

電磁気から探る遺跡の研究とGIS

岸田徹・酒井英男

富山大学理学部

1. はじめに

考古学における地理情報システム (GIS) では、ある時間での地理情報としてだけでなく、時間的な変化を追うことが重要になる。その際に、時間軸を厳密に設定することが必要になる。時空間の把握では、発掘結果に基づいた層位的な見解や、遺物型式による時期区分も重要な要素となるが、グローバルな視点で考察する場合は、地域的な相対年代だけではなく絶対年代が必要となる。その際に、放射性炭素年代とともに、遺構や遺物の磁気物性に基づく考古地磁気法による年代も活用される。

考古学の研究では遺跡や、それを構成する遺構、遺物等から、過去の人々の社会、生活、風俗等に関する情報を読み取り、再構築し復元する。研究対象の遺跡は地下に埋没しており、情報を得るために、「発掘」を行う。発掘調査は遺跡を地下から露出させ、研究者の目や手でそれを確認できることから、最も確実な方法である。しかし、考古学調査の支柱である発掘調査は「失敗のできない実験」と言われるように、常にある程度リスクが伴う。発掘によって取り除かれた土は二度と元の状態には戻らず、そこで見過ごされた情報は再び得ることはできない。そこで発掘前に、地下の状況、遺構・遺物の埋没深度や位置、分布範囲などをできるだけ詳しく把握し、それに適合した発掘調査計画をたてる必要がある。それによって発掘調査の精度を高めることができれば、遺跡から抽出できる歴史的情報の量や精度も当然高まることとなる。

また、史跡指定を受けた遺跡のように、発掘調査が困難な場合、非破壊で調査できる遺跡探査は情報収集の強力な方法となる。現在、国内外を問わず遺跡探査の機会は増えている。使用される探査法は対象物の埋没深度や種類によって様々だが、土壌の電気・磁気物性の違いによる変化を測定して土中の「異物」を読み取る電磁気探査が遺跡では活用されており、地中レーダ探査、磁気探査、電気探査等が挙げられる。

GISを使用した分析は主に国土地理院発行の数値地図をベースとしている。考古学で利用する場合は、「当時の生活面＝地下」を対象にするので、古地形や古環境を考慮しなくてはならない。遺跡の立地や分布の研究では、過去の発掘結果を元に研究者が調査報告書や遺跡地図からデータを打ち込むか、関係機関により公開されているデータを使用する。しかし発掘結果はあくまで部分的なものであり、全体像を把握するのは難しい。また、発掘調査は確実な反面、コストが高い。そこで広範囲を迅速に非破壊で調査できる探査の手法を取り入れるメリットは大きい。発掘調

査や探査データをGISに入力し、シミュレーションから立地や遺跡の領域を研究できる。得られた仮説や理論を探査という実践的手法により検証できれば、GISを使用する考古学研究において、新たな可能性を見出せると考えられる。

以下では、まず探査による研究とGISへの利用を紹介し、ついで磁気物性を用いる年代推定の研究について話題を提供する。

2. 探査

2-1. 古墳の地中レーダ探査

地中レーダ探査は様々な遺構・遺物に適用でき、考古学の調査では現在最も多く利用されている。探査において、送信アンテナより送り込まれたレーダ波は、土層の変わり目や異物等の比誘電率の異なる境界で反射し、主に含水率の高い土壤で減衰する。その様子を受信アンテナで捉え、反射波の強弱を色分けして表現する。こうして得た地下断面図の解析から、土中の遺構や遺物を調べる。地下断面をその場で確認できることは、地中レーダ探査の利点となっている。

ここでは、徳島県鳴門市に所在するカニ塚古墳の探査結果を紹介する。同古墳は三段築成の墳丘をもつ円墳で、墳丘表面には砂岩による葺石を有している。墳丘上から瑪瑙製勾玉や円筒埴輪片が採集され、築造時期は5世紀後半と考えられている。

