

遺跡調査への物理探査の適用

坂山利彦・長田正樹・島 裕雅

Applicability of Geophysical Surveys for Archaeological Investigations

Toshihiko SAKAYAMA, Masaki OSADA and Hiromasa SHIMA

Abstract

Archaeological sites from the Stone Age exist all around Japan. These sites are important for understanding history and culture of Japan.

These sites, of which there are many different kinds, include ancient dwellings, burial mounds, kitchen middens, castle remains, etc.

Due to expansion of residential and industrial areas, artificial reworking of land, road construction, or improvement of farmland, these sites are being lost every year. Civil engineering work of this kind also offers opportunities for conducting archaeological investigations before the work begins.

In archaeological investigations, excavation is the main method used to identify the contents of sites. However, for the sake of economy and efficiency, it is desirable to conduct geophysical prospecting before excavation, to identify distribution of the archaeological remains.

The way in which archaeological remains are buried, or conditions of the site vary from case to case. Therefore, in order to apply geophysical prospecting, it is necessary to have an adequate understanding of these conditions beforehand.

This paper cites actual example to consider the application of geophysical prospecting to archaeological investigations, investigations of ancient dwelling sites using ground probing radar, investigation of kitchen middens using ground probing radar and resistivity surveys, investigations for bronze artifacts by the electromagnetic method and investigations for kilns, using magnetometry.

① Investigation of Pit Dwellings with Ground Probing Radar

The Kuroimine site, in Komochi Village (Gunma Prefecture) contains the remains of a village, approximately 1,400 years old, buried beneath a voluminous pumice layer. In order to determine the distribution of pit dwellings buried underneath a pumice layer approximately 80,000m² of ground (Fig. 1). The old ground surface beneath the pumice layer showed up clearly, so that it was possible to identify the pit dwelling in a depression in the old ground surface (Fig. 3 and 5).

The results of the exploration showed ancient dwellings in 92 places within the area of investigation (Fig. 5). After the exploration, part of the region investigated was excavated, and these results corresponded well with those from the ground probing radar investigation (Fig. 6).

② Investigation of Kitchen Middens by Resistivity Surveys and Ground Probing Radar

The Mizuko site, in Fujimi City (Saitama prefecture) is an archaeological site of Pre-Jomon kitchen middens. In order to investigate a midden layer buried at this site by geophysical

prospecting, and experimental investigation, using ground probing radar and a resistivity survey of a 30m×40m area was conducted (Fig. 7). The results clearly showed a buried midden layer, strongly reflective of the electromagnetic waves (Fig. 8). Also, a resistivity survey from the surface showed that the soil surrounding the points where the midden layer exists are relatively low in resistivity (Fig. 9).

In order to obtain the state of resistivity distribution on detail of the soil layers of the ground, which include a midden layer, electrode cone penetration resistivity sounding was conducted at 1m intervals along a measuring line that horizontally cut the midden layer. It was found that resistivity in the ground is very high, but it is low in the soil around the midden layer (Fig. 10). The cause of this may be calcium ions from the midden layer blending into the soil.

The results from resistivity mapping and resistivity sounding may be displayed 3 dimensionally as an easily understandable expression of the soil layer structure, which includes the midden layer (Fig. 11).

③ Exploration for Bronze Artifacts by the Electromagnetic Method

The Kojindani site (Hikawa Cho, Shimane Prefecture) is a famous archaeological site at which 358 mid-Yayoi period bronze swords ("Douken") were discovered together. There is a possibility that other bronze relics are still buried at this site. Therefore, an investigation by the electromagnetic method was conducted. A range of approximately 3500m² was investigated in the area around the place where the bronze swords were discovered. Of the places where positive metal reactions were shown, two were selected for excavation (Fig. 14). At one of these places, (Point A), several bronze relics ("Doutaku" and "Douhoko") were unearthed (photograph). A detailed investigation provided correct, detailed information on the range in which bronze artifacts are distributed (Fig. 15).

④ Investigation of kiln Relics by the Magnetometry

The archaeological remains of the Inagi site were discovered at the top of one of a series of hills connected to the Daimaru site (Inagi City, Tokyo). The remains of Nara period kilns were discovered here.

The explorations for objectives such as these kiln relics, it is effective to look for geomagnetic anomalies produced by thermal residual magnetism. For that purpose, the magnetic survey was applied. An area of approximately 40,000m² was investigated along the northern and eastern slopes of the hill (Fig. 16). 10 places containing geomagnetic anomalies were thus detected (Fig. 17). These strongly geomagnetic anomalies located at relatively shallow depths. It was thought that some of may have been kiln relics.

After the investigation, the entire area was thoroughly excavated, and 4 kiln relics were unearthed, thus confirming the close correspondence between geomagnetic anomalies and relics of this type (Fig. 18). Areas of geomagnetic anomalies where kilns relics were not discovered were confirmed to have burned earth or vessels for making charcoal.

1 まえがき

日本の各地には、石器時代からの埋蔵遺跡が数多く散在しており、これらの埋蔵遺跡は日本の歴史や文化の発展などを解明する上で重要なものとなっている。

埋蔵遺跡といわれるものには、貝塚、住居跡、古墳、都城跡などの他に、遺物散布地、遺物包含地などが含まれ、その種類や規模は多種多様である。また、これらの遺跡に埋蔵されている土器、石器、金属器などは埋蔵遺物といわれている。遺跡の保存と保護を目的として昭和

25年に制定された文化財保護法では、これらの埋蔵遺跡と埋蔵遺物との両者を合わせて埋蔵文化財としている。

最近では、このような埋蔵文化財を包蔵する土地に対して、宅地や工場用地の造成、道路の建設、農地の改良などによって土地の開発が行われ、このために、土木工事などに先立って埋蔵遺跡を調査する機会が多くなってきた。また、重要な埋蔵遺跡については、史跡あるいは特別史跡に指定し、その土地を公有化するなどの措置を行って、その環境を積極的に整備し、これらの文化的遺産を破壊せずに保存しようとする計画も増えている。

このような遺跡調査では、学術的な成果をあげることが目的とした発掘調査が主体となっているが、遺跡保存の立場から、発掘調査を経済的、効果的に進め、遺跡の分布状態を知るために、非破壊的な手法による事前調査が行われるようになってきた。

このような非破壊調査に対して、物理探査法の利用が考えられ、その適用もいくつか試みられている。本論文では、遺跡調査に対する物理探査法の適用性について考察し、物理探査による遺跡調査の実施例を示す。

2 遺跡調査における物理探査法の利用の現状

遺跡調査は、通常その調査の内容によって分布調査、予備調査および発掘調査の3つの段階に分けられている(文化庁文化財保護部, 1966)。

分布調査は、主として地表踏査によって地表面を観察し、地表面の不自然な凹凸、遺物の散布あるいは包含層の露頭などから埋蔵遺跡の徴証を見付け出し、その分布を調査するものである。そして、古文書、古地図、土地利用図、航空写真などの判読も遺跡分布の推定に利用されている。各都道府県の遺跡台帖はこのような分布調査の結果に基づいて作成されている。

予備調査は、本格的な発掘調査を行う前に実施されるもので、測量、トレンチ、ボーリング(差し込み棒)、電気探査などによって行われる。この調査によって、遺跡の埋蔵深度やその分布状況を把握するとともに、遺跡の地区割り、発掘区域の設定、発掘費の積算などのような発掘計画を立てる際の基礎資料として利用される。

発掘調査は、遺跡の学術的内容を明らかにするための調査であり、その調査内容は細かく記録され、文献記録として保存される。発掘調査は学術的な成果を上げることが目的としているが、その動機によって学術発掘調査と緊急発掘調査に分けられている。現状では大規模な国土開発に伴う緊急発掘調査がその大半を占めている。

遺跡調査において、物理探査は予備調査として位置付けられ、電気探査が比較的良好に利用されている。すなわち、地盤の比抵抗が土質によって異なるため、古墳の周濠、石室、水路跡などのような規模の大きい遺構の検出に有効とされている。

最近における遺跡調査に対する物理探査の適用としては、田中、西村、岩本(1978)および西村(1980)は、土器や瓦を焼いた窯跡が熱残留磁気を帯びているため、地磁気の局所的な異常として捉えられると考え、2台のプロント磁力計を連動して用いて精度の高い測定を実施することによって、かなりの確度で窯跡を探知し得るこ

を報告している。

また、原、坂山(1983)および坂山、長田、原(1984)は、電磁波を使った地下レーダーによって、地下に埋蔵されている竪穴住居跡や古墳の墳丘を探索した事例を報告しており、最近では、遺跡調査に対して、地下レーダーの積極的な利用がなされている(井上、石井, 1986; Imai, Sakayama and Kanemori 1987)。

1984年にアメリカのアトランタで開催された第54回のS. E. G. Annual International Meetingにおいては、Archaeological Geophysics Sessionが設けられ、磁気探査による玄武岩質石碑の探索(Breiner)、屈折法地震探査および電気探査による旧海岸線の調査(Woods and Krentz)、地下レーダーによる建造物基礎の探索(Vaughan)、電磁探査による青銅器の探索(Tabbagh)などが報告されている。最近では、より高分解能、高密度のデータ収録と表示によって探査精度を向上させるための工夫が行われている。Scollar, Weidner and Segeth(1986)は、高密度に測定した磁気データのコンピューター処理とその表示法について検討している。また、Clark(1986)は、フラックスゲート型磁気傾度計を連続的に走査させ、地下の遺構や遺物の検出精度の向上をはかっている。

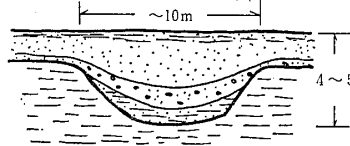
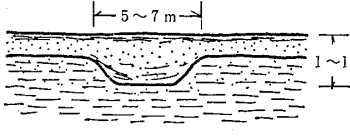
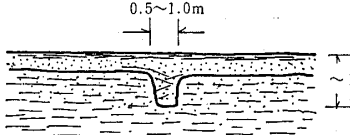
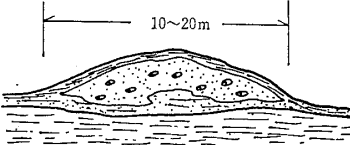
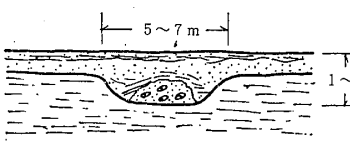
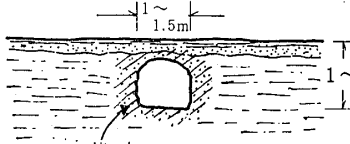

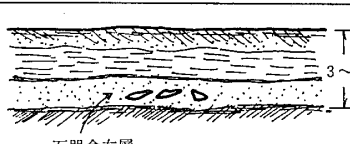
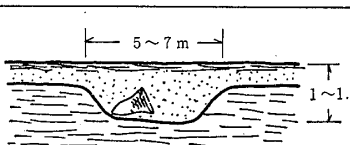
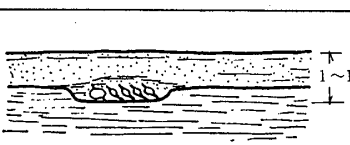
3 遺跡の埋蔵状況と物理探査の適用性

埋蔵遺跡の埋蔵状況は、その遺跡の立地条件や歴史的環境によって異なり多種多様であり、遺跡調査において物理探査を実施するに当たっては、対象とする遺跡の種類や埋蔵状況を十分に把握し、探査法の適用性を考慮した上で利用することが重要である。

埋蔵遺跡のうち、代表的な遺構や遺物の埋蔵状況は、表-1に示すように分けられる。そして、これらの埋蔵遺跡を探索しようとする場合、大溝・運河、竪穴住居跡・水路・環濠、石器や土器の包含層に対しては、これらの遺跡を地層構造の変化として捉えるいわゆる構造探査が適していると考えられ、一方、地点貝塚、登り窯跡、地下式横穴墓・古墳石室、鉄器・青銅器に対しては、遺構や遺物の材質に関わる物理反応の特徴を捉えるアノマリー探査が有効であると考えられる。また、柱穴・貯蔵穴、大型貝塚に対しては、構造探査とアノマリー探査の併用が考えられる。表-1には、それぞれの遺構・遺物について探査する際の着目点を記してある。

以上に示したように、埋蔵遺跡はいろいろな状態にある上に、その多くは、埋蔵深度が数10cm~2m以内と極めて浅いのが普通である。したがって、地盤表層部の浅

表-1 遺跡の埋蔵状況と調査上の着目点
Table 1 Buried conditions of archaeological remains and the points aimed for surveys

