

磁気物性による遺跡出土の黒曜石・遺物の産地および使用状況の研究

The source and usage of obsidians and archaeological artifacts  
through the investigation of the magnetic properties

2015年3月

富山大学大学院理工学教育部

菅頭 明日香



博士論文

菅頭 明日香

## 目次

要旨	・・・ i
<b>第 1 章 序論</b>	<b>・・・ 1</b>
1.1. はじめに	
1.2. 黒曜石の自然科学研究	
1.3. 考古学地磁気の研究	
<b>第 2 章 磁化研究の方法</b>	<b>・・・ 8</b>
2.1. 残留磁化と段階交流消磁	
2.2. 帯磁率	
2.3. IRM 獲得消磁実験と s-ratio	
2.4. 熱消磁実験およびテリエ法実験	
2.5. 磁気ヒステリシス特性	
<b>第 3 章 黒曜石の磁化研究－北海道の原産地黒曜石と黒曜石製遺物の研究</b>	<b>・・・ 12</b>
3.1. 研究の概要	
3.2. 研究試料	
3.2.1. 北海道の黒曜石原産地	
3.2.2. 黒曜石の研究資料	
3.3. 磁化研究の結果	
3.3.1. 残留磁化と帯磁率	
3.3.2. その他の磁気物性	
3.4. 遺跡出土黒曜石への応用-原産地推定	
3.4.1. 上ノ国町遺跡出土の黒曜石	
3.4.2. 蛍光 X 線分析による研究	
3.4.3. 磁気物性の研究結果	



### 3.5. 黒曜石の熱消磁とテリエ法実験

#### 3.5.1. 原産地黒曜石

#### 3.5.2. チャシコツ岬下 B 遺跡出土の発泡黒曜石

### 3.6. まとめ

## 第4章 信州の原産地黒曜石と黒曜石製遺物の研究

・・・27

### 4.1. 研究の概要

### 4.2. 研究試料

### 4.3. 磁化研究の結果

#### 4.3.1. 残留磁化と帯磁率

#### 4.3.2. IRM 獲得と SIRM 消磁

#### 4.3.3. 熱消磁実験, REM 値, 磁気ヒステリシス

### 4.4. 富山県内遺跡出土黒曜石との比較

#### 4.4.1. 魚津産黒曜石

#### 4.4.2. 魚津市内遺跡出土黒曜石の原産地推定

#### 4.4.3. 長野県内遺跡出土黒曜石の原産地推定

#### 4.4.4. 富山県内各遺跡出土黒曜石の原産地推定

### 4.5. まとめ

## 第5章 磁化による遺物・遺構の使用状況の研究

・・・44

### 5.1. 山東省臨淄齊国故城出土の漢代鏡範の研究

#### 5.1.1. 研究の概要と研究試料

#### 5.1.2. 磁化研究の結果

##### 5.1.2.1. 非破壊の帯磁率測定

##### 5.1.2.2. 磁化方向と熱消磁の結果による使用状況の検討

##### 5.1.2.3. 鏡範の使用年代の推定

#### 5.1.3. まとめ

5.2. 焼失竪穴住居の焼土の研究

5.2.1. 富山市打出遺跡

5.2.2. 高岡市下老子笹川遺跡

5.3. 沖縄県久米島における考古遺物の熱履歴

5.3.1. 久米島具志川城跡の石積みの研究

5.3.2. 宇江城城跡から出土した陶磁器片の研究

**第6章 総括**

• • • 72

謝辞

引用文献

## **Abstract**

The physical and chemical properties of archaeological remains include important information on characteristics such as age, place of production, and heating state, however, some information was not adequately cleared through archeological and scientific study methods. In this study, the magnetic properties are utilized to extract important information from archaeological remains. The obsidian and the reheated remains in archaeological ruins are studied. The following results are obtained.

### **1. Magnetic study of obsidian artifacts**

Obsidian articles excavated in many archaeological remains in Japan are important to examine the transfer and distribution of prehistoric materials and related people. Therefore, information on source is necessary in the study of obsidian articles, and generally, X-ray fluorescence (XRF) analysis is widely used. XRF analysis has several problems such as difficulty in the comparison of data among different laboratories, and an alternative, independent method for investigating obsidian resources is desired. In this study, we analyzed the magnetic properties of obsidian resources. The method of studying magnetic properties is improved and applied to obsidian articles from sources in Hokkaido and Shinshu, and the results indicate the efficacy of the magnetic method in determining the resources of obsidians.

Obsidians from each source in Hokkaido showed clear features in their magnetic properties, especially the susceptibility and remanent magnetization intensity. For obsidian articles from Shinshu, a detailed classification of sources is conducted, and the source groups which XRF analysis could not be classified were successfully divided into each eruption point.

The magnetic study was also successfully applied to distinguish each resource of the obsidian artifacts from the remains in Hokkaido and Toyama prefectures. Based on the results, the efficacy of the magnetic method for determining the resources of obsidians is verified.

Obsidians contain ferromagnetic particles less than 1% in weight, which result in magnetic properties. The magnetic domain structure of these particles was observed to be a pseudo-single-domain structure, indicating that the obsidians are suitable in the paleomagnetic study. Then, the magnetic dating of the obsidians, which is valuable to determine the source is possible by using the stable remanent

magnetization.

The obsidian artifacts were used as a cutting tool, and several of them are considered to have been treated with heat as an additional process. A magnetic experiment involving heating was conducted to prove the heat treatment in the obsidian articles.

The remanent magnetization and susceptibility acquired in the small magnetic particles in the obsidians were not formerly studied. This study revealed that their magnetic properties can be examined in highly accurate experiments with magnetic study, which is a new and useful method for various applications in the study of obsidians and obsidian articles. It is thought that the magnetic study of obsidians will expand to many research areas, including the study of the mechanism of magnetization acquisition.

## **2. Study of the usage of artifacts and remains through magnetic properties**

### **(a) Study of mirror-molds of the Han dynasty**

The production and development of ancient bronze mirrors in East Asia linked to bronze mirrors of China deeply, and the communication of manufacturing processes played an important role in cultural exchange in East Asia. In particular, mirrors of the Han dynasty, which were distributed widely as daily articles, were vigorously studied with regard to their age, form, technology, etc., by archaeological and physicochemical researchers. The mirror-molds are important objects in the study of the fabrication of bronze mirrors; however, they are rare and there has been little research on mirror-molds thus far.

We conducted a magnetic study on the mirror-molds excavated from Linzi, the capital of the state of Qi, located in Shandong province. From the results of study, the usage of mirror-molds for casting bronze mirrors was reconstructed. Further, the process of pouring molten metal, which heated the molds to high temperatures, was also restored.

Theillier's experimental method, a paleomagnetic technique, was applied to the samples, and the estimated past geomagnetic intensity (approximately 30  $\mu\text{T}$ ) indicates that the mirror-molds were used in the age of the former Han dynasty, which is consistent with the period estimated from an archaeological viewpoint.

These results are valuable scientific data of the mirror-molds that were formerly unknown, and the importance of magnetic method is emphasized by these data.

### **(b) Magnetic study of fired pit dwellings**

There were a considerable number of fired pit dwellings in the Jomon and Yayoi periods, which were suggested to have been destroyed by artificial fire. The use and formation process of the fire is important for research on ancient housing. We studied the magnetic properties of baked clay at fired pit dwellings of two ruins in the Toyama prefecture. The baked clay was inferred to have been used for constructing the roof, which burned and fell to the floor because of fire.

The remanent magnetization of the baked clay is stable with one component in the direction of the geomagnetic field. The thermal demagnetization property shows that the baked clay was heated to temperatures above 600°C. These results indicate that the clay heated by the fire was cooled and buried without disturbance.

The collapse of the fired pit dwelling was examined by using the magnetic data of baked clay. We conclude that the baked clay used to construct the roof of the pit dwellings was heated to temperatures above 600°C on the floor after falling and then cooled there without significant disturbance.

These results are important in the research of fired pit dwellings in archaeology and historic architectonics.

### **(c) Thermal history of ceramic artifacts**

The castle sites in Gushikawa and Uejyo are located in the Kumejima island in Okinawa prefecture; the ancient structural remains date back to the Gusuku age (the Middle Ages). These castles were considered to have been destroyed by fire during war in the beginning of the 16th century; however, there is no conclusive evidence for this theory.

We studied the magnetization of small limestone pieces collected from different blocks of wall (Gushikawa site) and ceramics with a trace of reheating (Uejyo site). The results show that these samples in the ruins had been heated to 300°C, suggesting that they had been subjected to a fire. We compared the magnetic direction of the limestone from wall (Gushikawa site) and the paleogeomagnetic intensity obtained in the experiment with past variations of the geomagnetic field, and we estimate that the fire occurred between 1500 and 1550 AD, which is concordant with the age of the destruction of the castle as written in ancient documents. Similarly, the magnetic study indicated that the ceramics of

Uejo were remagnetized after production by heating in the early 16th century

The estimated age of the heating events of the samples are concordant with the age of the destruction of the castle as written in ancient documents. This is an important result for the study of medieval history.

