

住居跡の磁気探査に関する一考察

亀井宏行¹⁾・浜島多加志²⁾・西村 康³⁾・川野邊渉⁴⁾

1. はじめに

磁気探査による遺跡の調査は、わが国でもいくつかの報告があるが(岩本:1974, 田中他:1978など)、比較的強い磁化を持った遺構、つまり窯跡や炉跡のように、熱残留磁気を帯びた遺構にのみ有効であるとされてきている。図1は、筆者らが調査した会津若松市大戸古窯跡群南原33号窯跡の磁気探査結果であり(浜島他:1989)、同図(a)は遺構概略図、同図(b)はフラックスゲート型グラジオメータ(Geoscan Research 社製 FM-18)による磁気傾斜測定結果、同図(c)はプロトン磁力計(Geometrics 社製 G-856)による全磁力探査結果である。図1(b), (c)とも中央部Aと示した位置に大きな双極子パターンが現れているが、実際同地点からは図1(a)にあるような形で須恵器窯が発掘されている(会津若松市教育委員会:1989)。このように局所的な双極子異常パターンとして窯跡は検出される。

ところで、住居跡の場合には、遺構内外の土壌の磁化率の差によって生じる磁気異常を検出せねばならず、これは熱残留磁化に比べ非常に小さく、さらにわが国の場合、遺構を覆う表土層の磁化率が大きく(特に火山灰や水田床などの場合)検出を困難にしている(西村:1988)。また、遺構が面的に広がりを持っており局所的な双極子パターンが得られにくいとも考えられる。

筆者らは磁気による住居跡探査の可能性を探るために、特に磁化率の大きい火山灰起源の土地にある住居跡を選び、既存の装置による探査実験を行い、計算機シミュレーションの手法を用いて考察を加えた。本論文では、その結果について報告する。さらに、種々の磁気探査法についても検討し、新たな磁気探査手法の提案も行う。

2. 探査実験

2. 1. 探査方法

調査対象として選んだのは、長野県佐久市長土呂にある聖原遺跡で、北に浅間山を望む平坦な台地上にある。50 cmほどの表土を剥ぐと黄土の間に黒土で満たされた竪穴住居跡が散在している状態を

1) 千葉大学工学部:260 千葉市弥生町1-33

2) 東京工業大学理工学研究科:152 東京都目黒区大岡山2-12-1

3) 奈良国立文化財研究所:630 奈良市二条町2-9-1

4) 東京国立文化財研究所:110 東京都台東区上野公園13-27

容易に確認できる。

実験に使用した装置は、フラックスゲート型グラジオメータ（イギリス Geoscan Research 社製 FM-18）およびプロトン磁力計（アメリカ Gemetrics 社製 G-856）の２種類である。グラジオメータ FM-18は、磁場の鉛直方向成分の２高度間の差（磁気傾斜）を測定するもので、上下 50 cm の間隔をおいて配置されたセンサで検出されたそれぞれの高度での磁場鉛直方向成分間の差分（下のセンサの測定値－上のセンサの測定値）を出力する。このとき、測定者の身長にもよるが下方のセンサは地上高約 30 cm となる。プロトン磁力計 G-856は、全磁力を測定する装置で、実験では 2 台の装置を連動し、1 台を定点に固定しもう 1 台を測定区域内を移動し、両者の差分を観測した。センサの高さは約 80 cm とした。

実験は表土の有無により 2 か所の区域を設定し行った。表土を剥ぎ遺構面を露出させ竪穴住居跡の存在を確認したうえで、孤立した住居跡を選び、これを取り囲む 6 m × 8 m の区域を「Area I」とし、未発掘部分 9.5 m × 15 m の区域を「Area II」とした。Area I では、25 cm 間隔のグリッドでグラジオメータ FM-18 による測定を行った。Area II では、50 cm 間隔のグリッドを設定し、FM-18 による測定と、プロトン磁力計 G-856 による測定を行った。

