

寺院の基壇、古墳の墳丘盛土および銅剣埋納墳の粘土の 応力残留磁気と寺院等の基壇の年代測定への応用

時 枝 克 安

1. は じ め に

地磁気の方向は時間とともにゆっくりと変化している。この変化を示すグラフを“時計”の文字盤として用いる年代測定法に考古地磁気法がある。この方法は、粘土を地磁気中で加熱したときに帯びる熱残留磁気¹⁾が、加熱時の地磁気の方向（“時計”の針の位置）を正確に記憶しているという事実を基礎として、焼土を伴出する遺跡の年代決定に大きな役割を果たしてきた。この論文で取り上げるのは焼土の熱残留磁気とは異なり、地磁気中で、粘土に熱ではなく力を加えたときに生じる残留磁気である。そして、熱を受けていない粘土遺物の年代測定を研究目的の一つとしている。この種の残留磁気を、ここでは仮に応力残留磁気と呼ぶことにする。

かつて、筆者は、九州の泉福寺洞穴遺跡のテラスに落下して堆積した粘土層の残留磁気を測定した。その結果、層の各部分の残留磁気の方向は全くでたらめではなく、地磁気の方向に揃う傾向を示した。¹⁾ これは、地磁気中で力を加えた粘土はかなり安定な応力残留磁気を獲得し、その方向は力と地磁気の両者によって定まることを暗示している。この場合、作用した力の方向が分っていれば、年代の分った粘土遺物の残留磁気の方向から、当時の地磁気の方向を知ることができるだろう。そして、地磁気の方向が分れば、焼土を伴出する遺跡の年代決定の場合と同様に、地磁気の変化を利用して遺跡の年代を決定できる。

ここで、考古学の遺跡に目を向けて、応力を受けた粘土遺物の例を探してみると、古代人の足跡や穴に投げこまれた粘土といった素朴なものから、版築土のように古代から伝承されてきた建築技法による精妙なもので、その種類は多岐にわたる。版築というのは、薄い粘土層を衝きかためて次々と積み重ね、建物の土台、城壁、墳墓の墳土等を築造する中国古来の建築技法である。一枚の粘土層の厚さは数 cm～30 cm 程度であり、衝きかためるには直径が数 cm の棒状の杵を用いた。²⁾ 最古のものは殷代中期の城壁に見られ、中国の長い歴史を通じて、それぞれの時代の遺跡に数多くの例がある。³⁾ 日本には、版築は仏教建築に伴って中国から伝来したとされており、飛鳥寺の中金堂等各地の仏教建築の基壇、高松塚古墳等の大和の終末期古墳、九州の古代山城跡や沖縄の今帰仁城跡等の中世の城跡にもその例がある。粘土遺物の応力残留磁気の測定から、遺物が築造された時代の地磁気の方向を知るためには、版築のように、作用した応力の性質が明らかな遺物を取り扱う方が容易であろう。これらの考慮の下に、地磁気中で力を加えられた粘土の実例を、寺院の基壇、古墳の墳丘盛土、銅剣

を埋納している粘土に求めて、採取した定方位試料の残留磁気の方角と遺跡の年代における地磁気の方角とを比較し、さらに、残留磁気の方角と強度との関係を調べた。

2. 遺跡と試料

岡田薬師古墳⁴⁾(島根県松江市法吉町)

墳形は方墳であり、石室は南方向に開口している。築造年代は、出土した須恵器の様式から六世紀後半と推定されている。石室を覆っている盛土の鉛直断面が発掘によって露出され、図1に示すよう

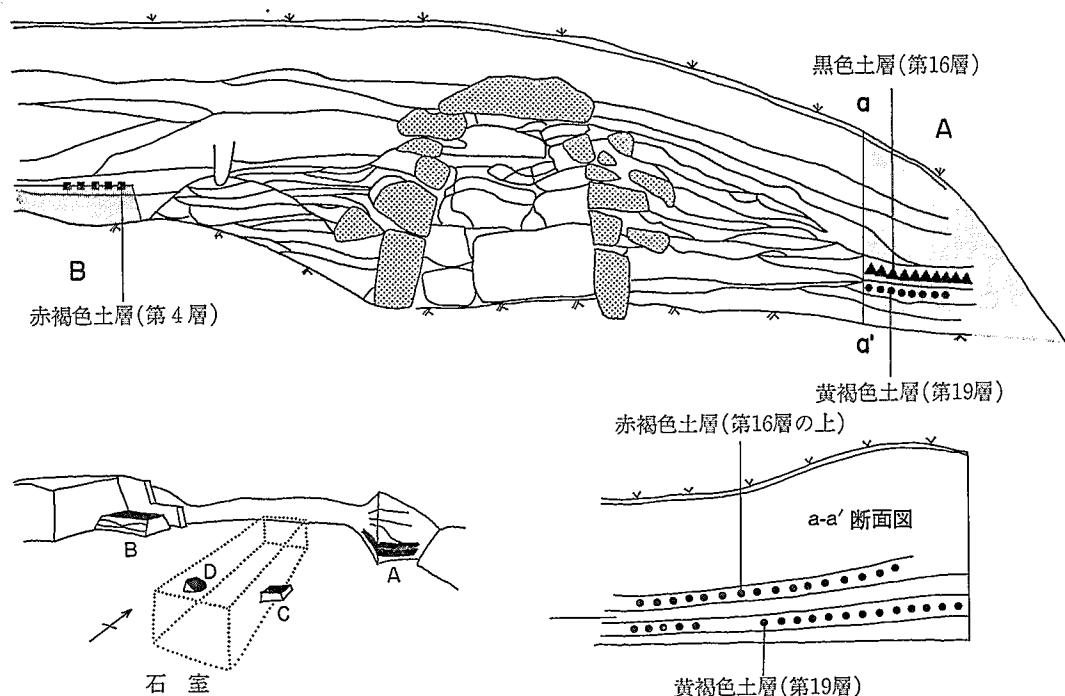


図1 岡田薬師古墳の墳丘盛土の断面と定方位試料採取位置

試料を示す ● ▲ ■ の記号は図-7の測定結果に対応している。

Fig. 1. Cross section of the mound of Okada Yakusi kofun (tumulus grave) and sampling place.

に、褐色土および黒色土の互層構造が認められた。しかし、各層の土質はいずれも軟らかく、十分な叩き締めが行なわれていない。したがって、岡田薬師古墳の墳丘盛土は、後述する神門寺境内廃寺の基壇のように、本来の版築技法によって築造されたものとは言い難い。図1から分かるように、盛土は、石室の側壁を埋める下部盛土と、その上部を覆う上部盛土から成っている。定方位試料は図1に示すように、A部の下部盛土では、下から順に、黄褐色土層(第19層)、黒色土層(第16層)、赤褐色土層(第16層の上)から、また、B部の上部盛土では、赤褐色土層(第4層)から合計85個を採取した。これらの試料は、弱い力による応力残留磁気の実例を示すものと考えられる。

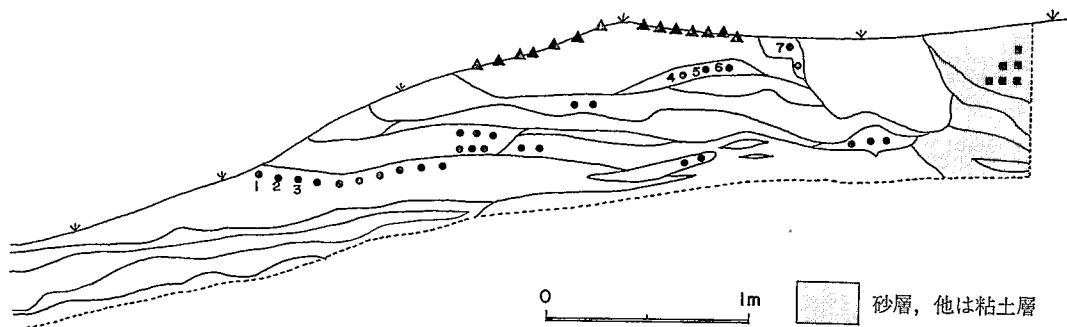


図2 明神古墳の墳丘盛土の断面と定方位試料採取位置

試料を示す ● ▲ ■ の記号は図-10の測定結果に対応している。

Fig. 2. Cross section of the mound of Myojin kofun and sampling place.

