

# 磁気探査の窯跡調査への適用性について

高瀬 尚人・峠 美穂

## Applicability of the magnetic method to investigation of archeological kilns

Naoto Takase • Miho Tohge

### Abstract

As urbanization is proceeding, the number of archeological investigations has been increasing in recent years. Especially archeological kilns have been often discovered around the hill with the forest whose slope is the suitable place for making a kiln. However most of old kilns are buried and distributed in a wide area. It is not so easy to effectively discover the archeological kilns. Since the kiln has thermo-remanent magnetism due to its burning in the past, it can be detected by the magnetic method that can image the subsurface magnetic anomalies. The magnetic method has been increasingly employed to locate buried kilns prior to their excavations. To enhance its application to investigation of archeological kilns more widely, depth of investigation, spatial resolution and robustness to the noise of the method are studied through numerical calculations and filed examples. This study reveals the following conclusions:

(1) Depth of investigation

The depth of investigation is around 1.5m for detection of the normal buried kilns.

(2) Spatial resolution

Spatial resolution of adjacent kilns is around 4m in most of cases.

(3) Influence of Noise

The magnitude of a magnetic anomaly changes with the change of the orientation of the long metallic object. The orientation of the object as well as the distance from it should be carefully considered in planning of measurement locations. Generally the measurement location should be more than 10m away from the metallic object.

**Key words:** The magnetic method, the archeological kiln

### 1. まえがき

近年、国土開発が急速かつ大規模に進められてきたことにより、それに伴う遺跡の発掘調査が増大している。開発工事が行われる地域を丘陵や山間部に限定した場合、対象となる遺跡としては「窯跡」が多くなる。これは、窯跡は、その用途（何を焼くか）により埴輪窯、須恵器窯、瓦窯などに分類されるが（表-1参照）、その形態は概ね登り窯が中心であり、これらの登り窯は傾斜面を利用して造営され、操業には粘土、水、燃料となる薪が必要となる。そのため、窯はこれらの条件を満たす場所、例えば風通しの良い丘陵の斜面や山間部に造られることが多いからである。一般に遺跡というと、環濠集落や古墳、城郭など大規模な建造物に注目しがちである。しかしながら、生産遺跡である「窯跡」は先人の日常生活を顧みるうえで重要な歴史遺産であり、窯跡の調査・研究

は考古学上極めて重要である。

通常、発掘調査を効率的におこなうために、事前に遺跡の分布状況の確認調査が行われるが、これは、発掘費用や期間等を含む調査計画を立案する上で極めて重要な情報を提供する。

窯跡に対する分布状況の確認調査では、通常、地表踏査などの予備調査が行われ、焚口付近に掻き出された灰や焼き物の破片が地表に散在している場合（このような場所を“灰原”等と呼ぶ）や壊れた窯体が地表で採取できる場合に、窯跡があると判断される。しかし、窯跡のほとんどは山林の斜面に点在し、埋没しているため、その周辺には地表に露出していない他の窯跡が埋没している可能性もある。したがって、窯跡の存在が推定されても、窯本体の位置や数などの分布状況を把握することは難しいのが通例である。

表-1 窯跡の種類<sup>1) 2)</sup>

Table.1 Classification of archeological kilns

窯の種類	埴輪窯	須恵器窯	瓦窯	陶器窯	製鉄炉
時代(年代)	古墳時代	古墳後期～(5世紀頃～14世紀)	奈良時代～(6世紀後半頃～)	平安時代末頃～	6世紀末頃～
構造	登り窯	登り窯(平安時代には平窯もあり)	登り窯(時代が下がると平窯もあり)	登り窯～(16世紀前半に大窯が登場)	8世紀～9世紀 竪形炉(東日本)、箱型炉(西日本)
大きさ	長さ: 1.5～10m程度 幅: 0.6～2.5m程度 傾斜: 10～25°	長さ: 8～10m程度 幅: 1.2～2 m程度 傾斜: 10°前後(平窯は傾斜なし)	長さ: 7～10m程度 幅: 0.5～2 m程度 傾斜: 12～25°(平窯は傾斜なし)	大窯の場合 全長: 8 m 最大幅: 3.4 m	竪形炉: φ70cm×H 1 m前後 箱型炉: L60cm×W40cm×H70cm前後
焼成温度	1000℃以上	1100～1200℃	1100～1200℃	1200℃以上	1500℃以上
備考	・須恵器との兼用窯もある。	・奈良・平安期の登り窯構造の場合、瓦陶兼用窯が多い。			