また、土壌の磁化率の違いを見るため、住居跡内・外および表土のサンプルを採取し磁化率の測定も行った。

2. 2. 測定結果

図 2 に Area I の測定結果を、図 3 に Area II の測定結果を示す。両図とも(a)は遺構概略図

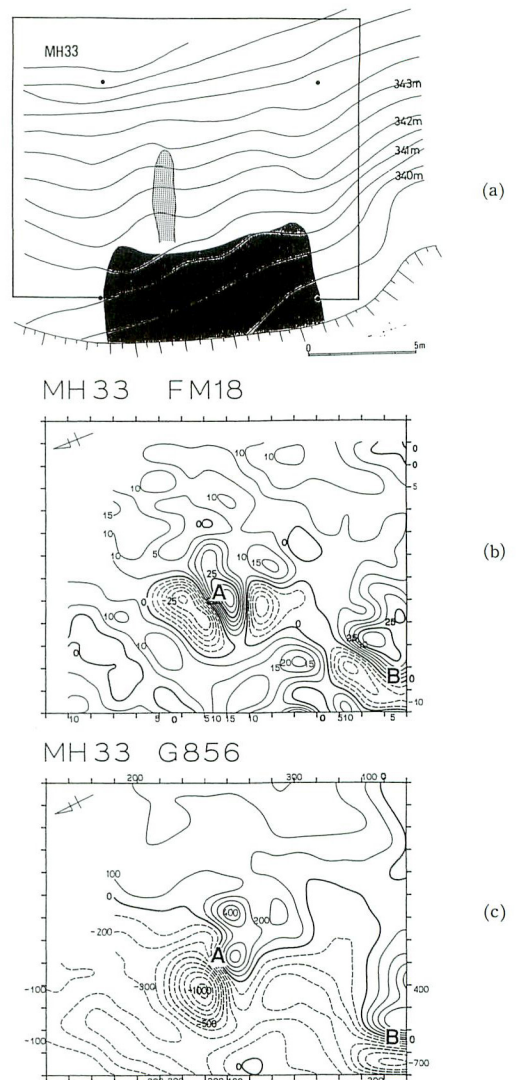


図 1 窯跡の磁気探査結果（会津若松市大戸古窯跡群南原 33号窯跡）

- (a) 遺構概略図
- (b) フラックスゲート型グラジオメータ（FM-18）による磁力傾斜探査結果
（単位 1 nT, 等値線間隔 5 nT）
- (c) プロトン磁力計（G-856）による全磁力探査結果
（単位 0.1 nT, 等値線間隔 10 nT）

Fig. 1 An example of magnetic survey for a kiln at Ooto in Aizuwakamatsu-city

- (a) Outline of the surveyed area.
- (b) The gradient survey result by a flux-gate gradiometer (FM-18).
(unit 1 nT, interval 5 nT).
- (c) The total intensity survey result by proton magnetometers (G-856).
(unit 0.1 nT, interval 10 nT).

で、図(b)は FM-18 による磁気傾斜測定結果、図 3(c)は G-856 による全磁力測定結果である。Area II における全磁力測定 (図 3(c)) では、2 台の装置の差分を測定しているにもかかわらず、負の値は測定されなかった。

どの結果でも窯跡での測定結果に見られるような局所的な双極子パターンは存在していない。しかし、Area I の測定結果では、住居跡内部が負の異常として現れており、住居跡の輪郭も読み取れる。Area II は、発掘結果から図 3(a) に示したように 3 つの住居跡 A、B、C が切りあっていることがわかり、残念ながら単純に Area I と比較はできないが、FM-18 による測定 (図 3(b)) では、表土を剥いた場合 (図 2(b)) と比べると値は全体に負の側にバイアスがかかっている。住居跡 A の部分では図 2(b) と同様に住居跡内部で負の磁気異常が観測され、住居跡の輪郭も読み取れる。住居跡 B、C は、重なり合いの程度も大きく明瞭には検出されてはいない。A、B、C 3 つの住居が別々の時期に異なる磁氣的性質の土砂で埋められさらに掘り返されたことを考えれば、当然検出は困難なものとなろう。全磁力測定の結果 (図 3(c)) では、図 3(b) と比べて明瞭ではないが、住居跡部分では小さい値が記録されている。図 3(c) で、北東辺に沿って値の小さい部分が存在するが、これは Area II の北東辺が隣地との境界でここに有刺鉄線のフェンスがはられており、この影響が現れたものと思われる。

サンプリングした土壌の磁化率は、住居跡内黒土が 1.55×10^{-2} 、住居跡外黄土が 1.75×10^{-2} 、表土が 1.91×10^{-2} (単位は SI 単位系) であった。ただし、この値は、土の密度をすべて 2 g/cm^3 と仮定して換算したもので、実際に現場で堆積した状態での値とは異なる可能性がある。これは、サンプリングおよび実験室での測定の際に密度が変化してしまうためである。