Obsidians, artifacts and cultural properties in the archaeological ruin include the magnetic particles of small quantity, which exhibit weak remanent magnetization and magnetic property that could be studied by using the high sensitive magnetometer such as superconducting rock magnetometer with the improvement of experimental method. Through the magnetic study, we can elucidate important information for archaeology and physicochemical scientific studies on cultural properties. Information that can be obtained includes age, source and usage, place of production, and thermal history.

The magnetic study is expected to be developed further for application in various subjects of cultural properties and archaeological artifacts.

## 第1章 序論

### 1.1. はじめに

遺跡・遺構では様々な考古遺物が出土する。それらの遺物の基になった土壌や岩石には、一般に、永久磁石になる性質（残留磁化を獲得する特性）を有する強磁性鉱物が、重量で数%含まれている。

それ故、考古遺物は残留磁化を獲得する。そして、土器や焼土などの被熱した資料、あるいは遺構の各種の覆土等の堆積物は、その当時の地磁気（方向と強さ）を記憶した磁化を獲得している。残留磁化は数千年後も遺物に残る安定な性質を持つので、分析により過去の地磁気を求め復元することが可能となる。このような遺跡や遺物の磁化を用いる研究は考古地磁気（archaeomagnetism）と称されており、国内でも研究が多く行われてきた(広岡, 2006, 酒井, 1998 等)。過去2千年間では西南日本を中心として地磁気変化が詳細に研究され(Hirooka, 1971 等)、それを利用する考古地磁気年代の研究は、誤差数10年の精度で実用化されている。

考古遺物の磁化は、ベクトルとして当時の地磁気の記録となっており、地磁気の復元以外でも、様々な方面で有用な物性となる。

従来の考古地磁気の研究では、焼土の研究に比べると土器・陶磁器等を用いた研究は少なく、更に他の遺物となるとほとんど無い。その理由として、磁化測定の分解能や測定試料の大きさの問題と共に、扱える遺物試料が加工できないこと、焼土以外の遺物は製品としての遠隔地への輸送も含め、移動していることが多いこと、焼成や堆積時の水平面が判別できない場合が多く、基本的に利用できるのは磁化強度(地磁気強度の復元)だけという制約が挙げられる。また遺物によっては、非破壊での研究が求められ、対応が困難な場合も少なくない。

遺物の磁化(ベクトル)は、年代だけでなく被熱時の情報も含んでいる。それは加熱温度と熱を受けた時の試料の状況であり、製品としての遺物の生産や製作技術にも関わる情報となる。さらに、残留磁化以外の磁気物性として、帯磁率や磁気ヒステリシスなどは遺物の磁気的特徴の指標となり、生産地の元々の土壌や岩石の情報源として利用できる。帯磁率異方性の測定からは、遺物の中の磁性粒子の配向を調べることができ、製作過程で受けた力や金属製品であれば湯の流し込みの情報ともなっている。

この様に、遺物の磁性について残留磁化と共に帯磁率やその他の磁気物性の特性を調べることで年代推定以外の分野での研究が可能になる。また焼土は出土する遺跡に限られるが、遺物は日本全国のほぼ全ての遺跡から出土するので、地磁気復元に利用できれば、日本各地の詳細なデータの蓄

積にも有効であり，地球科学分野での貢献も期待できる．

本研究では，そうした考古遺物の磁化・磁気物性について，研究方法の有用性を検討して，改良を行いながら実際の対象での研究を実施した．

黒曜石遺物では，原産地黒曜石と各地の黒曜石遺物を研究した．旧石器時代からの古代の物質や人の移動・流通の研究において重要な黒曜石遺物について，主要な原産地の黒曜石および北海道や長野・富山の各地で出土した黒曜石遺物を対象とした．従来行われていない磁気物性の研究から，主として産地推定を目的として，研究を実施した．

銅鏡製作の研究で注目されている鏡範では，銅鏡製作時の状況を復元する研究を行った．また縄文から平安時代にかけて，国内各地で発掘される竪穴住居址では，焼失竪穴住居も研究し，焼失時の状況を，焼土の磁化研究から探った．さらに文献に戦禍の状況が記述されている遺跡から，その痕跡を求めて，史実を実証する研究として，沖縄県久米島内のグスクから出土した陶磁器片や石積み  
みの石から熱履歴を研究した．

以下に，各研究の背景と目的を述べる．

### (1) 黒曜石製遺物の磁化研究

遺跡から出土した黒曜石製遺物の原産地を理化学的な分析で推定することは，黒曜石の流通や先史時代の社会様相を探る上で必要不可欠である．近年では，蛍光 X 線分析が主な研究方法となっており，非破壊で大量の資料を短時間で測定できるため，全国の遺跡出土黒曜石の産地分析の実施例が飛躍的に増加している．原産地推定を取り入れた黒曜石研究では，石器研究や GIS などとの融合的な研究や産地遺跡の調査が精力的に展開されており（建石，2012），より詳細な黒曜石の原産地の分類が求められている．

ただ，従来の蛍光 X 線分析の研究には，(1) 重量濃度比の算出で 100% に揃わないことがあるなど，測定上の誤差が考えられる，(2) 研究グループ毎で機械固有の測定値となっており，統一化がなされていない，(3) 信州産黒曜石の長門グループと和田峠グループが判別されない，諏訪グループ内の細分など，地質上の区分に沿わない原産地がある，(4) 中性子放射化分析や ICP 発光分光分析などで測定結果の確認はされているが，異なる物性によるクロスチェックがなされていないなどの問題が考えられる．

そこで，蛍光 X 線分析と独立な方法として磁気物性による黒曜石の調査を考えた．黒曜石の磁気物性の研究事例は，国内では従来報告されていない．国外では，McDougall et al. (1983) が地中海



や近東の黒曜石について磁気物性を研究し、エーゲ海やイタリア国内の様々な諸島から産出する黒曜石の分類を試みた。また、Vasquez et al. (2001) はアルゼンチンとチリ南部の原産地黒曜石と遺跡出土黒曜石の磁気物性を検討した。ただ、利用された磁化パラメータは多くなく、系統的でない。

研究は、日本における黒曜石研究で重要な原産地である北海道と信州を対象とし、磁気物性による黒曜石研究を実施し、様々な磁化パラメータから有用性を検討した。また北海道と富山県内の遺跡より出土した黒曜石製遺物の磁気物性を調べ、各原産地の特徴と比較した。同時に蛍光 X 線分析による原産地推定も行い、磁気物性による推定結果の検証を行った。

## (2) 磁化による遺物・遺構の使用状況の研究

### ① 山東省臨淄齊国故城から出土した漢代鏡範の研究

中国古代銅鏡の製作と使用は、東アジア地域における古代銅鏡の発生と発展に大きな影響を及ぼしている。特に、中国古代銅鏡の発展の第 1 ピーク期である漢代 (B.C.206 ~ A.D.220) は、年代、形式や伝播の問題と共に製作技術も注目される時代であり、各種の研究が行われている。しかし銅鏡製作工程の解明に重要な土製範の出土例や製作工房跡の発見が少なく、鑄造技術についての研究はあまり進んでいない。

近年、中華人民共和国山東省臨淄齊国故城から漢代の銅鏡製作工房跡、前漢時代 (紀元前 2 世紀後半) の草葉文鏡範を中心とした土製の鏡範が多数出土し、日中の共同研究が実施されて、古代銅鏡製作に関する成果が上がっている (奈良橿原考古学研究所他, 2009)。

本研究では、この齊国故城より出土した鏡範について磁化研究を行い、銅鏡の鑄造に使用された時の状況を検討した。

### ② 焼失竪穴住居の焼土の研究

縄文時代から平安時代の遺跡において、竪穴住居跡が焼失した状態で多く見ついている。その原因は失火ではなく、住居の廃絶後、何らかの理由で意図的に火を放ち、屋根土崩落後は埋め立てることなく放置された可能性が指摘されている (浅川・藤井, 2006)。竪穴住居の焼失模擬実験など、様々な観点での調査が行われているが、未解明の課題が多い (町田・上田, 2000, 高田他, 2003 等)。

本研究では、富山県富山市打出遺跡と高岡市下老子笹川遺跡で見つかった焼失竪穴住居跡において、屋根に葺かれていたと推測される焼土の磁気物性を調査し、火災時の年代推定を行い、焼土の磁化から屋根土の崩落状況を検討した。