遺構・遺物の種類	遺構, 遺構の埋蔵状況	調査上の着目点
大溝 水運河 	比較的大規模の大きい掘り込みで、その中に新しい堆積物が順次凹状に堆積している。	地層変化の規模が比較的大きいので、地層構造の変化、地層の起伏を捉えることができるような構造探査（地震探査屈折法・反射法、地下レーダー）が有効である。
竪穴住居跡 水路 環濠 	中規模の掘り込みで、その中には表土、耕作土が堆積している。	旧生活面であった地層境界の起伏あるいは局部的な表土層の変化を捉える構造探査が有効である。
柱穴 貯蔵穴 	小規模の掘り込みで、その中には表層部の表土、耕作土が堆積している。	規模が小さくなるに従って高い分解能が要求され、精密な構造探査（電気探査、地下レーダー）が有効である。
大型貝塚 	純貝層の厚さが1m以上に及び、表面が比較的薄い表土で覆われている。	貝層は材質的には土とは大きく異なる。したがって、貝層の材質による物理的変化、例えば比抵抗の変化などの探査が有効である。また、大規模なものでは構造探査が有効である。
地点貝塚 	竪穴住居跡の中に形成されることが多く、貝層の厚さは50cm程度である。	貝層による局部的変化を捉えるためには、分解能の高い探査が必要である。比抵抗変化を捉える比抵抗マッピング、地下レーダーが有効である。
登り窯跡 	完形の窯跡は中が空洞状で、その周囲の土が焼けており、焼土特有の赤色を呈する。	地下空洞探査としての立場からは地下レーダーが有効である。また、焼土の熱残留磁気を検出する磁気探査は、崩壊した窯跡に対しても有効である。
地下式横穴墓 古墳石室 	いずれも地下空洞の一種であり、内空の規模は1.5m×1.5m程度である。	地下空洞探査としては、地下レーダーが有効である。
石器 	石器その物は非常に小さい。石器の含まれる地層は文化層と呼ばれ、生活活動の時代を示す。	石器そのものの検出は困難である。文化層となっている鍵層の把握には、構造探査（地震探査反射法、地下レーダー）が有効である。
土器 	住居跡内やその周辺に多く埋蔵されている。完形で出土することは珍しく、多くの場合破片状に散布している。	土器そのものの検出は困難である。住居跡などの探査が主体となる。
鉄器 青銅器 	特別な祭祀跡や古墳の埋葬部に副葬されていることが多い。	金属器は電磁反応が強いので、電磁法を利用した探査が有効である。

い深度に対して高分解能をもつ探査方法が要求される。このような遺跡調査において、各種の物理探査法の適用性を具体的に示すと、表-2のようになる。実際の遺跡調査においては、対象としている遺構の種類、規模、埋蔵状況あるいは表層部の土質に応じて探査法を選択すること、また場合によっては、複数の探査法を併用することが必要となる。

表-2に示すように、これらの探査法のうち、電気探査、浅部電磁探査、地下レーダーおよび高精度磁気探査

は、比較的浅い部分に対する分解能が勝れており、これらの方法は遺跡調査への適用性が特に高いものと考えられる。これらの探査法の概要と遺跡調査への適用上の特徴や問題点はつぎの通りである。

(1) 電気探査

電気探査は、地盤中に電流を流し、その電圧降下を測定することによって、地盤内の比抵抗分布を求めるものである。

電流を流すための一対の電流電極と電圧降下を測るた

表-2 遺跡調査に対する物理探査の適用性
Table 2 Archaeological applicability of geophysical surveys

探 査 法	主な適用対象	適 用 性	
弾性波探査	屈折法	基盤面の起伏	
	反射法		やや深い地層構造や基盤面の把握に適している (数m~数10m)
電気探査	水平探査	堀跡, 水路跡	測線に沿って地下の比抵抗断面を把握することができる。線状の遺構の探査に適している。
	比抵抗 マッピング	表層土の分布	地表1~2mまでの平均的な土質変化を把握することができる。地表電極を多数使用するために作業性は劣る。
	貫入式比抵抗 サウンディング	地層の変化 住居跡, 貝層, 他	地層の細かな変化を把握することができる。 砂礫や礫質の土では適用が難しい。
浅部電磁探査	比抵抗 マッピング	表層土の分布	見掛けの比抵抗100Ω・m以下の地盤に対して適用できる。非接触型の測定であるので測定能率は良い。市街地ではノイズの影響を受け易い。
	金属探知	金属遺物 (青銅器など)	深度1.5m以浅の金属物の探知に適している。
地下レーダー	プロファイル 測定	竪穴住居跡, 堀跡, 貝塚, 水路跡, 古墳, 古墳内石室, 他	深度2.0m以浅の埋蔵遺跡に対して適用性が高い。 粘性土地盤に対しては電磁波の減衰が大きく、探査が難しくなる。
	ワイドアングル 測定	地層の区分 文化層	電磁波伝播速度による地層区分によって、地層の状態を推定することができる。
高精度磁気探査	全磁力法 (プロトン)	鉄製遺物, 窯跡	深度2.0m以浅の鉄製遺物や窯跡の調査に利用される。地形の影響や市街地におけるノイズの影響を受け易い。
重力探査		基盤構造 堆積層の厚さ	やや規模の大きい構造の把握に適用される。
リモート センシング	可視光写真	地表植生の変化 遺構の微地形変化	調査地域を全体的に鳥瞰することができる。 地形や植生の変化から遺構の分布を推定する。
	赤外カラー写真	地表含水状態の変化	地表土の含水状態の変化を把握することができる。 植生の多い所では適用が難しい。

めの一対の電位電極を一定の配列で地表に設置して、電流と電位差を測定する。この電極配置にはいくつかの方法があるが、地盤の比抵抗の水平的な分布を把握するには、2極法電極配置といわれる方法が作業性も良く適している。この電極配置は、一対の電流電極および電位電極のそれぞれについて、一方の電極を無限遠と考えられる遠方に固定接地し、電流電極および電位電極のもう一方の電極を一定の電極間隔を保ったまま移動接地するものである。

測定された電流および電位差から計算によって求められる地盤の見掛けの比抵抗値は、土質や土の空隙率、含水率などによって変化するため、その分布を測ることによって、土質や地盤状況の変化を把握することができ、地下に埋蔵されている遺跡や遺構の分布を推定することも可能となる。

電気探査の分解能は、探査深度（あるいは電極間隔）が大きい程低下し、深度5m以浅の探査では2~3m程度の分解能である。したがって、大きさが2~3m以上の遺構の検出は可能であり、規模のやゝ大きい水路跡や堀跡などを対象として適用できる。また、土中の貝層などは高比抵抗帯となっており、電気探査によって効率よく検出される。

(2) 浅部電磁探査

電磁探査は地盤の電磁誘導現象を利用した探査法で、地盤の導電率（比抵抗の逆数）を測ることによって、地下構造や高電導体の位置を探るものである。電磁探査装置には、探査深度が数千mに及ぶものから、地表近傍の数mを対象にするものまでいろいろなものがあるが、遺跡調査に対しては、浅部探査用の簡便なものが使用されている。

装置は送信コイルと受信コイルを備えており、送信コイルに電流を流し、これにより地盤内に一次磁界を形成させ、電磁誘導現象により生じた渦電流による二次磁界を受信コイルにより測定する。この一次磁界および二次磁界から、地盤の見掛け比抵抗を計算によって求める。

電磁探査による比抵抗測定では、電気探査のように地表面に電極を設置する必要がないため、作業性が良く、面的な探査に適している。また、地下に金属物のような良導体がある場合には、強い電磁誘導現象による異常が現れ、鉄器や青銅器などの金属遺物の探知に有効に使用される。しかし、電磁探査は、地盤の比抵抗が高い場所ではその測定精度が低下するので、通常は比抵抗値が数百 Ωm 以下の地盤で利用することが望ましい。また、市街地や高圧電線などの近くでは、これらのものによる電磁的ノイズの影響を受け易く、測定が困難となることが

ある。

(3) 地下レーダー

地下レーダーは、電磁波を地表から地下に向けて放射し、地下から反射してくる波を捉えて地下の構造を探るものである（原、坂山、1983参照）。

地下レーダーによる一般的な測定法としては、プロファイル測定とワイドアングル測定がある。

プロファイル測定においては、地表に置かれた送信アンテナと受信アンテナの間隔を一定に保って、測線上を移動して測定する。このような測定によって、測線下の反射面の形状が時間断面としてグラフィック記録上に得られ、反射面の起伏の変化や反射体の分布を直接的に把握することができる。

一方、ワイドアングル測定においては、送信アンテナを1ヶ所に固定し、受信アンテナだけを徐々に遠ざけるように移動し測定する。この測定によって、地中を伝播する電磁波の走時変化を把握することができ、地中における平均的な電磁波速度が求められる。電磁波速度を知ることによって、反射波の往復時間から反射面までの深さが求められる。

地盤内に伝播する電磁波は、主として誘電率が変化する境界面、すなわち、土の空隙率や含水率の変化する境界面において反射する。このような面としては、砂質土層と粘性土層の境界面などのような地層境界面や土質境界面、土の締め固め状態の急変面、地下水浸潤面などがあげられる。埋蔵遺跡に関しては、旧生活面や遺構の上面を境として土質が変化している場合には、これらの境界面が反射面として捉えられることになる。すなわち、堅穴住居跡、水路跡、堀跡などは後世に堆積した土に埋もれており、それらの起伏面が反射面となり、また、土中の貝塚や古墳内部の石室などは、それ自体が局所的な反射体となって、地下レーダー記録上に捉えられるのである。

しかしながら、電磁波は導電性媒質の中ではその伝播に伴う減衰が大きく、地下レーダーの探査可能深度が制限されることになる。一般的には、土質地盤における探査可能深度は4~5m程度であるが、沖積粘土層のように、表層土が低比抵抗（100 Ωm 以下）である場合には、探査可能深度は1m以下となり、探査は事実上その意義を失うことになる。

(4) 高精度磁気探査

磁気探査は、地球磁場の空間的变化を測定し、地下の磁性体の分布を探るものである。遺跡調査のように、浅い深度を対象にした探査では、磁場の細かな変化を捉える必要があるために、精度の高い測定が必要である。

測定には、プロトン磁力計による二台連動法が使われる(西村, 1980)。二台連動法とは、地球磁場の時間変化を測定するための定点測定と、空間変化を測定するための移動点測定を同時に行い、その残差の変化を把握する方法である。移動測定点は適当な格子間隔(2 m以下)で設定し、その磁場の変化を面的に捉えることによって地下の磁性体の分布を推定する。

地下に埋蔵されている鉄器のような強磁性体や、窯跡のように熱残留磁気を帯びたものが存在するときは、その箇所が地球磁場の局地異常として表される。今までのところ、窯跡の調査に対する磁気探査の利用例が多く見られる。

磁気探査による探査深度は対象とする埋蔵物の大きさやその磁化の強さに依存している。大きさが数m程度の窯跡に対する探査深度は2~3 mである。磁気探査も電磁探査と同様に、市街地や高圧電線などの近くでは電磁的ノイズの影響を受けるため、その測定精度は低下する。

4 物理探査による遺跡調査の実施例

前章で述べたように、物理探査は、その非破壊性のために、遺跡調査における発掘調査に先立つ予備調査として有効な調査手法であり、その利用価値は大きい。探査法のうち、適用性が高いと考えられる地下レーダー、電気探査、電磁探査および磁気探査による遺跡調査の実施例を示し、これらの探査法の適用について述べる。

4.1 地下レーダーによる竪穴式住居跡調査

—群馬県子持村黒井峯遺跡—

黒井峯遺跡は、群馬県榛名山の北東約10kmに位置する古墳時代の遺跡である。この遺跡は、六世紀の後半頃、榛名山ニッ岳の爆発を伴う大量の降下軽石によって完全に埋没したものである。そして、その降下軽石層の層厚は2~3 mに達している。近年、軽石は軽量ブロックの