盛土部の試料を採取中に、石室の石組が取り除かれ、側壁の石を安定させるために敷かれていた粘土が露出された。敷粘土は良く乾燥しており、石室の荷重によって強く押し込まれていた。これらの敷粘土のうち、表面が平坦なものと約20度の勾配をもったものを選び（図のCおよびD部）、それぞれ12個と10個の定方位試料を採取した。敷粘土の残留磁気は版築時のような衝撃力ではなく、静的な力を長時間にわたって加えた場合の実例を示すものと考えられる。

明神古墳⁹⁾(島根県邇摩郡仁摩町仁万)

墳形は円墳と想定され、石室は東方向に開口している。築造年代は、出土した須恵器の様式から六世紀後半と推定されている。石室の長軸に沿って調査用のトレンチが設けられ石室を覆っている盛土の鉛直断面が露出された。図2は盛土断面を示す。断面の大部分は強く締まった黄橙色、黒色、黒褐色およびそれらの混じりあった粘土から成る版築状互層を示しているが、右端から約50cmまでの間の小部分は砂層から成っており、この砂層は粘土層を非整合に切断している。粘土層の下部では、厚さ5~20cmの粘土層が水平方向に長く延びて積み重なった構造をしているが、上部では、厚さ約40cmの粘土層が横たわり、この層の中間部は上下に走る黒色粘土の局所的な層で切断されている。定方位試料は、図に示す位置から50個を採取した。粘土層が強く締まっていることから、この墳丘盛土の残留磁気は、かなり強い力を粘土に加えた効果を示すものと考えられる。

荒神谷遺跡^{6,7)}(島根県簸川郡斐川町神庭西谷)

谷あいの斜面の加工段に設けられた埋納墳中に358本という大量の銅剣が発見され、日本における青銅器の分布を書き替えるものとして話題をよんだ。埋納墳は、地山の斜面の中程を削って作られており、約1.8m×0.8mの広がりをもつ段状に加工されている。銅剣は粘土で整地された埋納墳底面に置かれ、地山の土で完全に覆われていた。調査用トレンチ断面を観察すると、図3に示すように、覆土は数種の土質が異なる粘土ブロックから成っているが、それらの境界は不規則な曲面となっており、版築のような計画的で整然とした層構造はみられない。これらの銅剣は、覆土に乱れが見られな

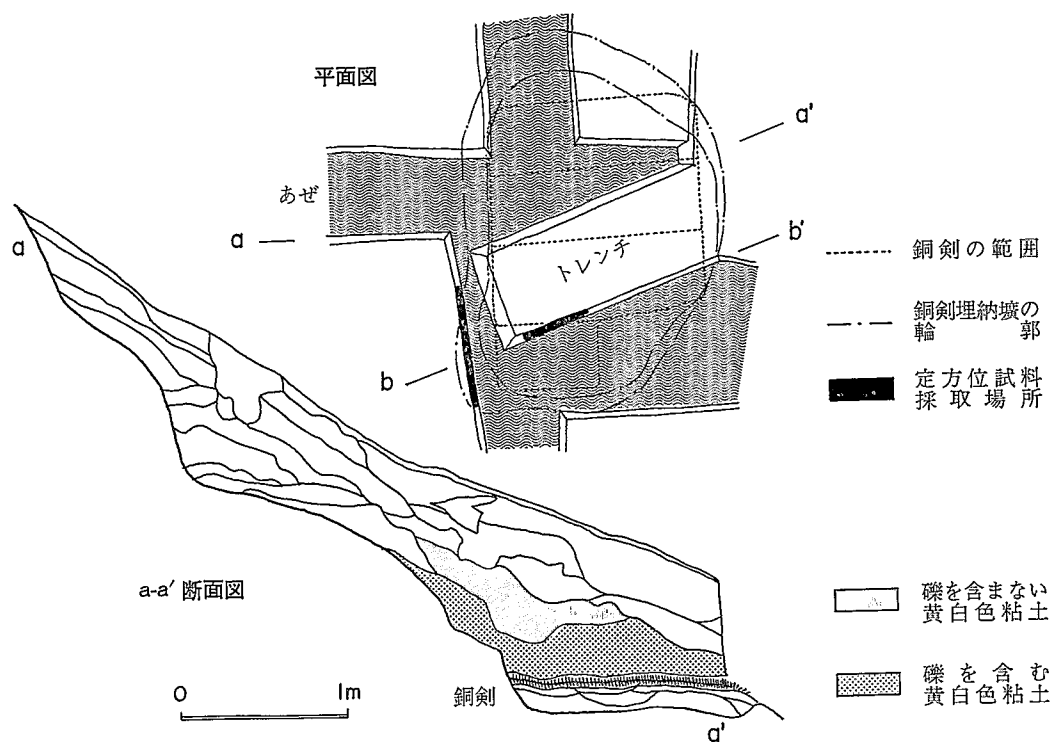


図3 荒神谷遺跡の銅剣を覆う粘土の断面
Fig. 3. Cross section of the clayey soil which covers the buried ancient bronze swords at Kojindani ruin.

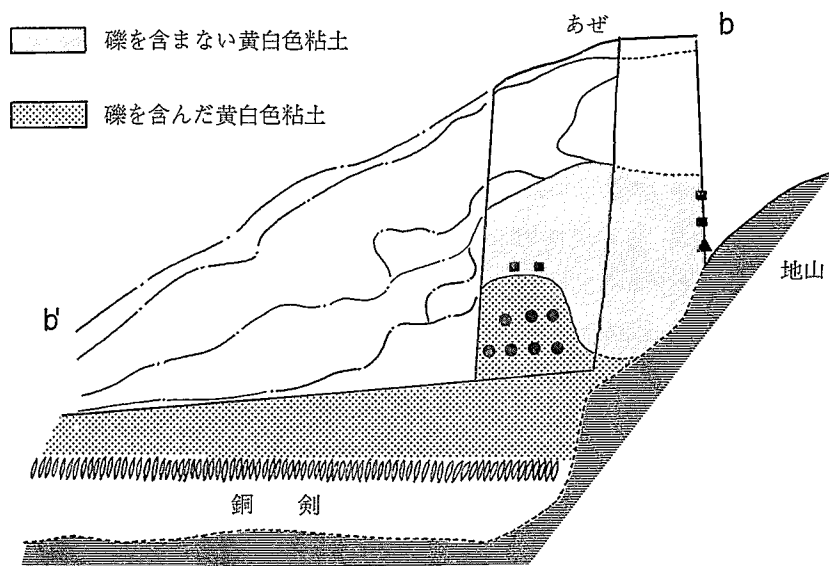
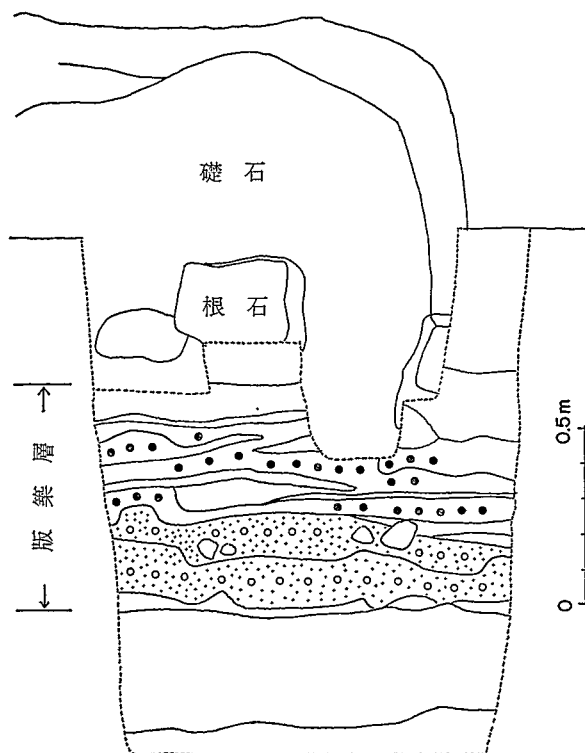


図4 荒神谷遺跡の銅剣埋納墳の粘土と定方位試料採取位置
試料を示す ● ▲ ■ の記号は図-11の測定結果と対応している。
Fig. 4. Sampling place at Kojindani ruin.



砂を含んだ粘土層，その上部は粘土のみの層

図5 神門寺境内廃寺の第19トレンチ断面と定方位試料採取位置

試料を示す ● ○ の記号は図-12の測定結果と対応している。

Fig. 5. Cross section at the 19th trench, cutting *kidan* (foundation made of layered clay) of Kandoji temple ruin.