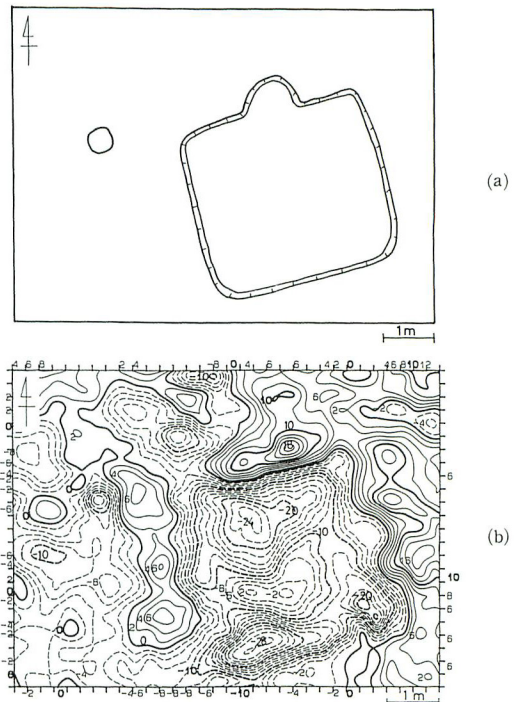


図 2 表土を剥いだ状態での住居跡の磁気探査結果 (佐久市聖原遺跡 Area I)

- (a) 遺構概略図
- (b) フラックスゲート型グラジオメータ (FM-18) による磁気傾斜探査結果
(単位 1 nT, 等値線間隔 2 nT)

Fig. 2 Result of magnetic survey on 'Area I' containing a pit-house, where the covering soil was removed until the archaeological features appeared.

- (a) Outline of the site 'Area I'.
- (b) The gradient survey result by a flux-gate gradiometer (FM-18),
(unit 1 nT, interval 2 nT).

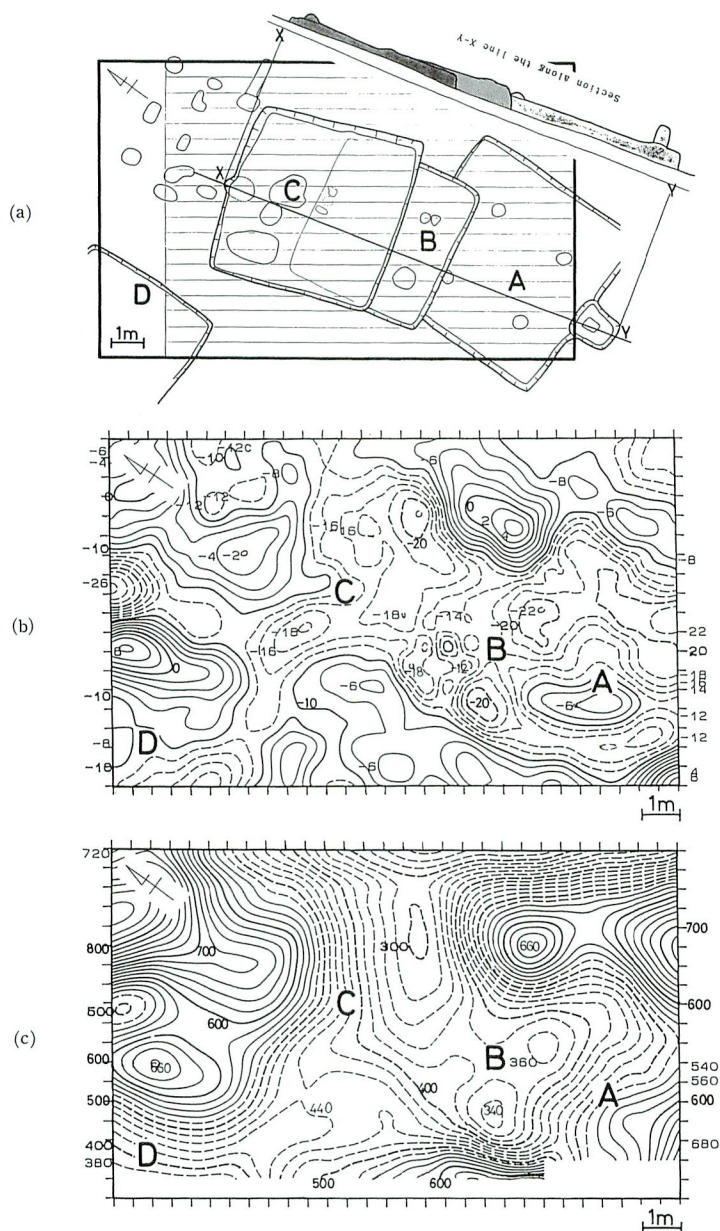


図3 表土を残した状態での住居跡の磁気探査結果（佐久市聖原遺跡 Area II）

- (a) 遺構概略図
- (b) フラックスゲート型グラジオメータ(FM-18)による磁気傾斜探査結果
(単位 1nT, 等値線間隔 2nT)
- (c) プロトン磁力計 (G-856) による全磁力探査結果
(単位 0.1nT, 等値線間隔 2nT)

Fig. 3 Results of magnetic survey on an unexcavated site 'Area II'.

