

京都府蟹満寺旧境内の平安時代の火災を瓦の磁化から検証する研究

酒井 英男¹⁾・松矢 啓佑²⁾・三船 温尚³⁾・中島 正⁴⁾

●キーワード：火事 (fire), 屋根瓦 (roof tile), 残留磁化 (remanent magnetization), 熱履歴 (heating history)

1. はじめに

蟹満寺は、京都府木津川市山城町に所在し、創建は白鳳期（飛鳥時代後期）に遡る（図1）。現在は真言宗智山派の寺院であり、蟹供養放生会を催す寺院としても有名である。本尊の銅像釈迦如来坐像は、国宝に指定されている（三船・奥：2011）。

平成20年度の木津川市の発掘調査により、蟹満寺旧金堂の基壇南辺中央部において、火事で落下したと思われる屋根瓦の堆積領域が見つかった。本研究では、この瓦と周囲の土壌の磁化を研究し、瓦屋根の焼失時の崩壊過程と年代の検討を行った。考古学の調査では、蟹満寺の火事の時期は、軒瓦型式と瓦屋根の修理痕跡から9世紀中頃と推定されている（木津川市教育委員会：2008）。

2. 古地磁気変動と研究試料

土壌や瓦は強磁性鉱物を有しており、地磁気（方向・強度）の記録となる残留磁化を獲得できる。瓦は、窯での焼成時に熱残留磁化を獲得しているが、屋根で使用されて火事を受けると、元の磁化のうちの加熱された温度までの成分が失われて、新たに獲得された熱残留磁化と置き換わる。それ故、磁化の分析により火事の痕跡を検討できると考えた。本研究では、蟹満寺の火事の崩落時に屋根からの落下が示唆されていた瓦と周囲の土壌の磁化を研究し、火事の検証と古地磁気変動を用いる年代推定を行った。

図2は、日本の過去2千年間の地磁気（方向・強度）の変動を示している（Hirooka：1971, Sakai and Hirooka：1986, など）。年代の研究は、測定した試料



図1 蟹満寺の場所と発掘で現れた屋根瓦

Fig. 1 Site of Kanimanji and the excavated roof tiles

¹⁾ 富山大学大学院 理工学研究部 〒930-8555 富山県富山市五福 3190

²⁾ 富山大学 理学部 〒930-8555 富山県富山市五福 3190

³⁾ 富山大学 芸術文化学部 〒930-8588 富山県高岡市二上町 180

⁴⁾ 木津川市教育委員会 文化財保護課 〒619-0286 京都府木津川市木津南垣外

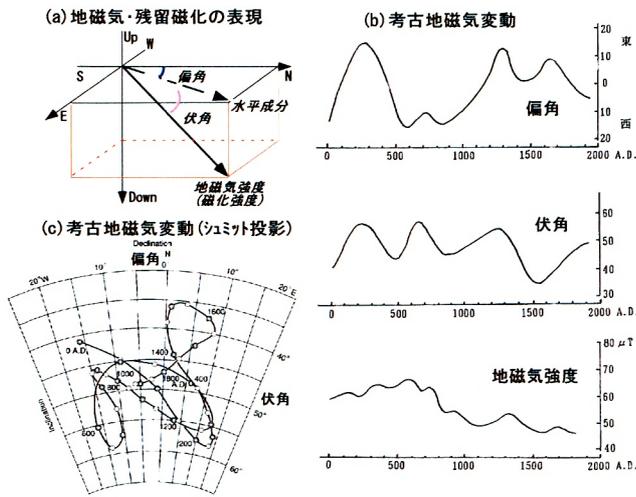


図2 (a)偏角・伏角と地磁気強度(磁化強度)。
 (b)地磁気の過去2000年間における変動。偏角と伏角の図は、Hirooka (1971) の Fig.13, 14 を引用して加筆した。また地磁気強度の図は Sakai and Hirooka (1986) の Fig.7 を元に加筆・作成した。
 (c)地磁気方向の変動の拡大シュミットネット上での表示。広岡 (1977) の図を引用し加筆した。

Fig. 2 (a) Description of the direction of the geomagnetic field and remanent magnetization.
 (b) Variation of the geomagnetic field during the past 2000 years. Figures showing the declination and inclination data are corrected from Figs.13 and 14 in Hirooka (1971). Figure showing the intensity is corrected from Fig.7 in Sakai and Hirooka (1986).
 (c) Variation of the direction of geomagnetic field during the past 2000 years represented on the Schmidt net. The figure is corrected from the figure in Hirooka (1977).