埴輪窯・須恵器窯・瓦窯(登り窯)

瓦窯(登り窯)

陶器窯  
(左上: 登り窯、左下: 大窯、上: 階段式登り窯)

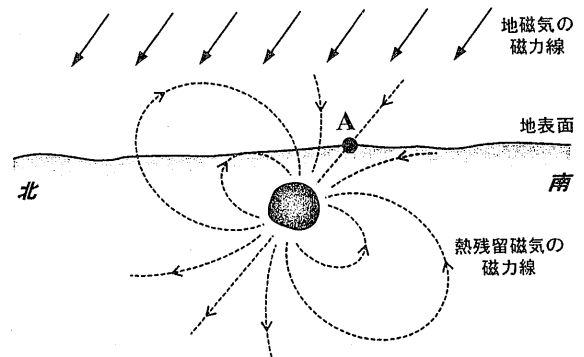
製鉄炉  
(上: 竪形炉、下: 箱型炉)

一方、窯跡はその焼成時に熱残留磁気を帯びることからそれ独自の磁場を有している。そこで、その局所的な磁気異常を磁気探査によって検出することによって、窯跡の位置を推定することができる。磁気探査は、非破壊的かつ効率的に広範囲の窯跡の分布状況を把握することが可能なため、発掘調査前の窯跡調査に適した手法として利用されている。しなしながら、今後さらに適用を拡大していくためには、その適用性を正しく評価することが重要である。そこで、本稿では、磁気探査の適用性を評価する上で特に重要な探査深度、複数の窯跡を識別するための空間的な分解能、周辺ノイズの影響範囲の3点について、数値シミュレーションと調査事例を基に検討したので報告する。

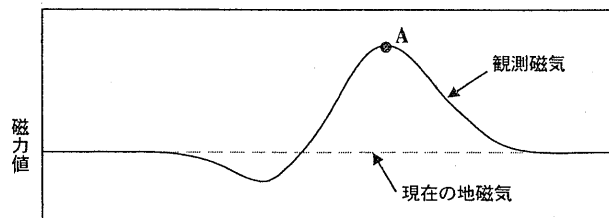
2. 磁気探査について

磁気探査は、地表付近において地磁気を測定し、その地磁気分布の中から地下の磁性体に起因する磁気異常を検出し、その原因となっている断層等の地質構造や埋没金属体等を推定する物理探査手法である。遺跡調査の分野においては、窯跡や金属性遺物(青銅器を除く)調査等に利用されている。

一般に土壤中に含まれる磁性鉱物は物質固有のある一定温度(キュリー点温度)以上に熱せられると磁性を失う。その後、冷却段階でその時点での地磁気方向に帯磁し、以後長期にわたりその磁気モーメントを保持し続ける。これは熱残留磁気と呼ばれる現象である。遺跡調査の対象となる窯跡の場合、窯の床面や壁面が土器や瓦な



(a) 磁力線の向き  
(a) Directions of magnetic forces



(b) 測定磁気値  
(b) Observed geomagnetic variation

図-1 磁気異常  
Fig.1 The magnetic anomaly

どの焼成時に受ける高熱のために熱残留磁気を帯びていることから、窯跡は独自の磁場を有している。これによる磁気異常を磁気探査により検出することによって、窯跡の位置等を推定することが可能となる。