### ③沖縄県内遺跡出土遺物の熱履歴の研究

沖縄県久米島は、火成岩の基盤に砂泥質の低地帯と石灰岩が広がっており、琉球王朝時代（1429～1879年）、中国をはじめ、東南アジアや朝鮮、日本本島と中継貿易を行い、寄港地として繁栄していた。久米島に存在する主なグスクの中に、具志川城と宇江城が挙げられる。両グスクとも、16世紀初頭に中山王の尚真（1477～1526年）の中央集権化政策により、王の一軍に討伐されたと考えられている（久米島町教育委員会，2007）。

久米島における従来の研究として、具志川城跡の石積みより採取された石灰岩小片の磁化研究（酒井・米原，2008）に触れる。この研究により、具志川城跡の戦火による被害が実証されている。宇江城でも具志川城跡と同様の戦火により、二次焼成を受けたと考えられる陶磁器が出土しており、その磁化研究を実施し、熱履歴を研究した。また、遺物から地磁気を研究する際に、非破壊での研究が必要となる場合も多い。二次焼成を受けていない陶磁器の底部を用いて非破壊の磁化測定による地磁気研究方法の有用性を検討した。

## 1.2. 黒曜石の自然科学研究

黒曜石は、流紋岩質からデイサイト質のマグマが急冷し生成される。均質で貝殻状断口に割れ、鋭利な石器などの加工に適するため、先史時代では石鏃としてよく利用されている。黒曜石は原産地が限定されており、第三紀中新世以後の珪長質火山岩の地域に産出する。日本では北海道白滝、関東箱根・伊豆、神津島、信州霧ヶ峰地区、九州腰岳などが代表的な産地とされる（図 1-1）。先史時代の遺跡からは、近隣に頁岩やチャートといった石器に利用可能な石材が存在しているにも関わらず、遠隔地からの黒曜石が出土する。そのため、旧石器や縄文時代における黒曜石の流通には、物流交換のネットワークや社会様相が深く関係していると考えられており、遺跡から出土する黒曜石やその産出地は先史時代の社会解明における重要な対象として、多くの考古学的研究がなされている（大工原，2008等）。その中で、理化学分析による遺跡から出土する黒曜石製遺物の原産地推定は重要な役割を占める。

黒曜石の原産地推定法とは、黒曜石の特性を利用して、遺跡から出土した黒曜石製資料の原産地を理化学的に推定する方法である。日本で黒曜石の原産地推定として初めて実施されたのは、晶子形態法である。黒曜石の内部には結晶質の晶子・微晶・斑晶が見られるので、黒曜石片を顕微鏡で観察し、各産地の晶子形態の差異から産地推定を行った（金山，1992）。この手法は、黒曜石の分類に一定の成果を収めたものの有効性には限界があった。

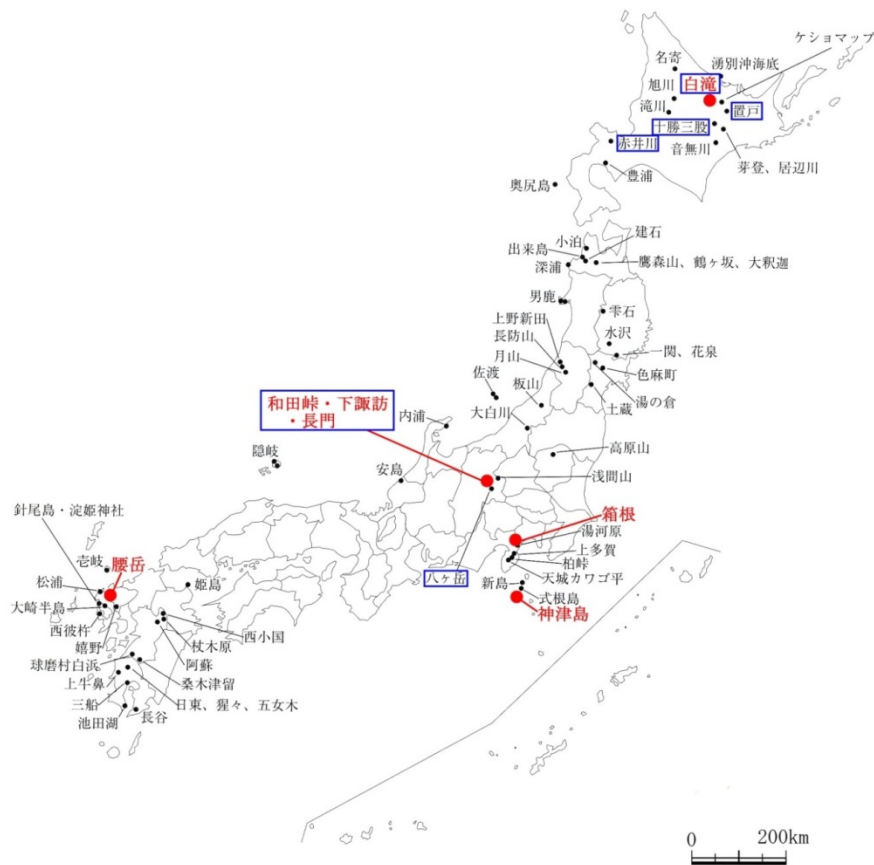


図 1-1. 日本における黒曜石原産地，磯貝（2003）から抜粋，加筆した。●は代表的な黒曜石原産地，□は研究を実施した原産地を示す。

1950年代から欧米で、発光分光分析による化学分析や水和層法の開発等、黒曜石の産地や年代推定の自然科学的分析手法の開発が活発化する（建石，2012）。1960年に入りフィッシュントラック法が開発されたことにより、日本でも黒曜石の原産地推定に理化学的手法が本格的に導入される（Watanabe & Suzuki, 1969）。フィッシュントラック法は、黒曜石に含まれるウラン-238 ( $U^{238}$ ) が自発核分裂を起こし、分裂片を放出する時、ガラスの中で飛跡（トラック）として結晶構造を損傷する。黒曜石が生成された時からウランの核分裂が始まるため、黒曜石中に残存する飛跡を計測する事で、黒曜石の噴出年代を知ることができる（田口・斉藤，2002）。噴出年代は各産地で異なるので、遺跡出土黒曜石の原産地推定が可能となる。Suzuki(1973, 1974) は、日本全国の黒曜石をフィッシュントラック法と黒曜石水和層年代測定法を用いて分析し、黒曜石原産地推定の基礎データを確立すると共に、時間軸と空間軸から黒曜石の分布を論じた。

その後、1976年から行われた文部省科学研究費特定研究の「自然科学の手法による遺跡・古文化

財等の研究」プロジェクトの実施を始まりとして、多くの自然科学研究者により黒曜石の各種の理化学的分析法が推進された。1990年代からは、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置による元素組成分析が取り入れられ、黒曜石試料の非破壊測定が可能となり、遺跡出土黒曜石の測定数が飛躍的に増加した。そして、現在まで一般的な研究方法として利用され、日本各地域の黒曜石について分析が進められている（建石他，2004 等）。

黒曜石の元素組成を用いる測定としては、以下の手法が主に挙げられる。

#### (1) 機器中性子放射化分析 (INAA)

種々の核種に原子炉で熱中性子照射すると、生成された放射性核種毎に固有のエネルギーの  $\gamma$  線を放出し、固有の半減期で壊滅する（野内他，1991）。黒曜石試料と標準試料の放射能比から産地の判別分析に有効な特定元素を定量し、原産地推定を行う。本研究で磁気物性を研究した北海道と信州の原産地黒曜石試料は、INAA により含有する元素の定性・定量が行われている（大沢，1991; 二宮，1993）。

#### (2) 誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP-AES)

高周波誘導結合プラズマ (ICP) を光源として、発光分光分析を行い、主成分元素から ppb レベルの微量元素の濃度が高精度に、短時間で同時に測定できる（田口・齋藤，1995）。試料溶液を高周波誘導プラズマに導入し、高温（数千～1 万 $^{\circ}\text{C}$ ）によって励起された各元素の発光強度を測定する。

#### (3) 蛍光 X 線分析 (XRF)

試料物体の表層に電子線または X 線を照射すると、物体表面に存在する元素が励起され、特性 X 線が放出される。この特性 X 線は各元素に固有のエネルギーをもつため、特性 X 線のエネルギーを測定すれば、元素の種類、含有量が判明する。分析装置には、結晶分光器により蛍光 X 線のエネルギー分析をする波長分散型 (WD-XRF) と半導体検出器によりエネルギー分析をするエネルギー分散型 (ED-XRF) がある。XRF 分析は、上記 2 つの測定法より感度は劣るが、短時間で簡便に、大量の測定ができ、試料の形状を基本的に破壊する必要がないことから、特に ED-XRF 法がよく利用されている。本研究でも、北海道・富山県の遺跡出土黒曜石に ED-XRF 法による産地分析を採用し、磁気物性による原産地推定の結果の妥当性を検討した。

黒曜石製遺物の年代を推定する方法として、黒曜石水和層年代測定法がある。黒曜石製石器は製作後土中に埋没すると、時間の経過と共に水和層が形成されていく。水和層の形成にかかる時間は気候気温や岩石学的性質などの条件が同じならば、水和層の厚さの 2 乗 ( $\mu\text{m}^2$ ) に比例するため、黒曜石表面に形成された水和層の厚さを光学顕微鏡で測定し、水和速度から年代を推定する（勝井・

近堂, 1967). 石器自体から使用年代を求められる唯一の理化学的分析法だが, 水和速度に影響を与える因子が複雑であることなどから, 信頼性や精度が決して高いとは言えない. 現在, 二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いて得た黒曜石水和層の水素イオン濃度プロファイルから水和層厚を求める事で, 水和層年代測定の精度向上を試みる研究がなされている (渡辺他, 2007).