- (a) Outline of the site 'Area II'.
- (b) The gradient survey result by a flux-gate gradiometer (FM-18).
(unit 1nT, interval 2nT).
- (c) The total intensity survey result by proton magnetometers (G-856).
(unit 0.1nT, interval 2nT).

3. 考 察

3. 1. シミュレーション

探査結果では住居跡の輪郭がとらえられているようであるが、地下に住居跡のような直方体の磁性体が存在するとき観測される磁気異常がどのようなパターンとなるかあらかじめ知っておかなければ、得られた測定結果から住居跡の存在を判別する事は難しい。そこで計算機シミュレーションにより、住居跡の磁気異常パターンを計算した。

直方体の磁性体がつくる磁場の計算式は Bhattacharyya (1964) により導出されているので、それをもとにシミュレーションをおこなった。図4に示すように、水平面を $x-y$ 平面に、 z 軸を鉛直下方にとった座標系で、 $\alpha_1 \leq x \leq \alpha_2$, $\beta_1 \leq y \leq \beta_2$, $\gamma_1 \leq z \leq \gamma_2$ の領域に磁化 P (磁化の強さ P) の磁性体が存在すると仮定する。 $x-y$ 面内の点 $(x, y, 0)$ での磁場の t 方向成分 $B_t(x, y, 0)$ は式(1)で計算できる。

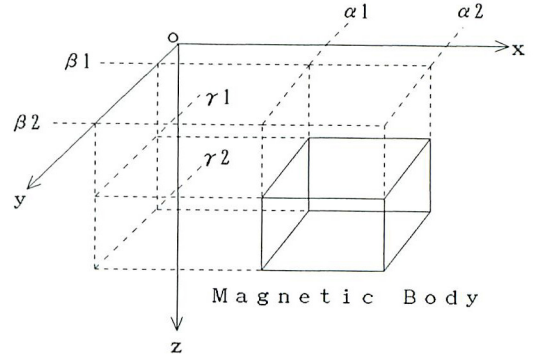


図4 理論計算に用いた座標系と住居跡モデル
Fig. 4 A pit-house model and the coordinate system.

$$B_t(x, y, 0) = \frac{\mu_0 P}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{(i+j+k+1)} F(x, y; \alpha_i, \beta_j, \gamma_k) \quad (1)$$

ここで、

$$F(x, y; \alpha, \beta, \gamma) = \frac{A_{23}}{2} \log\left(\frac{r-\epsilon}{r+\epsilon}\right) + \frac{A_{13}}{2} \log\left(\frac{r-\xi}{r+\xi}\right) - A_{12} \log(r+\gamma) \\ - l \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon \xi}{\epsilon^2 + r\gamma + \gamma^2}\right) - m M \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon \xi}{r^2 + r\gamma - \epsilon^2}\right) + n N \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon \xi}{r\gamma}\right),$$

$$\epsilon = \alpha - x,$$

$$\xi = \beta - y,$$

$$r^2 = \epsilon^2 + \xi^2 + \gamma^2 = (\alpha - x)^2 + (\beta - y)^2 + \gamma^2,$$

$$A_{12} = mL + lM, \quad A_{23} = nM + mN, \quad A_{13} = nL + lN,$$

また、

(l, m, n) は、 t 方向ベクトルの方向余弦

(L, M, N) は、磁化ベクトル P の方向の方向余弦

である。

今回、磁化率 χ の磁性率が地球磁場によって磁化されると考えるので、磁化 P は地球磁場の向きで、地球磁場を $B_0 = \mu_0 H_0$ とすると次式(2)で与えられる。

$$P = \chi H_0 = \frac{\chi B_0}{\mu_0} \quad (2)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率

x 軸を磁北の向きにとった場合、 y 軸は東向きになり、地磁気の伏角は θ 、偏角は 0° となり、 (L, M, N) は $(\cos\theta, 0, \sin\theta)$ となる。このとき、この磁性体のつくる磁場の南北方向成分(x 成分)、東西方向成分(y 成分)、鉛直方向成分(z 成分)を計算するには、 (l, m, n) はそれぞれ $(1, 0, 0)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ とおけばよい。