図-1に磁気探査の原理を示す。鉛直(断面)方向のみで考えた場合、埋没した窯跡の有する磁気は熱を受けた歴史時代の地磁気伏角方向に傾いて存在している(図(a)中の破線はこの埋まっている窯跡からの磁力線を示す)。磁気探査によって地表で測定する磁力値は実線の矢印で描いた現在の地磁気と破線の熱残留磁気との合成であり、この観測値から現在の地磁気成分を除去することによって窯跡に起因する磁気成分を磁気異常値として検出する。すなわち、図(b)で示す磁力値変化が地表で連続して測定した場合の磁気異常である。通常、ここに示すように、地下の異常体を挟んで正負の異常値が観測されるのが特徴である。この値が最も大きくなる位置は、現在の地磁気の向きと熱残留磁気の向きが一致する方向の位置(図中A)である。

### 3. 窯跡調査への適用性についての検討

#### 3.1 検出可能深度について

磁気探査による窯跡の探査深度について調べるために、窯跡の埋没深度に対して、地表面においてどの程度の磁気異常が検出できるか、数値シミュレーションと実測データにより検討を行った。

窯跡を均質地盤中に埋没した球体とすると、それによる地表で測定される磁気(異常)の大きさは、距離(深度)の3乗に逆比例して減衰する。そこで、ここでは実際の発掘調査により深度情報が得られている中部地方須恵器窯跡3地点の実測データに減衰曲線を当てはめて検討を行った(図-2)。

一方、測定時の誤差について実測データを分析し、どのレベルで窯跡からのシグナル(磁気異常)とノイズが区分できるかについて検討した。図-3は、探査範囲内

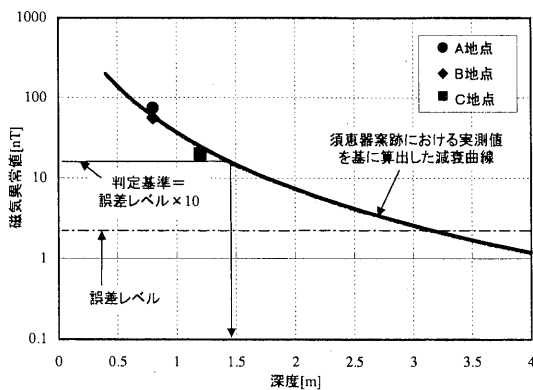


図-2 埋没深度と磁気異常の関係  
Fig. 2 The depth of the anomalous body and its magnetism

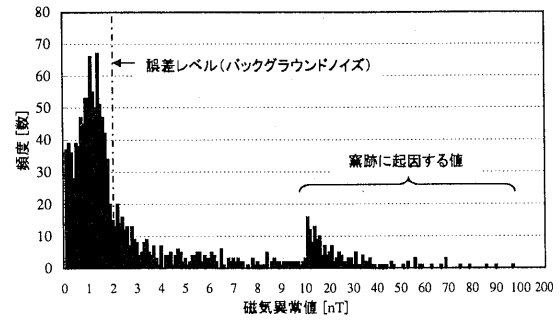


図-3 実測測定値の分析結果  
Fig. 3 Frequency distribution of the magnetic anomalies in actual observations

に金属製ゴミ等が存在しない静磁場の状態で測定したデータであり、横軸は磁気異常値、縦軸は異常値の検出頻度を表している。図-3によると、窯跡に起因する異常値は概ね10~100nT、バックグラウンドノイズと呼べる測定誤差レベルは2nT程度であることがわかる。

実際の探査で検出可能なS/N比を10程度と想定すると、上記ノイズレベルの10倍、つまり20nT程度が検出の限界値と考えられるので、図-2の結果を参考にすると、磁気探査で通常の窯跡を検知できる探査深度は、1.5m程度と想定することができる。

#### 3.2 検出可能な水平配置の分解能について

窯跡は丘陵斜面に複数基が群在している場合がある。ここでは並列する窯跡がどの程度の間隔で離れていれば個別に認識することができるかを検討した。

数値シミュレーションでは、直径1mの窯跡が2基、深度1mに存在するモデルを想定した。<sup>3)</sup> 上述の通り、磁気異常の大きさは、地球磁場との関係により、磁性体の方向によっても変化する。そこで、ここでは、窯跡が東-西に並列する場合と南-北に並列する場合の2つのケースについて、並列間隔を変化させることによりどのような磁気異常が得られるかについて計算を行った。計算結果を図-4に示す。以下、各ケースの計算結果について、探査実例を交えて説明する。