### 1.3. 考古地磁気の研究

考古遺物を構成する土壌や岩石に含まれる鉄の酸化物である強磁性鉱物 (磁鉄鉱, 赤鉄鉱など) は, 遺物が加熱され, 冷却していく過程で残留磁化を獲得し, 地磁気の方角と強さを記録する (図 1-2). この残留磁化は, 熱残留磁化 (TRM: thermo remanent magnetization) と称されている. 熱残留磁化は, 一旦獲得されると数万年経っても殆ど変わらず保持されるので地磁気の記録となり, 過去の地磁気の復元に利用できる. また, 熱残留磁化は加熱を受けた時の温度の情報ももっており, 実験から被熱の検討と温度推定もできる (酒井他, 1991).

以上の磁化特性を利用して, 遺跡の焼土, 陶磁器, 土器やれんが等の遺物を試料として, 過去の地磁気の研究が行われている. 物質がもつ残留磁化から過去の地磁気を研究する分野には, 岩石磁気学や古地磁気学があるが, 考古地磁気学では, 特に遺構や遺物を対象として先史・歴史時代の地磁気変動を研究している (中島・夏原, 1981).

日本では, 1950 年代末に渡辺直経により縄文・弥生時代及び古代以降の遺跡の焼土から地磁気変化の研究が行なわれ (Watanabe, 1959), 考古地磁気の研究が始まった. その後, Kawai et al. (1965) が陶器古窯跡群を中心とした畿内と東海の猿投山西南麓古窯群の磁化研究により, 5 世紀以降の地磁気変動を明らかにした. そして, Hirooka (1971) により, 東海・北陸から九州北部における多数の窯跡で焼土や遺物の磁化の研究が行われ, 西南日本を中心とした過去 2000 年間の詳細な考古地磁気永年変化 (archaeomagnetic secular variation) が示された. 図 1-3 (a) に示すように, 地磁気は一定でなく, 偏角では西偏 20°~東偏 15°, 伏角では 35°~60°の範囲を複雑に変化している. 考古地磁気学で得られた地磁気変動を利用し, 年代不明の遺構から採集した焼土・遺物の磁化を求めて対比することにより, 条件が良ければ 10~30 年の誤差での年代推定が可能になっている.

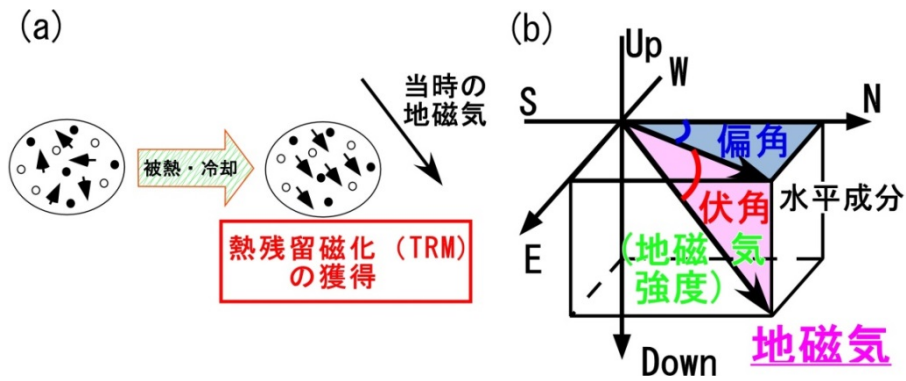


図 1-2. (a) : 熱残留磁化の概念図, (b) : 地磁気の偏角, 伏角と地磁気強度を示す.

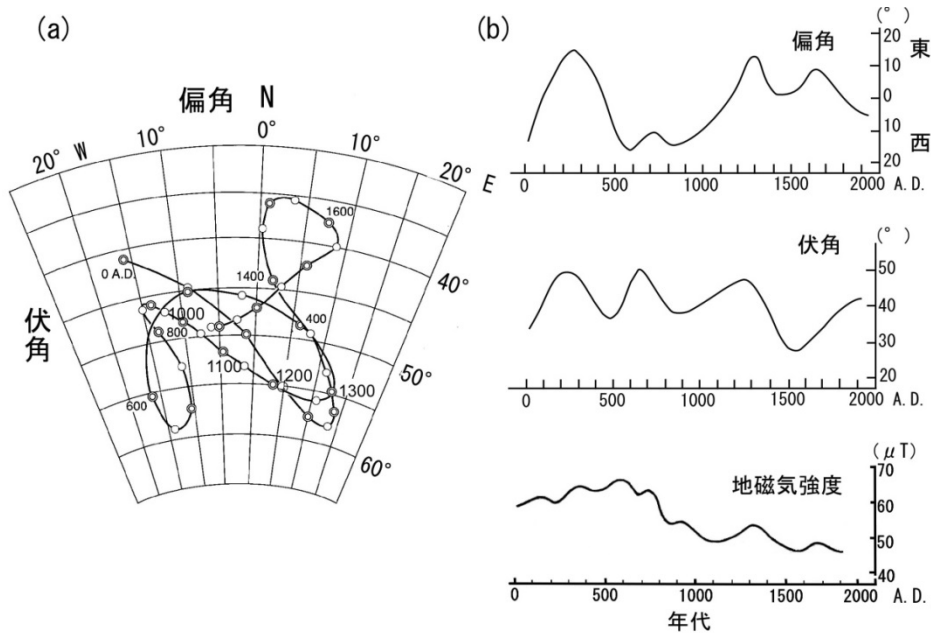


図 1-3. (a) : 地磁気方向の変動の拡大シュミットネット上での表示, (b) : 地磁気の過去 2000 年間の変動, (a) は広岡 (1977) より, (b) は Hirooka (1971), Sakai & Hirooka (1986) より抜粋加筆した.

地磁気強度の変動については, Sakai & Hirooka (1986) により, 西南日本の遺跡から出土した土器や陶器を用いて, 縄文時代から現在までの地磁気強度の変動が示されている (図 1-3b). この変動との比較から, テリエ法により岩石や考古遺物の年代推定が行えるが, 現段階では, データの蓄積が不十分であり, 精度に問題が残る. 地磁気強度は偏角・伏角と異なり, 試料が焼成された場所から移動していても復元することが可能であり, 基本的に焼かれた場所から移動している考古遺物の年代推定に有用である. 遺物の年代は発掘調査時の状況や考古学の編年研究によって決定されており, 理化学的に年代を推定することが難しい. C14 年代法が土器の年代推定に利用されているが, 遺物に付着する炭化物を対象としており, 遺物自体から年代を検討できる考古地磁気推定は非常に

重要である。

また最近では、地磁気変動の研究が進み、日本国内の各地域において、緯度差による伏角のズレだけでなく、変動のパターンに地域差があることが明らかになってきた(広岡, 1997)。地域差は時代により変化しており、北陸や東海地域での地磁気研究(広岡・藤澤, 2002)から、中世における両地域の永年変化曲線が新たに得られている(図 1-4)。しかし、その他の東北地域、北海道や南西諸島はデータの蓄積が不十分であり、詳細な地域差は不明である。近畿地方から離れると誤差が生じる事が考えられ、考古地磁気年代推定を日本全域で精度良く汎用するためにも、各地域の地磁気分布と時代的な変動を解明していく必要がある。

考古遺跡の遺構面の堆積物も残留磁化(堆積残留磁化: detrital remanent magnetization)を獲得しているため、水田遺構や柱穴、溝の覆土などの遺構の残留磁化を利用した研究も試みられている。また今、東日本大地震との関連で古地震の研究が注目されている。遺跡では地震時の液状化により生じた噴砂が見つかることがあり、この噴砂も残留磁化を獲得しているため、それを利用した古地震の年代推定が行われている(酒井・木村, 2011 等)。

