古地磁気学的手法による先土器遺跡の 炉址検出法の開発とその有効性¹⁾

森永 速男²⁾・井口 博夫³⁾・山下 秀樹⁴⁾・
久保 弘幸⁵⁾・藤田 淳⁵⁾・安川 克己³⁾

Establishment of a Method for Detecting Fireplaces in Pre-ceramic Sites by Means of Paleomagnetism and Availability of the Method¹⁾

Hayao MORINAGA²⁾, Hiroo INOKUCHI³⁾, Hideki YAMASHITA⁴⁾,
Hiroyuki KUBO⁵⁾, Jun FUJITA⁵⁾ and Katsumi YASKAWA³⁾

A Paleomagnetic method for detecting fireplaces in Pre-ceramic sites was established, and its availability was tested in detail.

At first, a bonfire experiment was carried out with the purpose of evaluating magnetic property changes of soils through a baking process. When soils were baked, the remanent magnetizations changed (1) to become stronger in intensity by one to two orders, (2) to become more stable in both intensity and direction against alternating-field demagnetization, and (3) to be directed more nearly in an identical direction than before being baked. These magnetic property changes may have been caused by chemical change (dehydration) from goethite to hematite or magnetite in soils through the baking process. These differences before and after baking were adopted as criteria to detect fireplaces and to determine their positions in Pre-ceramic sites (Paleomagnetic method).

Secondly, the availability of these criteria was tested using soils in two archeological sites, Tamatu-Tanaka site, Hyogo (Yayoi age) and Ichi-no-Kubo site, Oita (early Jomon age ~ Pre-ceramic age), where fireplaces have been definitely recognized with the naked eye. The results showed that remanent magnetizations of baked soils sampled from the fireplaces in these sites satisfy the above-mentioned criteria, and that those of unbaked soils sampled in the same sites do not. However, differences between the magnetic properties of the baked and the unbaked soils were not so significant as seen in the results of the bonfire experiment. This is attributed to chemical alteration of magnetic particles induced through a chemical process over a long period. Consequently, it is important to utilize all the above-mentioned criteria with significant care, in order to correctly detect fireplaces in Pre-ceramic sites.

I. はじめに

日本の先土器時代の遺跡では、大量の焼けた礫・石

器・炭化物が出土している。ところが、これらの先土器時代の遺跡において、火の使用の証拠である地面の明らかな赤化を伴う炉床は、ほとんど確認されていない。こ

- 1) 1988 年 10 月 13 日受付。1989 年 6 月 10 日受理。1987 年度春および 1988 年度春地球電磁気・地球惑星圏学会において発表。
- 2) 神戸大学自然科学研究科 The Graduate School of Science and Technology, Kobe University.
- 3) 神戸大学理学部 Faculty of Science, Kobe University.
- 4) 古代学協会 The Paleological Association of Japan, Inc.
- 5) 兵庫県教育委員会 Hyogo Prefectures Board of Education.

のことは、先土器時代にのみ独特の現象ではなく、縄文時代でも早期前半（8,000 年くらい前）以前には、急速に発見率が低下する。このような炉床の発見率の低下は、炉床が存在しなかったことに起因するとは考えられない。本来、存在したはずのものが検出されにくくなったためと考えられる。

肉眼で発見されにくくなる理由としては、(1) 土壤の移動による攪乱、(2) 化学変化に伴う土壤の変質、などが考えられる。しかし、炉床があるとすれば、可視的ではないとしても、その痕跡をとどめているはずであり、何らかの方法によって炉の位置が特定できる可能性がある。また、それが可能になれば、先土器時代の社会・集落研究への寄与ははかりしれないものがある。

一般的に先土器時代の遺跡は、石器が集中的に分布するブロック、焼けて赤化した礫が集中する礫群、焼けていない重さ 1 kg 以上の礫数個からなる配石、および炭化粒の集中する炭化物集中部で構成されている。まれに、石囲い炉や地面の赤化した地床炉、住居跡や土坑なども検出されている。火との関係は、これらブロック、礫群、配石、炭化物集中さらに住居跡などについて検討されている。特に、礫群はそれ自体が受熱の証拠である赤化を示しているが、礫がその場で焼かれた場合と、他所（数 m 以内）で焼かれた礫が場所を移して使用された場合とが想定されている。また炭化物集中は、一見すると炉そのものを示していると判断できるが、炭化物の粒径が数 mm と小さく、可動性が大きいために、炉本来の位置を示しているかどうか疑問がある。

考古学の立場から、受熱石器の分布解析を通して、いくつかの遺跡で炉址を推定した研究例がある（山下、1988）。物理探査的方法で、プロトン磁力計や帯磁率計を用いて、磁気異常や帯磁率コントラストを調べ、それをもとに遺跡探査や炉址推定がすでに行われている（COLANI and AITKEN, 1966; CLARK, 1986; GIBSON, 1986; WEYMOUTH, 1986）。

この論文で、われわれは遺跡表面（かつての生活面）の土壤を採取し、古地磁気学的方法を用いた炉址およびその位置判定法を紹介し、その方法の有効性および信頼性について述べる。

この研究を進めるにあたって、神戸大学農学部付属農場の上山 泰教授、京都大学理学部地質学鉱物学科の鳥居雅之博士、大分県教育庁文化課の栗田勝弘氏、山口卓也氏ならびに兵庫県教育委員会事務局社会教育・文化財課の村上泰樹氏には多くの御助言、御協力を頂いた。ここに厚く感謝の意を表する。この研究は、昭和 61 年度および 62 年度科学研究費補助金（試験研究（1）、課題