の磁化データをこれらの地磁気変動と対比して行った。

2.1. 研究試料

図3に示す発掘調査で現れた堆積層から、瓦片と堆積土を採取した。

(1)瓦試料

発掘現場から瓦片を、方位を記して採取した。全部で5つの瓦片を採取したが、それらは土壤中で並んではおらず、それぞれ離れて埋まっていた。研究室では、これらの瓦片について、現地での方位を保存して石膏で固め、ダイヤモンドドリルを用いて円柱状にくり抜いた。そして、直径1インチで長さ約2cmの実験用の円柱試料を作成した。円柱試料は、1個しか取れなかった瓦片以外では、それぞれの瓦片から2個を用意した。

(2)土壌試料

瓦片周囲の土壌を、容量10ccの立方体形状のプラスチック製キューブケース(以下ケースと称す)を用いて採取した。まず、ケースに収まる大きさに土壌をブロック状に整形し、次に、ブロックと周辺に薄い石膏をかけて固定した。その後、ケースに濃い石膏を入れてブロックに被せ、固まった後でケース上面に水平面との交線を記し、方位と傾斜角を読みとった。そして、土壌が入ったケースを面から外して試料とした。

試料採取にはクリノメータを用いており、磁化の解析

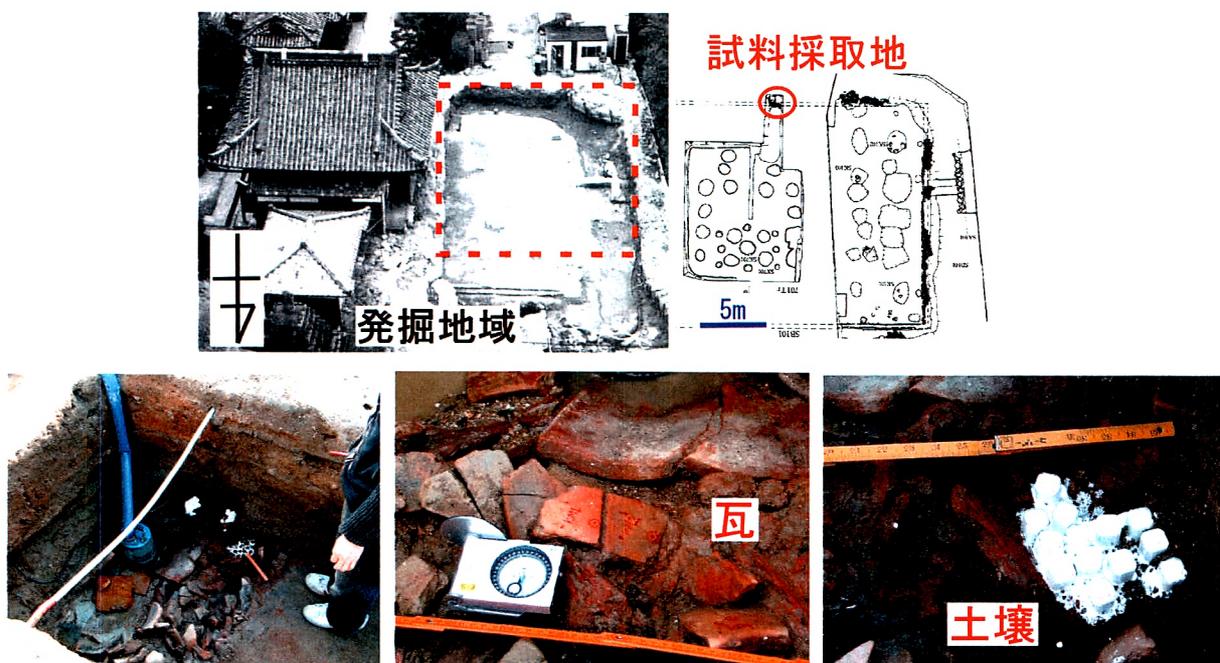


図3 試料を採取した遺構と瓦片・土壌の採取状況。

Fig. 3 Sampling area where the roof tiles and soil were collected.