探査では、カニ塚古墳の形状と周濠を調べるとともに、東に隣接した（失われた）尼塚古墳（図1の左図）の存在も検討した。用いたレーダ波周波数は250MHzである。探査結果の断面解析では深度約0.8mに反射の弱い領域が認められた。これは周囲より含水率が高い領域であり、周濠を示すと考えられた。一般に、周濠は埋没後も周囲より含水率が高くレーダ波は減衰する傾向にある。

図1右には、多数の測線での探査結果をまとめて解析したTime slice図を示している。この図の解析法はX線CTスキャンと似ており、反射面を三次元で整理し、地表から擬似的に掘りながら面的に異物の深度変化を追っていく手法と表現できる。図1には、カニ塚古墳を取り巻く周濠が紫色の弱い反射の領域として示され、明確に読みとれる。周濠の幅は4-5mであった。さらにその東側に、削平された尼塚古墳の周濠の位置も明らかに認められる。探査結果から、尼塚古墳の直径は約38mと読みとれた。探査後に一部で確認のため発掘調査が実施されたが、探査の結果と良くあった。探査から確認された尼塚古墳はかなりの規模であり、徳島県内の円墳では2番目の大きさであった。

2-2. 古墳の盛土量算出

古墳の研究における重要なテーマの一つに、盛土量の推算および、古墳を築くために投下された労働力の検討がある。従来、盛土量の算出は、計算し易い平地の古墳においては試みられた例もあるが、多数を占める丘陵に立地した古墳では殆ど検討されていなかった。理由は、そうした古墳では発掘が限られ、盛土の下の地山



図1 徳島県鳴門市におけるカニ塚古墳と尼塚古墳の探査結果を示す。

の形状が十分捉えられなかったためである。我々は、探査データを活用して地山の形状を三次元で把握し、それをを用いて盛土量の計算を試みた。

富山県婦中町（現富山市）の富崎千里古墳群9号墳における調査例を報告する。富崎千里古墳群は18基からなる古墳群であり、古墳時代初頭（3世紀末～4世紀末）の造営と推定されている。9号墳は、標高約56mの丘陵東端に立地し、全長34mを測る前方後方墳である。主軸は北より27度東へ振っている。同古墳の地中レーダ探査は、周波数225MHzと200MHzのアンテナを使用して行った。

この古墳での探査においては、厳密なデータを得るために、CMP調査（Annan and Cosway, 1992）により電磁波の土中伝播速度を求めて探査深度を解析した。また、同古墳の代表的な土壌を採取して、比誘電率の実測も行い探査結果を検討した。

図2右上に示す探査断面図には、8m地点よりほぼ水平に走る土層の境界が認められる。この層は0-10mに見られる地山の構造と平行であり、人為改変（盛土）が加えられていない地山（或いは旧表土）との境界と解釈できる。上部の盛土は、後方部墳頂で約1.9m厚と推定された（図2左下）。前方部には盛土の明確な構造は認められず、探査結果では、前方部の殆どは地山を削りだして成型されていると解釈できる。また盛土中にもあまり顕著では無い境界線があり、盛土構築において、土質の違う土壌が利用された可能性も推測される。

探査で得た盛土と地山の境界をもとに、9号墳の盛土量を計算した。図2左上図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、比高差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。下の図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153m³という結果が得られた。