##### (1) 窯跡が東-西に並列している場合

数値シミュレーション結果である図-4(a)によると、窯跡の間隔が5mの場合には2つの窯跡を識別できるが、4mの場合には辛うじて正の磁気異常が識別できる程度となる。3mでは正負とも重なり合い磁気異常は一对にしか見えない。

[探査の実例1]: 権現坂埴輪窯跡群(埼玉県江南町)  
荒川沖積地を見下ろす標高50mの丘陵北縁に位置し、窯跡のある山林内には円筒埴輪の破片が広範囲にわたって散在している。5世紀末から6世紀にかけて、現在の埼玉県行田市に埼玉古墳群が形成されたが、権現坂窯跡群も本古墳群への埴輪供給地となっていたと考えられている。

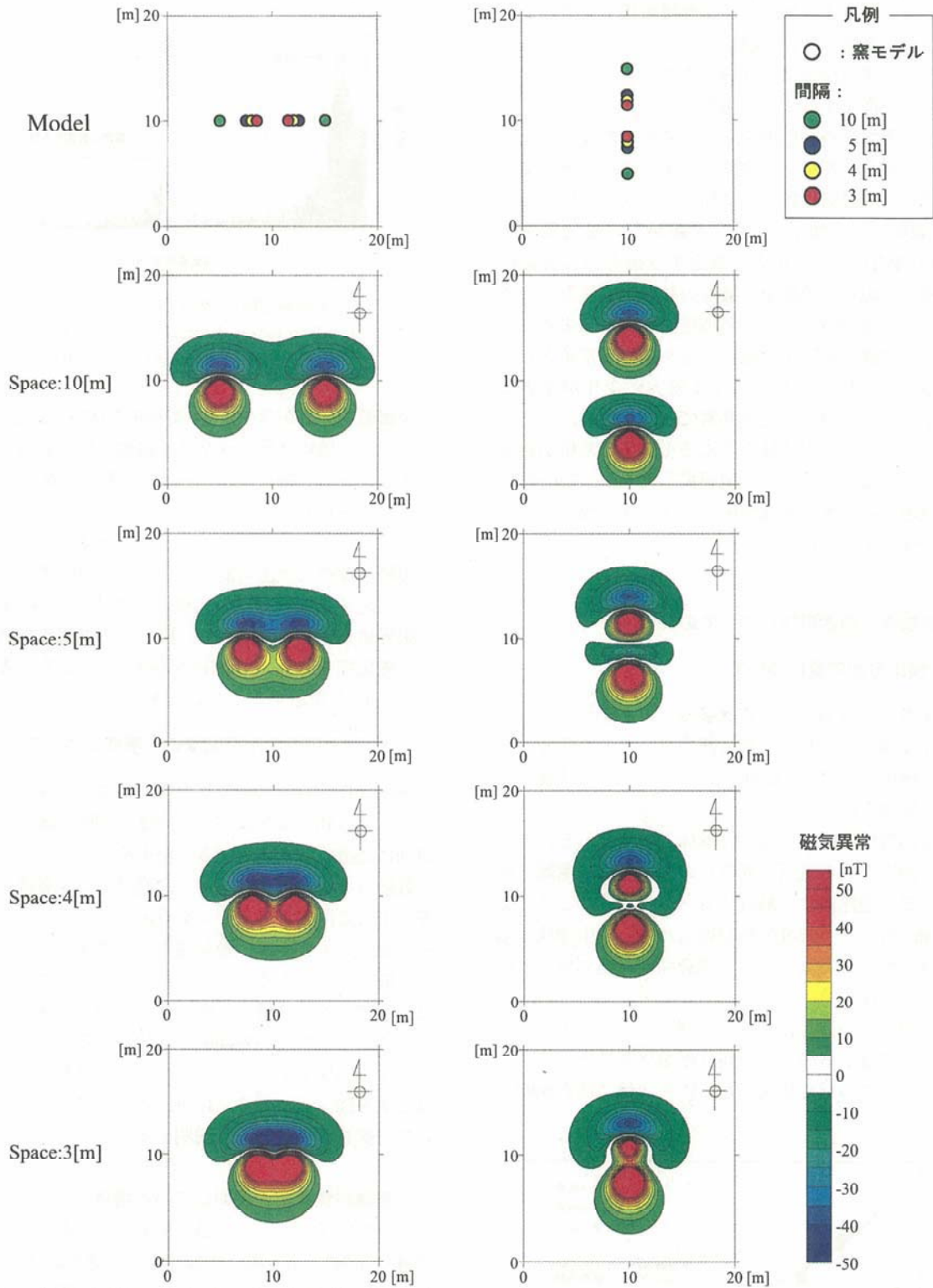


図-4 配置状況の違いによる磁気異常の変化

Fig. 4 Change of magnetic anomaly due to the difference of arrangement between two kilns  
 (a) 東-西に並列している場合 In the case of the alignment of the East-West direction  
 (b) 南-北に並列している場合 In the case of the alignment of the South-North direction

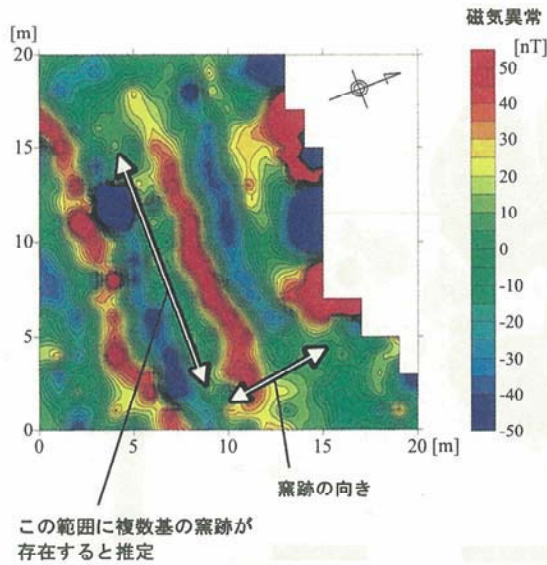


図-5 東西方向に並列している窯跡の事例  
 Fig. 5 An example of the magnetic anomaly map for the kilns with the alignment of the East-West direction