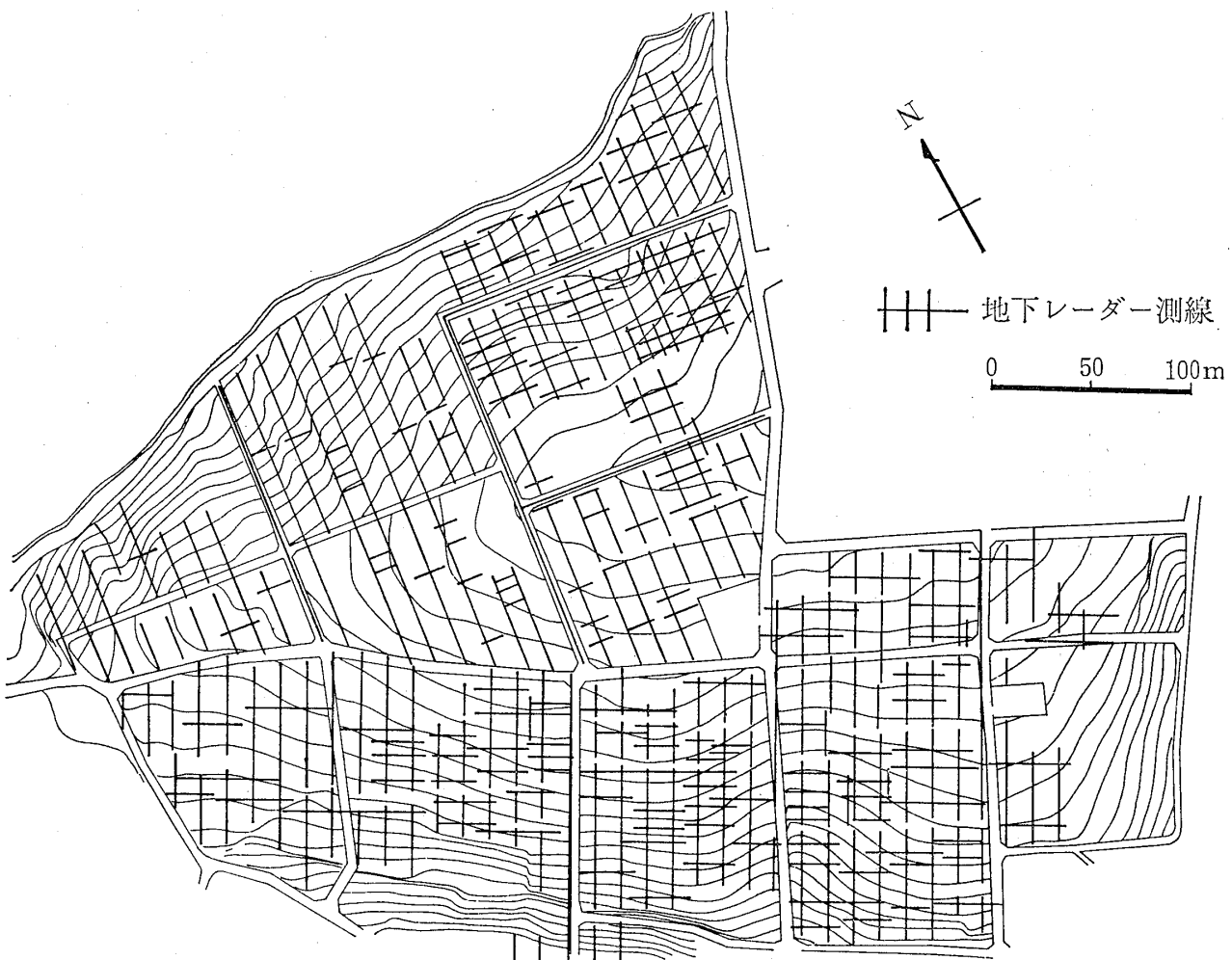


図-1 黒井峯遺跡における地下レーダー測線配置図

Fig. 1 Measuring lines of ground probing radar exploration at Kuroimine archaeological site

原材料として利用されており、この黒井峯遺跡はその採取工事中に発見された。軽石層下部にはローム層が分布し、このローム層上面を生活面として多数の竪穴式住居跡が分布している。また、部分的な発掘調査によって、畠跡、道路跡、祭祀跡などの遺構も確認されている。竪穴式住居の規模は、一辺の長さが5~13m、掘り込みの深さが50cm程度のもが多く、住居の周囲には高さが30cm程度の盛土が周堤帯として巡らされている。

このように、大量の軽石層によって埋没した黒井峯遺跡の場合には、竪穴式住居跡はローム層上面のくぼみとして残されることになる。この多孔質の軽石層である表層はその比抵抗値が高く、したがって、この層における電磁波の減衰が比較的少なく、また、軽石層とローム層の土質物性上の差異が顕著であることから、地下レーダーによってローム層上面が明瞭な反射面として捉えられる可能性は十分に予想された。

地下レーダーによる探査は、図-1に示すように、約80,000m²の未発掘区域において実施された。測線は10m間隔に設定された。これらの測線にそった測定において、住居跡などの遺構の存在を示す記録が得られた箇所においては、遺構の規模を確認するために、さきの測線に直交する方向に副測線を設けて測定を行った。延べ測線長は約10kmであり、測定には応用地質株式会社製YL-R2型地下レーダー装置を使用した。

図-2は、電磁波の地中伝播速度と反射面深度を把握

するために行ったワイドアングル測定記録の1例である。この図において、縦軸は時間 (nsec=10⁻⁹sec)、横軸はアンテナ間の距離 (cm) である。図中のAで示してある波群は、空气中を直接伝わった電磁波で、その速度は真空中での電磁波伝播速度 (30cm/nsec) に等しい。Sで示した波群は、地表面近傍を伝播した地中直接波であり、Rで示した波群は、軽石層とローム層との境界面で反射した反射波である。図-2に示した記録の解析結果から、反射面より上部にある軽石層の電磁波伝播速度は約9.0cm/nsecとなり、これによって約2.5mの反射面深度が得られる。この反射面深度は、発掘調査によって確認された軽石層とローム層との境界面深度に良く対応しており、ローム層上面が反射面として明瞭に把握されていることが分かった。

図-3および図-4は、地下レーダーによるプロフィール測定記録の例である。いずれの記録もローム層上面からの反射波が捉えられており、その起伏変化を知ることができる。図-3に示す記録では、ローム層の境界面がくぼんだ形状を示しており、このくぼみの巾は約14mで、深さは約50cmである。そして、くぼみの周辺部にはわずかではあるが盛り上がりが見られ、これは、周堤帯を伴う住居跡の典型的な断面と全く同様な形状を示している。また、図-4の記録では、巾約11mのくぼみが現れている。そして、周辺部の盛り上がりも明瞭であり、住居跡によるくぼみであることが推定される。なお、左側

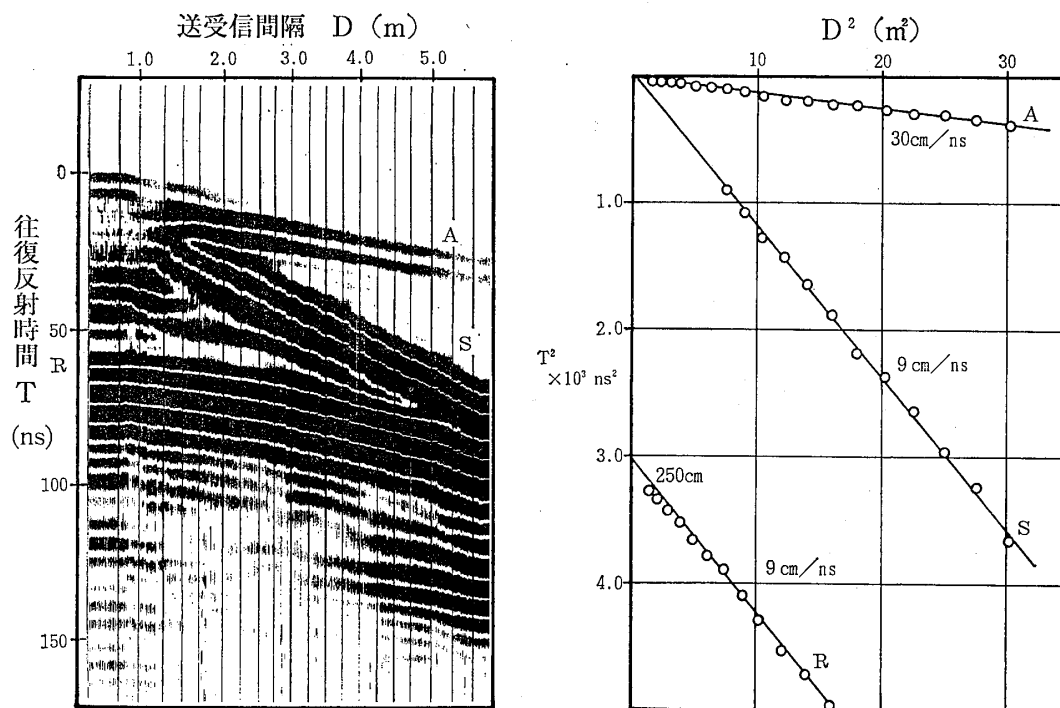


図-2 地下レーダーのワイドアングル測定記録および解析図

Fig. 2 Record of wide angle measurement and analyzed results

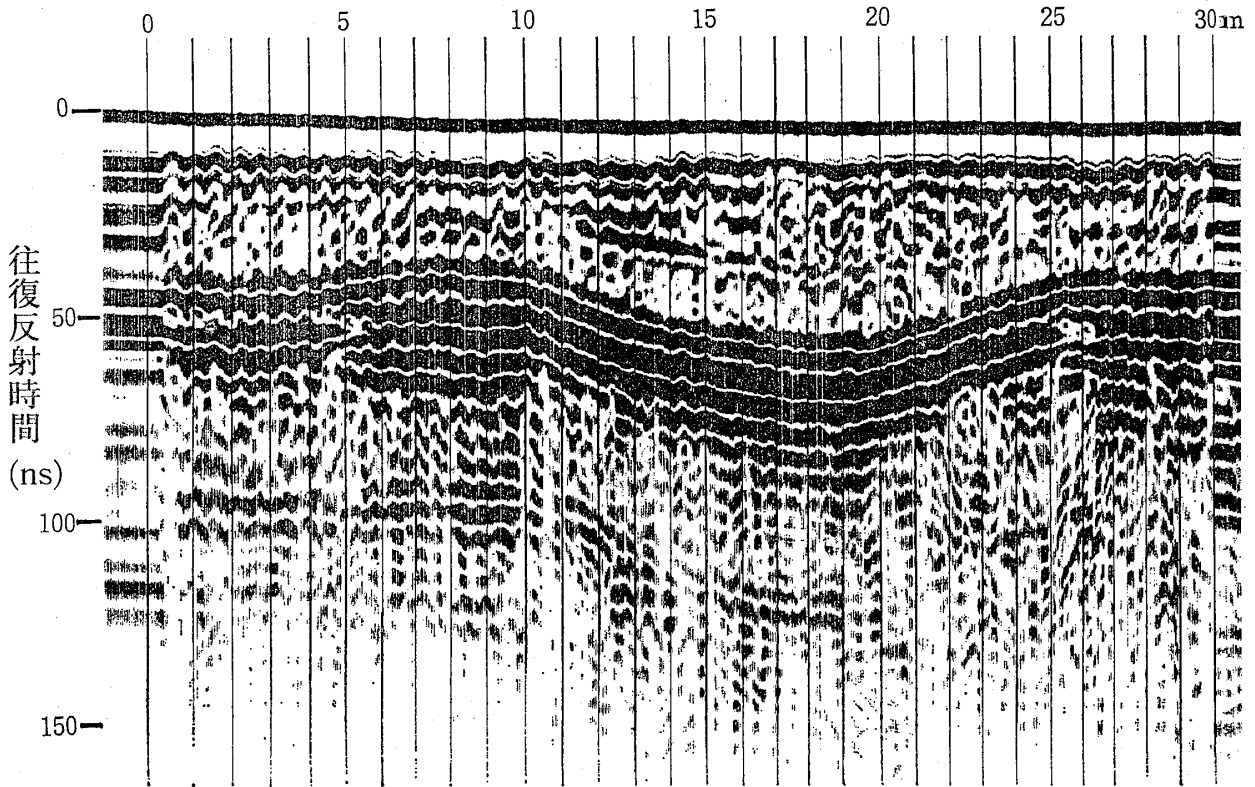


図-3 竪穴住居跡における地下レーダー・プロフィール測定記録(その1)
Fig. 3 Radar profile of ancient dwelling buried in a pumice layer (1)