同様な地中レーダ探査を用いて古墳の盛土量を探る調査は、富山県の阿尾島田A1号墳などでも実施し、良好な結果を得ている。

地中レーダ探査を用いて古墳の盛土量を求めることは可能になってきた。ただ、

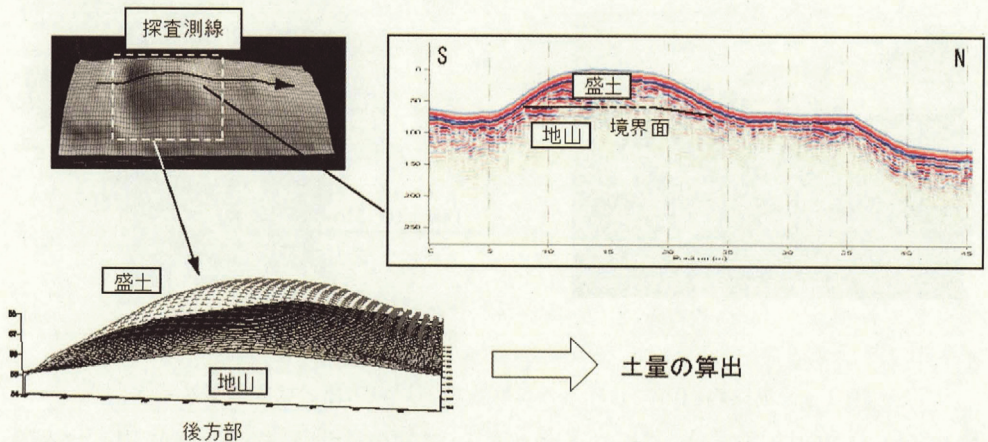


図2 富山県富山市の富崎千里古墳群9号墳を対象に地中レーダ探査から盛土を算出した。

古墳構築における労働力を研究する際には、古墳の時期、立地や形状、内・外部施設等の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、GISから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は非常に意義があると考えられ、現在解析を進めている。

2.3.モンゴル・チンギス=ハンの遺跡での地中レーダ探査

日本の考古学研究グループは、世界における日本を視野に入れる研究発展のため、周辺の極東や東南アジア、さらに中東の国々での研究を展開している。その際、ターゲットを絞った短期間の効率的な調査が望まれ、探査は有効な手段となる。図3は、平成16年8月にモンゴル・チンギス=ハンの霊廟跡の調査研究（日本・モンゴル合同調査団：総団長は加藤晋平・元國學院大學教授、調査代表は新潟大学・白石助教授）にて、地中レーダ探査により得られた予察的な調査結果を示している。基壇跡を中心に異常な応答が囲む形で認められている。異常が現れた深度は地表下約30cm程度までであり、考古学的な知見からは、焼けた牛や馬などの骨と灰が詰まったモンゴル祭祀の痕跡「焼飯（しょうはん）」跡ではないかと推測されている。

2.4.土壌の磁気物性と磁気探査法

窯跡では磁気探査が有効であるが、これは土壌の磁気物性が高温になると変わることを利用している。土壌には、磁鉄鉱や赤鉄鉱などの磁性鉱物が数%程度含まれている。磁性鉱物は常温では磁石の状態、つまり、磁化を持った状態でいられるが、高温に焼かれた時に磁化を失う。この磁化を失う温度をキュリー点という。高温状態にあった磁性鉱物は、冷えてキュリー点まで温度が下がった瞬間に再び磁性を取り戻し、地磁気方向の磁化を獲得する。この様に獲得された磁化を熱残留磁化といい、焼成時の地磁気を記憶した磁石になる。