いことから一時に埋納されたものと考えられている。定方位試料は、図4に示すように、銅剣の直上の風化礫（直径が数mm～3cm）を含んだ黄白色粘土と二番目の礫を含まない黄白色粘土から、トレンチの鉛直断面に沿って26個を採取した。銅剣の鑄造年代は、銅剣の形式が中細形銅剣の最も新しい段階のものであることから、弥生時代中期後葉～後期と考えられている。⁸⁾ また、銅剣が埋納された年代は、多数の銅剣の形式が良く揃っていることから、鑄造後

神門寺境内廃寺⁹⁻¹¹⁾(島根県出雲市塩冶町)

礎石に沿って第19トレンチが深く掘り下げられ、ここでは基壇版築層のすべてが確認できた。また、礎石の周辺には、基壇の広がりを確認するための浅い第21トレンチ他が設けられ、底部には版築層上部が露出していた。版築層は、図5に示すように、厚さ5～15cmの水平な叩き締められた粘土層が

礎石周辺のトレンチ配置

第21トレンチ底面

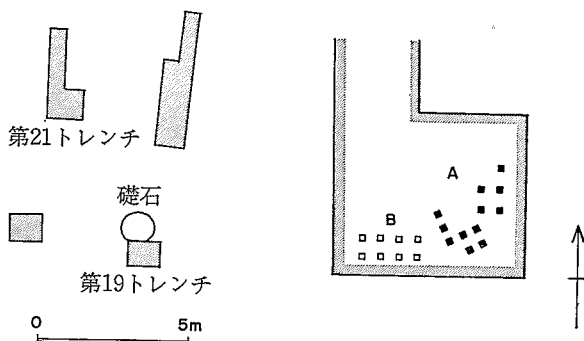


図6 神門寺境内廃寺の第21トレンチの定方位試料採取位置

試料を示す ■ □ の記号は図-12の測定結果と対応している。

Fig. 6. Sampling place at the 21th trench of Kandoji temple ruin.

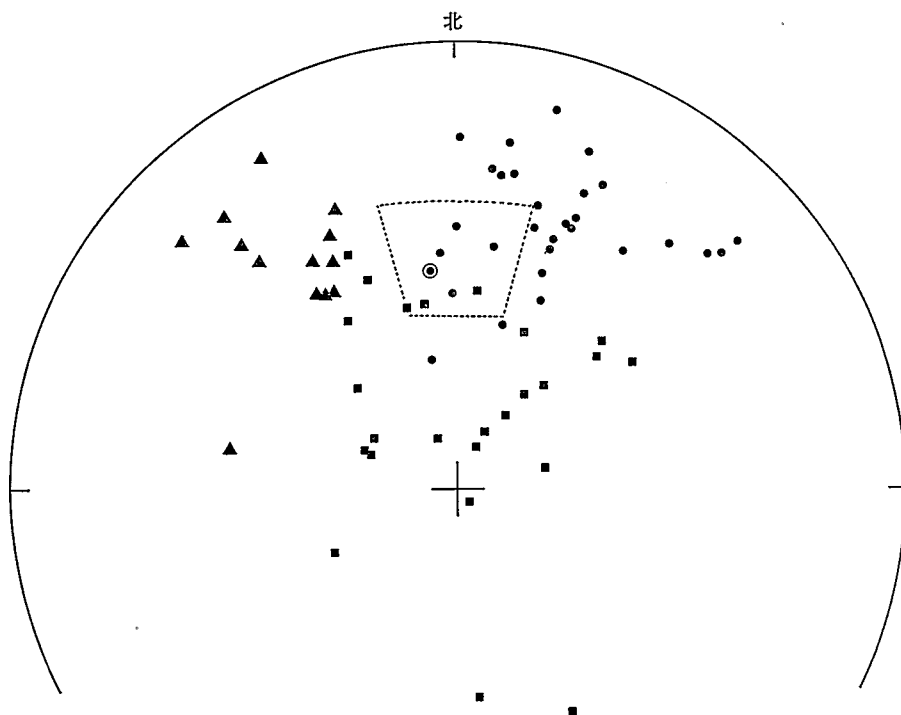


図7 岡田薬師古墳の墳丘盛土の残留磁気の方
試料を示す ● ▲ ■ の記号は図-1の試料採取位置に対応している。また、点線の
窓は過去2000年間の地磁気の方の変動範囲を、◎は現在の地磁気の方を示す。

Fig. 7. NRM directions from the mound of Okada Yakusi kofun.

約 70 cm にわたって整然と積み重ねられ、全体として非常に堅牢な構造をしている。そして、版築層の最下層およびすぐ上の層では、粘土中に砂が混入していた。定方位試料は、図5に示すように、第19トレンチの版築層から50個を、図6に示すように、第21トレンチ底部に露出する版築層上部から20個を採取した。遺跡の年代は正確には判明していないが、史料および境内から出土した古瓦の様式から判断して奈良時代と考えられる。伝統的な版築技法によれば、寺院の基壇の版築粘土層に作用した力は、鉛直方向の衝撃力である。したがって、神門寺境内廃寺の例では、他の遺跡とくらべて、応力の性質が明瞭であるのが特徴となっている。

3. 残留磁気の測定結果と考察

岡田薬師古墳の墳丘盛土と石室の敷粘土

図7に墳丘盛土の残留磁気の方の測定結果を示す。試料のうち4個は破損し、14個は磁気的非均質性による大きな測定誤差のため省略している。残留磁気の方の方向は散りじりに乱れているが、大きく分けると、三つのグループに別れて分布している。下部盛土について見ると、二枚の褐色土層（最下

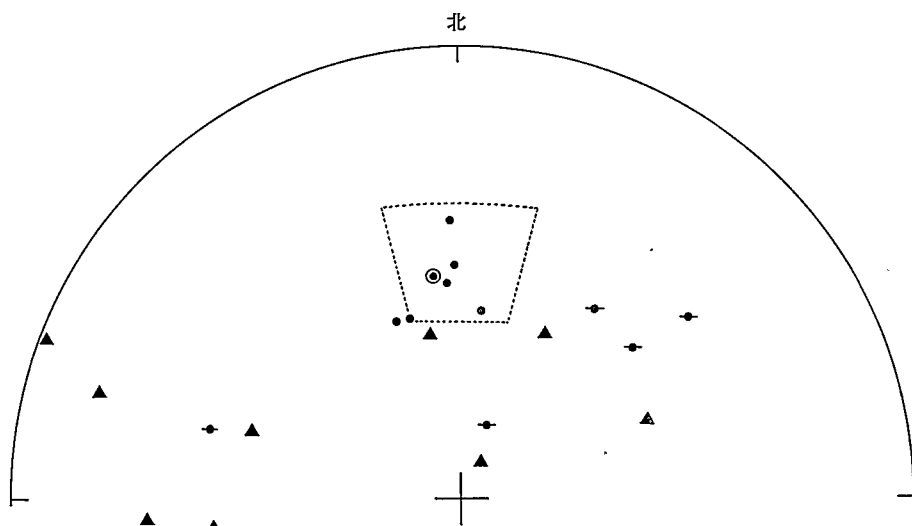


図8 岡田薬師古墳の石室の敷粘土の残留磁気の方

● 表面が水平な敷粘土から採取された試料。● 同上、ただし、周縁部の試料。▲ 表面が約20度の勾配をもった敷粘土から採取された試料。点線の窓は過去2000年間の地磁気の方

向の変動範囲を、⊙は現在の地磁気の方を示す。
Fig. 8. NRM directions from the clay blocks lying under the side wall of the stone chamber of Okada Yakusi kofun

層の黄褐色土層（第19層）と三番目の赤褐色土層）では、残留磁気の方

向がステレオ投影図の第一象限にあるけれども、これらの褐色土層の間にはさまれた黒色土層（第16層）では第二象限に分布している。そして、石室を隔てた所にある上部盛土の赤褐色土層（第4層）では、第一象限と第二象限の中間に分布している。

さて、島根県出雲市に所在する大念寺古墳の発掘調査^{12,13)}によれば、墳丘盛土断面は、堅く締まった黒色粘砂層と褐色粘土層の版築状互層構造を示しており、透水層と不透水層を交互に組み合わせることによって、効率の良い排水を意図し、墳丘の崩壊を防いだものと指摘されている。岡田薬師古墳の墳丘盛土の互層を構成している黒色土と褐色土を比較すると土質はともに軟らかいが、粘度は黒色土の方が低い。それゆえ、黒色土の方がより透水的である。また、黒色土層（第16層）には細い草の根が多量に認められたが、一つ上の褐色土層では、逆に少なかった。これに加えて、図1から分かるように、黒色土層（第16層）の試料を採取した場所から傾斜した盛土表面までの距離は、鉛直方向には約80cmあり、その間は互層構造が続いているが、水平方向には短く約70cm以下であり、この間は水平な黒色土層に沿っている。これらの事柄を、黒色土の方が透水的であるという判断と合せて考えると、草の根は墳丘盛土の横腹から水平な黒色土層に沿って侵入したと推定できる。一方、磁場中で火山灰層に水を浸透させた時、火山灰層の磁化方向が、磁性鉱物の再配列によって、外部磁場の