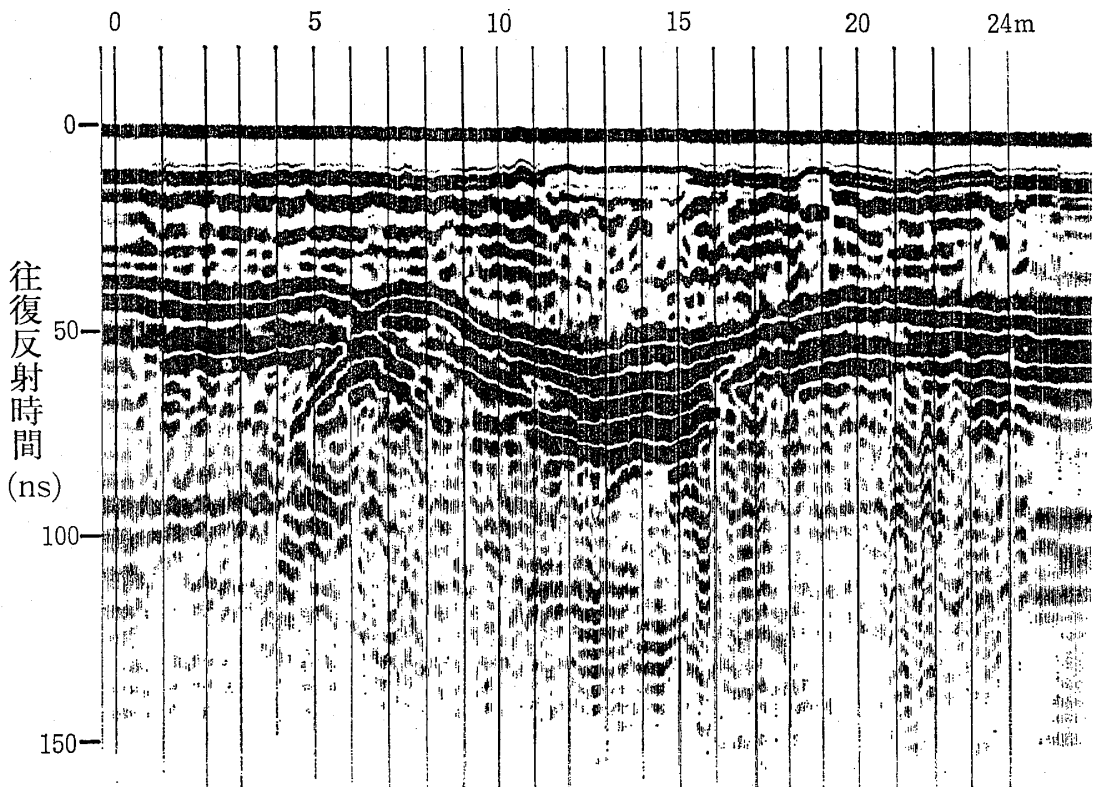


図-4 竪穴住居跡における地下レーダー・プロフィール測定記録(その2)
Fig. 4 Radar profile of ancient dwelling buried in a pumice layer (2)

周堤帯の中央部には、溝状のくぼみによるものと思われる反射パターンが見られる。これは、住居の周囲に雨水溝のようなものが巡らされていたことを示すものと考えられる。

プロフィール記録に現れたこのようなくぼみの分布を図-5に示す。この図によれば、調査区域内において住居跡と推定される箇所としては、92箇所が指摘されている。これらの中には、一辺の長さが15mを越えるような非常に大きなものが数箇所見られる。このほかに、調査区域の中には、ローム層上面が孤立状に高まっている箇所が9箇所認められた。これらの微高地は $2 \times 2\text{m} \sim 10 \times 10\text{m}$ の平面的拡がりを有し、その比高は約50cmである。このような微高地は、小規模な墳墓あるいは祭祀跡のようなものに対応するものと考えられる。

その後、この調査区域の西端部約 $12,000\text{m}^2$ の範囲において全面発掘が行われ、古代農村集落の遺構が完全な姿

で現れた。図-6は、この区域において発掘された遺構の位置と、地下レーダーによって推定された竪穴住居跡の位置とを対比したものである。

発掘の結果によれば、軽石が降下堆積する直前まで使用されていたと思われる竪穴式住居跡5軒(A-1~A-5)、平地式住居跡2軒(C-1, C-2)および道や畑の畝などの遺構が確認された。また、竪穴式住居跡には、その掘り込みの回りに雨水などの浸入を防ぐための周堤帯が巡らされている。このほかに、その当時すでに廃棄され埋まりつつあった竪穴式住居跡と考えられるくぼみが10数ヶ所認められた。

これらの遺構の分布を地下レーダーによる結果と対比してみると、当時使用されていたと思われる竪穴式住居跡(A-1~A-5)については、5軒ともすべてが地下レーダーによって検出されている。また、その当時埋まりつつあった竪穴式住居跡についても、そのくぼみの

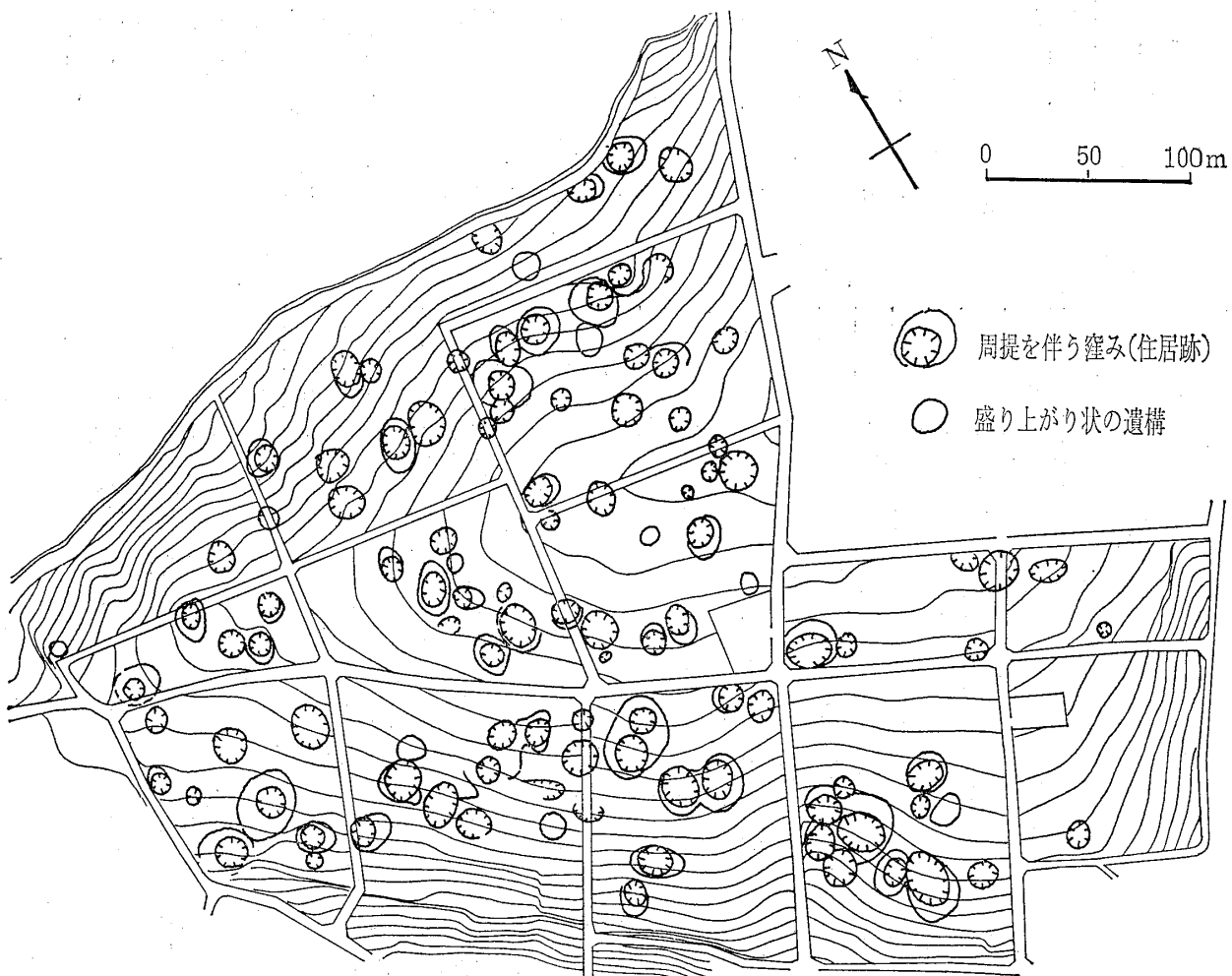


図-5 黒井峯遺跡における地下レーダーによる住居跡の推定分布図

Fig. 5 Estimated distribution of ancient dwellings detected by ground probing radar at Kuroimine archaeological site

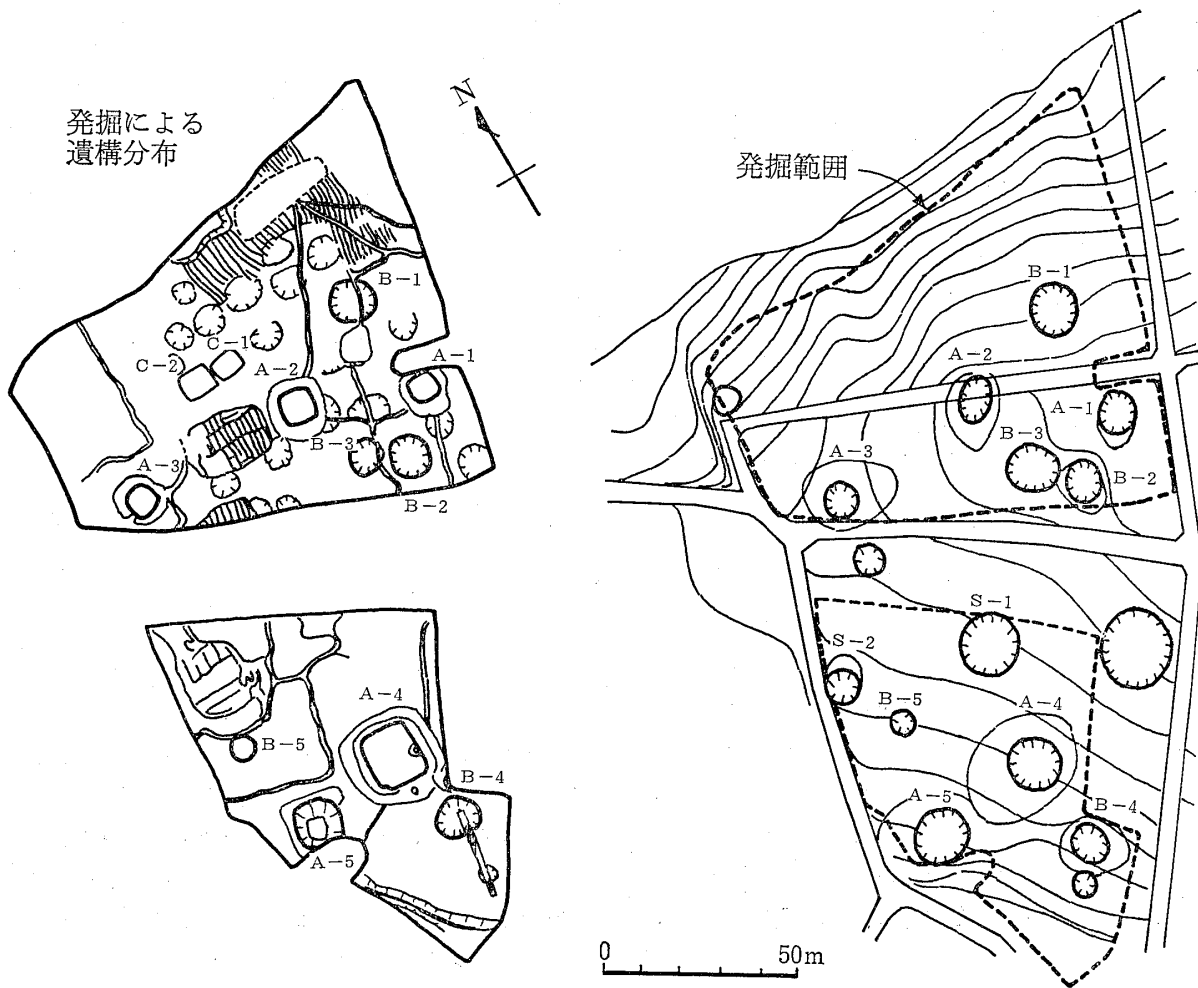


図-6 地下レーダー結果と発掘調査結果による住居跡の分布の対比

Fig. 6 Comparison of the distribution of dwellings detected by ground probing radar with the findings of excavations

深さが約30cm以上残っていたもの(B-1~B-5)は、
 竪穴式住居跡として検出されていることが分った。これ
 に対して、地下レーダーによってそのくぼみの状態から
 住居跡と判定したS-1とS-2は、畑の畝や自然地形
 による起伏であることがわかった。

この黒井峯遺跡の場合には、遺跡が比較的均質な降下
 軽石層よって埋蔵され、当時の生活面が明確な地質境界
 面として形成されていたことは、地下レーダーの適用に
 にとって有利な条件であったといえる。しかしながら、地
 下レーダーによる遺構の検出が旧生活面の起伏に基づく
 ものであるのも、もともと起伏のない平地式住居跡の検
 出が不可能であることは当然であるが、くぼみが30cm
 以下になっている竪穴式住居跡の検出および自然地形と
 人工地形の識別などの課題があることがわかった。