焼土の熱残留磁化は、加熱を受けていない土壌の磁化に比べて数10倍も強い。

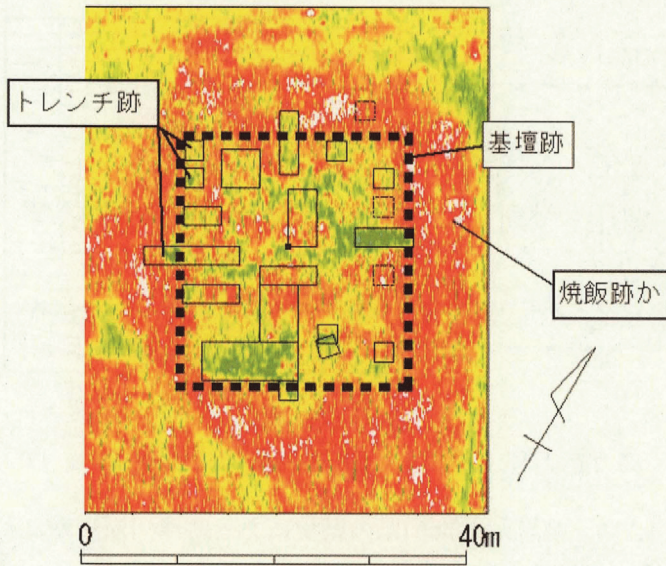


図3 モンゴルアウラガ遺跡での地中レーダ探査

前はスイカ畑であった地域から得た顕著な磁気異常は、地中の窯跡の平面位置を10cmの精度で推定していた（酒井ほか、1993）。探査法や解析に改良を加えた結果、広範囲の調査から窯跡を探り、窯の形状、大きさや軸線の方位を押さえるだけでなく、窯内の焚き口等、焼成度の高い領域を事前に探ることも可能となっている。

3. 考古地磁気年代推定法

先述の様に、土壌は高温まで加熱されると冷却時に熱残留磁化を獲得するので、焼土や土器等の遺物は熱残留磁化を有し、当時の地磁気の化石となっている。地磁気は、地磁気方向の真北からのずれである偏角、水平面からの傾きを示す伏角、および地磁気の強さで表現され、これらは地磁気の3要素と呼ばれている（図5上）。

地磁気の原因は地球内部にあり、一種の巨大な電磁石が生じているためである。この地球内部の電磁石は変化しており、それに起因する地磁気も時間変化している。図5は、日本国内における数千基の窯跡焼土から研究された紀元後2000年間における地磁気の偏角と伏角の変動を表している（Hirooka, 1971; 広岡, 1999など）。下の図は、遺構出土の土器片を主な実験試料として得られた地磁気強度の変動を示している（Sakai & Hirooka, 1986）。

図5の地磁気の標準変動曲線は、古文書や信頼できる考古年代を時間軸として作られている。年代不明瞭の遺構から焼土や遺物が得られた場合、その残留磁化を地磁気標準変動と対比することにより、年代推定が可能となる。この考古地磁気年代推定法は、遺構や遺物そのものを利用する特長を持ち、条件の良い遺構においては、精度20-30年での年代推定が可能となっている。

地磁気変動の標準曲線は、遺跡を襲った火山噴火や地震の発生日代を決める上で

また、熱残留磁化は常温では磁氣的に非常に安定で、何万年たっても焼成時の地磁気の方角を記憶している。つまり、熱残留磁化を持った焼土は地中の強い磁石の領域となって、ずっと残っている。このため地表で磁気探査を行うと、加熱を受けた領域を磁気の異常領域として見つけることができる。