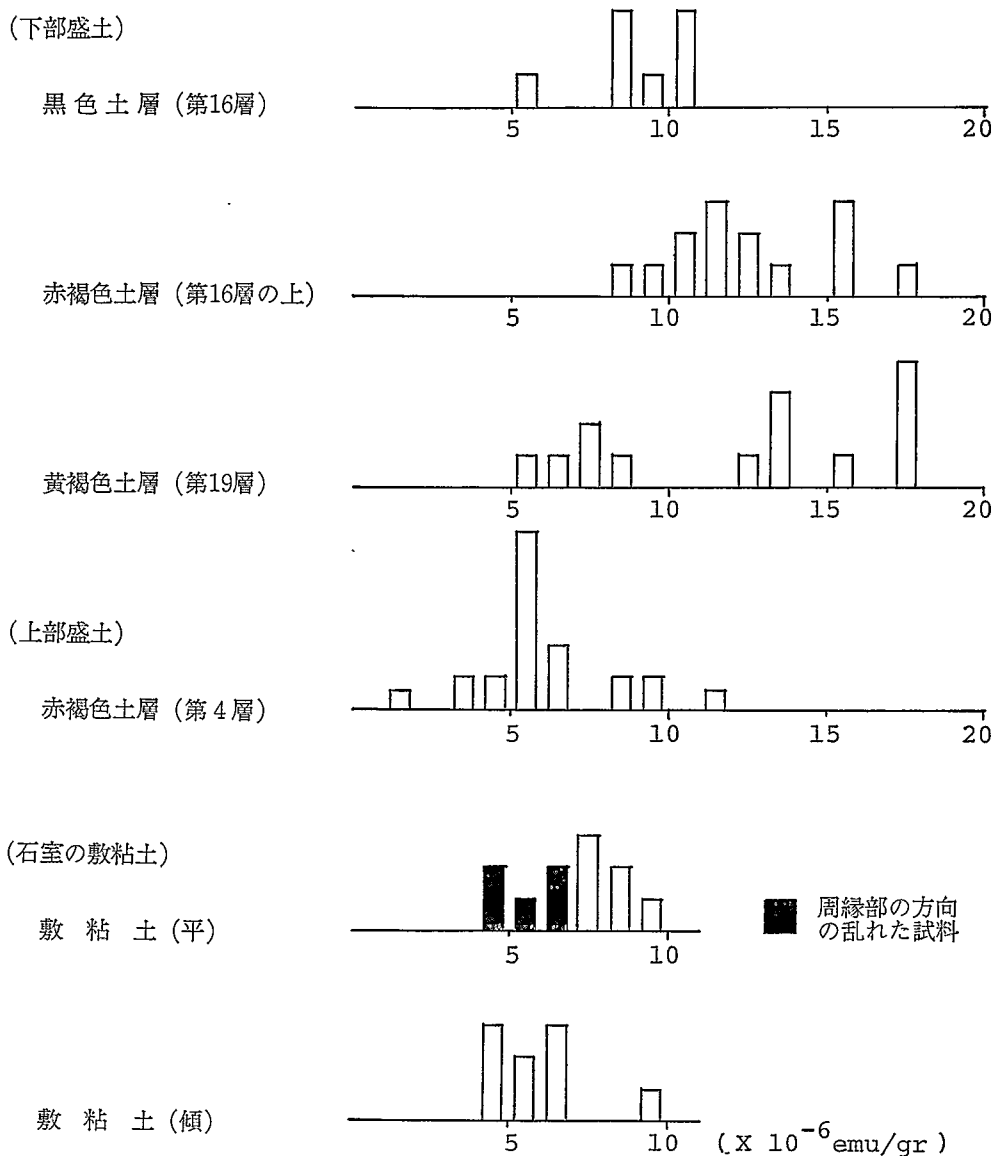


図9 岡田薬師古墳の残留磁気強度ヒストグラム

Fig. 9. Histogram of the intensity of the NRM from Okada Yakusi kofun.

方向に揃うという実験結果が報告されている。¹⁴⁾ したがって、二枚の褐色土層にはさまれた黒色土層の残留磁気方向が第二象限に飛び離れているのは、水分が墳丘斜面から水平な黒色土層中を伝わって侵入し、水分の助けを借りて、層中の磁性粒子が地磁気との相互作用で再配列し、残留磁気方向が現在の地磁気方向に引きずられたためと考えている。また、同じ褐色土層でありながら、残留磁気方向の分布が、下部盛土の二つの層と石室を隔てた上部盛土とで一致しないのは、墳丘築造時、土層に作用した力が弱く、方向も一定でなかったために、オリジナルな応力残留磁気方向が広範囲

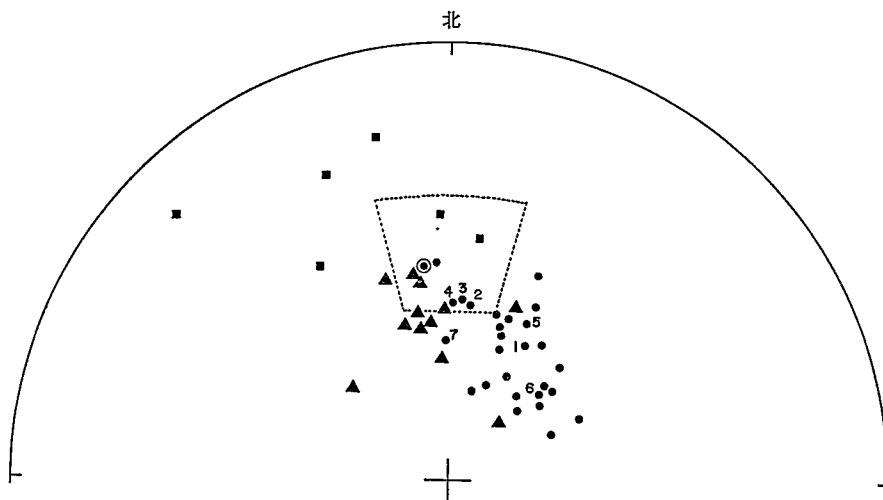


図10 明神古墳の墳丘盛土の残留磁気の方
試料を示す ● ▲ ■ の記号は図-2の試料採取位置と対応している。
Fig. 10. NRM directions from the mound of Myojin kofun.

にわたっては揃わなかったものと解釈している。

図8に示すように、石室の敷粘土の残留磁気の方、表面が傾斜したものについて極端に乱れているが、表面が水平なものについては、敷粘土表面の周縁部から採取された試料を除くと、かなり良くまとまっている。敷粘土の周縁部では、媒質の不連続性によって応力が変化しているために残留磁気の方、方向が乱れると考えられる。したがって、残留磁気の方、方向は、粘土に作用する応力が表面に垂直な圧力である場合には揃うが、平行なずり応力の場合には乱れると結論できる。

ここで、遺跡の推定年代である六世紀後半での地磁気の方、方向と、表面が水平な敷粘土の残留磁気の方、平均方向（周縁部を除く）とを比べると、図8に示すように、両者は一致していないが、相互のずれは、衝撃力が加えられた他の遺跡の例ほど大きくはない。したがって、地磁気と応力残留磁気の方、方向の間の離反角は、衝撃力の場合には大きい、静的に作用する圧力では比較的小さいと言える。

図9に示された残留磁気強度の頻度分布から、盛土および敷粘土の両者において、残留磁気の方、方向のまとまりが良い方が、残留磁気強度が大きくなっていることが分る。すなわち、下部盛土の褐色土層（第16層の上の層と第19層）と上部盛土の赤褐色土層（第4層）とに関して、残留磁気の方、方向の分散の程度を計算すると、前者について Fisher の95%誤差角^{15,16)}が6.9度であるのに対して、後者は10度となり、前者の方、方向のまとまりが良い。また、前者の残留磁気強度が $5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ emu/gr であるのに対して、後者は $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ emu/gr であり、前者の方が大きい。同様に、敷粘土についても、表面が平坦で、残留磁気の方、方向のまとまりが良い方が、残留磁気強度が大きい。残留磁気の方、方向と強度についての同様の関係は神門寺境内廃寺の測定結果にも認められる。