では現在の磁北と真北のずれである偏角の補正が必要となる。この補正には、国土地理院による計算式から得た調査地での西偏7度05分の偏角を用いた。

3. 磁化と地磁気年代

3.1. 交流消磁

焼土や瓦には、地磁気の記録となった熱残留磁化だけでなく、その後に二次磁化が付着している場合があり、これを除く必要がある。本研究では、交流磁場を用いて二次磁化を除く交流消磁を行った。磁場強度を徐々に強くして消磁の状況を検討しながら進めるので、段階交流消磁と称されている。実験では、最初に消磁前の自然残留磁化（NRM：natural remanent magnetization）を測定し、交流消磁は、2.5-60mT（milli-tesla）の間の9段階の磁場を用いて行った。消磁結果はザイダーベルト図（Zijderveld：1967，酒井他：2013等）で解析した。磁化の測定と交流消磁には、富山大学磁気シールド室の超伝導磁力計（2G社760R）と付属の消磁装置を使用した。

図4は、瓦片と土壌試料から得られた、代表的な交流消磁の結果を示している。両図において、磁化の変化はほぼ直線上にあり、これは磁化が安定であることを示している。図の様な直線的な関係を示す結果が得られず、不安定な磁化の試料や冷却中に動いた可能性がある試料もあった。

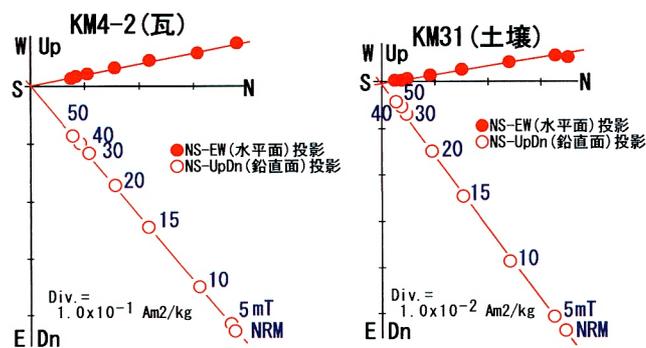


図4 段階交流消磁の結果（ザイダーベルト図）。
Fig. 4 Results of AF demagnetization represented in Zijderveld diagrams.

3.2. 瓦と土壌の磁化方向と蟹満寺の火事

交流消磁を行った瓦と土壌の、それぞれの試料の結果から、信頼度の高い磁化が得られた試料のデータを選び、その平均をフィッシャー統計（Fisher：1953）により

計算した。表1に結果をまとめている。表中の $\alpha95$ は、磁化方向の集中度を示す指標であるが、瓦と土壌試料の値は共に 3° 以内と小さく、良くまとまっていた。また、瓦と土壌の磁化は、ほぼ同じ方向を示していた。

本来、瓦が焼成時に獲得していた磁化は、瓦が屋根に葺かれた際に、地磁気と無関係な方向を向いてばらばらになっている。そして、屋根の崩壊により瓦が落下した後も、その磁化が残っておれば、土壌中の瓦の磁化は、ばらばらな方向を示す筈である。つまり、表1で示された様に、土中から採取された瓦の磁化方向が揃っていたことは、地磁気の方に新たな磁化を獲得したことを示している。また、瓦片の周囲の土壌は、単位質量あたりの磁化の強度が $10^{-2} \text{ Am}^2/\text{kg}$ の値を示したが、これは、通常の堆積土壌の磁化強度よりも非常に強い値であった。この結果は、土壌は、加熱されて元の堆積残留磁化を失い、新たに熱残留磁化を獲得している為と考えられた。

表1 磁化測定の結果

Table 1 Remanent magnetization of the roof tiles and soils

試料	試料数	偏角 ($^\circ$)	伏角 ($^\circ$)	磁化強度 (Am^2/kg)	$\alpha 95$ ($^\circ$)	k	帯磁率 (SI)
瓦	5	-13.5	46.6	5.68×10^{-1}	2.4	1013	299
土壌	8	-14.6	47.8	4.82×10^{-2}	2.2	642	79

以上の磁化の研究から、土中にあった瓦群は高温でその場所に到達しており、そして周囲の土壌を加熱したことが示された。つまり、旧境内において蟹満寺の火事により屋根瓦は崩れて高温で地表に落下したことが検証できた。

図5には、表1の瓦と焼土の磁化方向を地磁気変動と対比した。蟹満寺が白鳳期の創建であることから、

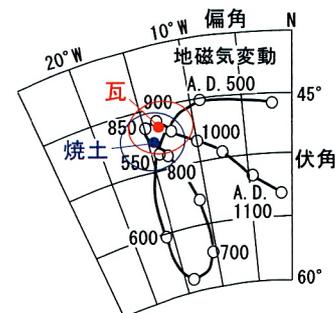


図5 焼土・瓦の磁化と地磁気方向の変動との比較。地磁気変動については、広岡（1977）の図を引用し加筆した。
Fig. 5 Comparison of the magnetization of the roof tiles and soils with the secular variation of the direction of the geomagnetic field. Secular variation of the geomagnetic field is corrected from the figure in Hirooka (1977).