番号 61810005）を使用して行われた。

II. 古地磁気による炉址およびその位置判定法の開発

自然界に存在する岩石や土壤の磁気的性質は、受熱の過程を経て変化する。これは、それら物質中の磁性鉱物粒子が受熱により化学的に変化することによって起こる。例えば、水和酸化鉄が数百度の温度で赤鉄鉱に変わる脱水反応、すなわち、 $2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ （STRANGWAY *et al.*, 1967, 1968）が土壤中で起こることが考えられる。この反応が起こった場合、土壤の残留磁化は強くなり、磁氣的に安定になる。しかしながら、これを土壤の加熱実験によって示した研究はない。実際に、磁気的性質の変化を調べる必要がある。加熱により、土壤の磁化が強く安定になることが確かめられれば残留磁化が強くかつ安定という指標を使って、肉眼で確認できない先土器時代の炉址の存在とその位置を推定できる。

受熱による土壤の磁気的性質を調べるために、実際に土壤面で焚火を行った。焚火前後での土壤試料を採取し、その残留磁化の測定および安定性の検討を通して、炉址の存在とその位置の判定法を探った。まず、焚火実験や実際の遺跡での土壤試料採取の方法、残留磁化測定および安定性の検討の手順について述べ、その後、焚火実験とその結果について詳述する。さらに、磁性鉱物の化学的な変化が生じたかどうかを熱磁気分析により調べた結果について述べる。

1. 試料の採取と残留磁化測定・安定性検討の方法

(1) 試料採取

磁化測定用試料を 1 辺 2.2 cm の立方形のポリカーボネイト製の試料ケースを土壤面に水平に押し込む（土壤が堅い場合にはたたき込む）ことによって採取した。土壤面に水平に押し込むために、真鍮製の採取用の道具を使った。こうして採取した試料（定方位試料）は非常に方向づけの精度がよく、残留磁化の方向を議論する場合に、特に有効である。採取時間が限られている場合や、採取すべき試料数が多い場合には、採取地点にメッシュ状に張った糸に試料ケースの特定な面を揃えて水平にケースを押し込み、試料を採取した（準定方位試料）。この場合の方向づけの精度は平均で $\pm 5^\circ$ であり、最も悪い状態でも $\pm 10^\circ$ 程度であった。試料採取間隔は、遺跡の規模によって異なる（10～25 cm）が、炉址の確認されている遺跡では、焼土の範囲から複数個の試料を採取するように設定した。

(2) 残留磁化測定

Fig. 1 Temperature change at typical three positions during a bonfire experiment

○ : at soil surface, ● : at about 2 centimeter below the soil surface,
△ : at ten centimeter below the soil surface

試料の残留磁化を、超伝導磁力計を用いて測定した。超伝導磁力計は、現在最も感度のよい磁力計で、最小測定レンジは 10^{-8} emu (10^{-11} Am²) である。残留磁化を地球座標系での偏角、伏角そして強度の3つの要素として求めた。1試料1回の測定および計算処理に要する時間は、土壤試料の磁気的な安定性にもよるが、約1分から数分であった。

(3) 残留磁化の安定性の検討

磁気的安定性は交流消磁法を用いて調べた。無磁場空間を発生する円筒密封型の μ -メタル中に置かれたソレノイド・コイルに、交流の電流を流して交流の磁場を発生させる。その磁場中心に測定すべき試料を入れて三軸回転させると、発生磁場の強度以下の保磁力を持つ試料中の磁性粒子の磁化は磁場の方向を向こうとするため、試料の回転に伴って試料中で回転する。この状態から磁場の振幅を徐々に減少させていくと、これら磁性粒子の磁化は徐々にその保磁力に対応した磁場の方向に向かって固着する。その場合、回転していた各磁性粒子の磁化は種々の方向を向き、全体から見ると磁化は失われ、発生磁場の強度以上の保磁力を持つ安定な磁性粒子の磁化だけが残る。これが交流消磁の原理である。交流消磁後、試料の残留磁化を測定した。さらに、発生させる交

流磁場の振幅を段階的に大きくして測定を繰り返す段階交流消磁実験を行った。

2. 焚火実験

(1) 焚火実験の実行

1987年1月6、7日の両日、神戸大学農学部附属農場において、焚火実験を実行した。農場の空き地の一部で、地面に穴を掘り、深さ約50 cm、幅約50 cmの垂直面を作った。その面上から6個の定方位土壤試料を採取した後、さらにその面上の地表下7点およびほぼ地表の7点にアルメル・クロメルの熱電対を設置した。掘った穴を埋め戻し、その上で焚火を行った。焚火の規模は最終的に直径約2 mのほぼ円形であった。熱電対はアナログ・レコーダーと接続し、この実験の終了時までその出力電圧を記録し、各点での温度変化を測定した。焚火は6日14時～23時の約9時間続けられ、7日の11時頃に上のおき炭を排除するまで、おき火の状態が保たれた。

おき炭の排除後、焚火中心を通る測線上を中心に、土壤表面より計19個（これらには焚火の範囲外のものも含まれる）、土壤表面下2.0 cmの所から10個、さらに焚火前に試料を採取した面を掘り出し、そこから17個、計46個の定方位土壤試料を採取した。実験室で、