明神古墳の墳丘盛土版築状粘土層

図10に残留磁気の方角の測定結果を示す。採取した50個の試料のなかで3個は破損のため、また他の3個は磁気的非均質性のために残留磁気の方角を測定できなかった。図から分るように、粘土層の上部と下部とでは、残留磁気の方角は異なるグループに別れて分布している。しかし、上部についてFisherの95%誤差角が5.9度、下部では5.7度と、各グループの分散の程度が予想外に小さいのは注目してよい。それぞれのグループの平均方角を比較すると、粘土層上部では、伏角が60.4度、偏角が6.3度Wと現在の地磁気の方角に近くなっているのに対して、粘土層下部では、伏角が64.3度、偏角が25.3度Eとより深い伏角と大きく東偏した偏角をもっている。下部のものについて、さらに検討すると、傾斜した盛土表面に近くなっている部分の残留磁気の方角は、むしろ上部の分布範囲に属している。目を転じて、砂層の残留磁気についてみると、方角のまとまりは悪いが、方角の分散の様子は、粘土層上部の残留磁気と同じ傾向をもっており、ともに現在の地磁気の方角に引きずられているように見える。

残留磁気の方角が粘土層の上部と下部とで異っているのは、雨水の浸透による影響として説明できる。すなわち、墳丘築造時には、版築による応力によって粘土層全体が粘土層下部の現在の残留磁気の方角に帯磁したが、その後、雨水が表面の砂を透過して粘土層上部に浸透し、含有磁性鉱物粒子が地磁気との相互作用によって再配列した結果、粘土層上部の残留磁気の方角が変化して現在の地磁気の方角に近くなったと考えられる。砂層の残留磁気の方角が粘土層上部と似ているのも、同様に説明できる。また、砂層の残留磁気の方角の分散が大きいのは、砂粒子の不規則な形状が原因であると考えられている。

西南日本における地磁気の方角は過去2000年間に、伏角が35～60度、偏角が16度W～14度Eの範囲で変動している。また、明神古墳の推定年代である六世紀後半における地磁気の方角は、伏角が50～55度、偏角が約15度Wである。¹⁷⁾ これに対して、明神古墳築造時の応力残留磁気と見なしうる粘土層下部の残留磁気の平均方角は、伏角が64.3度、偏角が25.3度Eである。したがって、図10に示すように、オリジナルな応力残留磁気の方角は過去2000年間ににおける地磁気の方角の変動範囲の外にあり、応力残留磁気の方角は、応力作用時の地磁気の方角から大きく偏向している。

残留磁気の強度は、粘土層と砂層についてともに $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-5}$ emu/gr の範囲にあり、最大頻度値は 1×10^{-5} emu/gr である。このように、両者の残留磁気強度の分布の仕方には差が認められない。

荒神谷遺跡の銅剣埋納壇の粘土

図11に残留磁気の方角の測定結果を示す。残留磁気の方角は、粘土ブロック中の礫の有無によって異った分布をしている。すなわち、銅剣の直上の礫（直径が数mm～3cm）を含んだ黄白色粘土ブロックでは、残留磁気の平均方角は、伏角が42.1度、偏角が20.6度Eと東に偏っているのに比べると、二番目の礫を含まない黄白色粘土ブロックでは、伏角が34.5度とほぼ同じであるが、偏角は0.2度E

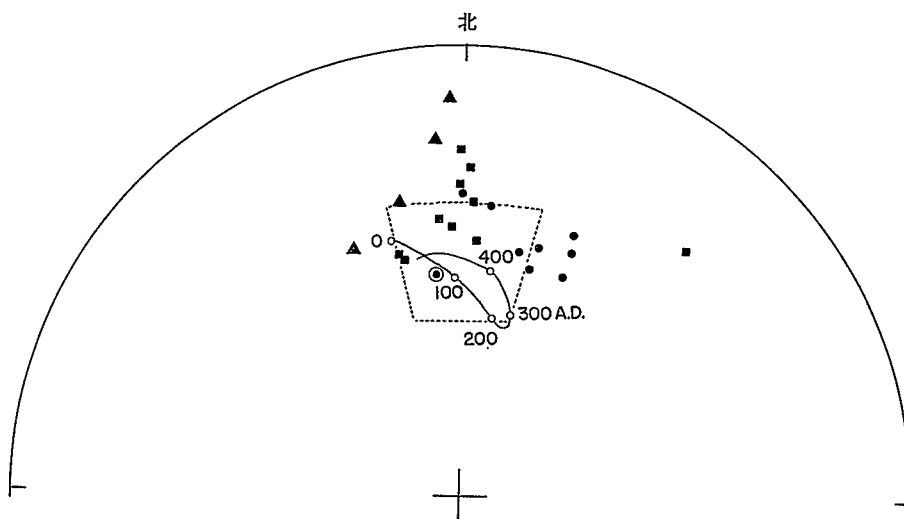


図11 荒神谷遺跡の銅剣埋納墳の粘土の残留磁気の方
試料を示す ● ▲ ■ の記号は図 - 4 の試料採取位置に対応している。点線
の窓は過去2000年間の地磁気の方の変動範囲を、●は現在の地磁気の方
を示す。また、曲線は弥生時代後半の地磁気の方の変化を示している。

Fig. 11. NRM directions from the clayey soil which covers the
buried ansient bronze swords at Koujindani ruin.

と磁北に近くなっている。粘土中の砂の有無によって、残留磁気の方異なる例は、後述の神門寺境内廃寺の基壇版築層に、また、砂と粘土での同様の例は前述の明神古墳の墳丘盛土に認められる。礫を含まない黄白色粘土ブロックの結果をさらに検討すると、傾斜した地山の表面から離れた場所では、残留磁気の方比較的良くまとまっているのに対して、表面に接する場所では、大きく乱れているのが注意をひく。この原因は、粘土が埋納墳に投入されてから定位置に安定するまでに、粘土と地山斜面との間に働くずり応力によって、残留磁気の方乱れたものと考えられる。ずり応力が残留磁気の方を乱す例は、すでに述べたように、岡田薬師古墳の石室の、表面が傾斜した敷粘土にも認められた。ここで、礫を含有する粘土層の応力残留磁気は、礫の性質にかなり依存すると予想されるので、取り扱いを別にするのが良策であろう。そうすると、銅剣埋納時のオリジナルな応力残留磁気としてふさわしいのは、礫を含まない黄白色粘土ブロックの、地山表面から離れた部分の残留磁気である。

さて、銅剣を埋納した年代が、少なくとも弥生時代後半～六世紀末にかけてであることはすでに述べたが、この期間に、地磁気の方伏角が 55～45度、偏角が 15度 E～15度 W にわたって変動している。¹⁷⁾ 一方、荒神谷遺跡の礫を含まない黄白色粘土の残留磁気の平均方(地山に近接した試料を除く)は、伏角が 34.5度、偏角が 0.2度 E である。したがって、地磁気の方と応力残留磁気の方はずれている。しかし、他の遺跡の例と異って、ずれの角度は小さい。

図 3 からわかるように、銅剣を埋納している粘土ブロックには、版築のように明確な層構造が見ら

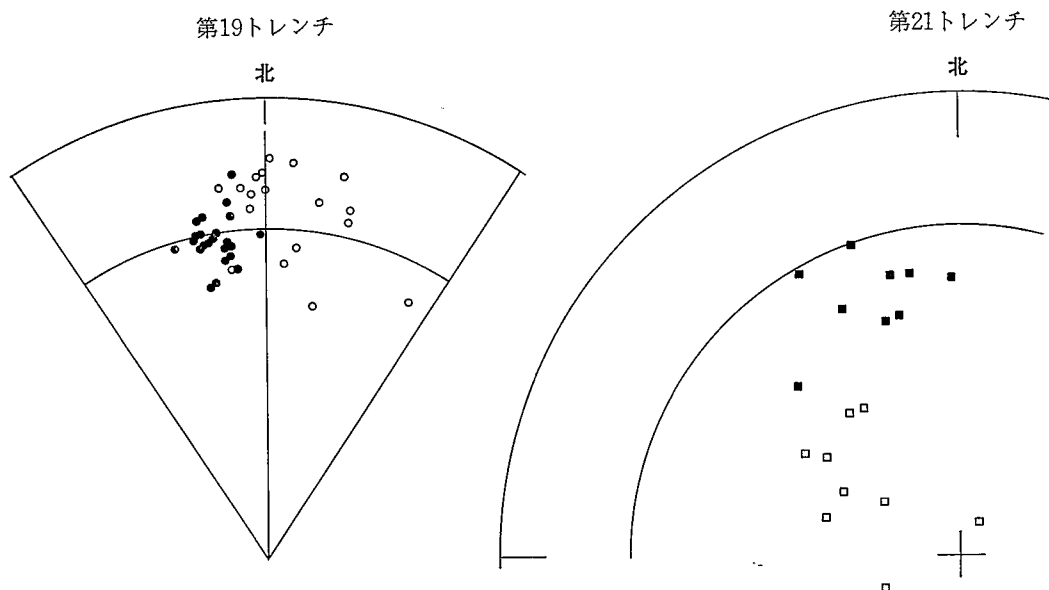


図12 神門寺境内廃寺の基壇版築層の残留磁気の方

試料を示す ● ○ ■ □ の記号は下半球の方向を示し、図-5, 6の試料採取位置に対応している。

Fig. 12. NRM directions from *kidan* (foundation made of layered clay) of Kandoji Temple ruin.