図-6 発掘後の窯跡の空中写真<sup>9)</sup>  
 Fig. 6 The photograph of the excavated kilns

本古墳で埴輪窯跡を対象に実施された磁気探査の結果を図-5に示す。この結果では、東-西方向に正負の磁気異常が約16m程度伸長しており、この方向に窯体が存在すると判読できる。しかしながら、埴輪窯跡としては大き過ぎること、斜面の等高線に沿っていることから、複数基の窯跡が存在していると推定された。図-6に示す発掘調査時の空中撮影記録から、推定したとおり複数基の窯跡が2~3m間隔、あるいは重なり合っていることがわかる。

(2) 窯跡が南-北に並列している場合

数値シミュレーションでは窯跡の間隔が10mの場合、磁気異常が南側から「正-負-正-負」と並んでいることが識別できるが、間隔が狭まるに従いこの並びが不明瞭になる。間隔が3~4mでは、正負が一对をなさなくなる(図-4参照)。特に、間隔が3mになると、2基

が並列していると判読することは難しいことがわかる。

〔探査の実例2〕：丸石八号古窯跡群(岐阜県土岐市)  
 本遺跡の場合、探査前の地表踏査で、丘陵東斜面の一面に陶器片が散在することが確認されていたが、窯体の所在については不明であった。

斜面を対象に実施された磁気探査探査結果を図-8に示す。この結果、斜面に対してほぼ等間隔に並存する4対の正負の磁気異常(①~④)とその下方に点状して広がっている磁気異常(⑤)が検出された。発掘調査の結果(写真-1参照)、以下のとおり遺構が確認され、磁気探査の推定結果と一致した。