採取試料の残留磁化および磁氣的安定性を測定した。

(2) 土壌の温度変化

土壌表面（白丸）およびその約 2 cm 下（黒丸），その 10 cm 下（三角）の位置における温度変化の典型的な三つの例を Fig. 1 に示す。表面では 100°C 付近で少し横ばいになるものの，100°C を超えて急速に温度が上昇し，焚火終了前の 22 時頃に 400°C 近くまでの温度上昇がみられた。その後，温度は徐々に下降した。表面下約 2 cm の位置の温度は，表面と同様 80°C 近くまでは急上昇したが，その後 100°C 以上になるまでに長い時間を要した。100°C を超えた後，温度はおき炭を排除した時刻まで徐々に上昇し，その後下降した。表面下 10 cm では，温度は最後まで 100°C 以上にならず，ほとんど横ばい状態であった。100°C 以下付近で温度上昇が一旦横ばいになるのは，土壌に含まれる水の気化熱として，熱が奪われることによると考えられる。また，表面下約 2 cm 位置で（わずかではあるが，10 cm の位置も），おき火状態の時に温度上昇が見られることは，おき火が充分熱の供給源となりうることを示している。しかしながら，一つ注意しておかなければならないのは，おき火が厚く重なっている位置では，温度上昇が非常に緩やかな例があったことである。これは，土壌表面付近で酸欠状態が生じたためであり，酸欠状態下にあるおき火が断熱材の働きをしたと考えられる。この場合，表面でも今回の実験時間では 200°C~300°C の温度上昇しか見られなかった。

実験における各熱電対設置地点の最高温度の分布を Fig. 2-(a) に示す。逆三角印は設置地点を示し，縦の線は目標とした焚火中心を表している。最高温度がその中心から北に約 40 cm~60 cm ずれた所に見られる主な原因は，先に述べたように，おき火が中心付近に厚く重なったためである。さらに，最高温度の地点では，焚火途中で 1 度おき火を掻き出したので，このような温度分布になったと思われる。また，中心から南に 20 cm の所では 200°C に達しなかった。この地点では，熱電対は表面下約 2 cm の位置に置かれている。そこでの温度変化は先の Fig. 1 の黒丸で示した。

(3) 土壌試料の残留磁化測定の結果

焚火後に採取した土壌試料の自然残留磁化（NRM；Natural Remanent Magnetization）強度の地中断面における分布を Fig. 2-(b) に示す。四角印は残留磁化測定用の試料の採取地点を示している。目標中心点の北側約 40 cm の表面付近の土壌に残留磁化強度の最大値（ $\geq 300 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ）が見られる。また，同じく南側約 40 cm の表面付近に，次に残留磁化の高いところがある。

Fig. 2 Distribution charts showing (a) maximum temperature during the bonfire experiment, (b) NRM intensity and (c) intensity ratio (DE-MAG./NRM) of soil samples collected after the bonfire experiment

▼ : position of thermocouples, ■ : position of soil samples on the vertical plane in the dug hole

これらはいずれも 200°C 以上の温度分布とよく対応している。深さ 10 cm 以内では，相対的に高い残留磁化強度の土壌が分布しており，100°C 以上の温度の分布とよく対応している。土壌は，それが受けた熱（温度）の度合に比例した大きさの残留磁化強度を獲得することが，以上の結果からわかる。

焚火前後の土壌を 5 種類に分類し，それらの残留磁化の強度および方向の平均値を Table 1 に示す。この表から受熱の度合の大きかった（温度が高くなった）土壌ほど強い残留磁化を帯びていることがわかる。さらに残留磁化方向は，受熱していない試料ではバラツキが大きく（精密度パラメータ； k が小さく，フィッシャーの 95% の信頼円の半径； α_{95} (FISHER, 1953) が大きい），かつ西寄り偏角を持つが，受熱の度合が増すにつれて，バラツキはやや小さくなり，現在の焚火実験付近での地球磁場方向（偏角=約 6° 西向き；伏角=約 48°）に近づいてきている。これらのことは，元来地球磁場と関係のなかった磁性粒子の磁化が，土壌の受熱（おそらく化学変化）を通して，現在の地球磁場方向に再配列したことを示している。また，それらの再配列は土壌中の

Table 1 Results of magnetization measurement for soil samples collected before and after the bonfire experiment

	N	T (°C)	Mean NRM Values of Soils				
			INT. ($\times 10^{-3}$ A/m)	DEC. (°)	INC. (°)	k	α_{95} (°)
Before bonfire							
Underground, ≤ 10 cm	6	—	4.2	-73.6	8.2	4.0	38.1
Surface	3	—	5.6	-28.8	28.8	(24.5)	(25.5)
After bonfire							
Underground, ≤ 10 cm	17	<100	4.9	-46.9	49.1	7.7	13.7
Underground, ~ 3 cm	10	100~300	25.7	-36.1	39.4	4.6	25.4
Surface	7	~ 400	266.2	-8.2	24.0	11.9	18.3

NRM : natural remanent magnetization, N : number of samples,
T : maximum temperature, INT., DEC. and INC. : intensity,
declination and inclination of remanence, respectively, k and α_{95} :
Fisher statistic parameters (FISHER, 1953)

磁性粒子の一部のみ起こったと考えられる。以下の化学式で示すように、受熱により大きな自発磁化を持たない水和酸化鉄 (goethite; αFeOOH) から、かなり大きな自発磁化を持つ赤鉄鉱 (hematite; $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) への化学変化が起こった可能性がある。

これは脱水反応であり、空气中 $100^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ の温度で起こることが知られている (STRANGWAY *et al.*, 1967, 1968)。この反応で生成する赤鉄鉱 (Fe_2O_3) は赤い色で特徴づけられ、考古学で言うところの「赤化」という言葉の赤は、主に赤鉄鉱によると考えられる。また、おき火下の表面土壌は黒い色をしていたが、以下の化学式で示すように、酸欠、すなわち還元的な状態で赤鉄鉱が化学変化 (下の化学式) して生じた磁鉄鉱 (magnetite; Fe_3O_4) の色であると考えられる。