A.D.450-1150年の地磁気変動を抜粋して比べているが、磁化方向は、A.D.550年頃もしくは800-950年頃の地磁気方向に近いので、火事の年代としてこれらの二つの年代の可能性が推測された。

4. 瓦の熱履歴と古地磁気強度

4.1. 熱消磁と火事での被熱温度

次に、瓦が火事の際に加熱された温度を、実験室で試料を無磁場中で加熱冷却する熱消磁の研究により検討した。研究試料は、2.1節で説明した様に、5つの瓦片から得た円柱試料において、3章で磁化方向の研究に用いた残りの試料を使用した。なお番号KM3の瓦片については、円柱試料は1個しか取れなかった為、この実験は行わなかった。

実験での加熱温度は100-600℃の範囲で8-10段階を取り、徐々に高温に上げて実験を行った。図6の左に、熱消磁の結果例をサイダーベルト図に示している。磁化方向は570℃までの温度でほぼ同じ方向にある。これは、この瓦試料が570℃（磁性を失うキュリー点）以上の温度で屋根から落下し、地磁気の下で一方向の熱残留磁化を獲得したことを示しており、屋根の火事の際の高温加熱の証拠となっている。他の瓦試料には、400℃付近より低温部の磁化のみが地磁気方向を向き、途中で転がったと考えられる試料もあった。

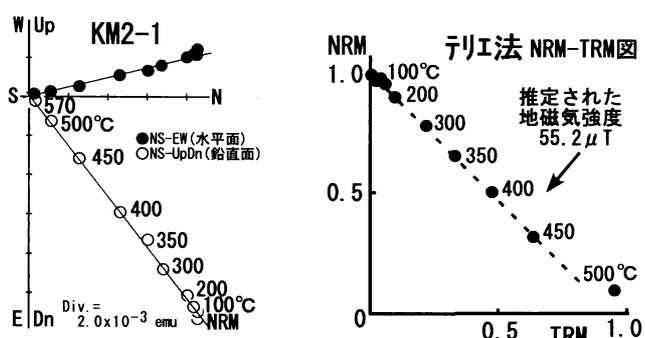


図6 瓦試料KM2-1の熱消磁の結果のサイダーベルト図(左)とテリエ法実験の結果(右)。
Fig. 6 Result of thermal demagnetization for roof tile sample KM2-2 (left), and the result of Thellier's method (right).

4.2. テリエ法実験と古地磁気強度

瓦試料にテリエ法実験を適用して、瓦が火事で再加熱された当時の地磁気の強度を研究した。テリエ法は、熱消磁と熱残留磁化 (TRM: thermo remanent

magnetization) の獲得を繰り返す研究法であり、Thellier and Thellier (1959) や Sakai and Hirooka (1986) などに方法の詳細が示されている。テリエ法の実験結果は、図6の右図に示すNRM-TRM図で解析した。この図では、縦軸に、ある加熱温度で消磁されたNRM(自然残留磁化)の磁化強度を、横軸には同温度で人工磁場(本研究では50μTを使用)のもとで獲得したTRMの磁化強度を、それぞれNRM(初期値)で割ってプロットしている。そして図のデータを直線で近似し、直線の傾きと人工磁場の強度を積算すると、試料が熱残留磁化を獲得した時代の地磁気強度が求まる。

図6の試料では、NRM-TRM図における磁化データの近似直線の傾きから、55.2μTの古地磁気強度が得られた。同様にして4個の瓦片試料から求められた実験結果を、表2にまとめている。得られた古地磁気強度の平均値は、54.9±2.6μTと得られた。図7には、この値を過去2000年間の日本の地磁気強度変動(Sakai and Hirooka: 1986)と対比している。図より、瓦試料が火事で熱残留磁化を獲得した年代として、A.D.850~900年頃が推察される。