- ①~④：窯跡
- (①と②は近接。③は下層にもう1基の窯体が存在)
- ⑤：灰原

探査結果を詳細に見ると、①の負磁気異常の幅が狭く、②の正磁気異常の値が小さいことが読み取れる。図中の直線A-A'に沿って磁気異常値を取り出した記録が図-7であるが、①と②の窯体間隔が③と④の間隔よりも狭く、相互が近接しているため正負の記録振幅が互いに打ち消し合ったためにそのような結果となったと推定される。その限界は4, 5m程度と推定されるが、この結果は、モデル計算により予測された値とよく一致している。

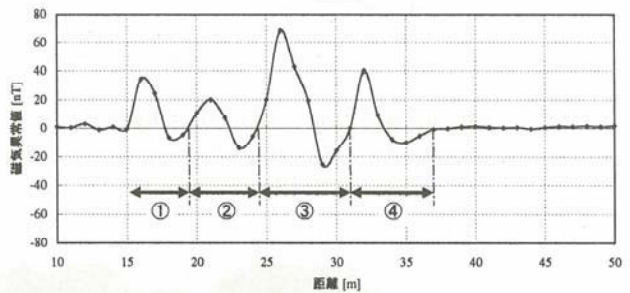


図-7 A-A'測線における磁気異常  
 Fig. 7 The magnetic anomaly along the A-A'line

3.3 既存構造物等によるノイズの影響について

過去においては人里離れた丘陵斜面に造られた窯も、近年の開発により宅地や道路に隣接している場合も多い。このことがノイズ源を増加させ、磁気探査による窯跡の検出を困難にする場合がある。一例として、ガードレールの影響による磁気異常の変化について、実測データを基に検討する。

図-9は、ガードレール近傍で実測された磁気異常値の距離減衰の様子を示したものである。図中には、理論的に予想される減衰曲線を、ガードレールが東西方向に設置されている場合と南北方向に設置されている場合について、それぞれ実線で示した。ガードレールから2m程度離れた地点では1,000nT以上、5m離れても30~100nT以上の磁気異常値が測定されている。窯跡からの磁

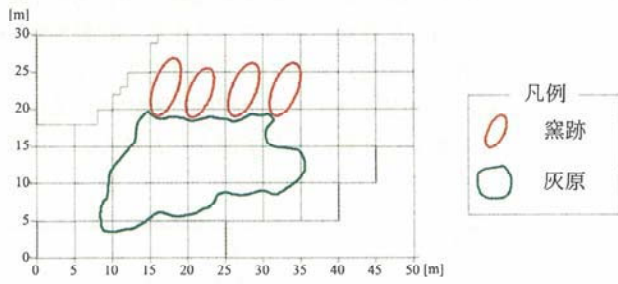
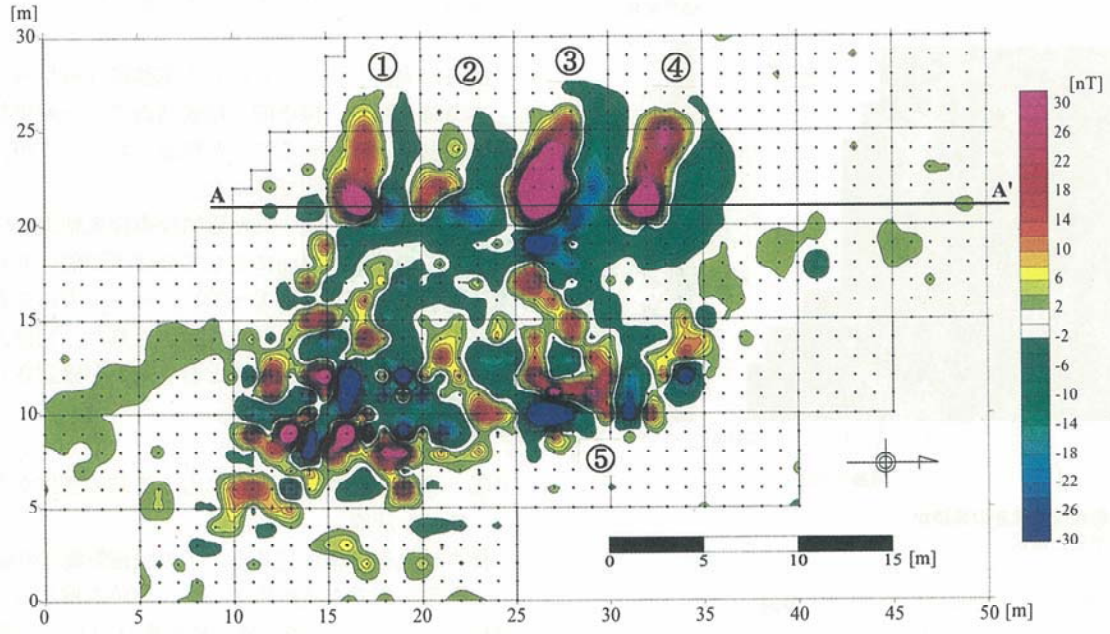