4・2 地下レーダーと電気探査の併用による貝塚遺跡 調査

——埼玉県富士見市水子貝塚遺跡——

水子貝塚遺跡は、埼玉県富士見市の南東部で、武蔵野
 台地が荒川沖積地に面する台地末端部に位置し、縄文時
 代前期に属する貝塚遺跡である。この貝塚遺跡では、こ
 れまでの調査によって、径約160mの範囲にわたって、
 50~60ヶ所の地点貝塚が存在していることが分っている
 (富士見市教育委員会, 1984)。

これらの地点貝塚は、いずれも当時すでに廃棄されて
 いた竪穴式住居跡内に堆積形成したものである。また、
 その周辺には貝層を伴わない住居跡も存在し、地点貝塚
 の分布状況から貝塚形成当時の集落の規模や形態を推測
 することができる遺跡として学術上重要視され、国の指
 定史跡となっている。

今までに実施された部分的なトレンチおよびボーリングによる調査によって、遺跡の形成に関する時代的考察や地点貝塚の分布状況などの概要が明らかにされてきたが、地点貝塚や住居跡の全体的分布については十分に把握されていないのが現状である。したがって、今後、国の指定史跡としての保存整備計画を進めるに当たって、経済的かつ非破壊的な方法によって、地点貝塚や住居跡の全体的分布を求めることが必要となった。

一般に、地中に埋蔵されている貝塚は、周囲の土層に比べて比抵抗値が著しく高いことが予想される。このような場合、地下レーダーは地下の地点貝塚を反射体として捉え、その位置や大きさを決定することができる。一方、電気探査によってその反射体の比抵抗値を測定し、その値によって貝塚であるかどうかの判断を行うことができる。したがって、貝塚遺跡に対しては、地下レーダーと電気探査を併用することによって、有効な調査が可能になると考えられる。

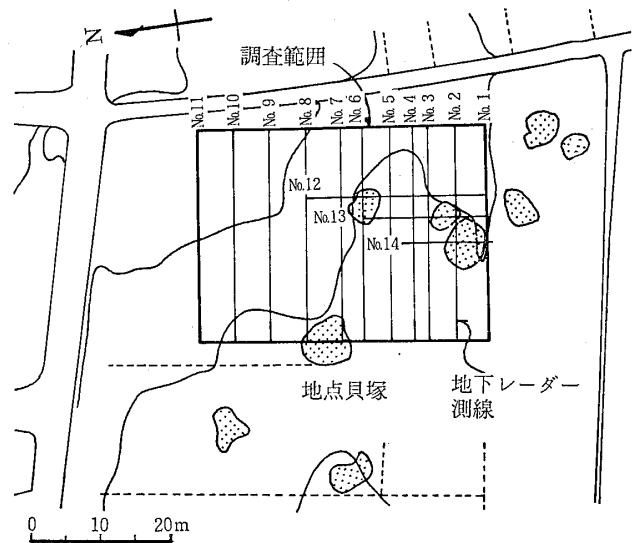
以上に述べたことから、水子貝塚遺跡においては、図一七に示す区域において、地下レーダー、電気探査（比抵抗マッピングおよび貫入式比抵抗サウンディング*）による調査を実験的に行うことになった。この実験の目的は、地点貝塚や住居跡の分布を把握するための非破壊的探査手法としての可能性と適用性を明らかにすることであった。

調査区域は図一七に示す約40m×30mの範囲である。地下レーダーの測線としては、No. 1からNo. 14までの14測線を設けた。No. 12～No. 14の3測線はNo. 1～No. 11の測線において捉えられた反射体の拡がりを確認するために設けた副測線である。プロファイル測定によって得られた記録例を図一八に示す。No. 2測線の記録では、測点15m～20mの区間に強い反射が認められる。また、No. 13測線の記録では、測点0m～3mと測点11m～15mの2区間にそれぞれ強い反射が認められる。

電気探査の比抵抗マッピングは、電極間隔を1mに固定した2極法電極配置によって、調査範囲を面的に探査するように実施した。測定にはABEM SAS 300 電気探査装置を使用した。

この測定においては、表面から1mくらいの深さまでの平均的な比抵抗の平面的分布が捉えられるもので、そ

* 貫入式比抵抗サウンディングは、先端に電極を取り付けた電極棒を地中に差し込み、地盤の深度方向の比抵抗を測定し、その分布を精度良く求めることができるもので、水子貝塚遺跡における調査実験に際して特別に開発したものである。



図一七 水子貝塚遺跡における調査範囲
Fig. 7 Investigation area at Mizuko archaeological site

の結果を等値線図で示すと図一九のようになる。この結果によれば、低い所で80Ω・m前後、高い所で250Ω・m前後の値を示し、場所によって表層部の土質に変化があることを示している。図一九には、地下レーダーによって明瞭な反射が捉えられた区域を併せて示してあるが、これらの区域における表層部の比抵抗が、その周辺部に比べて相対的に低い値を示す傾向が見られる。

これらの地表からの調査結果を検証することをも含めて、地盤内における比抵抗分布を直接的に把握するために、貫入式比抵抗サウンディングを実施した。測定を実施した箇所は、地下レーダーのために設けたNo. 2測線とNo. 13測線上で、測点間隔は1mとした。また、各測点における測定深度間隔は10cmとし、最大深度1.2mまでを測定した。

貫入式比抵抗サウンディングの結果を図一十に示す。この結果によれば、地下レーダーによって捉えられた反射体が、その周辺の比抵抗値に比べて極めて高い領域に対応していることが分る。したがって、これらが貝塚であることが容易に推定できる。しかし、この貝層を挟む上部と下部において低比抵抗値を示す傾向がはっきり見られ、これは貝層を挟む周辺の土が変質を受けたことによるものと考えられる。

したがって、比抵抗マッピングにおいて、本来、貝塚自体は高比抵抗と考えられているにも関わらず、地下レーダーによる反射体に対応する区域が低比抵抗となる傾向を示すことは、貝層周辺に低比抵抗を示す土層が存在しているためと思われる。

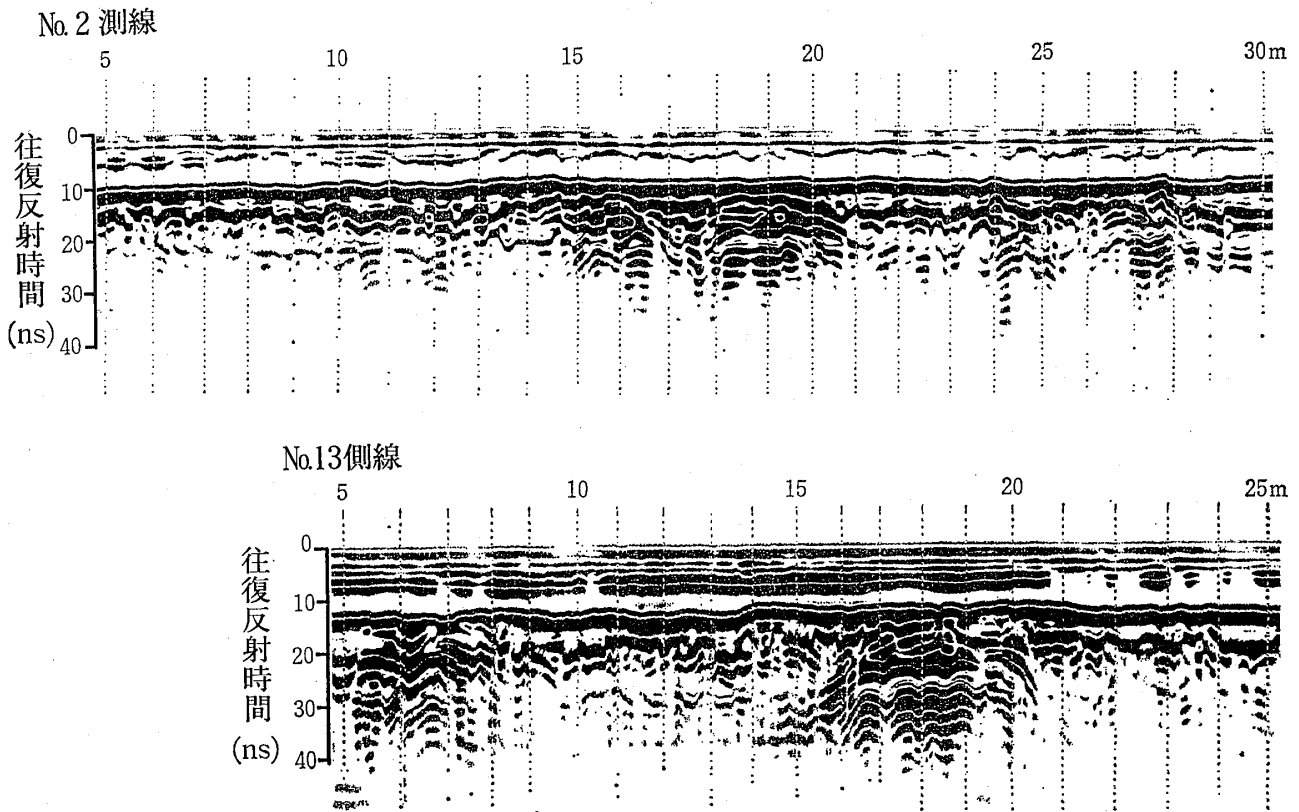


図-8 貝塚における地下レーダー・プロフィール測定記録
 Fig. 8 Radar profiles of underground kitchen middens

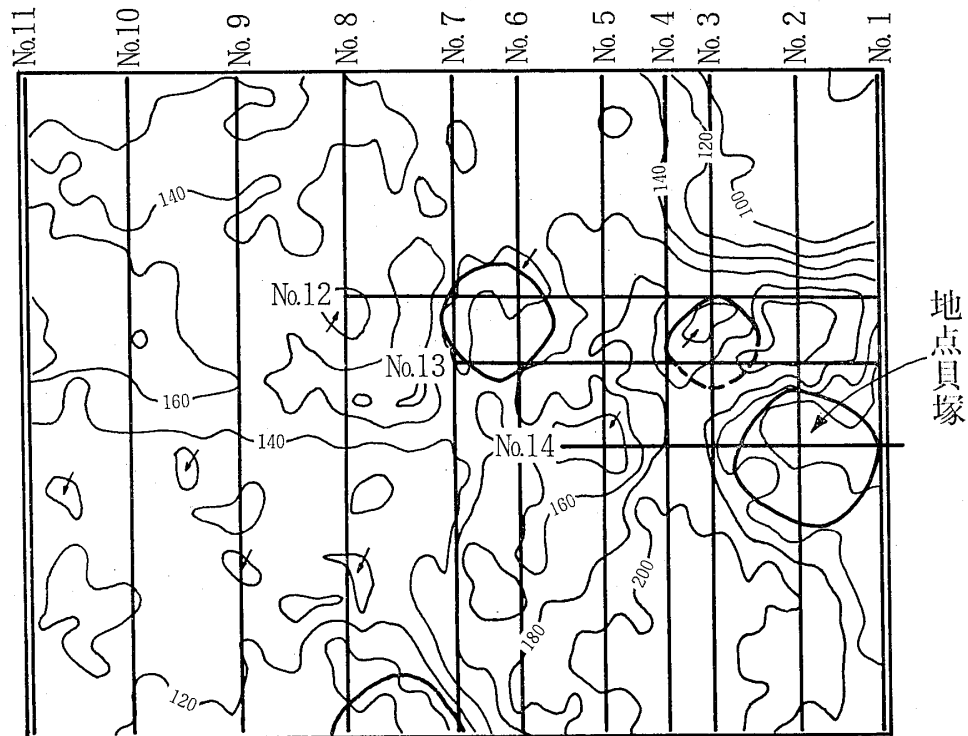


図-9 比抵抗マッピングによる表層の見掛けの比抵抗分布
 Fig. 9 Plane distribution of apparent resistivity obtained by resistivity mapping surveys