式(1)を用いて、聖原遺跡 Area I での FM-18 による磁気傾斜測定シミュレーションを行った結果を、図 5 に示す。等値線は間隔 1nT で、正の値が実線、負の値が破線で表してある。住居跡は、 $3.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ 、深さ 50cm の直方体とし、北（磁北を指す。以下本論文では北はすべて磁北を指す。）から西に 15° 傾いていると仮定した。実際には磁化率 $\chi = 1.75 \times 10^{-2}$ の大地の中に $\chi = 1.55 \times 10^{-2}$ の住居跡が存在しているが、その磁化率の差によって生じる磁気異常パターンを検出すればよいので本シミュレーションでは住居跡内のみに磁化率 $\chi = -0.2 \times 10^{-2}$ の磁

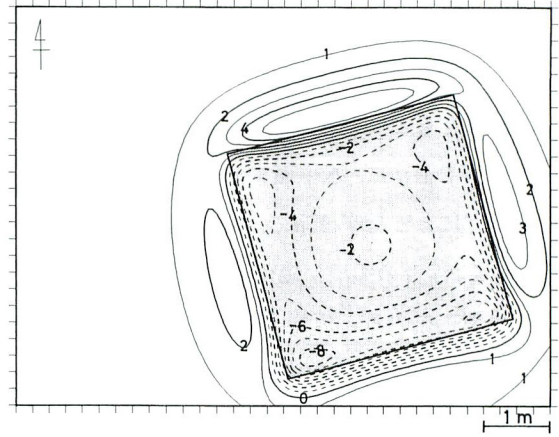


図 5 Area I の磁気傾斜探索シミュレーション結果(単位 nT, 等値線間隔 1nT)
Fig. 5 Simulation result of gradient survey of 'Area I' (unit nT, interval 1nT)

性体が存在すると仮定した。地球磁場の大きさ $B_0 = 47000\text{nT}$ 、伏角 50° 、偏角 0° とした。地表 30cm と 80cm での磁場の鉛直方向成分を計算し、その差を表示した。

図 5 からわかるように、住居跡内では負の値を示し、それを囲むように西・北・東面に正の大きな磁気異常が現われている。この傾向は図 3(b)の実測パターンと一致していることから、図 3(b)でとらえている磁気異常は住居跡によるものであることが確認された。磁気異常の大きさ（最大値と最小値の差）は、図 3(b)では約 40nT あるのに対し図 5 では 13nT と $1/3$ しかないが、この差は土の密度が不明なことや不均質性からやむをえない。

3. 2. 測定法の検討

磁気探索では、地下の磁性体が生み出す磁場のみをベクトル量として検出できれば理想的である。これを実現するためには、2 台の 3 軸ベクトル磁力計を用いて、1 台を地下の影響を受けない 1 点に固定し、もう 1 台を探索領域内を走査しながら、固定点との差を記録して行けばよい。しかしながらこの方法では、測定点ごとに磁力計の軸合わせを厳密に行わなければならない、実用的ではない。そこで、住居跡探索を想定し、既存の磁気測定装置を用いたもう少し簡便ないくつかの探索法について考察を加えた。

まず最初に、3軸ベクトル磁力計をFM-18のように一本の軸上に上下2台固定し、その差を検出することを考えてみよう。この装置を3軸グラジオメータと呼ぶことにする。3軸グラジオメータでは、最初に上下のベクトル磁力計の軸を正確に合わせておけば、測定中は鉛直軸と水平面上の一軸（たとえば南北方向）さえずれないように注意さえすればよく、2台の磁力計の軸ズレは考えなくてもよい。3軸グラジオメータによる探査をシミュレートした結果が図6である。ここでは、磁化率 $\chi = 1.0 \times 10^{-2}$ の磁性体が詰まった4m×4m、厚さ50cmの直方体住居跡が地下50cmにあるとし、これをセンサ間隔50cmの3軸グラジオメータで測定する（下のセンサは地表30cmの高さとした）と仮定した。地球磁場は、同じく大きさ $B_0 = 47000 \text{ nT}$ 、伏角 50° 、偏角 0° とした。