図4は、石川県珠洲市の珠洲焼窯を対象とした磁気探査の調査例である。発掘

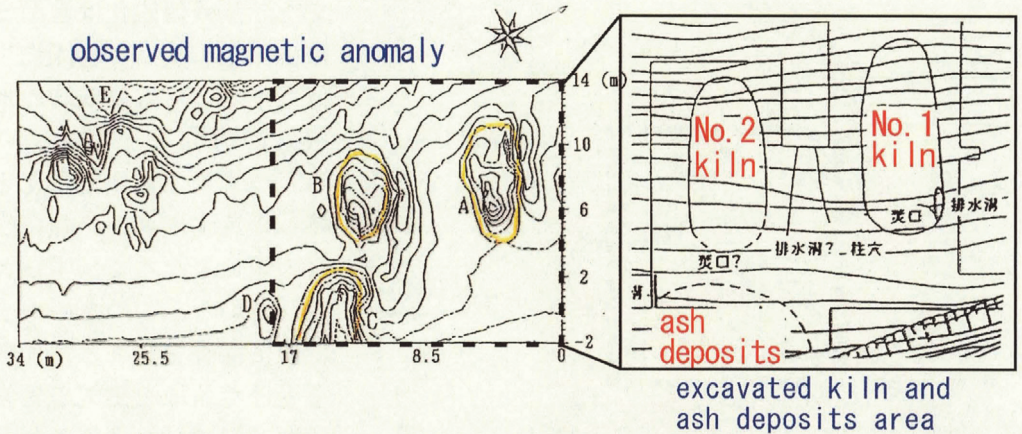


図4 珠洲焼窯において、プロトン磁力計で得た探査結果（左）と発掘された窯跡の分布（右）

も役立っている。図5のデータAは、岐阜県と富山県の県境にある跡津川断層が江戸時代に活動した際の土壌（噴砂）の残留磁化から地震の年代を求めた例である（酒井・広岡，1983）。また、図5データBは、6世紀中期に榛名山の噴火で埋まった群馬県子持村の遺跡から得た結果である。日本のポンペイと言われる同遺跡を瞬時に埋めた火山堆積物は、その年代の地磁気を確かに記憶していた。火山が多く地震も多発する日本では自然災害を被った遺跡も少なくない。考古学において災害の痕跡も重要な研究になると考えられ、基礎となる年代推定に考古地磁気法は活用できる。

4. おわりに

考古学において、年代は最も重要なパラメータの一つである。GISによる研究においても、遺構・遺物の年代が必要である。考古地磁気年代推定法の研究は、諸外国に比べて日本は進んでおり、年代測定の精度は高い。考古学において基本情報である年代軸の設定に、放射性炭素年代推定法と考古地磁気年代推定法を共に利用できることは、GISにおいても世界に先駆ける研究を目指す際に有利な条件と言えよう。

考古学における電磁気探査の利用は今後さらに貢献が期待できる。GISによる遺跡の研究において、鳥瞰図を作成して可視領域、分布や大きさによる領域図などの分析がなされている。しかし大きさで見ても長い年月の間に削られ縮小したり、さらには消失した遺構も少なくない。高精度の探査によって、地下の平面図や三次元での図化が可能となり、縮小や消失を発掘せずに検討できる。

更に、探査区の国土座標を取得していれば、探査結果をGIS上にのせることもできる。発掘結果がある場合は併せて閲覧することで新たな情報源となる。我々は探査の際に探査エリアの国土座標を取得し、探査結果をGIS上に載せる作業を開始している。探査と発掘により遺跡の立地や分布を研究し、得られた仮説や理論を再び探査という実践的手法によって検証することがルーチンとなれば、GISを使用した考古学研究は新たな可能性を見出せると考える。