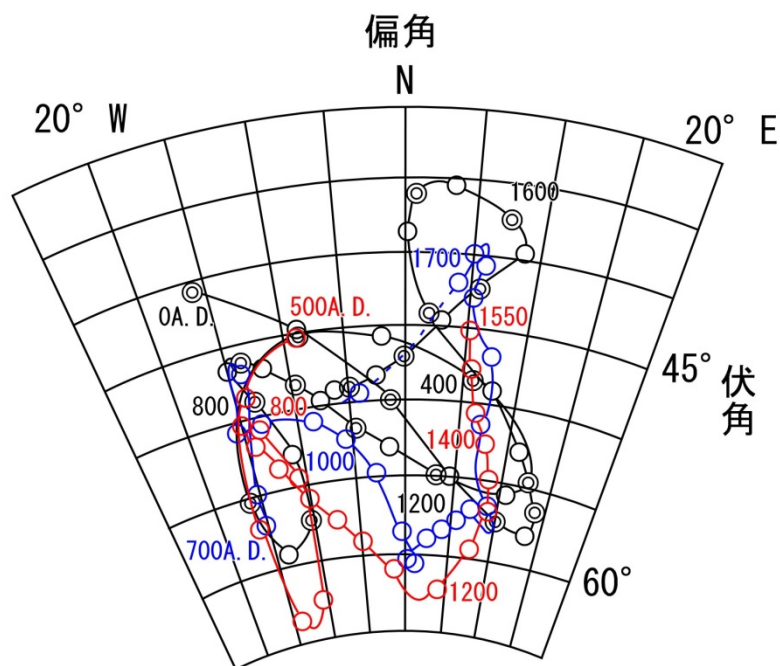


図 1-4. 西南日本と北陸・東海における地磁気変動の比較, 広岡(1977, 1997), 広岡・藤澤(2002)より抜粋し加筆した, 黒線は西南日本, 赤線は北陸, 青線は東海の地磁気変動を示す。

## 第2章 磁化研究の方法

### 2.1. 残留磁化と段階交流消磁

試料の元の磁化である自然残留磁化（NRM：natural remanent magnetization）の測定と段階交流消磁（Progressive Alternating Field Demagnetization）には、富山大学の岩石磁気超伝導磁力計(2G-760R)を主に用いた。試料は、粘性残留磁化（VRM：viscous remanent magnetization）や化学残留磁化（CRM：chemical remanent magnetization）など多様に不安定な二次磁化を獲得していることが多く、試料の初生磁化（primary remanent magnetization）を求めるために、段階交流消磁を行った。段階交流消磁は、試料を交流磁場中に設置し、磁場の振幅を徐々に減少させて消磁する。印加する磁場を段階的に強くし、消磁と磁化測定を繰り返すことで、不安定な磁化成分を取り除き、保磁力の高い安定な磁化を抽出できる。

交流消磁結果の解析には、ザイダーベルト図法（Zijdervelt, 1967）を用いた。この図法は、三次元ベクトルの磁化を水平面投影（水平成分）と鉛直面投影（鉛直成分）に分解して、磁化の方向と大きさを平面に示すものであり、図2-1に概念図を示す。水平面投影では、横軸に磁化の南北成分を、縦軸に東西成分を取った図上にデータを黒丸で表す。また鉛直面投影では、横軸と同様に南北成分を、縦軸に上下成分を取った図に、データを白抜き丸でプロットする。この様にして、磁化を水平と鉛直の成分に分解して、それぞれを平面図に投影する。そして横軸（南北軸）を共通にして2枚の図を重ねることで、磁化を二次元として表示できる。

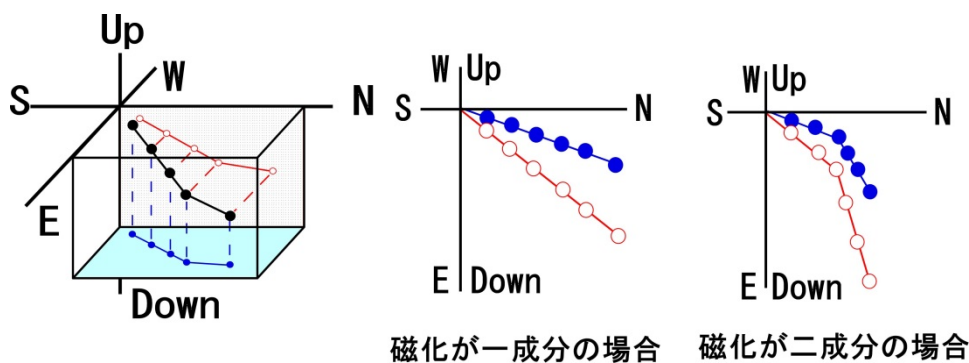


図2-1. ザイダーベルトの概念図.

残留磁化が安定な一成分の場合には、消磁磁場（または熱消磁の温度）を段階的に上げて、磁化方向は変わらずに強度が減少していき、磁化の変化は図の原点に向かう直線上にプロットされる。二次的な磁化がある場合にはプロットは二つの直線に乗るなど複雑になる。磁化方向は、主成分分



析法 (Kirshvink, 1980) を用いてザイダーベルト図上のプロットを解析し求めた。

磁化方向の測定結果は、フィッシャー統計 (Fisher, 1953) を用いて平均値と信頼度パラメータ (95% 信頼角  $\alpha_{95}$ ) を求めて、検討した。

## 2.2. 帯磁率

帯磁率は、微弱な磁場を試料に加えて現れる誘導磁化と加えた磁場の比であり、試料に含まれる磁性鉱物の種類や量、粒子の大きさの指標となる。単位体積あたりでは無次元数 (SI) で表され、単位質量あたりでは  $\text{m}^3/\text{kg}$  となる。本研究では、Bartington 社製 MS-2 帯磁率計と Kappabridge 帯磁率計を使用して帯磁率を測定した。

## 2.3. IRM 獲得消磁実験と s-ratio

物質に磁場を加えて、常温で獲得させた残留磁化を等温残留磁化 (IRM : isothermal remanent magnetization) と称する。

磁性鉱物は、種類により外部磁場に対する安定性が異なり、それを表すパラメータとして保磁力 (coercive force) がある。保磁力は、試料の磁化に、その向きと反対方向の磁場を与えて磁化の変化を調べ、磁化がゼロになる時の外部磁場の強さで表される。

IRM の獲得消磁実験は、保磁力の違いを通して磁性鉱物の種類や粒度を推定する方法である。IRM の獲得で、高い磁場まで磁化が飽和しない試料は高保磁力の磁性鉱物を含み、低い磁場で磁化が飽和する試料は低保磁力の磁性鉱物からなるとわかる。また IRM の消磁曲線の減少が緩やかな場合は保磁力が高く、急な場合は保磁力が低いと推定される。IRM の獲得には、電磁石とパルスマグネタイザー (PM9) を用いた。

s-ratio は、強い直流磁場を試料に印加して磁化を飽和させ、その後、外部磁場をゼロに戻した時に獲得される SIRM (saturation IRM : 飽和等温残留磁化) と、逆方向にそれより弱い磁場を加えて獲得させた IRM の比で求められ、試料に含まれる磁性鉱物の高保磁力と低保磁力の鉱物の割合の指標となる。マグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) やマグヘマイト ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) などの低保磁力の磁性鉱物が多いほど、s-ratio は 1 に近づき、ヘマタイト ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )、ゲーサイト ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) などの高保磁力の磁性鉱物の割合が増えると s-ratio は小さくなる。

s-ratio は、次の式で表される (Bloemendal et al., 1992)。

$$S_{-300} = \left[ - \left( \frac{IRM_{-300}}{SIRM_{1000}} \right) + 1 \right] / 2 \quad (2.1)$$

図 2-2 に示すように、パルスマグネタイザー (PM9) を用いて、1000mT の磁場をかけて試料に着磁させた SIRM と、それと逆方向の 300mT の磁場により着磁させた IRM を、それぞれ SIRM1000、IRM-300 と表している。

