山に含まれる土壤ではなく、何らかの構造物があると考える方が自然である。ただし、これが石室であるとか、内部が空洞か土に埋もれているかなどの推定については、今回測定した情報からだけでは判断は難しい。

またそのやや上方(X=101, Y=8)に、孤立した点のような異常体が見られる。これは、玉石のような孤立した、直径30cm程度の物体からの反射波であると推定する。

図9は深度2m付近の水平断面図であるが、3つの周波数に共通した位置(X=102, Y=7)に点状の異常物が見える。この物体は、やはり玉石のような円い形状をしているが、やや大きく、直径50cm程度かもしれない。材質は天然の石か、人為的に埋設された何らかの物体であるかの識別はこのままでは難しい。

更に図10に深度3m程度の水平図を示すが、500MHzを除き、横向きに広がる幅50cm、長さ2mほどの異常体が(X=102, Y=2)確認できる。この物体も長方形であり、深度2.5mから3m付近に存在している。この物体は奥の山古墳全体の長軸にほぼ沿って存在している。

(2)これまで見てきたように、探査の結果いくつかの物体の反応が現れており、現状でこれらを考古学的にどのように解釈可能かについて触れてみたい。仮に、図8の直径30cm程度の物体をA、同図の幅50cm、長さ2mの長方形の物体をB、図9の直径50cmほどのものをC、図10の幅50cm、長さ