れず、考古学的には、粘土を締めかためたかどうかを判断できない。しかし、Fisher の95% 誤差角が6.7度と、残留磁気の方が予想外に良くまとまっていることは、粘土をかためる 何らかの作業が行なわれたことを暗示している。粘土の残留磁気強度は $\sim 1 \times 10^{-6}$ emu/gr であった。

神門寺境内廃寺の基壇版築層

図12に残留磁気の方

粘土鉱物の形は概して薄い板状であり、大きさも比較的良く揃っているのに比べて、砂粒子の形は不規則であり、大きさも幅広く変化する。砂を含有する粘土層の応力残留磁気は、砂粒子の性質が強い影響をもつと考えられるので、別に取り扱うのが賢明であろう。第21トレンチ底部は第19トレンチの版築層上部の延長上にあるので、同じ物理的条件を仮定すれば、残留磁気の方

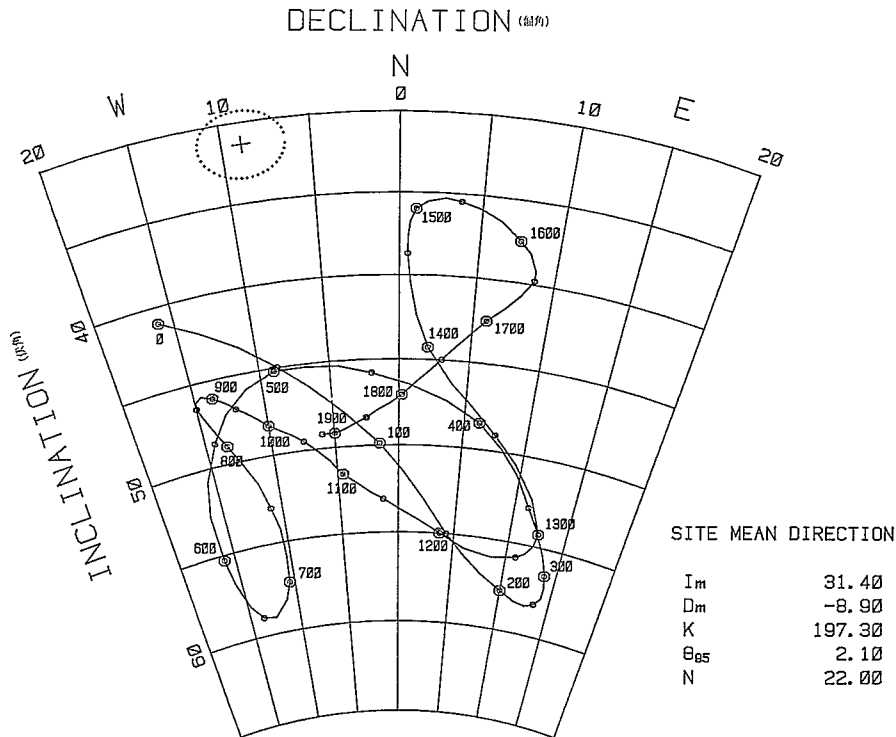


図13 神門寺境内廃寺の残留磁気の平均方向と、西南日本における過去2000年間の地磁気永年変化曲線
 +の記号は残留磁気の平均方向を、点線の楕円は誤差の範囲を示す。

Fig. 13. Mean direction of the NRM from Kandoji Temple ruin and the geomagnetic secular variation curve during past 2000 years in southwestern Japan, which has established by Hirooka (1977).

ていなければならない。図6のA部についてはこの要請が満されている。すなわち、計算によると、A部と第19トレンチの版築層上部の残留磁気の二つの平均方向の離反角は約15度であるが、両者のFisherの95%誤差角の和は14度であるので、統計学的には両者の方向はほぼ一致すると見てよい。しかし、図6のB部では、残留磁気の方は伏角がずっと深い方へずれ、方向の分散も大きくなる。このように、第21トレンチB部の残留磁気の方が予想される方向からずれているのは、発掘調査に伴う攪乱のためであると解釈している。

神門寺境内廃寺の基壇版築層でも、他の遺跡と同様に、応力残留磁気と地磁気の方が大きく食い違っているのが認められる。すなわち、版築時のオリジナルな応力残留磁気としてふさわしい第19トレンチの粘土層の残留磁気の方を、遺跡の推定年代である奈良時代の地磁気の方と比較してみると、図13に示すように、偏角はほぼ等しいが、伏角は応力残留磁気の方が約25度も浅くなっている。

図14に残留磁気強度の測定結果を示す。残留磁気強度はかなり強く、第19トレンチでは 1×10^{-4} emu/grにも達する試料が32%もある。この強度は古窯跡の熱残留磁気強度の通常値 ($10^{-6} \sim 10^{-3}$

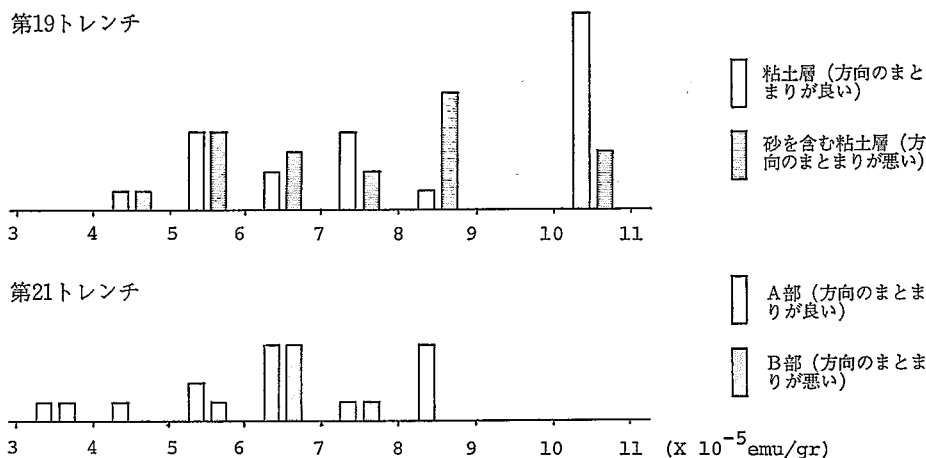


図14 神門寺境内廃寺の基壇版築層の残留磁気強度ヒストグラム

Fig. 14. Histogram of the intensity of the NRMs from Kandoji Temple ruin.

emu/gr)と比較しても遜色がない。次に、残留磁気の方角の集中度が良くなるのに応じて、強度の最大頻度値が大きくなる傾向が認められる。第19トレンチを例にとると、方角の集中度の良い粘土層は、残留磁気強度の最大頻度値が 1×10^{-4} emu/gr であるのに対して、方角の集中度の悪い砂を含有した粘土層では 8×10^{-5} emu/grとなる。また、同じ層に属する、第19トレンチ版築層上部と第21トレンチ底部の測定結果を比較しても同様の傾向がある。第21トレンチについて、方角の集中度の異なる二つのグループを比べると、強度の最大頻度値は同じであるが、方角の集中度の良い方が最大強度が大きくなっている。

4. 測定結果の要約

神門寺境内廃寺の基壇版築層の応力残留磁気を示す、鋭い方角集中度と、強い残留磁気強度は、特筆されてよい。地磁気中で粘土に力を加えた場合に生じる応力残留磁気の方角、強度および安定性について、測定結果の要点をまとめると次のようになる。

方角

- (1) 応力残留磁気の方角は遺跡の時代における地磁気の方角と一致しない。両者の離反角は衝撃力の場合大きく、静的な圧力の場合小さくなる。
- (2) 粘土と、砂または礫を含有した粘土の間で、応力残留磁気の方角は少し異なる。また、方角の分散の程度は、粘土のみの方が小さい。
- (3) 応力残留磁気の方角の分散は、応力が強い場合小さく、弱い場合大きくなる。
- (4) 粘土の表面に垂直に働く圧力は応力残留磁気の方角を揃えるが、平行に働くずり応力の場合は著しく乱す。

強度

- (5) 応力残留磁気の強度の測定値は $10^{-6} \sim 10^{-4}$ emu/gr の範囲にある。この値は古窯跡等の熱残留磁気強度の通常値 ($10^{-6} \sim 10^{-3}$ emu/gr) とほぼ同じ水準にある。
- (6) 各々の遺跡の応力残留磁気強度の最大頻度値は、応力が強くなると増加する。
- (7) 残留磁気の方角の集中度が良くなるのに応じて、残留磁気強度の最大頻度値は大きくなる。