図-8 南北方向に並列している事例

Fig. 8 An example of the magnetic anomaly map for the kilns with the alignment of the South-North direction



写真-1 発掘状況

Photo.1 The situation of an excavation

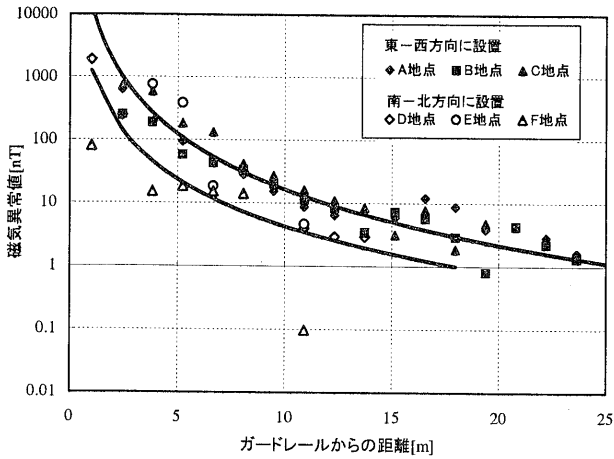


図-9 ガードレールによる磁気異常  
Fig.9 Magnetic anomaly due to a guardrail

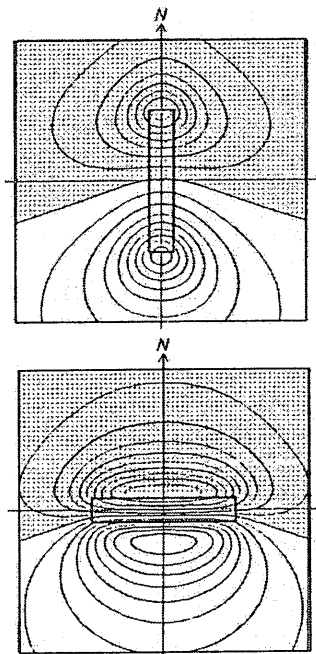


図-10 構造物の設置方向の違いによる磁気異常の変化  
Fig.10 Change of magnetic anomaly due to the direction of the long metallic object

気異常は大きくても100nT程度であるため、ガードレールからこの距離以内に窯跡が存在していたとしてもその検出は難しいことがわかる。上記同様、S/N比が10以上を検知限界と想定すると、窯跡からの信号が100nTと大きい場合でも、ガードレールからの影響が10nT程度に低下する距離、つまり、ガードレールが東-西方向に設置されている場合は12m程度、南-北方向に設置されている場合でも7m程度以上、離れている必要があることがわかる。

構造物によって受ける影響範囲は、上記のように構造物の設置されている方向により差がある。これは長さを有した金属異常体に対する磁気異常を表した図-10に示されるとおりである。金属物などの異常体が南-北方向

に連続する場合は、その端点に磁気異常が局所的に集中するため、異常体の東-西方向では比較的影響が少ない。一方、東-西方向に連続する場合には、その南側・北側にそれぞれ磁気異常が広く分布する。

本稿での事例に置きかえると、ガードレールの側面方向に対する磁気異常の影響範囲は、南-北方向に設置されている場合は比較的小さく、東-西方向に設置されている場合には、広い範囲で影響を受けることになる。