この反応は約 340°C で起こること (KOBAYASHI, 1959) が知られていて、一部の表面での最高温度が 400°C 近かったことと調和的である。磁鉄鉱は赤鉄鉱の数百倍の飽和磁化を持っている。

受熱前後での磁気的な安定性の変化を知る一つの手がかりとして、段階交流消磁実験を行った。その結果のうち、典型的な例である受熱前の土壌試料 AA と受熱後に最高温度に達した表面の土壌試料 AJ についての残留磁化強度変化を Fig. 3 に示す。受熱後の試料 AJ の残留磁化強度が、受熱前の試料 AA のそれに比べて 100 倍程度強くなっている。両者は、最も低い交流磁場強度 (3 mT) で、すでに異なる減衰の仕方を示す。さらに、

Fig. 3 Intensity decay of baked (AJ) and unbaked (AA) soil samples during progressive AF demagnetization

The vertical axis shows relative intensity ratio against the virginal intensity before AF demagnetization. The AF value, at which the ratio becomes near 50%, is MDF of samples.

元の強度が半分になる交流磁場強度 (MDF; Median Destructive Field) は、AA が 6~10 mT の間であり、AJ では 10~15 mT の間にある。AA が 15 mT を超えたあたりから、不安定で振動する減衰曲線を示すのに対し、AJ はほぼ 50 mT の最高交流磁場強度まで、一様な減衰を示す。これらのことは受熱により、土壌が磁気的に安定に、強度減衰の度合いが相対的に遅くなったことを示している。

すべての採取試料を 3 mT の交流磁場強度を用いて消

Fig. 4 Thermomagnetic curves (a) unbaked surface soil sample, (b) baked surface soil sample, (c) unbaked subterranean soil sample, and (d) slightly baked subterranean soil sample

Every vertical axis shows relative intensity change of saturation magnetization. Scales in the figures correspond to relative magnitude of the intensity.

磁し、消磁前に比べてどれくらい強度が減衰するかを調べた (Fig. 2-(c)). 四角印は Fig. 2-(b) 同様、試料採取地点を示す。表面かその付近で採取された試料が、ほとんどすべて 100% 付近か、それ以上の残存率を示す。残留磁化の安定性を示すこの残存率の分布も、最高温度および残留磁化強度の分布とよく対応している。100% 以上残存している (消磁後に増加している) 理由は、次のように考えられる。焚火前の土壌中の磁性粒子は、全体にほぼでたらめな方向を向いていたが、統計的に土壌はある方向を向いた弱い磁化を持っていた。土壌が受熱することによって、その中に含まれる水和酸化鉄の何割かは赤鉄鉱 (または 340°C 以上の還元状態下で焼かれた土壌中ではさらに磁鉄鉱) に変化したと考えられる。新しく化学変化で作られた赤鉄鉱 (または磁鉄鉱) が、現在の地球磁場方向に獲得した磁化を、より不安定な水和酸化鉄の磁化成分が見かけ上消していたが、

その土壌試料を交流消磁することによって、その不安定成分がすばやく除去された。そのために、消磁後の残留磁化強度は、結果的に大きくなったと考えられる。残留磁化の安定性を示すこの残存率の分布 (Fig. 2-(c)) も、最高温度および残留磁化強度の分布とよく対応している。

(4) 熱磁気分析

岩石や土壌に含まれる磁性鉱物粒子は、その種類によっていろいろな大きさのキュリー温度 (Curie temperature) を持っている。キュリー温度とはある磁性鉱物の自発磁化が失われる温度のことであり、試料を徐々に加熱して、飽和磁化強度の温度変化を調べるのが熱磁気分析である。その温度変化から、すなわちキュリー温度の分布から、磁性鉱物の同定が可能である。

京都大学理学部地質学鉱物学科の磁気天秤を用いて、焚火実験前後の土壌の熱磁気分析を行った。測定はすべ

て空气中、800 mT の直流磁場の下で、8.3°C/分の加熱（冷却）速度で実行された。Fig. 4 にその結果を示す。図中の（a）および（b）は表面土壌であり、前者（AS）が受熱しなかったもので、後者（AJ）は約 400°C の温度で焼かれたものである。図中の（c）および（d）は地中の土壌であり、前者（AA）は 7 cm の深さから焚火前に採取されたもので、後者（BM）は 20 cm の深さで、焚火中約 30°C の温度になったものである。各図の直流磁場強度の下に示したスケールは、飽和磁化強度の相対的な大きさを示している。

表面土壌では、焚火による受熱前後に約 5 倍の飽和磁化強度の差が見られる。焚火前の土壌の場合には、加熱時の熱磁気曲線は 100°C を超えたあたりから傾斜が緩やかになり、この分析中に水和酸化鉄の脱水現象が起こっている様子がうかがえる。また冷却時では、加熱時よりも飽和磁化が各温度で常により大きくなっている。このことも、分析中の水和酸化鉄の脱水により、赤鉄鉱が生成したことを示している。焚火後の土壌での加熱時の曲線には、320°C と 560°C あたりの 2 ヶ所に傾きの変化点が見られる。前者がどのような磁性鉱物によるものなのか定かではないが、後者は明らかに磁鉄鉱のものである。つまり、焚火中に水和酸化鉄から赤鉄鉱への脱水反応が起こり、さらに還元状態下で赤鉄鉱が磁鉄鉱に変化したことを示している。冷却時は加熱時より常に飽和磁化は小さくなっている。このことは、この分析中に磁鉄鉱が酸化反応を通して赤鉄鉱に変化したことを示している。