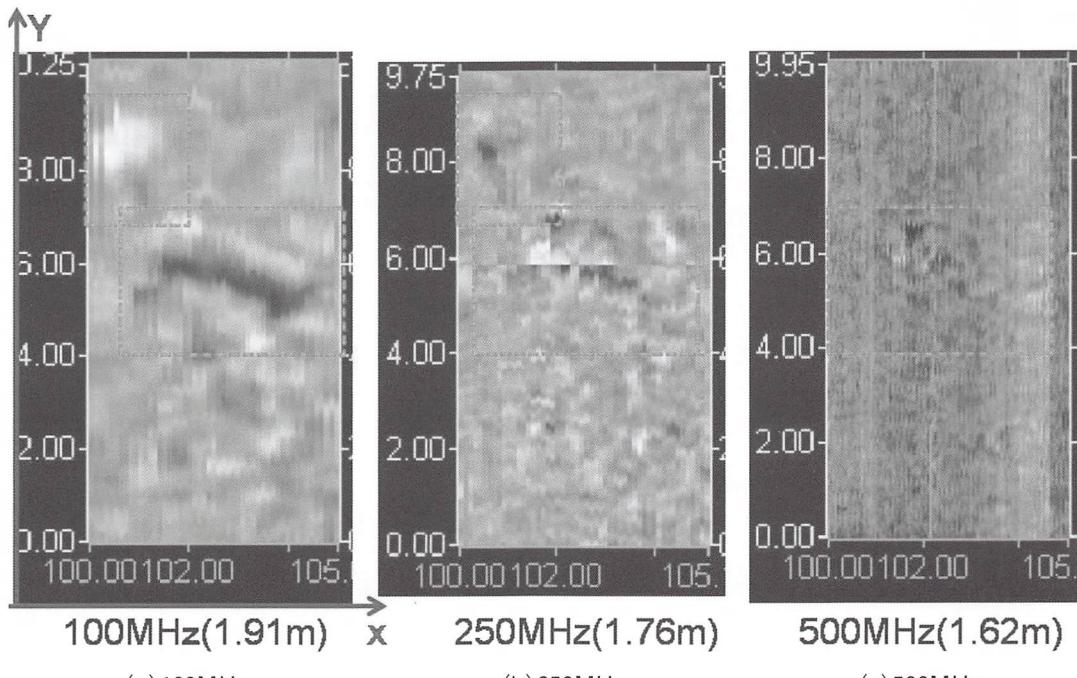


図8 奥の山古墳水平スライスイメージ（深さ～1.8m）

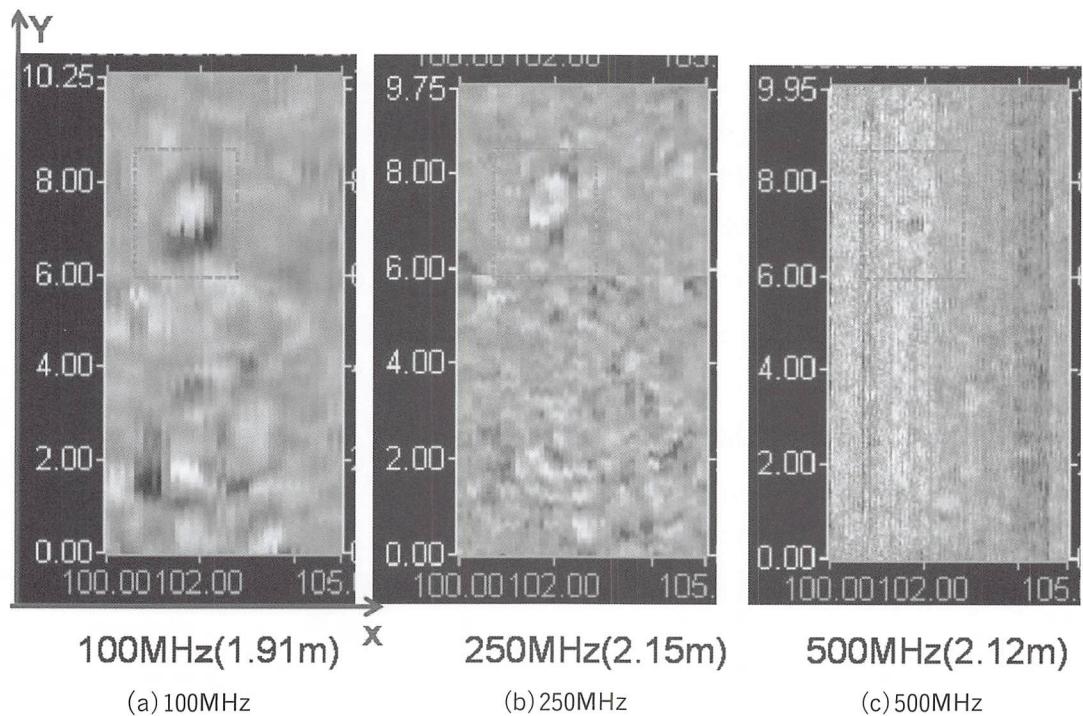


図9 奥の山古墳水平スライスイメージ (深さ～2 m)