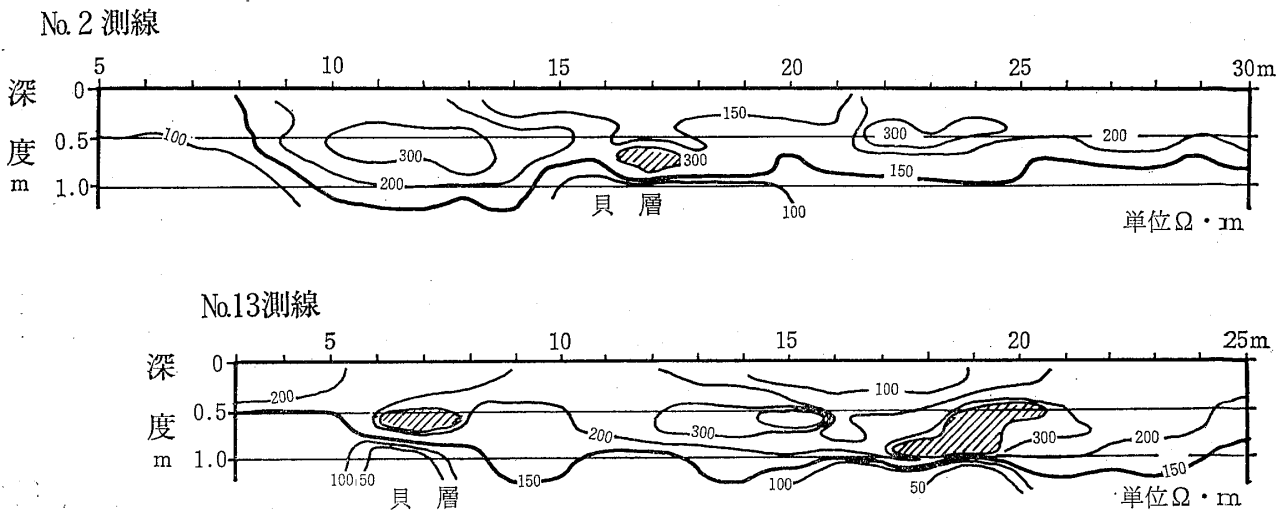


図-10 貫入式比抵抗サウンディングによる比抵抗断面

Fig. 10 Resistivity sections across the underground kitchen middens measured by electrode cone penetration

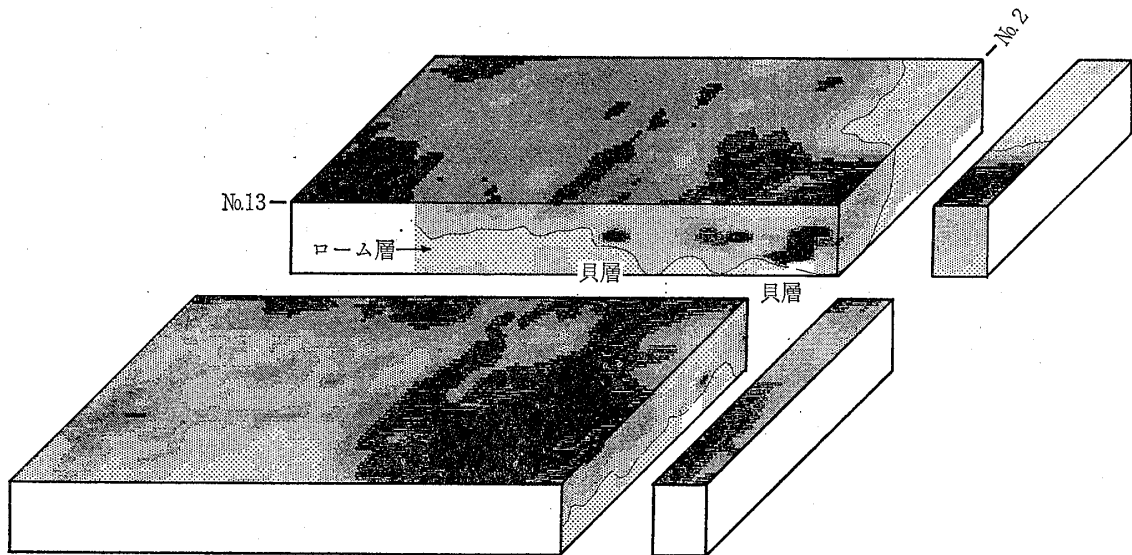


図-11 水子貝塚遺跡における比抵抗分布の三次元的表示

Fig. 11 3-dimensional expression of resistivity distribution at Mizuko archaeological site

また、図-10には比抵抗値が $150 \Omega \cdot m$ を示す等値線を太線で表示してあるが、貝層堆積部はいずれもこの太線よりも上部に位置している。この線よりも深い部分では、比抵抗値が $150 \Omega \cdot m$ 以下となっており、貝層底部以深には、やゝ低比抵抗のローム層が分布しているものと推定される。したがって、このローム層が縄文期の生活面を示すものとすれば、この層の起伏の状況から貝層を伴わない住居跡の分布を推定することができると思われる。

図-11は、地表面での比抵抗マッピングの結果と貫入式比抵抗サウンディングの結果を総合して、三次元的に

表示したものである。このように表示することは、基盤ローム層の起伏、表層土質の変化、貝層の分布などを推定する上で極めて有効である。

以上の結果から明らかなように、地下レーダーは貝塚の分布やその連続性の把握に、比抵抗マッピングは表層土質の分布や大局的な構造の把握に、また、貫入式比抵抗サウンディングはローム層の起伏や表層土質の変化の把握に有効であり、さらに、これらの手法を併用することによって確度の高い探査ができることが分った。したがって、地下レーダー、比抵抗マッピングおよび貫入式比抵抗サウンディングは、貝塚遺跡の非破壊調査法とし

て十分有効で適用性をもつものといえることができる。

4・3 電磁探査による金属遺物調査

—— 島根県斐川町荒神谷遺跡 ——

荒神谷遺跡は、島根県東部、宍道湖の西岸に位置し、高瀬山北麓の低丘陵地にある小さな谷あい面に面した弥生時代の遺跡である。この遺跡は、広域農道の建設に先立って行われた発掘調査（昭和59年7月）によって、弥生時代中期のものとして推定される358本の中細形銅剣が一度に出土したところである。これが日本におけるこれまでの総出土数を上まわる多量の銅剣であったことから、一躍注目を集めた遺跡である。ここに述べる荒神谷遺跡における探査は、上述の多量の銅剣が出土した丘陵斜面部の未発掘部分において、青銅器遺物の有無を調査、確認することを目的としたものである。

島根県教育委員会（1985）によれば、発見された銅剣の埋蔵深度は0.8m～1.0mと浅く、また、数多くの銅剣がまとまって埋蔵されていたと報告されている。したがって、その他にも青銅器遺物が存在するとすれば、それらの埋蔵深度も高々1.0m程度であろうし、遺物もある程度まとめられているものと予想された。このような状況から浅部電磁探査による調査を実施することにした。

使用した装置はGEONICS社製EM-38型電磁探査装置である。

この装置は、水平に設置した場合（水平モード）には深度0.75mまでの平均的な比抵抗を、また、垂直に設置した場合（垂直モード）には深度1.5mまでの平均的な比抵抗を測定することができるものである。

図-12は荒神谷遺跡における調査範囲である。この調査区域の中央部の約10m×10mの部分は、昭和59年の発掘調査において多量の銅剣が発見されたところで、今回の調査においては除外された。測定に当たっては、調査区域に縦横1m間隔のグリッドを設定し、その格子点を測点とした。各測点では、水平モードおよび垂直モードのそれぞれについて測定を行った。総測点数は2041点であった。

水平モードによって測定された深度0.75mまでの見掛けの比抵抗分布を図-13(a)に、垂直モードによって測定された深度1.5mまでの見掛けの比抵抗分布を図-13(b)に示す。測定された見掛けの比抵抗は、全般に地形、地質および地盤の含水状態を良く反映しているものと考えられ、調査地中央部を北東から南西に延びる谷部で数十 $\Omega \cdot m$ 程度、その両側の斜面部で数百 $\Omega \cdot m$ 程度の値を示している。図-13に示す探査深度が0.75mと1.5mの見