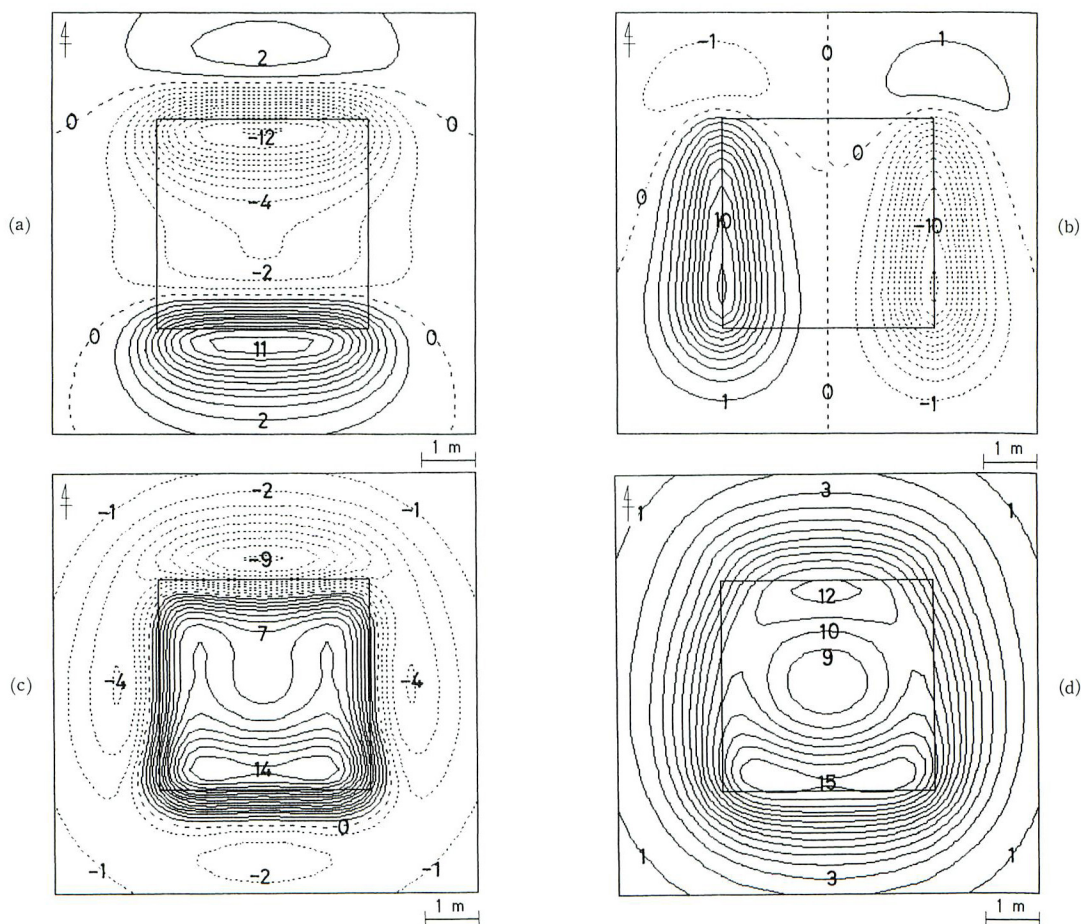


図6 3軸グラジオメータによる住居跡の磁気探査シミュレーション結果（単位 nT，等値線間隔 1nT）

(a)南北方向成分 ΔB_N (b)東西方向成分 ΔB_E (c)鉛直方向成分 ΔB_V

(d)絶対値 $|\Delta B| = (\Delta B_N^2 + \Delta B_E^2 + \Delta B_V^2)^{1/2}$

Fig. 3 Simulation of magnetic gradient survey of a pit-house by 3-component gradiometer (unit nT, interval 1nT).

(a) The N-S component. (b) The E-W component. (c) The vertical component. (d) The absolute value of the gradient vector.

磁場 $\mathbf{B}$ を南北方向成分 B_N 、東西方向成分 B_E 、鉛直方向成分 B_V で表すと、

$$\mathbf{B} = (B_N, B_E, B_V)$$

3 軸グラジオメータの出力は、次の 3 成分となる。

$$\begin{aligned}\Delta B_N &= B_N(h_1) - B_N(h_2) \\ \Delta B_E &= B_E(h_1) - B_E(h_2) \\ \Delta B_V &= B_V(h_1) - B_V(h_2)\end{aligned}\tag{3}$$

ここで、 h_1, h_2 はセンサの地上高で、このシミュレーションでは $h_1 = 30 \text{ cm}$ 、 $h_2 = 80 \text{ cm}$ とした。図 6 (a) は ΔB_N を、図 6 (b) は ΔB_E を、図 6 (c) は ΔB_V をそれぞれ示している。また図 6 (d) には、磁気傾斜の絶対値

$$|\Delta \mathbf{B}| = (\Delta B_N^2 + \Delta B_E^2 + \Delta B_V^2)^{1/2}\tag{4}$$