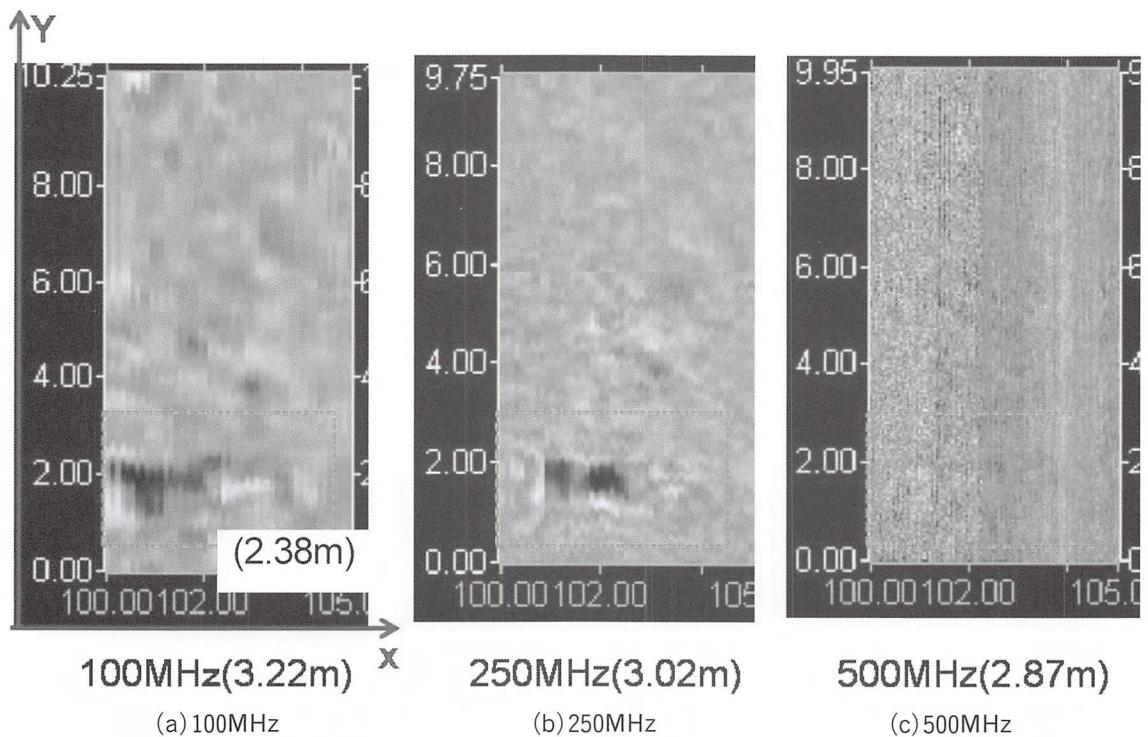


図10 奥の山古墳水平スライスイメージ (深さ～3 m)

2 m程の長方形の物体をDとしておく。AとCについては、両者とも玉石状の円形の形状であるが、遺物であるかを含め石かどうかの識別はできない。これに対して、BとDは幅50cm・長さ2 mと同程度の規模で、Bについては深度方向の広がりも50cm程度と判明している。つまり、長さ2 mで幅と高さが50cmの箱状の物体であることが想定されるのである。Bは後円部墳丘中央部から1.6—1.9 mの深さであり、古墳主軸ラインの北西で長軸は東西に近い方向を示している。これに対してDは、深さ2.5—3 mとやや深い位置にあり、ほぼ古墳主軸と平行する墳丘頂部南東側で確認されている。両者は位置・深度・主軸ともに異なっているが、墳丘主軸線上でないことは共通している。

これら4点の物体について、AとCに関してはいくつかの想定は可能であるが、推測に推測を重ねる結果になるので、ここではBとDについて類例と比較してみたい。BとDの映像を見た時、最も規模・構造ともに近い遺構として、周囲にこれを取り巻く反応もないことから、石室内部に安置されるタイプではない箱式石棺ではないかと考えた。行田市内では小見真觀寺古墳・小針鎧塚古墳・大日塚古墳で箱式石棺が発見あるいは存在が想定されているが、小見真觀寺古墳の第1主体部は複室構造の横穴式石室で、玄室床面に4本の溝があることから、箱式石棺を安置したと想定している。第2主体部については、横口式石槨か横穴式石室の特異な一形態と考えられていたが、緑泥片岩を組合せた箱式石棺とされ、長さ2.8m×幅1.76m×高さ1.12mである。小針鎧塚古墳では、6世紀中ころの胴張りのある横穴式石室内に石棺が安置されていた。大日塚古墳は、埼玉古墳群の西に隣接する佐間古墳群にあり、内径22mの円墳で2基の粘土槨とその下方30cmで1基の箱式石棺が発見された。長さ1.8m×最大幅50cmで厚さ5~7cmの緑泥片岩を使用している。報告書(斎藤1978)では時期的には6世紀前半としている。現深谷市の小前田古墳群では、5基の箱式石棺が調査されているが、明確な墳丘を伴うものではなく、同様な構造の埴輪棺も発見されている。古墳の周堀であるなら、2基の箱式石棺を主体とするであろう周堀状遺構も検出されているが、可能性として止めている(瀧瀬1986)。石棺のプランは橜円形と長方形、石材は河原石や砂利・片岩を使用し、規模も棺部の最大が長さ1.96m×幅0.42mの5号石棺から、長さ0.9m×幅0.38mの2号石棺まで多様である。