安定性

- (8) 水分が二次的に侵入するとき、オリジナルな応力残留磁気の方角は、侵入時の地磁気の方角に向って変化する傾向がある。
- (9) 発掘調査に伴う二次的応力に原因すると考えられる残留磁気の方角の乱れがあった。
- (10) 二次的な攪乱がない場合、応力残留磁気の方角は、1000年以上も現在の地磁気の方角と異っているので、磁氣的粘性効果による磁化方角の変化は少ないとみてよい。

5. 磁化機構の要因

粘土の主成分は非磁性体の層状粘土鉱物で占められ、¹⁸⁾ その中に微量の磁鉄鉱等の磁性粒子が分布している。粘土の全磁気モーメントは個々の磁性粒子の磁気モーメントのベクトル和であるから、理想的な混合が行なわれた場合、粘土中で磁性粒子は全くでたらめな配向をし、全磁気モーメントは消滅する。しかし、何かの原因で磁性粒子の配向に偏りが生じると、それに応じて磁気モーメントが出現する。堆積物の残留磁気に関する研究から、堆積後の圧密過程で粒間の水分が移動する際、磁性粒子の方角が変化し、堆積物全体として地磁気の方角に磁気モーメントをもつようになる効果が認められている。¹⁹⁾ したがって、地磁気中で粘土に力が作用した場合の磁化機構には、次の二つの要因が常識となっている。

- (1) 水分の、磁性粒子の姿勢制御に対する作用：粘土鉱物の間にある磁性粒子は、水分に支持されて動き易くなっており、水分の移動に伴ってその向きを変える。水分が多いほどこの作用は大きい。
- (2) 磁性粒子の磁気モーメントと地磁気の磁氣的な相互作用：磁気モーメントは地磁気と平行になって磁氣的ポテンシャルエネルギーを下げようとする。

これらに加えて、筆者は次の要因を考えている。

- (3) 磁性粒子と力の機械的な相互作用：層状粘土鉱物の層面が力の方向と直角になろうとするので、面間にはさまれた磁性粒子もこの動きに順応し、全磁気モーメントも力の方向と直角になろうとする。粘土鉱物の層面が力の方向と直角になろうとすることは、土質力学の分野で実証されている。²⁰⁾

6. 年代測定への応用

考古地磁気法による粘土遺物の年代測定の立場から、測定結果を見なおしてみると、困った事情が二つある。その一つは、残留磁気の方角の分布の中心が遺跡の年代における地磁気の方角から外れて

表1 残留磁気方向の分散が小さい測定例

遺跡の粘土遺物	Fisher の95%誤差角
神門寺境内廃寺版築層 第19トレンチの砂を含まない粘土層	2.1度
荒神谷遺跡、銅剣を埋めた粘土 ただし、地山に接する試料を除く	5.3度
明神古墳、墳丘盛土の版築状互層 下部層	5.7度
岡田薬師古墳、石室の表面が水平な敷粘土 ただし、周縁部を除く	6.4度

いることであり、他の一つは、少数例を除いて、残留磁気の方がかなり分散しており、甚だしい場合は、分布範囲の大きさが、過去2000年間の地磁気の方角の変動範囲の大きさを越えていることである。残留磁気の方角の分散が大きい遺跡については、年代誤差がどうしても大きくなるので、残念ながら意味のある年代推定は不可能である。表1に、方角の分散が小さい4例について、Fisher の95%誤差角をまとめてある。図13に示された地磁気永年変化図¹⁷⁾ から分るように、例えば、Fisher の95%誤差角が5度とすると、対応する年代誤差は、弥生時代では $\sim \pm 25$ 年、古墳時代では $\sim \pm 50$ 年となる。それゆえ表1の4例は、年代誤差に関しては実用範囲にある。しかし神門寺境内廃寺以外の3例について、粘土に作用した応力の性質が十分に分かっていないので、応力残留磁気の方角から、応力作用時の地磁気の方角を再現することができず、肝心の年代値の推定ができない。そこで残留磁気の方角の分散が非常に小さく、また作用した応力の性質が明瞭な神門寺境内廃寺の例について考察を進める。

神門寺境内廃寺の砂を含まない版築粘土層の残留磁気の方角を、遺跡の推定年代である奈良時代の地磁気の方角と比べると、図13に示すように、偏角は両者でほとんど等しいが、伏角は前者の方が後者よりも約25度も浅い。また、残留磁気強度は、図15に示すように、他の遺跡に比べて一桁大きい値をとっている。さて、寺院の基壇版築層に加えられた力は、鉛直方向の強い衝撃力であることは確実である。では、このような力が粘土に作用

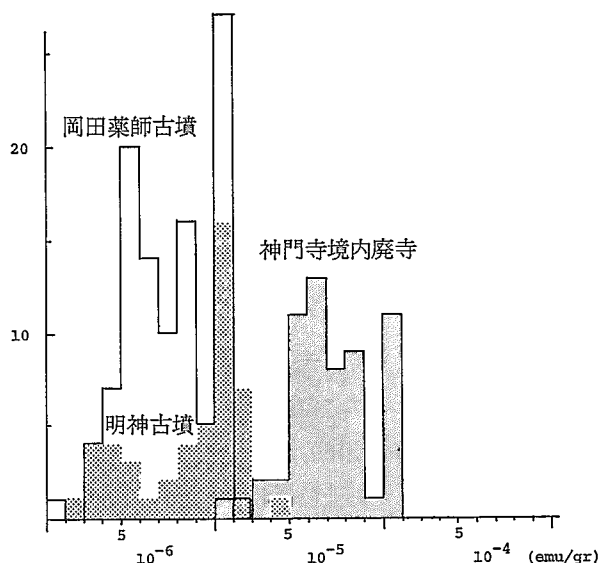


図15 神門寺境内廃寺の基壇版築層、明神古墳と岡田薬師古墳の版築上互層の残留磁気強度ヒストグラム

Fig. 15. Histogram of the intensity of the NRM from Kandoji Temple ruin, Myojin kofun and Okada Yakusi kofun.

する場合、前述の磁化機構の要因に基づくと、どのような結果が予想されるだろうか。

地磁気中で粘土に鉛直力が加えられた場合、粒間の水分に支持された磁性粒子は、地磁気との磁気的相互作用、粘土鉱物との接触および粒間の水流による機械的相互作用の二つの原因によって回転運動をし、粘土の磁気モーメントが変化する。力が作用する以前の粘土鉱物の配向がでたらめな場合、水平面内の、機械的な相互作用による回転は、粘土の磁気モーメントの方向を変化させない。その理由は、幾何学的対称性から、正逆方向に等量の回転が見込まれ、それらが磁気モーメントの方向の変化を打ち消しあうからである。それゆえ、水平面内の磁気モーメントの方向の変化は、地磁気との磁気的相互作用による回転によってのみ引き起され、粘土の磁気モーメントの水平成分は磁北と平行になろうとする。したがって、十分強い力が作用した場合、残留磁気の偏角は地磁気の偏角と一致する。次に鉛直面内の磁気モーメントの方向の変化に目を転ずると、地磁気だけでなく力も関係する。磁性粒子は、一方では、磁気モーメントの方向を地磁気の方に向けて磁気的ポテンシャルエネルギーを下げようとするが、他方では、前述の磁化の要因(3)のために、力がこれを上回る仕事をして磁気モーメントの方向を水平にするように働く。その結果、残留磁気の伏角は地磁気の伏角よりも浅くなる。そして、十分強い力が作用した場合、磁性粒子の水平方向と磁北方向への整列が進行するので、残留磁気の伏角は零に近ずき、強度は次第に強くなる。このように、地磁気中で粘土に鉛直方向の強い力が加えられた場合、次の三つの結果を予想することができる。

- (1) 残留磁気の偏角は地磁気の偏角と等しくなる。
- (2) 残留磁気の伏角は地磁気の伏角より浅くなる。
- (3) 残留磁気の強度は伏角が減少するのに従って大きくなる。

これらの予想は神門寺境内廃寺の版築層の測定結果と定性的に一致している。このように、遺跡の実例と磁化機構に基づく予想が矛盾なく整合するので、「寺院の基壇の版築層のように、鉛直方向の強い衝撃力が加えられた粘土層は、残留磁気の偏角を過去の地磁気の偏角と直接比較することによって、年代を推定できる」という見解に達した。但し、測定結果から示唆されるように、一度残留磁気が獲得された後で、雨水が浸透したり、二次的な力が作用した試料は好ましくない。