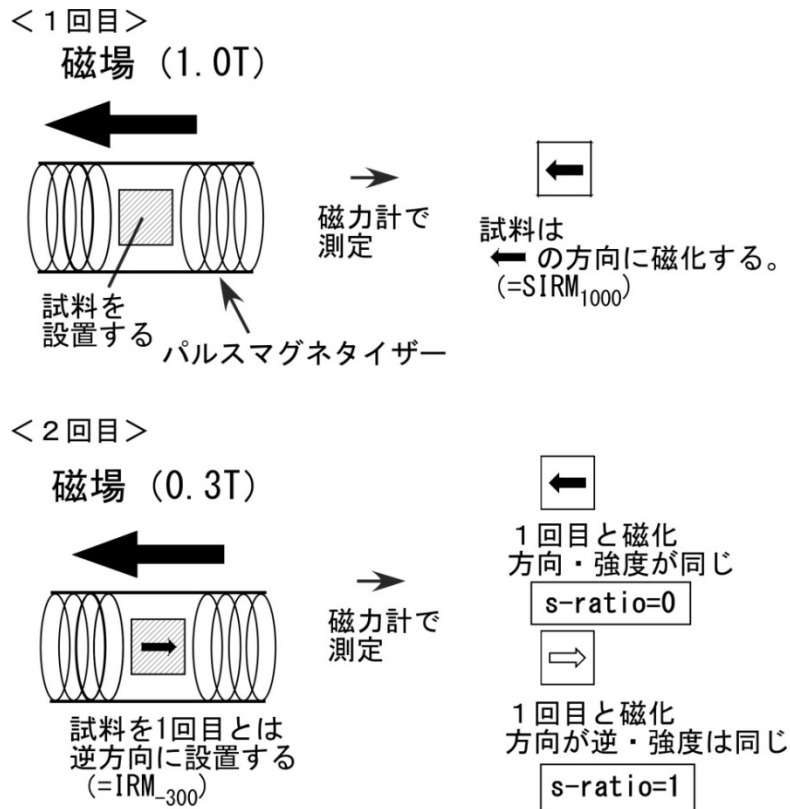


図 2-2. s-ratio を求める実験方法.

#### 2.4. 熱消磁実験およびテリエ法実験

本研究では、磁化の温度特性を、熱消磁実験により求めた。この実験は、試料を段階的に加熱して、加熱後に無磁場空間で冷却して、磁化方向と強度の温度変化を調べる。試料に含まれる磁性鉱物のキュリー温度が測定可能な最高温度となり、一般には 570~670°C である。磁化の温度変化の解析には、ザイダーベルト図法を用い、磁化方向は、主成分分析法 (Kirshvink, 1980) でザイダーベルト図上のプロットを解析して求めた。

熱消磁実験と併行してテリエ法実験 (Thellier & Thellier, 1959) を行い、古地磁気強度も研究した。テリエ法は、熱消磁と熱残留磁化の獲得を繰り返し行う実験で、以下の手順からなる。

まず、試料を無磁場中でキュリー点以下のある温度 ( $T_n$ ) まで加熱し冷却する。温度 ( $T_n$ ) 以下の TRM は、試料のブロッキング温度分布に応じて消磁され、温度 ( $T_n$ ) 以下の磁化成分 (pTRM) を取り出すことができる。次に、既知の人工磁場中で、試料を再び温度 ( $T_n$ ) まで加熱し冷却する。これにより、試料は温度 ( $T_n$ ) 以下で、人工磁場の強度に比例した部分残留磁化を獲得する。これを低温から高温 (580°C) まで段階的に繰り返す。

テリエ法の実験結果は、SNRM-TRM 図 (酒井改良法: Sakai & Hirooka, 1986) で解析した。この図は、縦軸にある温度段階までに消磁された磁化強度を、横軸には同温度で人工磁場のもとで獲得した TRM の強度を、それぞれ元の磁化 (NRM) で割ってプロットしている。そして、各温度でのプロットを直線で近似し得られた直線の傾きと磁場を掛けることで、試料が過去に加熱を受けて熱残留磁化を獲得した時代の地磁気強度が求まる。

地磁気強度を求める上で、以下の基準を設けてデータの信頼度を検討した。

- (1) pTRM テストのずれが 20%以内である。
- (2) SNRM/TRM 図上で地磁気強度を求める直線範囲は 3 点以上を含む。
- (3) 3 点以上の温度区間はザイダーベルト図上で直線関係が成り立ち、標準偏差が 0.98 を越える。

テリエ法は、試料の残留磁化が熱起源 (TRM) か他の要因による磁化 (DRM, CRM や VRM 等) かを判別することもでき、遺構や遺物の焼成の有無を判定する事にも有用である。

加熱実験は、夏原技研製電気炉 (DEM-8602C) を用いて、50 $\mu$ T の人工磁場を印加し、アルゴン雰囲気下で実施した。

## 2.5. 磁気ヒステリシス特性

磁性体に徐々に強い磁場をかけていくと図 2-3 の a→b のような変化を示し、磁化は飽和する。この飽和磁化 (saturation magnetization,  $M_s$ ) に印加した磁場と逆向きの磁場を再び与えていくと、磁化は b→c→d と同じ経路を辿らずに弱くなっていき、飽和磁化と逆方向に飽和する。以後強い磁場を正負方向に交互にかけると i→j→e→f→g→h→i というループを描いて変化する。これをヒステリシスループという。また飽和残留磁化と逆方向の磁場をかけていき、磁場がゼロになっても残る残留磁化を飽和残留磁化 (saturation remanent magnetization,  $M_{rs}$ ) という。

十分に強い磁場をかけると e で磁化はそれ以上増えなくなる。さらに逆向きの磁場をかけていくと元の経路を通らず磁化は弱くなっていくが、磁場をゼロにしてそのまま逆向きの磁場をかけ続けて磁化がゼロになったときの磁場の強さを保磁力 (coercivity,  $H_c$ ) という。試料を強い磁場で飽和

させ、その後飽和させた磁場と逆向きの弱い磁場をかけてから磁場をゼロに戻す。これを繰り返して、逆向きの弱磁場を徐々に強くしていき、残留磁化がゼロになった時の磁場の強さが残留保磁力 (remanent coercivity,  $H_{rc}$ ) になる (中井, 2004)。これらの現象を磁気ヒステリシスと呼び、岩石の磁気ヒステリシス曲線は、含まれる磁性鉱物の磁氣的性質について多くの情報が得られる。実験は振動試料分析計 (VSM: Vibrating Sample Magnetometer) Micro Mag3900 型 (Lake Shore Cryotronics 社製) を用いて行った。

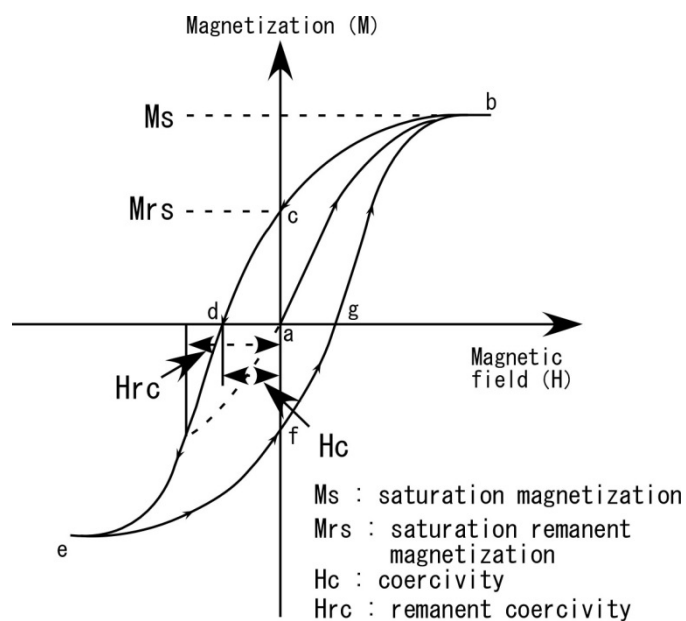


図 2-3. 磁気ヒステリシス曲線.

### 第3章 黒曜石の磁化研究—北海道の原産地黒曜石と黒曜石製遺物の研究

#### 3.1. 研究の概要

黒曜石は、暗色の火山ガラスで、光沢をもち、貝殻状断口を示す。ガラスシリカ鉱物に富む珪長質岩で、一般的に流紋岩とほぼ同じ化学組成をもつ。石基がほぼ完全なガラスからなり、微晶または晶子が流線に沿って配列している（鈴木，2005）。ガラス質の石基に球殻状の割れ目が多く見られるものをパーライト（真珠岩）、黒曜石よりピッチ状の鈍い光沢を示すものをピッチストーン（松脂岩）と呼ぶ。黒曜石は H<sub>2</sub>O を通常 1%以下しか含まないのに対し、ピッチストーンは 2~10%近く含む（下鶴他，2008）。マーガライトやトリカイトなどの晶子や、石英、斜長石、微量の黒雲母や角閃石が偏光顕微鏡から観察され、晶子形態や岩石学的な観察でも、原産地毎の特徴が固有とまではいえないが見られる（石岡他，2001）。

火山岩や火山ガラスは通常数%の鉄チタン酸化物を含んでいるため、黒曜石も弱い磁性を有する。磁性鉱物は加熱冷却の過程で残留磁化を獲得し、地磁気の記録となる。黒曜石も、マグマが冷却固化する過程で熱残留磁化を獲得すると考えられる。表 3-1 に示すように、マグネタイトやマグヘマイト、ピロタイトは、ヘマタイトと比べ残留磁化は 100 倍以上、帯磁率は 1000 倍以上の強さがある。原産地や噴出過程の違いでほんの微量の磁性鉱物でも変化すれば、黒曜石の磁気物性を大きく左右し、磁化研究により分かる。

表 3-1. 磁性鉱物の磁気物性.