を表示した。全図とも等値線間隔は 1 nT で、正の値は実線で、負の値は破線で表示してある。

従来のグラジオメータ (FM-18) による測定では、図 6 (c) だけしか得られなかったが、図 6 (a), (b) と 3 図面そろって磁場の湧き出しのようすがよくわかり、住居跡の大きさ形状が把握できる。また、磁気傾斜の絶対値パターン (図 6 (d)) は、グラジオメータの傾きや回転に依存しないので、この図だけをj得るためには測定の際のグラジオメータの保持に注意を払わなくてもよく、大きな面積の範囲をサーベイするときには高速の探査ができる。その結果から大きな磁気異常の出現した範囲だけを見つげだし、その範囲をこのグラジオメータで 3 成分の精密測定を行えば、効率的な探査が行える。

次に、全磁力型の磁力計を組み合わせた探査シミュレーションを行った。その結果を図 7 に示す。住居跡のモデルは図 6 の場合と同じであるが、等値線間隔は 2 nT である。図 7 (a) は、1 台の磁力計を固定し、もう 1 台を測定領域内を走査しその差分を検出する探査法をシミュレートしたもので、今回プロトン磁力計 (G-856) で測定した方法と同じである。固定点の磁力計が地球磁場だけを測定しているとすれば、このときの出力は、地球磁場を $\mathbf{B}_0$ とおけば、次式(5)の $\delta |\mathbf{B}|$ となる。

$$\delta |\mathbf{B}| = |\mathbf{B}| - |\mathbf{B}_0| \tag{5}$$

図 7 (b) は、全磁力型磁力計を 2 台鉛直軸上に配置したグラジオメータ型の装置をシミュレートしたもので、出力は式(6)となる。ここで、センサの高度は図 6 の場合と同じとした。

$$\Delta |\mathbf{B}| = |\mathbf{B}(h_1)| - |\mathbf{B}(h_2)| \tag{6}$$

図 7 (a) では磁気異常の大きさ (最大絶対値) は 38 nT となり、図 6、図 7 の全図中最も大きく、この測定法が今シミュレーションした探査法の中で、最も大きな出力値が得られている。窯跡などとは異なり磁場の弱い住居跡を探査するためには、感度の高い測定法が有効である。しかし、聖原での測定結果図 3 (c) に現れた有刺鉄線の影響のように、この方法はローカルな雑音に弱いという欠点がある。グラジオメータ型に配置した場合は、ローカルな雑音には強くなるが、図 7 (b) では、最大値は 14 nT と感度はきわめて悪くなる。センサ間隔をあげれば感度は上がるが、逆に雑音には弱くなる。

また、式(6)と式(4)を比較すると、三角不等式から次式(7)の関係が得られ、

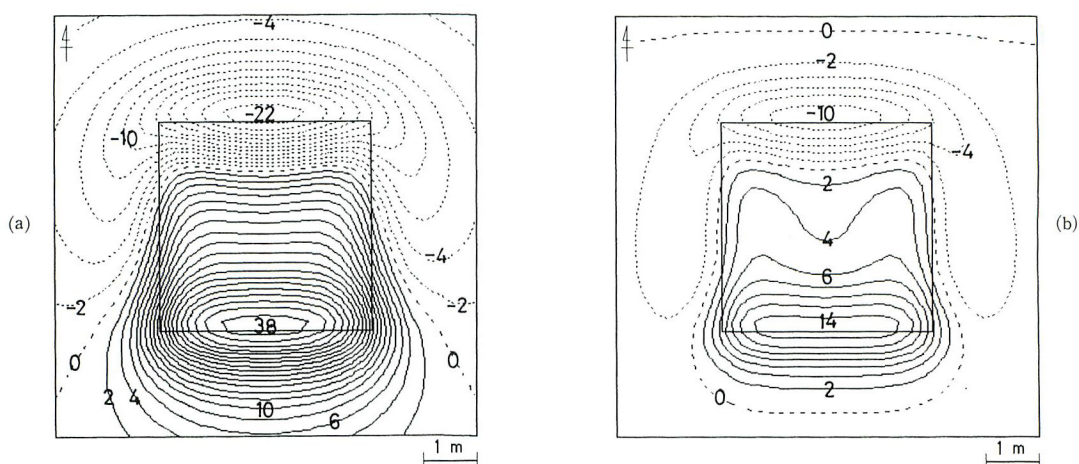


図7 全磁力型磁力計による住居跡の磁気探査シミュレーション結果（単位 nT，等値線間隔 2nT）

(a) 固定点との差分測定（従来方式） $\delta |B| = |B| - |B_0|$

(b) 磁気傾斜測定 $\Delta |B| = |B(h_1)| - |B(h_2)|$

Fig.7 Simulation of magnetic survey of a pit-house using magnetometers sensitive to total field intensity (unit nT, interval 2nT).

(a) The difference from the intensity of the earth field.