地中の土壌に関しては、焚火により数十度程度しか熱せられなかった試料 BM は、焚火前の試料 AA より約 2 倍の飽和磁化強度を持つ。また、表面土壌の場合と同様、加熱時と冷却時の熱磁気曲線の特徴は焚火前後の試料間で、わずかではあるが違いがある。つまり、試料 AA の冷却時の飽和磁化強度曲線が低温側で加熱時より上側にくるのに対して、試料 BM では、冷却時のその曲線が常に下側にくる。数十度の温度上昇でも、識別できるような熱磁気曲線の違いが現われることは注目に値する。

焚火実験による土壌の磁気的性質の変化、つまり飽和磁化強度の差や熱磁気曲線の違いは、受熱から測定や分析までの時間が短い場合のものである。遺跡での炉址やその位置判定を行う場合には、現在までの続成作用の効果も含まれるため、絶対的な数値で表される飽和磁化強度の定量的な差をそのまま適用することはできない。それゆえ、われわれが以下で述べる炉址やその位置判定のための基準を設定する際には、焚火実験や熱磁気分析で

わかった磁気的性質の定性的な差のみに注目する。

3. 炉址およびその位置判定の基準の設定

上述の焚火実験で得られた結果をもとにして、炉址およびその位置判定のための磁気的な基準が設定できる。遺跡表面から、任意の間隔で土壌を試料ケース内にかき乱さないよう注意して採取する。その採取試料の残留磁化が以下の条件を満足すれば、その土壌の採取地点付近をかつて火を使用した位置と判断する。

①自然残留磁化強度が大きい土壌（基準 1）。

②自然残留磁化強度の安定性の高い土壌：残留磁化はベクトル量であり、安定性はベクトルとしての安定性ということになるが、ここでは強度と方向を分けて考え、特に強度の安定性に注目する。つまり、交流消磁をある交流磁場強度で実行した時、強度の減衰が少ない（残存率が高い）ほど安定性のより高い（より安定な）土壌と考える（基準 2）。

③自然残留磁化方向の安定性の高い土壌：磁化方向の安定性とは、交流消磁を実行した時に、その変化が少なく、また段階的にそれを実行した場合、より高い交流磁場レベルまである方向値を保つことを言う。遺跡によっては、この方向の安定性および周辺土壌の自然残留磁化方向との違いを使って、炉址の存在を議論する必要がある（基準 3）。

III. 炉址およびその位置判定基準の有効性の検討

古地磁気学的方法による炉址およびその位置の判定基準は、焚火実験によって土壌が磁気的に変化することに基づくもので、長い年月を経てきた遺跡において、その方法が有効であるかどうかを検討する必要がある。全国に分布する遺跡の中で、わずかではあるが、地面の赤化を伴う炉址が確認されているものがある。そのうち、玉津田中遺跡（弥生時代の遺跡）および市ノ久保遺跡（先土器～縄文時代の遺跡）の二つの遺跡で発見された赤化した炉址においてわれわれの方法の有効性を検討した。

1. 玉津田中遺跡

(1) 試料採取

玉津田中遺跡は、神戸市西区玉津町田中の沖積平野の微高地上に位置し、弥生時代前期～古墳時代・中世の集落遺跡である。

試料採取は 1987 年 2 月 17 日に、弥生時代中期の堅穴住居址床面（竹添 16 トレンチ、SB01 住居址）で検出された 2 ヶ所の明瞭な炉址周辺で行われた。炉址 2 ヶ所を中心に、十字型に 50 個および焼土の表面より

Fig. 5 Distribution charts showing (a) sampling point
 ● : surface soil sample, ■ : soil sample collected at 1.5 centimeter below the soil surface,
 (b) NRM intensity, (c) intensity after AF demagnetization (10 mT), and (d) intensity ratio (DEMAG./NRM) of soils in Tamatu-Tanaka site

1.5 cm 掘り下げた面より 12 個、総数 62 個の土壌試料を採取した。試料はすべて定方位試料である。採取地点を Fig. 5-(a) に示す。図中の実線（斜線部）および破線で囲った部分は、それぞれ赤化した焼土部分およびやや赤化した焼土部分を示す。さらに、図中の黒丸は表面から、また四角は掘り下げた位置から採取した試料を示す。

(2) 残留磁化測定とその結果

自然残留磁化 (NRM) 測定の結果、NRM 強度は最小 $25 \times 10^{-4} \text{ A/m}$ 、最大 $147 \times 10^{-4} \text{ A/m}$ の範囲にあった

(Fig. 5-(b))。表面の赤化した焼土とそれら以外の土壌に分けて調べると、焼土の磁化は平均で 1.6 倍強い NRM 強度、そして 1 桁大きな精密度パラメータ k の値を示している。また、磁化方向は両者ともにほぼ同じである (Table 2)。

磁化の安定性を調べるためにパイロット試料を選び、段階交流消磁実験を行った。これにより、10 mT の交流消磁をした時に、焼土試料と焼土以外の試料との間で、残留磁化強度に差が現われることを確認した。残りの試料の磁化の安定性を調べるために、全試料について 10 mT で交流消磁を行い、それらの残留磁化を測定した (Fig. 5-(c))。この場合にも、焼土試料とそれ以外の試料との差がはっきりと現われ、磁化強度にして 5.9 倍の差が、精密度パラメータ k の値にも大きな差が現われた (Table 2)。磁化の安定性の指標として、交流消磁後の磁化強度の残存率 (Fig. 5-(d)) を計算すると、焼土試料の中に高い残存率を示すものが多いことがわかった。NRM と交流消磁 (10 mT) 後の残留磁化の強度および磁化強度の残存率について、その頻度分布をヒストグラムで示す (Fig. 6)。焼土試料数と、焼土以外の試料数の割合を見ると、それぞれ横軸の値が大きくなるにつれ、焼土試料の割合が大きくなっていることがわかる。