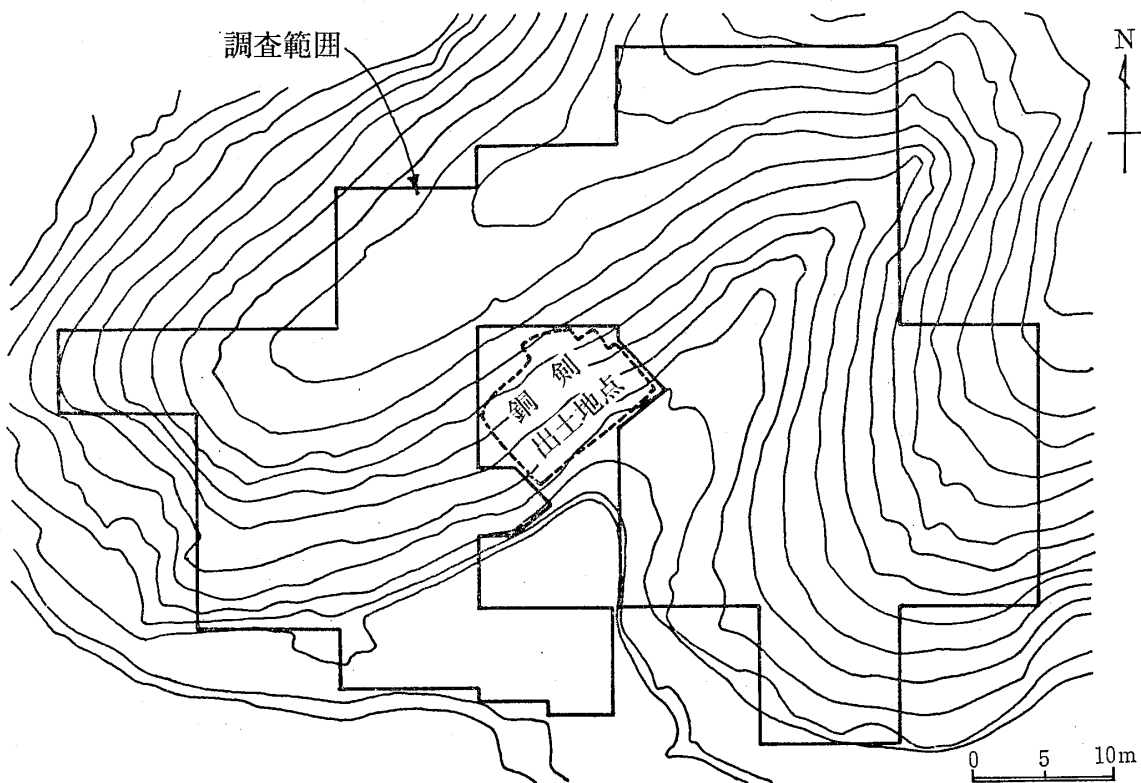


図-12 荒神谷遺跡における調査範囲

Fig. 12 Investigation area at Kojindani archaeological site

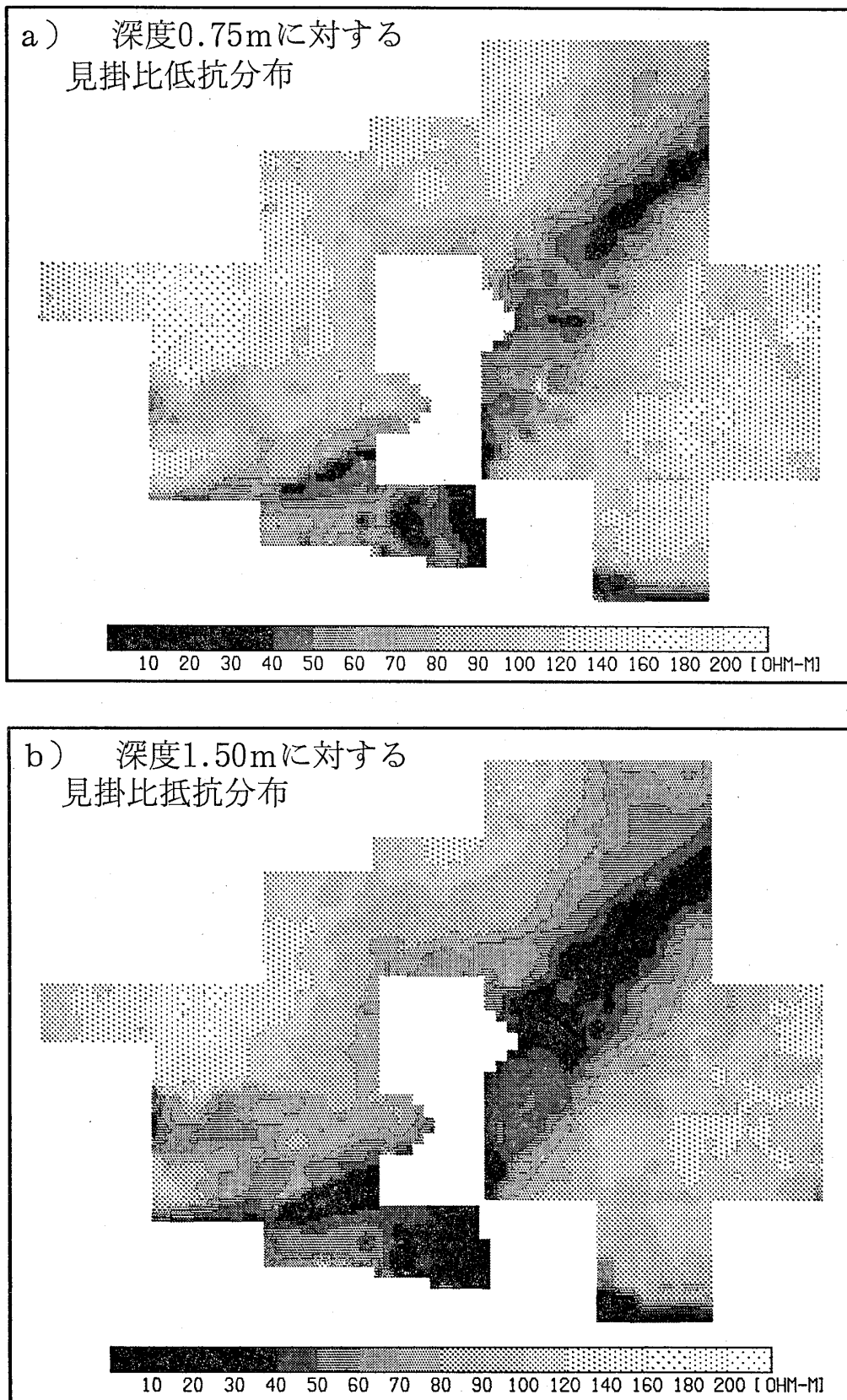
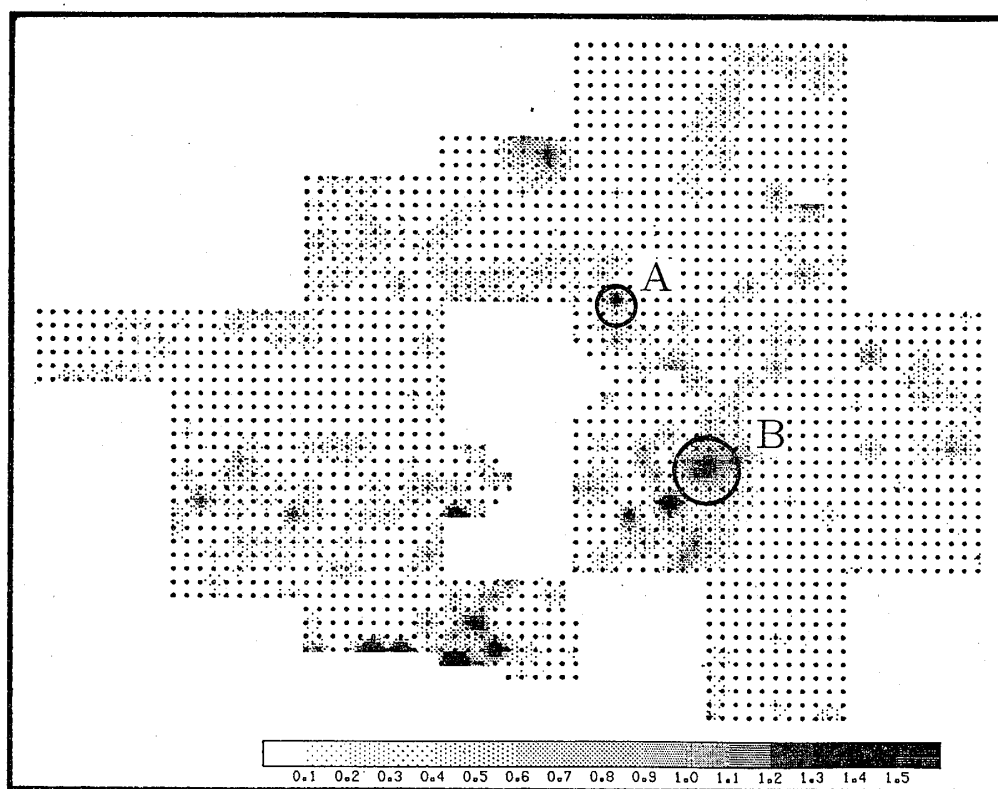


図-13 電磁探査による表層部の見掛比抵抗分布

Fig. 13 Plane distribution of apparent resistivity obtained by electromagnetic survey



図—14 データー処理による金属反応地点の抽出結果

Fig. 14 Results of metal reactions detected by analyzing apparent resistivity data

掛けの比抵抗分布を比較すると、探査深度 1.5m の方が全体にやゝ低い値を示しており、表層に比べて地山の方が低い比抵抗であることが推定される。また、探査深度が 0.75m までの分布図によれば、表層付近の局所的な比抵抗の変化がよく把握されている。

先に出土した多量の銅剣は、深度 1m 以浅の極めて表面に近いところに埋蔵されていたことから、今回の探査においても表層部を対象としており、表層部分に金属遺物が埋蔵されていれば、見掛けの比抵抗分布に低比抵抗異常として検出されることが予想される。したがって、このように金属の存在による局所的な異常を強調し、検出を容易にするために、局所的な比抵抗変化を強調するための二次元ハイパスフィルターと、地質構成による比抵抗変化を取り除くための 2 深度 (0.75m と 1.5m) データー間の相互補正を基本としたデーター処理を行った。データー処理の結果得られた比抵抗異常の分布は図—14 に示す通りである。

図—14には、比抵抗異常を示すいくつかの黒い斑点が現れている。この遺跡は多量の銅剣の発掘以後、関係者や見学者などの出入が多くあったということで、必要に応じて金属類が持ち込まれ、そのまま放置されている可能性が考えられた。そこで、図—14に示す分布図に基づ

いて、それぞれの異常の原因を確認するための踏査を行った。多くの異常点において、表土中に埋れた金属性工具 (ハンマーなど) や針金などが発見された。とくに、図—14の最下部に示されている異常が集中している箇所は、見学者用の仮設通路を撤去した際の廃材を焼却したところで、厚く堆積した残灰の中から釘や針金などが発見された。以上のような踏査の結果、比抵抗が低くなる原因を特定できなかった箇所は、図—14に示す A および B の 2 箇所であった。したがって、この A および B における低比抵抗の原因は、地表下にある金属物体によるものと判断し、金属性遺物が埋蔵されている可能性が高いことを指摘した。

その後、A 地点から 2 基の銅鐔が発見されたので、その近傍の状況を詳細に調べるため、銅鐔発見箇所を中心に 0.2m 間隔のグリッドを設け、電磁探査による測定を再度実施した。測定結果は図—15に示すように、巾 80cm の L 字型の範囲に金属の存在を示す強い反応が認められ、さきに発掘された 2 基の銅鐔のほかいくつかの金属遺物が埋蔵されていることが明らかとなった。その後の発掘調査によって、さきに示した L 字型の箇所から銅鐔 6 基と銅矛 16 本が出土した。写真は、A 地点において最初に発見された 2 基の銅鐔のうちの 1 基の出土状況を

示したものである。

以上のように、金属遺物の調査に対して、浅部電磁探査は極めて有効な方法であり、また、測定値だけからは検出できないような小さい金属体に対しても、データ処理を実施することによって検出が可能であることが判明した。

4.4 磁気探査による窠跡調査

—東京都稲城市大丸遺跡—

大丸遺跡は、多摩丘陵の東端に近く、丘陵が多摩川へ張り出した尾根の先端部に位置する。この尾根の頂部は古くから城山と呼ばれており、大丸城跡の存在が知られている。また、大丸遺跡のある稲城市大丸から、多摩市連光寺にかけての川崎街道に沿う谷は瓦谷戸と呼ばれ、奈良時代中頃以降の瓦が出土し、いくつかの瓦窠跡の存在が確認されている。大丸遺跡はこの瓦谷戸の入口にあたり、この尾根の斜面部にも窠跡の存在が予想された。

斜面を利用して作られた窠は、一般に登窠と呼ばれ、地中にトンネル状に掘り込みを作り、窠体を構築したものである。このような窠跡は熱残留磁気を帯びていることから、一般的には、熱残留磁気の検出に有効である磁気探査が用いられている。この大丸遺跡においても、窠跡の分布状況を把握するために磁気探査を実施した。調査区域は図-16に示す通りである。

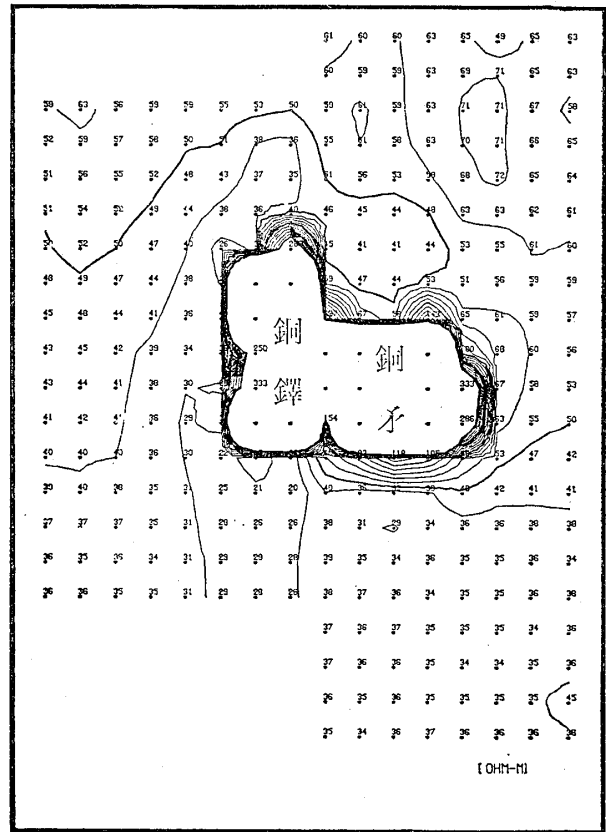


図-15 A地点における詳細な電磁探査の結果
Fig. 15 Results of detailed electromagnetic survey at the site of A

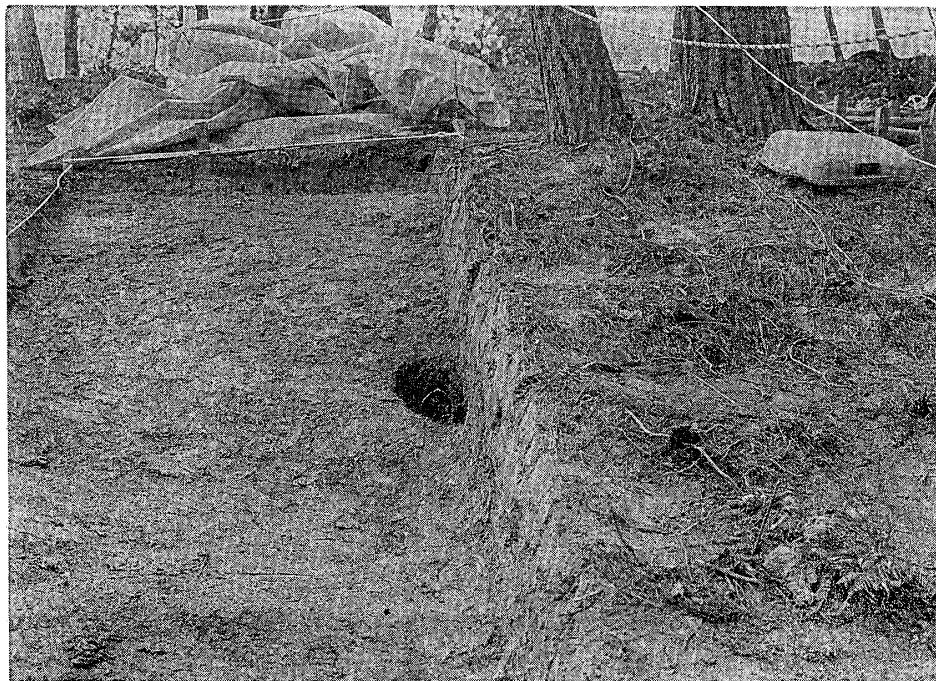


写真 銅鐸の出土状況

Photo A photograph of the excavated bronze relic (Doutaku)

調査には、プロトン磁力計(GEOMETRIX社のG826を使用)による二台連動法を用い、調査区域に2m間隔のグリッドを設け、その格子点を測定点とした。この調査において、二台連動法の定点のセンサー高さは約2.5m、移動点のセンサー高さは約1.0mとした。