[探査の実例3] ガードレールの影響

探査範囲外で東-西方向に設置されているガードレールが存在していた。この地点から約6~8m程度までは50nT以上の磁気異常が検出され、離れるに従い徐々に減衰を示した。

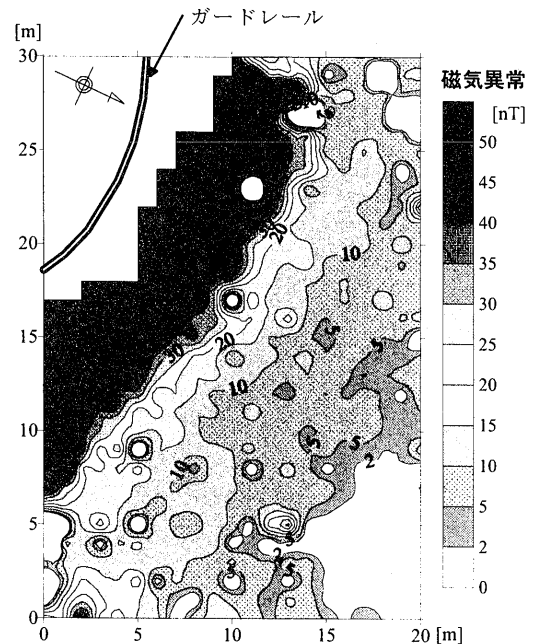


図-11 ガードレールに隣接する地点での磁気異常例  
Fig.11 An example of the magnetic anomaly near a guardrail

以上のように、磁気探査の計画を立てる際には、構造物の位置のみならず、設置されている方向にも注意し、影響を受ける範囲を予測しておかなければならない。

なお、空き缶等の小さな金属製ゴミも探査に影響を与えるため、明らかに金属物が散在している調査区域では着手前に金属探知機等によって検知し、取り除く必要がある。

5. あとがき

広範囲の磁気異常分布を効率的に探査できる磁気探査法は、熱残留磁気を有する窯跡を探査する手法として適しており、適用例も多い。しかしながら、窯跡に起因する磁気異常は通常それほど大きくないため、探査可能深

度やノイズの影響などについて十分理解し、適切な探査計画を立案しなければならない。また探査により得られた結果を解釈するためには、窯跡の埋蔵状況による磁気異常の変化のパターンを理解しておかねばならず、これに窯跡の構造や立地条件などについての考古学的知見を加味する必要がある。本稿では、磁気探査の窯跡調査への適用拡大を念頭に、窯跡と磁気異常との関係について検討した。その結果は以下のように要約できる。

- ① 通常の窯跡の場合、探査可能な深度は1.5m程度と考える必要がある。
- ② 群在あるいは並存する窯跡を識別する窯跡間の限界距離は4m程度である。
- ③ ガードレール等長さを有した金属物による磁気異常ノイズは、その設置方位により変化するので、注意する必要がある。一般に、窯跡調査では、そのようなノイズ源から10m以上離れる必要がある。

以上のような点を念頭において適切な探査計画を立案することにより、広範囲を迅速に探査できる磁気探査の利点を活かした窯跡調査は、さらに有効なものとする事ができるものとする。

## 6. 謝辞

この報文の執筆に当っては、埼玉県江南町教育委員会、(財)岐阜県文化財保護センターおよび(株)イビソクの関係各位から、各種資料の使用に対する御了解と多岐にわたる御助力を頂きました。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 中村浩.窯業遺跡入門. 東京, ニュー・サイエンス社, 1982, 115p
- 2) (財)瀬戸市埋蔵文化財センター. “瀬戸・美濃系大窯の窯体構造”. 瀬戸・美濃系大窯とその周辺. 愛知, 瀬戸市埋蔵文化財センター, 1997, p19
- 3) Thomas Bell ; Douglas DeProspero ; Mark Prouty. MagAID : PC-BASED TARGET CHARACTERIZATION SOFTWARE FOR USE WITH TOTAL FIELD MAGNETOMETER SURVEY DATA. 9th SAGEEP. 1996
- 4) 江南町史編さん委員会 : 江南町史 資料編1 考古, pp. 270-290, 1995. 3.