(b) The vertical gradient of total intensity.

$$\Delta |B| = |B(h_1)| - |B(h_2)| \leq |B(h_1)| - |B(h_2)| = |\Delta B| \quad (7)$$

全磁力型磁力計を用いたグラジオメータは、3軸グラジオメータから得られる磁気傾斜の絶対値より感度が低いことが導かれる。さらに、全磁力型磁力計では、絶対値をとるという操作で情報量が減らされてしまうので、図6と比較すると、住居跡の輪郭・形状を判定するには十分な情報は得られていない。

以上のシミュレーションの結果から、全磁力型磁力計を2台連動させる従来の方法が感度の点では最も優れていることが、また、住居跡の形状・大きさなどを判定するには3軸グラジオメータが有効であることがわかった。

4. むすび

長野県佐久市長土呂の聖原遺跡において行った竪穴住居跡の磁気探査実験および土の磁化率測定の結果と、計算機シミュレーションにより求めた磁気異常パターンの比較から、磁化率の大きな表土の有無にかかわらず、遺構の存在およびある程度の形状まで測定できることがわかった。

いくつかの実用可能な磁気探査手法の特性について検討を加えた結果、感度の点では、2台の全磁力型磁力計を差動させ1台を固定しもう1台を走査する探査法が最も優れていることを示した。また、磁場3成分の鉛直方向差分を検出する3軸グラジオメータを提案し、これが磁場の湧き出しの状況をとらえることができるので、住居跡（磁気異常体）の形状・大きさを把握するためには有効な手段となることを示した。この3軸グラジオメータは、測定に際しセンサの方向合わせにある程度の注意が

必要となると思われるが、出力ベクトルの絶対値を使う測定法では、従来の1成分のみのグラジオメータ（例えばFM-18）や全磁力型磁力計を組み合わせたグラジオメータと比べ操作性はまったく変わらない。しかもそれらと比べ感度は優れているという利点がある。3軸グラジオメータについては、現在開発にとりかかっており、その成果については別の機会に報告したい。

謝 辞

この研究の実施にあたり、遺跡発掘中にもかかわらず探査実験を許可いただいた佐久市教育委員会の方々に感謝いたします。なおこの研究は、昭和63・平成元年度文部省科学研究費補助金総合研究(A)「考古学における物理探査技術の改良と評価」（代表：道家達将）および平成元年度文部省科学研究費補助金総合研究(B)「考古・歴史遺構の非破壊探査技術の開発」（代表：奥島基良）による。

参 考 文 献

- 会津若松市教育委員会(1989) 会津大戸古窯跡群発掘調査概報Ⅰ. 会津若松市文化財調査報告書第14号.
- 岩本圭輔(1974) 窯跡の磁気探査. 考古学と自然科学 7:31-41.
- 田中 琢・西村 康・岩本圭介(1978) 遺跡の磁気探査. 考古学と自然科学 11:85-84.
- 西村 康(1988) 遺跡探査の現状と課題. 考古学と自然科学 20:23-26.
- 浜島多加志・西村 康・川野邊渉(1989) 遺跡探査法の再検討. 考古学と自然科学 21:45-56.
- Bhattacharyya, B. K. (1964) Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. Geophysics 29(4), 517-531.

A Study of geomagnetic prospecting of archaeological features

Hiroyuki KAMEI ¹⁾, Takashi HAMAJIMA²⁾

Yasushi NISHIMURA³⁾ and Wataru KAWANOBE⁴⁾

- 1) Chiba University, Yayoi-cho, Chiba 260, Japan
- 2) Tokyo Institute of Technology, Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152, Japan
- 3) Nara National Cultural Properties Research Institute, Nijo-cho, Nara 630, Japan
- 4) Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, Uenokoen, Taito-ku, Tokyo 110, Japan

The results of geomagnetic prospecting of pit-houses in volcanic ash soil at Hijirihara site, Nagano Prefecture, Japan, are reported. The gradient measurement and the total intensity measurement were employed, and also magnetic susceptibility of soil samples were measured. By comparing the measured patterns with the theoretical pattern of magnetic field produced by a magnetized pit-house model, it is shown that both methods could detect the outline of pit-house, whether the covering soil existed or not.

Furthermore, the effectiveness and the limitation of some available methods of measuring magnetic anomalies due to the difference of magnetic susceptibility of soil are discussed. It is shown that the method of measuring the difference of total field intensity between at a fixed point and at a mobile one has the highest sensitivity, and that the 3-component gradiometer, now proposed, is most effective for determining the shape and the size of pit-house because a pattern of magnetic vector field can be reconstructed.