7. 粘土の応力残留磁気の方向分散についての考察

表1以外の粘土遺物の残留磁気の方が大きく分散しているのは何故だろうか？ 帯磁後の外的な攪乱以外に次の四つの原因が考えられる。

- (1) 一様でない応力場：粘土に作用する応力の方向と強さが一定していない。
- (2) ずり応力の影響：ずり応力は残留磁気の方を大きく乱す。例えば、古墳の墳丘盛土の築造工程で、粘土をコテ状の道具で塗りつける作業が行なわれたとすると、粘土の表面にずり応力が働き、粘土の磁化方向は大きく乱れる。叩き締めが行なわれたとしても、力が弱い場合は、残留磁気の方が分散したままである。

(3) 遺跡の幾何学的形状：粘土に働く応力が、表面に垂直な圧力であっても、古墳の墳丘盛土のように表面が曲面であると、場所によって加えられた力の方向が異なる。

(4) 粘土の初期状態：現実の粘土では、含有磁性鉱物の配向に多少の偏りがあり、外力によって帯磁する以前から若干の磁気モーメントを持っている。同じ遺跡の中で、この磁気モーメントの方向は狭い範囲では揃っているが、広い範囲になると分散しているだろう。このような粘土に力が加えられると、すでに考察したように、磁気モーメントの方向は力と地磁気とによって定まる一定の方向（力と地磁気の両ベクトルを含む面内で、力と垂直になる方向）に向って回転してゆくが、力が弱い場合、磁気モーメントの方向は、予想される方向に揃う前に、分散したまま取り残されてしまう。

このように版築に見られるような理想的な状況を除くと、帯磁前の粘土の状態や、応力の作用の仕方によって、応力残留磁気の方法はさまざまな分布をする。

8. お わ り に

「寺院の基壇の版築のように、鉛直方向の強い衝撃力を受けた粘土は、残留磁気と地磁気の偏角を直接比較することによって、年代を推定できる」という筆者の見解を支持する実例は、現在のところ、神門寺境内廃寺の一例のみである。それゆえ、この見解を実用に耐える新しい年代測定法の基礎とするには、年代既知の寺院の基壇もしくは他の適当な遺跡のいくつかについて残留磁気の測定を行ない、見解の真実性を確認しなければならない。年代既知の寺院等の調査が困難であれば、その代りに、奈良時代の寺院等を調査する実用的な方法がある。図13の地磁気永年変化曲線から分るように、奈良時代の地磁気の偏角はほぼ一定であり、その値は約10度Wである。したがって、正確な年代が分からなくても、奈良時代の寺院であれば、基壇の残留磁気の偏角もまた約10度Wでなければならない。

遺跡の考古地磁気調査から、粘土の応力残留磁気について有用な知識を得たが、それらはいずれも定性的な理解に留まっている。この研究から、さらに、年代測定に役立つ成果を引き出すためには、条件をコントロールした実験によって、磁場と力と粘土の相互関係を定量的に理解する必要がある。筆者は、このような実験を通じて、伏角の補正による年代測定の精度の向上、過去の地磁気強度の測定、および過去の応力場の解析を目標としている。

謝 辞

島根大学理学部応用物理学科、河本直子嬢と伏見良夫君の定方位試料採取および残留磁気測定における協力に感謝する。島根県教育委員会、文化課文化財保護主事、埋蔵文化財第二係長、石井 悠氏、同文化財保護主事川原和人氏、西尾克己氏には、貴重な試料の円滑な供給を図っていただいた。また、各遺跡について、次の方々から多くの御教示を受け、遺跡の図面の使用を許して頂いた。ここに記して心から感謝の意を表したい。(岡田薬師古墳)：島根県教育委員会、文化課文化財保護主事、

川原和人氏（明神古墳）：津田小学校教諭，門脇俊彦氏，仁摩町教育委員会，社会教育係主事，金築正彦氏（荒神谷遺跡）：島根県教育文化財団主事，足立克己氏（神門寺境内廃寺）：出雲市教育委員会 社会教育係主事 河上 稔氏。終りに，筆者の注意を版築に喚起した，島根大学 法文学部歴史学教室 渡邊貞行助教授に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. Hirooka and K. Tokieda (1979) Archeomagnetic results of Sempukuji remains, the cave site, and the Holocene paleosecular variation in Japan. *Rock Magnetism and Paleogeophysics*, Vol. 6: 18—24.
- 1) 世界考古学辞典(1979) 平凡社.
- 3) 劉敦楨(1984) 中国古代建築史 明文書局 中華民国 台北市重慶.
- 4) 岡田薬師古墳発掘調査報告書(1986) 島根県教育委員会.
- 5) 明神古墳発掘調査報告書(1986) 仁摩町教育委員会.
- 6) 荒神谷遺跡銅剣発掘調査概報(1985) 島根県教育委員会.
- 7) 足立克己(1984) 島根県荒神谷遺跡銅剣発掘調査概要 考古学雑誌 第70巻 第2号: 1—8.
- 8) 三宅博士・足立克己(1985) 弥生時代の銅剣埋納遺跡 季刊 考古学 雄山閣 第10号: 91—92.
- 9) 神門寺境内廃寺-第一次発掘調査概報-(1983) 出雲市教育委員会.
- 10) 神門寺境内廃寺-第二次発掘調査概報-(1984) 出雲市教育委員会.
- 11) 神門寺境内廃寺(1985) 出雲市教育委員会.
- 12) 史跡今市大念寺古墳保存修理工事報告書(1984) 出雲市教育委員会.
- 13) 川原和人(1983) 史跡今市大念寺古墳発掘調査概要 考古学ジャーナル 226: 19—21.
- 14) Y. Aoki (1972) A post depositional magnetization mechanism of sediments and its application to geophysical problems. Thesis. Dr., Geophysical Institute, Univ. of Tokyo.
- 15) R. A. Fisher (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc. London*, A217: 295—305.
- 16) 中島正志・夏原信義(1981) 考古地磁気年代推定法 ニューサイエンス社.
- 17) 広岡公夫(1977) 考古地磁気および第四紀古地磁気研究の最近の動向 第四紀研究 15巻: 200—203.
- 18) 須藤俊男(1974) 粘土鉱物学 岩波書店.
- 19) Y. Otofujii and S. Sasajima (1981) A magnetization process of sediments: laboratory experiments on post-depositional remanent magnetization. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 66: 241—260.
- 20) 最上武雄(1969) 土質力学 技報堂.

Stress-induced remanent magnetization revealed in non-baked clay at archeological sites and its application to archeomagnetic dating.

Katsuyasu TOKIEDA

Department of Physics, Faculty of Science, Shimane University
Nishikawazu-cho 1060, Matsue 690

Application of mechanical stress to wet clay in a magnetic field induces remanent magnetization in it. This type of remanence is called stress-induced remanence here. In order to study the stress-induced remanence, we collected 254 oriented samples from non-baked clay which composes four remains in Shimane prefecture. The clay structures treated are (1) The mound of Okadayakushi *kofun* (tumulus grave), (2) The mound of Myoujin *kofun*, (3) The clayey soil which covers the buried ancient bronze swords at Koujindani ruin, and (4) *Kidan* (foundation made of layered clay) of Kandoji temple ruin. Directions and intensities of their natural remanent magnetization were measured by an astatic magnetometer. The results are summarized as follows.

Direction

- (1) The mean direction of the stress-induced remanence deflects from the ambient earth's magnetic field direction. The deflection angle increases by impact force but decreases by static force.
- (2) The mean direction of the stress-induced remanence are slightly different between the clay and the clay containing a small amount of sand. Dispersion of the remanence directions is less in the former.
- (3) Application of strung stress converges the remanence directions.
- (4) Shearing stress disperses the remanence directions but pressure converges them.

Intensity

- (5) The intensities of the stress-induced remanence measured range from 10^{-6} to 10^{-4} emu/gr. These values are comparable to those of the thermoremanent magnetization of baked earth.
- (6) The maximum frequency value of the observed remanence intensities become greater with increasing stress strength within a remain.
- (7) Convergence of the directions of the remanence accompanies increase of its maximum frequency value of the intensity within a remain.

The results from *Kidan* of Kandoji temple ruin are significant to the archaeomagnetic dating, because they show that the remanence directions are sharply converged and that declination angles are equal between the remanence and the ambient earth's magnetic field, although the inclination of the remanence is shallower by 25 degree. The same results are estimated using a well-grounded model for the stress-induced magnetization mechanism of the clay. Therefore, it is concluded that the ancient clay structure which was consolidated by the perpendicularly applied force, can be archaeomagnetically dated by comparing the declination of its remanence with that of the past earth's magnetic field.

the first of these is the fact that the
the second is the fact that the
the third is the fact that the
the fourth is the fact that the
the fifth is the fact that the
the sixth is the fact that the
the seventh is the fact that the
the eighth is the fact that the
the ninth is the fact that the
the tenth is the fact that the