(3) 考 察

NRM 強度の平面分布 (Fig. 5-(b)) を見ると、一般的に焼土試料は NRM 強度が大きい。しかしながら、焼土試料にも関わらず、NRM 強度がさほど大きくないものもある。また、逆に肉眼で焼土と判断できないにも関わらず、NRM 強度が大きい試料がある。後者の試料は消磁後、その残留磁化強度が急激に減少している (Fig. 5-(c))。

磁化強度の残存率の平面分布 (Fig. 5-(d)) では、焼土試料がやはり高い残存率を示し、より安定である。しかし、この場合においても、肉眼では焼土と判断されるのに、さほど高い残存率を示さない試料がある。この原因は、そういった焼土試料が炉址中心から離れていたためと考えられる。焼土と判断されていないのに、磁氣的に安定な試料も出てきたが、これらは、NRM 強度が最大のものでも $47 \times 10^{-4} \text{ A/m}$ といずれも小さかった。

ほとんどの焼土試料は、われわれの方法での二つの基準、すなわち NRM 強度が大きく、磁氣的に安定であるという条件を満たしていた。しかし、焼土であるにも関わらず、それらの判定基準の両方、またはどちらかを満足しない試料もでてきた。また、NRM および消磁後の焼土試料の残留磁化方向を調べてみると、NRM 強度

Table 2 Results of magnetization measurement for baked and unbaked surface soil samples in Tamatu-Tanaka site

	N	Vectorial Mean Values				
		INT. (10^{-3} A/m)	DEC. ($^{\circ}$)	INC. ($^{\circ}$)	k	α_{95} ($^{\circ}$)
NRM						
Baked soils	22	10.33	16.6	33.4	19.1	7.3
Unbaked soils	28	6.47	14.7	33.9	2.0	26.8
Remanence after AF demag. (10 mT)						
Baked soils	22	4.99	2.9	31.3	45.5	4.6
Unbaked soils	28	0.85	-17.0	45.2	2.5	21.8

N : number of samples, INT., DEC. and INC. : intensity, declination and inclination of remanence, respectively, k and α_{95} : Fisher statistic parameters (FISHER, 1953), NRM : natural remanent magnetization, demag. : gnetization

Fig. 6 Frequency distribution charts of baked and unbaked surface soil samples for NRM intensity, intensity after AF demagnetization (10 mT) and intensity ratio (DEMAG./NRM)

とそれらの磁氣的安定性が判定基準を満たすか否かに対応して、消磁後の方向が互いにほとんど同じか、ばらつくかに分かれていた。方向の安定性（基準3）をも含めた焼土試料間での差は、焼成度すなわち、焼かれた温度や時間に依存していると考えられる。つまり、判定基準を十分に満足する焼土試料は、他のものより焼かれた温度が高かったか、時間が長かったと考えられ、その結果、磁氣的な安定性に差が生じ、その後の長い期間における粘性残留磁化（VRM; Viscous Remanent Magnetization）の獲得に違いがあったと思われる。

以上のように、実際には焼土試料と焼土以外の試料との間に、NRM 強度や磁氣的な安定性に焚火実験で確認されたような大きな差が現われない。この遺跡で確認されている焼土を、古地磁気学の方法で焼土と判定するためには、その際の判定基準の設定値を緩和すればよい。たとえば、それらの基準値を、 75×10^{-4} A/m 以上を“NRM が大きい”とし、消磁後の磁化強度残存率が15% 以上を“磁氣的に安定である”とすれば、表面から採取した試料において、肉眼で焼土と認められた試料のうち、4 個を除くすべてを焼土と判定することがで

Fig. 7 Distribution chart of sampling point of surface soils in Ichi-no-Kubo site

Numbers showing closed areas denote names of hearths

きる。しかしながら、肉眼で焼土を確認できているからこそ、このような基準設定の緩和ができるのであって、肉眼で判断できない遺跡で実際にこの方法を用いる場合には、ここまで適切な基準を設定することは難しい。判定基準の緩和は、焼土でないものをも焼土と判定する危険性を持っている。

2. 市ノ久保遺跡

(1) 試料採取

市ノ久保遺跡は、大分県犬飼町高松の火山性丘陵上の西側斜面海拔 125 m に位置する。堆積物はすべて火山灰であるが、かつての農地整備のために上層が削剝されているらしく、現地表面下 40~50 cm と非常に浅いレベルで遺跡が発見されている。

遺跡の主体をなしているのは、細石刃文化に属している遺物であり、数百点ほど出土している。このことから、この遺跡はおおよそ 1.3~1.4 万年前のものと考えられている。しかし、ほとんど層準を違えず、縄文時代早期初頭約 9,000~6,500 年前の土器片も十数片発見されている。石器ブロック、配石が数カ所と炉址が 8 基発見されており、集落址の典型とみなされる。焼土は、鮮やかな赤化を示しており、明らかに炉址と判定できる。

試料採取は 1987 年 6 月 30 日、7 月 1 日、7 月 25 日に、明瞭に赤化した焼土を持つ炉址が 3 基発見された D4 区で行われた。ここでは、赤化した焼土の周囲を黒