これらの他に、現本庄市生野山將軍塚古墳では、墳裾に長さ1.65m×幅0.25mの緑泥片岩の石棺が発見されており、5世紀中葉とされている。また、滑川町糟沢古墳では、開墾時に墳丘のない部分で長さ1.8m×幅0.4mの規模の箱式石棺が確認されている。川島町大塚古墳の箱式石棺は、現在は町指定文化財となって川島中学に保管されているが、江戸時代に墳丘が削平された際に発見されたもので、長さ2.32m×幅0.8m×高さ0.55mで、蓋石も一枚石である。6世紀中ころとされている。滑川町屋田7号墳・同寺前2号墳・秩父市原谷村古墳・騎西町小沼耕地1号墳などでも箱式石棺の可能性を指摘されているが、石材片の存在からの間接的な指摘である。滑川町の松原古墳もその一つであるが、他の多くの古墳が緑泥片岩を使用している中で、凝灰岩による組合せ石棺という特徴がある(塩野2004)。

以上、今回の探査実験結果と考古学的知見の2層をレイヤーしてみた時、奥の山古墳の後円部には2基の箱式石棺が存在する可能性がある。これまで見てきた他の箱式石棺の規模・構造・時期と

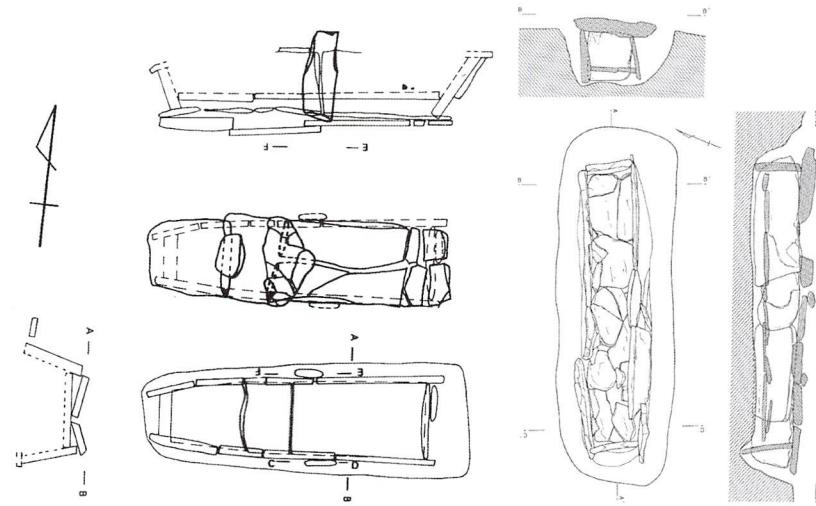


図11 大日塚古墳

も齟齬は見られず、稻荷山古墳の粘土槨や礫槨と將軍山古墳の横穴式石室とも異なる主体部構造が奥の山古墳にはあったのではないか。誤差を想定すれば木棺直葬や粘土槨・礫槨あるいは舟形石棺等も考えられるが、現段階での考古学的評価として上げておく。前方後円墳との組合せの問題などは、報告書で考察したい。