	Mineral	Mass specific susceptibility *1 ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ )	Saturation magnetization*2 ( $\times 10^3 \text{ A/m}$ )
Ferri-magnetic	Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	390-1116	480
	Maghemite ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )	286-440	380
	Titanomagnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$ )	169-290	125
	Pyrrhotite ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ )	50-53	80
Antiferro-magnetic	Hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )	0.27-1.69	2.5~
	Goethite ( $\alpha\text{-FeOOH}$ )	0.35-1.26	2~
Para-magnetic	Ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ )	1.7-2	

\*1はDearing(1999), \*2は中井(2004)より抜粋し、加筆した。

本研究では、蛍光 X 線分析法と独立な方法として磁化特性による原産地推定を考え、黒曜石の磁化特性から北海道内の主要原産地から採取した黒曜石の産地毎の違いを研究した。磁化特性の実験として、残留磁化、帯磁率の測定および人工的な磁化(等温残留磁化)の獲得消磁を行った。さらに、上ノ国町コンドウヤ遺跡から出土した黒曜石製遺物の研究も行い、磁化研究による原産地推定の妥

当性を検討した。また、黒曜石の熱磁気特性を調べるため、原産地黒曜石とチャシコツ岬下 B 遺跡から出土した黒曜石遺物を対象として熱消磁とテリエ法を行った。

図 3-1 に残留磁化の測定の様子を示す。試料は超音波洗浄機で表面を洗浄後、超伝導磁力計の測定トレイに固定して非破壊測定を行った。消磁は、超伝導磁力計付属の消磁装置と交流消磁装置を用いて、80mT まで 5mT 毎に磁場を段階的に強くして行った。帯磁率は試料の単位質量値に統一した。

人工磁化(等温残留磁化)の獲得特性は、試料に印加する磁場を徐々に増やしながらか求めた。印加磁場は、電磁石とパルスマグネタイザーにより発生させた、5~1000mT までの 14 段階の磁場を利用し、各段階の磁場で獲得された磁化を測定した。そして最後に加えた最も強い磁場下で獲得された等温残留磁化について、続いて交流磁場による消磁特性を求めた。交流消磁は、5~90mT の 11 段階に設定した交流磁場を用いて行った。また、別の磁化パラメータとして、s-ratio も使用した。



図 3-1. 残留磁化の測定の様子。

## 3.2. 研究試料

### 3.2.1. 北海道の黒曜石原産地

北海道では、黒曜石の主要原産地として、紋別郡白滝、河東郡十勝三股、余市郡赤井川、常呂郡置戸が知られている。

白滝の産地は赤石山と十勝石沢の二群からなり、それぞれ幾つかの露頭や包含地が所在し、湧別川流域でも転石を採取することができる。十勝石沢では、ざらざらした梨肌状で鈍い光沢の黒曜石が主であり、赤石山はつややかに光沢し、鉄分の高温酸化による赤や赤茶色が特徴的な黒曜石など、多様な黒曜石が分布する。赤石山とその周辺を中心に、大規模遺跡が多く見つかり、北海道の黒曜石利用において主要な役割を担う産地である。木村(2002)によれば、白滝産黒曜石遺物は、北海道各地の遺跡で見つかり、更にシベリアまで流通することが知られている。

赤井川産の黒曜石は、曲川や余市川等の沢における転石や火山灰に富む堆積物中のみ見つかり、数 mm の白い球顆を層状に含むことが多い(向井他, 2002)。赤井川にごく近い道南部から石狩低地帯、渡島半島の旧石器時代の遺跡では、赤井川産黒曜石が多用されている(寺崎, 2005)。

置戸産黒曜石は置戸山と常呂山の2カ所で採取できるが、露頭はまだ確認されていない(明治大学古文化財研究所, 2011)。置戸山の黒曜石は、多くが断面は滑らかな光沢があり、黒と灰色の縞状に配列する。十勝産黒曜石は、主に音更川水系と然別川水系において河川堆積物として分布し(向井, 2009)、十勝平野の広範囲で採取できる。その供給源の一つは、音更川上流部の十勝三股付近と指摘されている(吉谷他, 1999)。

その他の産地として、豊浦、名寄や旭川などの小規模な転石採取地がある。

北海道の黒曜石原産地の研究は、放射化分析法を併用するフィッシュトラック法によるウラン濃度と噴出年代の分析(興水, 1981)や、蛍光 X 線による微量成分元素分析(藁科・東村, 1985)等で研究されてきた。

近年、新たな試みとして波長分散型電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)を利用する主成分元素組成からの原産地研究も精力的になされている(向井, 2009等)。また、明治大学古文化財研究所は、エネルギー分散型蛍光 X 線装置を用いて原産地の総合的研究を進めており(高倉他, 2013等)、北海道の黒曜石の分析事例は増加しつつある。

### 3.2.2. 黒曜石の研究資料

研究は、白滝、十勝三股、赤井川、置戸の露頭および転石の黒曜石を試料とした。白滝産黒曜石 14 点、赤井川産 13 点、置戸産黒曜石 10 点、十勝産黒曜石 1 点を用いた。図 3-2 に原産地の位置を、図 3-3 には研究した黒曜石の例を示す。

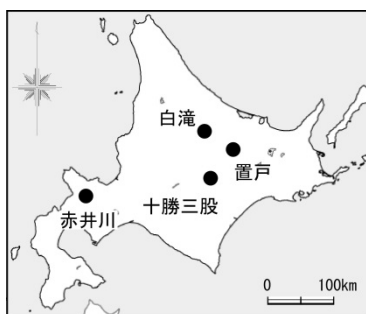


図 3-2. 北海道の黒曜石試料の原産地。

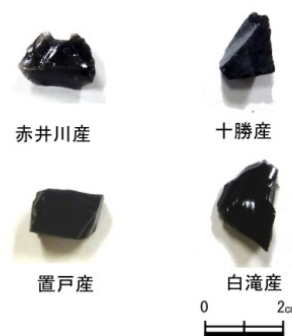


図 3-3. 研究した黒曜石の例。

表 3-2. 北海道の黒曜石の微量成分元素の存在量（二宮他，1991）.

	Na(%)	Fe(%)	Rb	Cs	La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu	Th	Hf	Co	Sc	Cr
置戸(常呂郡置戸町)															
OB388 HKOK-01-01	2.82	0.82	140	7.3	23	39	3.6	0.69	2.2	0.41	12	3.2	0.6	3.7	2
白滝(紋別郡白滝村)															
OB389 HKSI-01-01	2.87	0.86	150	9.9	21	38	4.1	0.55	2.4	0.45	11	2.9	-	2.9	3
OB389 HKSI-01-02	2.88	0.85	170	11	20	38	4.2	0.53	2.9	0.43	11	2.8	0.4	3	3
十勝三股(河東郡上士幌町)															
OB391 HKTM-01-01	3.03	0.79	150	8.7	23	42	5	0.74	2.9	0.48	12	3.1	0.5	4.6	2
OB391 HKTM-01-02	3.04	0.81	160	9.6	24	42	5	0.68	3.3	0.49	13	3.2	0.3	4.6	3
赤井川(余市郡赤井村)															
OB393 HKAK-01-01	2.69	0.74	120	11	27	48	3.8	0.53	2.6	0.52	18	3.3	0.5	2.4	1
OB393 HKAK-01-02	2.93	0.79	140	11	29	48	3.9	0.56	2.9	0.48	18	3.4	0.4	2.4	-

\*Na, Fe以外はppmで示している.

これらのうち数点は，東京学芸大学二宮研究室で，中性子放射化分析により主成分元素のナトリウム (Na)，鉄 (Fe) を含む微量成分元素が定量化されている (表 3-2)．北海道産黒曜石の微量成分元素の存在量は全体的に類似しているが，アルカリ金属元素 (Rb, Cs)，軽希土類 (La, Ce, Sm, Eu, Th, Sc) の元素に原産地間の違いがみられ，クラスター分析の結果からも各原産地が独立のクラスターを形成する結果が得られている．

### 3.3. 磁化研究の結果

#### 3.3.1. 残留磁化と帯磁率

各試料の測定結果について，表 3-3 に帯磁率と磁化強度 (平均値，標準偏差) を示す．図 3-4 の左図は原産地黒曜石の帯磁率 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) を，右図は磁化強度 ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ ) の最大・最小値と平均値を示している．帯磁率は，赤井川産が他地点に比べて最も小さく，置戸産と白滝産が高い．磁化強度は，白滝産が他地点より 1 桁大きく，置戸と赤井川産が弱い傾向にある．

図 3-5 は，各試料の帯磁率と磁化強度の比を示している．帯磁率と磁化強度で，各産地の特徴が表れており，原産地黒曜石が大まかに判別できるとわかる．

表 3-3. 原産地黒曜石の帯磁率と磁化強度の測定結果.