味がかったおそらく炉址と関係のある土壌が取り囲んでいた。これらの炉址を 1 号炉、2 号炉、3 号炉と呼ぶ。また、それらとは別に 1カ所黒味がかった土壌だけが独立して存在するところ（4 号炉）があった。これら各炉を中心として定方位試料を計 90 個、それ以外のところでは、約 50 cm 間隔で準定方位試料を 502 個、計 592 個を採取した（Fig. 7）。図中の実線で囲った部分は、肉眼的に判断できた黒味がかった土壌と周囲との境界を示す。さらに斜線部は赤化した焼土の範囲を示す。

(2) 残留磁化測定結果

D4 区における全試料の自然残留磁化（NRM）強度の平面分布を Fig. 8 に示す。D4 区の西側と東側とでは、強度分布に大きな違いがあり、明らかに西側は NRM 強度が大きい。各炉と全範囲、ランダムに試料を選出した西側半分・東側半分それぞれの偏角、伏角、磁化強度の平均値、精密度パラメータ k 、 α_{95} を計算した（Table 3）。各炉の NRM の磁化強度は $150 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 以上となり、西側の平均に対して約 40% 大きな値になっている。しかし、 $150 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 以上の土壌は、これらの炉以外の場所にも多く見られる（Fig. 8）。

パイロット試料での段階交流消磁の結果から、焼土試料とそれら以外の試料間で、磁気的な安定性に差の現われる交流磁場強度（5 mT）を決定した。5 mT の交流消磁後の全試料の磁化強度の残存率の平面分布を Fig. 9

Table 3 Results of magnetization measurement for baked
(Nos. 1 ~ 4 hearths) and unbaked surface soil
samples in Ichi-no-Kubo site

	N	Vectorial Mean Values				
		INT. (10 ⁻³ A/m)	DEC. (°)	INC. (°)	k	α ₉₅ (°)
NRM						
No 1 hearth	12	167.1	−16.9	45.9	14	14.1
Nos 2,3 hearths	41	166.7	−10.2	41.6	157	2.2
No 4 hearth	14	159.6	−15.1	45.4	909	1.6
Total area	27	103.2	−11.4	49.1	72	4.0
Eastern part	28	69.8	− 7.3	51.4	71	4.0
Western part	27	121.5	−15.4	42.4	69	4.1
Remanence after AF demag. (5 mT)						
No 1 hearth	12	58.6	2.7	30.9	11	16.5
Nos 2,3 hearths	27	65.2	4.2	45.8	18	6.5
No 4 hearth	14	49.0	8.0	35.5	50	6.9
Total area	27	49.5	−3.1	43.8	39	5.5
Eastern part	28	35.5	6.5	42.3	27	6.6
Western part	27	56.4	−9.0	39.3	30	6.3

N : number of samples, INT., DEC. and INC. : intensity, declination and inclination of remanence, respectively, k and α_{95} : Fisher statistic parameters (FISHER, 1953), NRM : natural remanent magnetization, demag. : demagnetization

Fig. 8 Distribution chart of NRM intensity of surface
soils in Ichi-no-Kubo site

Fig. 9 Distribution chart of intensity ratio (DEMAG./NRM) of surface soils in Ichi-no-Kubo site

に示す。1号炉, 2号炉の赤化している焼土の部分では60%以上の値になる試料がある。しかし, これら以外の場所でも60%以上の値になるところがあり, 特にNRM強度の小さかった東側に多く存在する。さらに, この図は一般に磁氣的に安定な土壌が広範囲に分布している印象を与える。1号炉, 2号炉, 3号炉の各炉では, 消磁後の偏角が西側の焼土以外の試料の平均偏角に対して約 12° 東に偏り, 4号炉では約 17° 東に偏る (Table 3)。

(3) 考 察

古地磁気学的方法における, NRM強度が大きく, 磁氣的に安定とする判定基準をそれぞれ 200×10^{-3} A/m, そして, 交流消磁後の残存率60%と仮に設定すると, 実際の炉址を正しく特定できない。1号炉および2号炉の赤化した中心部分のみがそれらの基準値を満たし, 結果的に直径20cm程度の小さな範囲が炉址と判定される。ところが, 実際の遺跡面で赤化している焼土は, およそ30~50cmの範囲であり, 黒味がかった土壌はさらに広範囲にあった。設定基準値の緩和によって, 実際の焼土の全範囲を炉址と判定できるが, そうすると炉址以外の試料も, 炉址の試料と判定してしまうことになる。

焚火実験で示した, 受熱に伴う明らかに大きいNRM強度や高い磁氣的安定性は, この遺跡での調査で見いだすことができなかった。これは, 受熱後の長時間の経過

に伴って焼土が種々の物理的および化学的作用を受け, それら残留磁化が徐々に変化してきたことを示している。炉址の中心付近で強く受熱した範囲の焼土のNRM強度でさえも減少し, その磁氣的安定性も低下している。さらに, 炉址の中心以外の焼土は, より一層そういった傾向を持っている。また, 黒味がかった土壌は, 交流消磁によって減衰の度合が大きく, 非常に不安定である。このことから, 黒味がかった土壌は磁鉄鉱を含む焼土ではなく, 炭化物等の混入したものと考えられる。

この遺跡における土壌残留磁化の, 時間経過に伴うこのような変化は, 玉津田中遺跡のものより進んでいる。このことは, 市ノ久保遺跡の炉址の方が使用後数倍長い時間を経過していたという, それぞれの遺跡の経過した時間の違いによるのか, それとも, 市ノ久保遺跡の土壌の主成分が火山灰であるのに対して, 玉津田中遺跡の土壌の主成分は砂質粘土であるという, 土壌構成成分の違いによるのかは, 現在わかっていない。