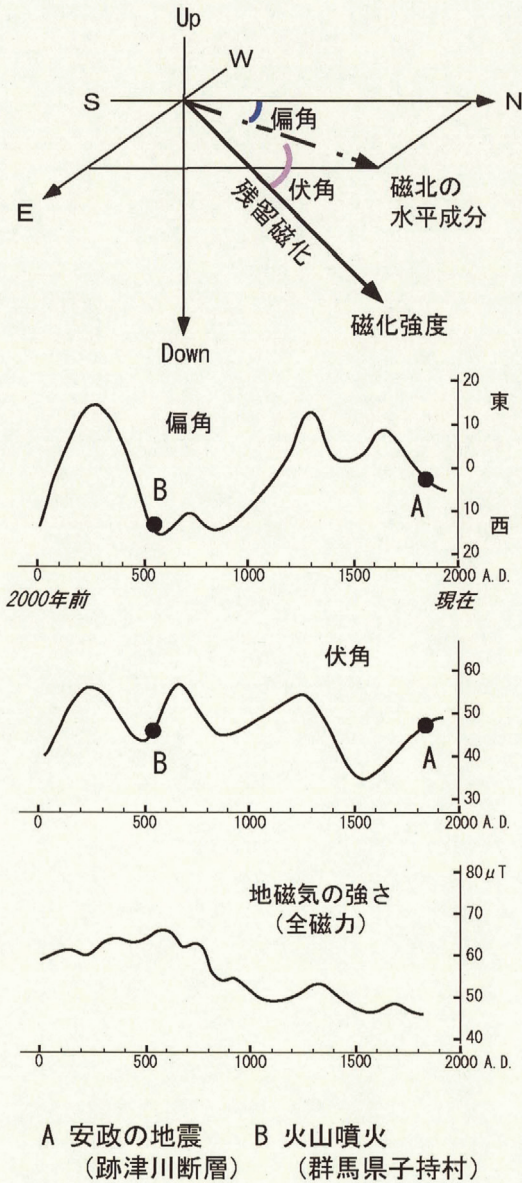


図5 地磁気の三要素および、その過去2000年間の変動。

空間に関する研究はGISがもっとも得意とする、意義ある分野である。大地の堆積や侵食量の計算においても、GISの利用により迅速に簡便に行うことが可能となる。考古学的に重要な堆積量の計算例の一つに古墳の盛土量がある。体積を計算する場合は対象となる遺構の三次元構造を把握する必要がある。盛土の上面・下面の座標データの策定に探査による非破壊の調査を利用することで、古墳盛土の調査は大きく発展するであろう。

参考文献

Hirooka, K. (1971) : Archaeomagnetic study for the past 2000years in southwest Japan. Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ. Ser. Geol. Mineral, 38, 167-207.

広岡公夫 (1999) 古地磁気法・考古地磁気法, 「考古学のための年代測定学入門」, 長友恒人編, 古今書院, 39-57.

金田明大・津村宏臣・新納 泉 (2001) : 「考古学のためのGIS入門」, 古今書院, 1-231.

岸田徹・酒井英男 (2002) : 富崎千里古墳群における地中レーダ探査, 「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, 127-131.

岸田徹・酒井英男 (2003) : 阿尾島田A1号墳におけるレーダ探査, 「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, 34-37.

酒井英男・広岡公夫 (1983) : 古地磁気・岩石

磁気から見た断層運動, 月刊地球, vol. 7, 394-398.

Sakai, H. and Hirooka, K. (1986) : Archaeointensity determinations from western Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 1323-1329.

酒井英男・小林剛・山田剛士・田中保士 (1993) : 石川県珠洲市大島遺跡における登り窯の磁気探査, 「珠洲大島窯」, 富山大学考古学教室, 真陽社, 67-75.

酒井英男・D. Goodman・田中謙次 (1999) : 考古学および雪氷学における地中レーダ探査法, 地

質ニュース, vol.537, 16-23.

Electric and Magnetic Research on Archaeological Sites and Remains

Kishida Toru Sakai Hideo

Faculty of Science, Toyama University

Excavation is generally regarded as the most important part of archaeological fieldwork as it allows researchers to directly observe the artifacts and structures that they will be working on. Prospecting, on the other hand, can serve both as an alternative means of data acquisition when digging is not feasible and as a tool for ensuring the efficiency of an excavation project. Among the various methods of prospecting currently available, the method utilizing electromagnetism is known to be especially effective in archaeological research. Underground objects have electromagnetic properties that are distinct from those of the soil surrounding them. Electromagnetic prospecting endeavors to locate buried artifacts by detecting this difference in the target area. Electromagnetic properties themselves also represent valuable sources of archaeological information. Remanent magnetizations, called "fossils of geomagnetism," are used particularly extensively in dating ancient artifacts and tracing their thermal histories.

Recent advances in prospecting equipment and analysis procedures have made it possible to determine the precise three-dimensional position of an underground object within a broad geographic area. Accordingly, archaeological data gained through electromagnetic prospecting can now be considered accurate enough to be reliably used with a geographic information system (GIS).

Also recorded in the remanent magnetization of an archaeological object is the direction of the geomagnetic field at the time when the article was in use. In other words, in addition to being useful in dating ancient artifacts, a remanent magnetization offers spatial information about their original environment. The data obtained through its analysis can therefore be used in GIS research as well.

Based on the above, this report outlines the process of an archaeological prospecting project that involved measurement of electromagnetic properties and remanent magnetizations. The actual tasks performed include archaeomagnetic dating, locating of underground structures using ground penetrating radar (GPR) and magnetic survey techniques, and estimation of the volume of fill in the mound using GPR, all of which are closely related to GIS.