この方法は、移動点において測定された全磁力と、それと同時に定点において測定された全磁力の差を各移動点について求め、たとえば、等値線図として表すことによって、磁場の場所的变化を知るものである。図-17は、大丸遺跡における測定結果から得られた全磁力差の等値線図である。

窯跡などのような比較的浅い深度にある磁性体による異常は、狭い範囲における局所的な異常として現れ、一般に、その異常は南側に高異常、北側に低異常が対になっている。図-17には、このような異常を示す箇所を丸で囲い番号(No. 1~No. 10)を付けてある。これらのうちのいくつかは古代の窯跡によって現れた異常であると考えられる。

また、図-17の北東部の比較的広い範囲にわたって半円状の高異常帯が見られるが、これは調査地の外縁部に設置されている鋼矢板によるものである。

磁気探査の結果、数基の窯跡が存在する可能性が高いと判断されたため、発掘調査が行われ、磁気探査を実施した区域内において4基の窯跡が確認された。確認された窯跡などの分布は図-18に示す通りである。これらの分布を図-17に示した磁気異常箇所と対比すると、No. 4の異常は3号窯跡に、No. 6異常は10号窯跡に、No. 7異常は11号窯跡に、No. 9異常は12号窯跡の位置を明確に指摘していたことになる。また、No. 8異常のところでは新しい時代の炭焼窯、No. 10異常のところでは焼土が確認された。しかしながら、No. 1, No. 2, No. 3およびNo. 5の異常については、それに対応するようなものは見られなかった。

磁気探査による計測値には、地盤構造による反応や人工構造物(主に鉄製物)による反応が複雑に影響することから、局所的な磁気異常の解析には、ある程度の経験と判断を必要とするが、上述のように、磁気探査は窯跡の調査に対する有効な手法であると思われる。

5 あとがき

遺跡調査に対して物理探査を利用することの各国の関

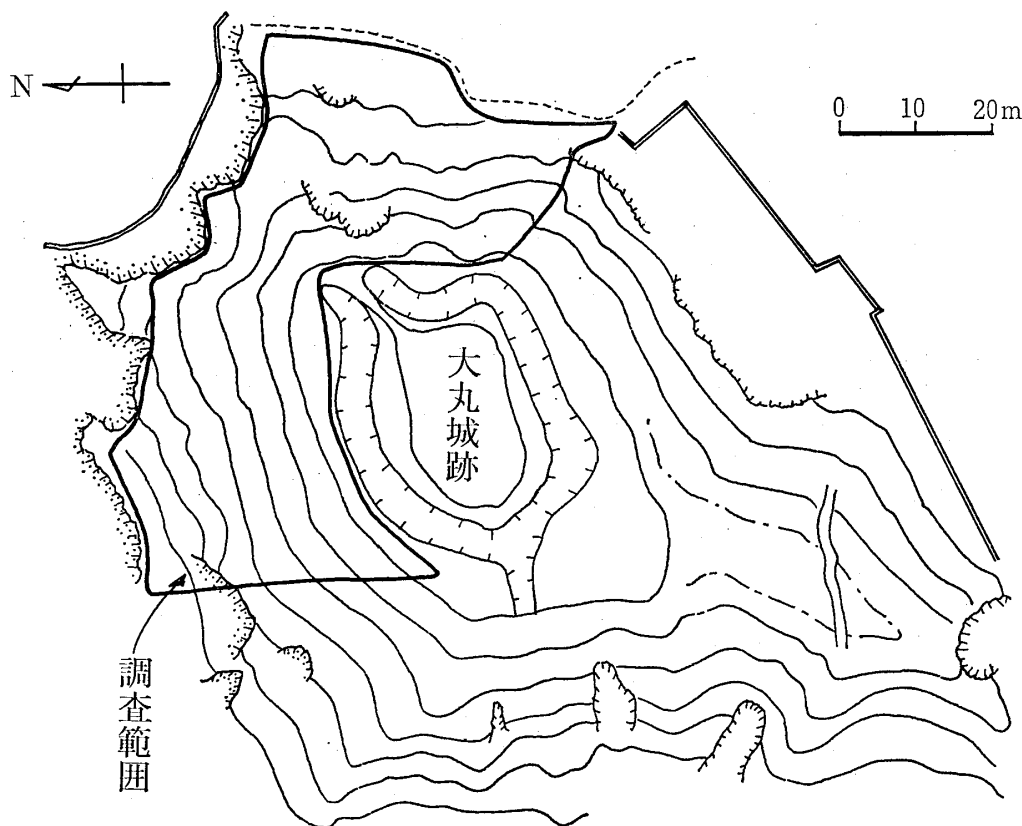
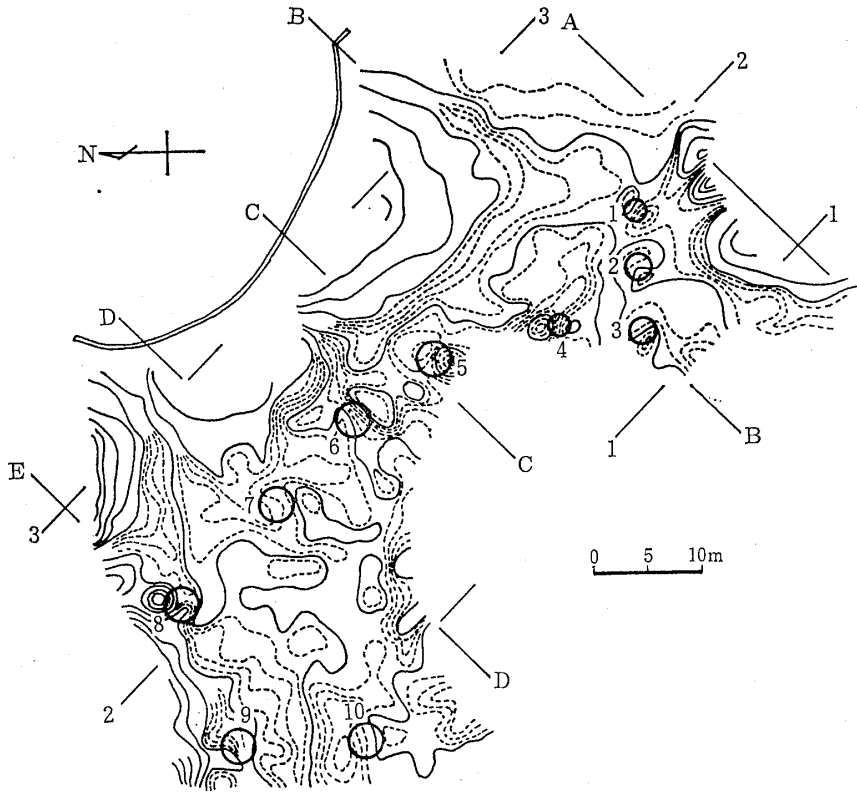


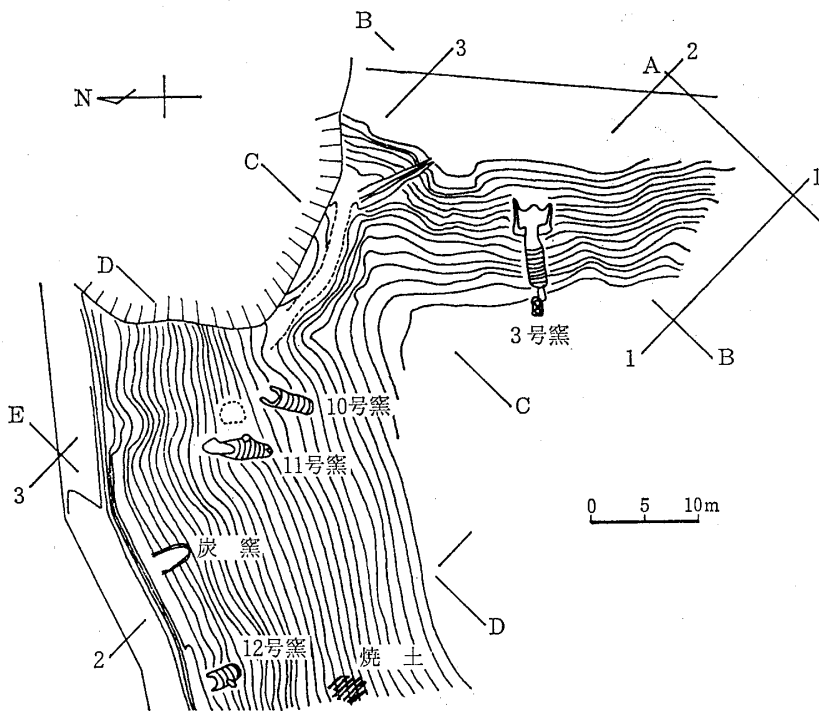
図-16 大丸遺跡における調査範囲

Fig. 16 Investigation area at Daimaru archaeological site



図一17 全磁力差の等値線図

Fig. 17 Contour map of total intensity of geomagnetism



図一18 発掘結果による窯跡の分布

Fig. 18 Distribution of ancient kilns found out by excavation

心は高く、その適用について種々の実験、調査が試行され、各方面で成果を上げてきている。しかしながら、日本における現状は、物理探査が遺跡調査法として十分に実用化されていないし、また、遺跡調査におけるその位置付けも十分に確立されているとは云へない。遺跡調査においては発掘調査が主体であるとはいうものの、発掘に際しては綿密な計画を立て、遺跡に対する無用な破壊を起ささないようにすることが必要である。また、重要な史跡では可能な限り現地保存策がとられることが多くなっている。このようなことから、非破壊調査法が重要視され、遺跡調査においては、今後ますます物理探査を利用しようとする動きが多くなるものと考えられる。

一口に遺跡、あるいは埋蔵文化財といっても、その種類や埋蔵状況は実に多種多様である。このような遺跡を調査するに当たっては、その計画段階において、それぞれの遺跡に適合した探査法を選択し利用することが重要である。また、多様な条件のもとでの遺跡調査関係者からの要望に答えてゆくためには、従来からの探査技術に加えて、遺跡が存在する地表下の極めて浅いところをさらに精密に調べることができるように、いわゆる浅部探査の技術の向上と開発が必要であると思われる。

謝 辞

本報文を執筆するに当たっては、群馬県子持村教育委員会、埼玉県富士見市教育委員会、島根県教育委員会ならびに財団法人東京都埋蔵文化財センターの関係各位から極めて有益な御助言と御協力をいただき、さらに、資料の御提供をいただいた、ここに記して、関係各位に感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- Breiner, S. (1984) : Magnetic Survey for Buried 3000 Year Old Basalt Monuments in Mexico, 54 th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts, pp.179-182
- 文化庁文化財保護部(1966) : 埋蔵文化財 発掘調査の手びき, 国土地理協会発行
- Clark, Anthony J. (1986) : Archaeological geophysics in Britain, *Geophys.* Vol. 51, No. 7, pp. 1404-1413
- 富士見市教育委員会(1984) : 国指定史跡 水子貝塚試掘調査報告書, 富士見市文化財報告第32集
- 原徹夫, 坂山利彦(1983) : 地盤調査に対する地下レーダーの適用性について, *応用地質調査事務所年報* No. 5, pp. 77~91.
- Imai, T, T. Sakayama and T. Kanemori (1987) : Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations., *Geophys.* Vol. 52, No. 2, pp. 137-150
- 井上唯雄, 石井克己(1986) : 群馬県黒井峯遺跡の調査 日本考古学協会第52回総会研究発表要旨, p. 46
- 西村康(1980) : 地下遺構の探査法の開発, *自然科学の手法による遺跡・古文化財等の研究—総括報告書*
- 坂山利彦, 長田正樹, 原徹夫(1984) : 地下レーダー記録のデータ処理, *応用地質調査事務所年報*. No. 6, pp. 37~47
- Scollar, Irwin, Bernd Weidner and Karel Segeth (1986) : Display of archaeological magnetic data, *Geophys.* Vol. 51, No. 3, pp. 623-633
- 島根県教育委員会(1985) : 島根県簸川郡斐川町神庭西谷所在荒神谷遺跡銅剣発掘調査概報
- Tabbagh, A. (1984) : Interest in the Slingram EM Method for Archaeological Prospecting, 54 th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts, pp. 206-208
- 田中琢, 西村康, 岩本圭輔(1978) : 遺跡の磁気探査, *考古学と自然科学* 第11号
- Vaughan, C. J. (1984) : Ground Penetrating Rader Surveys used in Archaeological Investigations; Two Case Histories, 54 th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts, pp. 195-197
- Woods, D. V. and D. H. Krentz (1984) : Integrated Geophysical Investigation of the Fort Frontenac Archaeological Site, 54th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts. pp. 182-185