表2 瓦試料のテリエ法実験の結果
Table 2 Paleointensity data obtained from the roof tiles

試料	データ温度範囲 (°C)	地磁気強度 (μT)	誤差 (μT)
KM1	100-400	59.6	6.2
KM2	100-450	55.2	5.4
KM4	100-400	51.2	6.9
KM5	100-450	53.4	4.9
地磁気強度の平均		54.9 ± 2.6 μT	

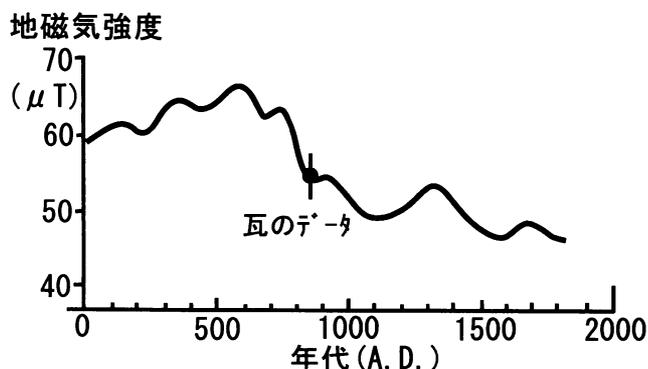


図7 本研究のテリエ法実験で得た地磁気強度の平均と過去の地磁気強度変動(Sakai and Hirooka: 1985)との対比。
Fig. 7 Comparison of the paleointensity obtained in this study with the variation of paleointensity (Sakai and Hirooka: 1985) during the past 2000 years.

第3章の瓦や焼土の磁化方向と地磁気方向との対比では、火事の年代として A.D.550 年頃と 800-950 年頃を候補としたが、古地磁気強度の研究も併せると、蟹満寺が火事になり屋根瓦が地上に落ちた時代は 9 世紀中頃から 10 世紀初めの可能性が高い。

4.3. 瓦の熱履歴と落下状況

本研究では、蟹満寺で起きた火事を屋根瓦の磁化から検証した。図8には、研究結果から考えられる、瓦の磁化の獲得過程を示している。

- (1)瓦は、窯の中での焼成時に地磁気方向に熱残留磁化を獲得した。
- (2)その後、屋根に使用されて、瓦の磁化は地磁気とは無関係のばらばらな方向を向いていた。
- (3)火事で屋根が高温 (>570 °C) になり、瓦は焼成時の磁化を失った。そして、屋根が崩れて瓦は落下し、瓦には、地上での冷却時に地磁気方向の新たな熱残留磁化が獲得された。瓦によっては、十分な高温にならずに落下した為に元の磁化が残り、落下後の磁化との合ベクトルになったものもあった。

本研究で実験した瓦片の多くは高温までの一成分の磁化を獲得しており、火事の際、570 °C 以上の温度まで加熱されて落下したと判明した。火事の熱は相当激しかったと推測される。

たと推測される。

5. まとめ

京都府木津川市の蟹満寺において、平成 20 年度に旧境内で行われた発掘調査から見つかった瓦片と、その周囲の土壌を採取し、残留磁化の研究を行った。瓦は、当時の蟹満寺の屋根に使用されていたと考えられていた。

複数の瓦片の残留磁化の方向は地磁気方向にまとまり、磁化は地磁気の下で獲得されていた。周囲土壌の磁化も瓦と同じ方向を示し、更に磁化強度は一般的な土壌よりも強かった。以上の結果は、瓦は屋根から高温で落下しており、その際に周囲の土壌を加熱したことを示している。

瓦と土壌の磁化から復元した地磁気の方角と強度を、過去の地磁気の変化と対比した結果、火事の年代として、9 世紀中頃から 10 世紀初めの年代が推測された。この年代は、瓦屋根の修理痕跡から類推される“旧金堂は 9 世紀中頃に焼失した”との見解（木津川市教育委員会：2008）と調和する。蟹満寺の旧境内の発掘地点で実施した瓦と土壌の磁化研究により、蟹満寺が被った平安時代中期における火災が証明された。