なお、奥の山古墳は整備途中であり、ここでは位置図の掲載などは控えておきたい。

## おわりに

今回の探査実験について、「史跡埼玉古墳群保存整備協議会」で報告したところ、委員から主体部探査も重要であるが、レーダー探査の結果と発掘調査の結果を比較検討できる地点を選定したらどうかとの意見があった。主体部発掘調査の可能性については、これまでの文化庁との調整や現状の財政状況からは厳しいと言わざるを得ない。今回の実験結果を、すぐに発掘調査によって検証することは難しいのが現実である。東北大学東北アジア研究センターとの打ち合わせでは、今回のような探査実験は継続して実施することで合意しており、今後の探査地点選定については協議会での意見も反映しながら、両者で協議して決定していくと考えている。埼玉古墳群の発掘調査と整備は長期的な継続事業であり、マクロとミクロ両面からの視野と計画の中で、共同研究に相応しい有効な方法で実験を継続していきたい。

なお、今回行った実験では、奥の山古墳の他に稻荷山古墳後円部墳頂も対象とした。稻荷山古墳後円部では、礫構造と粘土構造の2基の主体部が確認されているが、第3の主体部の存在については、これまでにも何度か指摘されており（増田1999・大塚他2001・小川他2003・若松2007）、埼玉古墳群の解明ばかりでなく、日本古代史・東アジア古代史においても重要な問題として注目されている。特に小川は、前述した2回のレーダー探査の情報を初めて紹介し、5つの埋葬施設が存在する可能性を示唆している。残念ながら、今回の実験では時間的な制約や機器の調整、あるいは多くの見学者が通過するたびに作業を休止しなければならないなど、条件が整わず充分な探査ができなかった。500MHzのみの実験であったが、人工物と思われる物体からの反射を確認しており、今後も実験対象として俎上に上げたいと考えている。

最後になったが、探査機材の運搬や機器の牽引は重労働である。3月とはいえ日差しの強い3日間にわたり、重い機材を担いで墳丘や階段を何度も往復し、日影のない中での作業となった。感謝するとともに、佐藤教授をはじめとするセンターのメンバーのご苦労に報いるよう、実験成果を活用していきたい。また、差し入れなどを頂いた地域の方々にも併せてお礼を述べたい。

## 謝辞

本研究の一部はJST戦略的国際科学技術協力推進事業「地中レーダー(GPR)による高精度地下3次元可視化」によるものである。

### 《註》

- (1) 画像分解能：レーダー画像は回折効果でピントがぼやけたようになる。画像の上で2つの物体を識別できる最小の大きさを画像分解能と定義する。
- (2) 回折効果：電波の波長が物体の大きさより長い場合、反射した電波が直進せず折れ曲がる効果。

### 《引用・参考文献》

- 大塚初重他 2001 『稻荷山古墳の鉄剣を見直す』学生社  
小川良祐他 2003 『ワカタケル大王とその時代』山川出版社  
斎藤国夫他 1978 『大日種子板石塔婆および古墳の調査』行田市教育委員会  
塩野 博 2004 『埼玉の古墳』さきたま出版会  
瀧瀬 芳之 1986 『小前田古墳群』(財)埼玉県埋蔵文化財調査事業団  
奈良国立文化財研究所 2000 『埋蔵文化財ニュース98—遺跡探査実態調査—』  
増田 逸朗 1999 「辛亥銘鉄剣と武藏国造」『国学院大学考古学資料館紀要15』  
若松良一他 2007 『武藏埼玉 稲荷山古墳』埼玉県教育委員会

## 日誌抄

1 期 間 平成21年3月17日～19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・渡邊 学・趙 維俊・劉 海・村谷直紀

埼玉県立さきたま史跡の博物館：  
井上尚明

3 日 程 3月17日（午後）：奥の山古墳の現状確認と打合せ  
3月18日（終日）：奥の山古墳後円部墳頂のレーダー探査実験  
3月19日（午前）：稻荷山古墳後円部墳頂のレーダー探査実験



機材の準備・点検



墳丘での機器セッティング状況



準備完了・探査開始



メジャーに沿って装置を移動していく



稻荷山古墳後円部での探査実験風景



パソコンなどの機器を背負い装置を牽引する