黒味がかった土壌は, 明瞭に焼土とは判定できないが, これを含めた炉址試料の消磁後の磁化方向は, 偏角値が周囲の平均偏角よりも $12^\circ \sim 17^\circ$ 東に偏っており, 明瞭な違いを示している。この違いは, 粘性磁氣的な効果により周囲の磁場による, 二次磁化の獲得があったにもかかわらず, 受熱作用を受けた時に獲得した磁化の記録がいまだに残っている可能性を示している。

この遺跡においては, 判定基準の1と2, すなわち強

い NRM 強度と高い磁氣的安定性に関して、炉址と周囲の土壌との間でわずかな違いしか見いだすことができなかった。しかし、焼土試料の記録している、おそらく初生磁化方向は、周囲の試料のそれらとは明らかに異なっていた。つまり、この遺跡の炉址試料は判定基準 3 を満たしていた。

すべての炉の平均磁化方向は、偏角 3.8° 、伏角 42.5° となり、おそらくこの方向は受熱当時の地球磁場方向を示している。将来、過去数万年の地球磁場の永年変化曲線が完成すれば、それとこの値から炉を使用した年代が決定できるであろう。

IV. まとめと先土器時代遺跡での実行の際の問題点

実際の土壌面で焚火を行い、受熱前後での土壌の残留磁化の磁氣的性質の変化を調べた。その結果、焼けた土壌が、焼けなかった土壌と以下の 3 点で異なることを確認した。

1. 自然残留磁化 (NRM) 強度が大きい。
2. 残留磁化が交流消磁に対して安定である。
3. 残留磁化方向が特異または安定である。

玉津田中遺跡と市ノ久保遺跡において、肉眼で確認されている赤化した焼土で、これら 3 点の磁氣的性質の差が見られるかを検討した。その結果、焚火実験で得られたようなそれらの大きな定量的な違いを、焼土とそれら以外の試料との間で見いだすことはできなかった。しかし、定性的にはこれらの磁氣的性質の差が認められ、炉址やその位置の判定の際の基準として有効であることを確認した。実際の遺跡面の焼土は、現在までに物理的・化学的な種々の作用の下に晒されてきているため、受熱により獲得した磁氣的性質をそのまま残してはいない。長い時間経過の間に、徐々にその性質は変わり、周囲の土壌の性質に近づいていったと想像できる。現在まで残っているそのかすかな磁氣的性質を検出するためには、実際に採取した土壌試料の磁氣的性質を調べるという直接的な古地磁気学的方法が最も有効と思われる。

実際の遺跡面の焼土の例で見たように、焼土以外のものと比べて明瞭な NRM 強度の差、すなわち帯磁率のコントラストがない場合もある。さらに、埋没している遺物や岩石の残留磁化のみならず、雑音としての磁気異常が帯磁率コントラストによる磁気異常に加算されている可能性もある。そのため、日本のように、人工的な電磁雑音が多く、地磁気が乱されているところでは、帯磁

率計やプロトン磁力計を用いて得られた帯磁率コントラストや、磁気異常から炉址を推定するという間接的な物理探査の方法 (COLANI and AITKEN, 1966; CLARK, 1986; GIBSON, 1986; WEYMOUTH, 1986) は、実際の遺跡で成功する見込みは少ないように思われる。しかし、この間接的な方法は発見された遺跡面に手を加えることなく実行できるという利点を持っている。

焼土を肉眼で判定できない遺跡において、古地磁気学的方法を適用する場合、確実に炉址の存在やその位置を判定するために、判定基準は厳しく設定すべきであろう。そうすることにより、焼土でない試料を誤って焼土と判定することもなく、判定基準を満たす試料を確実に焼土と明言できるであろう。さらに、三つの判定基準のうち、ただ一つで炉址を判定することも避けた方がよい。実際の焼土の例で見たように、焼土以外の土壌と磁氣的性質が明瞭に異なることは稀であろうから、ここで示した基準をすべて活用して判定すべきである。また、赤化していても、分析結果から直径 20 cm くらいの範囲しか有意と判定できない市ノ久保遺跡の結果から考えると、試料採取間隔をかなり狭くする必要がある。

引用文献

- CLARK, A. J. (1986) Archaeological prospecting in Britain. *Geophysics*, **51**, p. 1404-1413.
- COLANI, C. and AITKEN, M. J. (1966) Utilization of magnetic viscosity effects in soils for archaeological prospecting. *Nature*, **212**, p. 1446-1447.
- FISHER, R. A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc.*, **A217**, p. 295-305.
- GIBSON, T. H. (1986) Magnetic Prospection on prehistoric sites in Western Canada. *Geophysics*, **51**, p. 553-560.
- KOBAYASHI, K. (1959) Chemical Remanent magnetization of ferromagnetic minerals and its application to rock magnetism. *J. Geomag. Geoelectr.*, **10**, p. 99-117.
- STRANGWAY, D. W., McMAHON, B. E. and HONEA, R. M. (1967) Stable magnetic remanence in antiferromagnetic goethite. *Science*, **158**, p. 785-787.
- STRANGWAY, D. W., HONEA, R. M., McMAHON, B. E. and LARSON, E. E. (1968) The magnetic properties of naturally occurring goethite. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **15**, p. 345-359.
- WEYMOUTH, J. W. (1986) Archaeological site surveying program at the University of Nebraska. *Geophysics*, **51**, p. 538-552.
- 山下秀樹 (1988) 日本先土器時代遺跡における受熱石器の分布。京都文化博物館 (仮称) 研究紀要。第 1 集, p. 41-65.