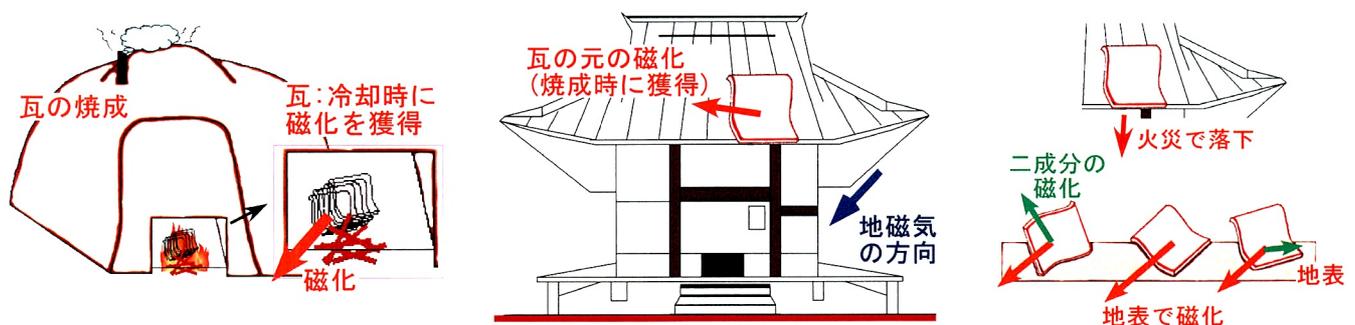


図8 瓦の磁化獲得の過程。

Fig. 8 Schematic illustrations showing the estimated process by which the roof tiles of this study acquired remanent magnetization.

引用文献

- 木津川市教育委員会 2008 「蟹満寺旧境内第7次調査概報」『木津川市埋蔵文化財調査報告書第2集』19p
- 酒井英男・菅頭明日香・小黒智久 2013 「竪穴住居上屋土壌の火災による落下状況を残留磁化から探る研究」情報考古学 19 pp. 28-35
- 広岡公夫 1977 「考古学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 pp.200-203
- 三船温尚・奥健夫 2011 『国宝蟹満寺釈迦如来座像』 八木書店 236p
- Fisher, R. A. 1953 “Dispersion on a sphere” Proc. Roy. Soc. London A217 pp.295-305

- Hirooka, K. 1971 "Archaeomagnetic study for the past 2000 years in southwest Japan" Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ. Ser. Geol. and Mineral. 38 pp.167-207
- Kirschvink, J. L. 1980 "The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data" Geophys. J. R. Astr. Soc. 62 pp.699-718
- Sakai, H. and Hirooka, K. 1986 "Archaeointensity determinations from western Japan" J. Geomag. Geoelectr. 38 pp.1323-1329
- Thellier, E. and Thellier, O. 1959 "Sur l'intensite du champ magnetique terrestre dans le passe historique et geologique" Ann. Geophys. 15 pp.285-376
- Zijderveld, J. D. A. 1967 "A. C. demagnetization of rocks : Aanalysis of results" In: Collinson, D. W., Creer, K. M. and Runcorn, S. K. (eds.) "Methods in Paleomagnetism" New York Elsevier pp.254-286

(2014年8月18日受付, 2015年6月20日受理)

Evidence of the Fire at Kanimanji Temple in the Heian Period from a Magnetization Study of Roof Tiles and Surrounding Soils

Hideo SAKAI¹⁾, Keisuke MATSUYA²⁾, Haruhisa MIFUNE³⁾ and Tadashi NAKAJIMA⁴⁾

¹⁾ Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama, Toyama 930-8555, Japan

²⁾ Faculty of Science, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama, Toyama 930-8555, Japan

³⁾ Faculty of Art and Design, University of Toyama, 180 Futagami, Takaoka, Toyama 930-8588, Japan

⁴⁾ Board of Education, Kizugawa City, Minami-Gaito, Kizu, Kizugawa, Kyoto 619-0286, Japan

We conducted a magnetic study of Heian-period roof tiles discovered in the soil layer at Kanimanji Temple in Kyoto Prefecture, Japan. The roof tiles collapsed to the ground during a fire at the temple. The roof tiles have stable remanent magnetization with a direction that is acquired at temperatures above 570 °C. Soil samples collected from the area around the roof tiles were also studied. The direction of the concentrated remanent magnetization of the soil samples was similar to that of the roof tiles. These results confirm that the roof tiles were heated in a fire and collapsed to the ground. The roof tiles heated the surrounding soil, and as they cooled, they acquired thermoremanent magnetization under the geomagnetic field. We compared the magnetization of the roof tiles and soil samples to the variation in the geomagnetic field over the past 2000 years. The comparison indicated that the fire occurred after the middle of the 9th century, which is consistent with the archaeologically estimated date of the fire at Kanimanji Temple. We conclude that the magnetic study has verified that the fire occurred at Kanimanji Temple during the Heian period.