原産地	n(個)	帯磁率	磁化強度	磁化強度/帯磁率
		ave.	ave.	ave.
置戸	10	10.5±1.9	1.21±0.3	1.26±0.62
赤井川	13	2.6±3.8	2.04±1.42	10.6±4.8
十勝	1	8.0	3.81	4.76
白滝	14	14.2±8.1	21.3±22.3	38.8±58.1

\*帯磁率: ( $\times 10^{-7} \text{m}^3/\text{kg}$ ), 磁化強度: ( $\times 10^{-4} \text{Am}^2/\text{kg}$ )



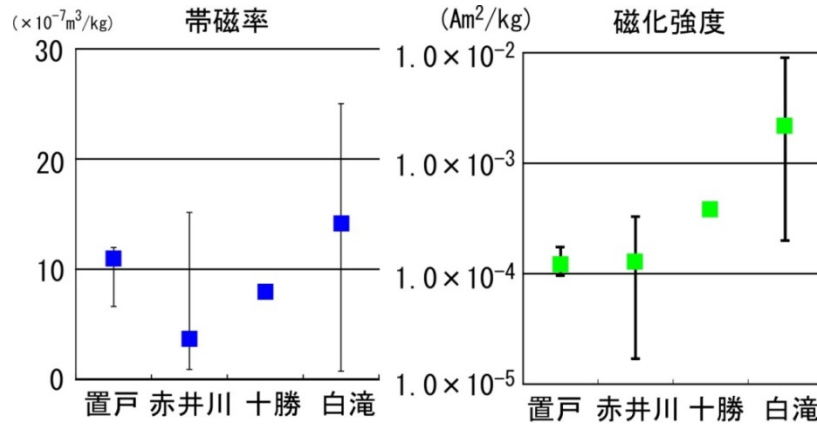


図 3-4. 原産地黒曜石の磁化特性, 左: 帯磁率, 右: 磁化強度の結果.

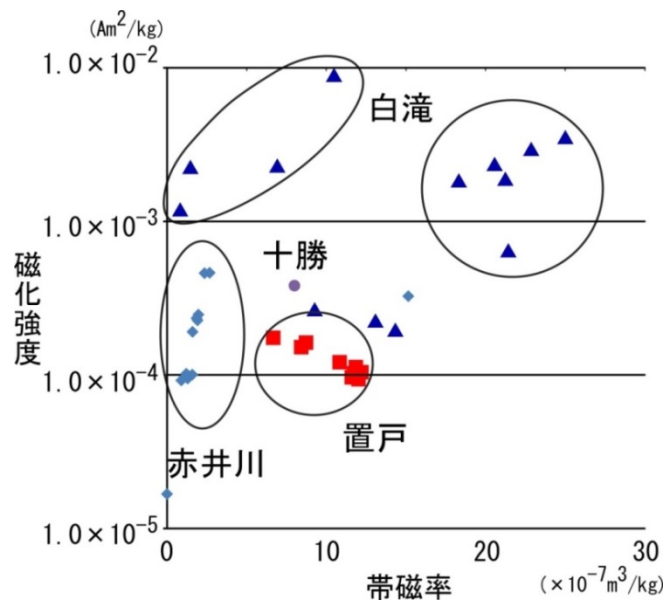


図 3-5. 原産地黒曜石の帯磁率/磁化強度図.

白滝産黒曜石の結果では, 2つのグループに分かれた. 両グループは採取地点が違っているので, 白滝産黒曜石は産出地点によって磁気物性が異なると思われる. 蛍光 X 線分析でも, 白滝の産出地点は二群に分かれるとの結果が示されており (藁科・東村, 2000), 今後産出地点の情報を踏まえて詳細な分析を行う必要がある.

### 3.3.2. その他の磁気物性

図 3-6 は交流消磁で得た磁化強度の変化 (消磁特性) を示す. 横軸は, 消磁磁場の強さ (mT), 縦軸は各消磁段階での磁化強度を消磁前の磁化強度で割っている. 置戸産は, 二次磁化があったため, 磁化強度のベクトル差を求めてプロットした.

表 3-4 に各原産地の磁化特性のまとめを、図 3-7 にはヒストグラムで表している。磁化パラメータは、交流消磁で磁化が 7 割に減少した時の磁場の強さ (mT)、IRM が獲得された磁化が 5 割に増加した時および SIRM 獲得後磁化が交流消磁で 5 割に減少した時の磁場の強さ (mT)、強い磁場 (1.0T) を与えた時の磁化強度 (SIRM)、s-ratio からなる。以上のパラメータは、白滝産黒曜石は複数試料の測定値の平均と標準偏差で示したが、他の産地試料は測定値を示した。

また、交流消磁で赤井川産黒曜石の磁化強度が NRM の 7 割までしか減少しなかったため、磁化が 7 割まで減少した時の磁場の強さで検討を行った。

(1) 交流消磁での特性

図 3-6 に示す様に、白滝産黒曜石は 25mT、置戸産は 10mT の磁場で相対磁化強度が 7 割まで減少しており、保磁力は低かったが、十勝産と赤井川産は、磁化強度が 7 割になる磁場が 50mT 以上と保磁力は高かった。特に赤井川産は、80mT の磁場でも磁化は多く残り、保磁力が非常に高かった。

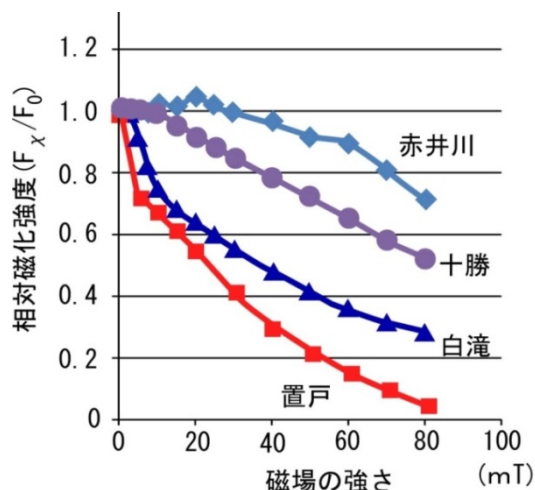


図 3-6. 交流消磁実験における磁化強度の変化。

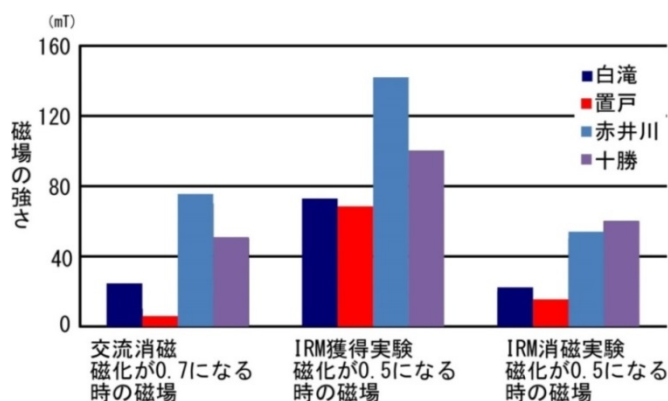


図 3-7. 各原産地の磁化パラメータのヒストグラム図。

表 3-4. 各原産地の磁化特性のパラメータ.

	交流消磁	IRM獲得実験		IRM消磁実験	s-ratio
	磁化が0.7になる時の磁場 (mT)	SIRM ( $\times 10^{-3} \text{Am}^2/\text{kg}$ )	磁化が0.5になる時の磁場 (mT)	磁化が0.5になる時の磁場 (mT)	
白滝	25 ± 9.24	25.7 ± 5.54	73.0 ± 3.5	22.3 ± 4.0	0.989
置戸	4, 8	2.62, 14.8	75, 62	20, 11	0.979
赤井川	71, 80	0.23, 0.45	150, 134	45, 63	0.866
十勝	52	14.8	100	60	0.974

(2) IRM の獲得・消磁特性

図 3-8-1 に各試料の IRM の獲得曲線, 図 3-8-2 に IRM の消磁曲線を示す. 縦軸は各磁場段階で獲得された IRM を SIRM で割った値である.

図 3-8-1 で, 白滝と置戸産黒曜石の磁化は, 75mT 前後の磁場で飽和磁化の 5 割まで獲得され, 300 mT までに飽和している. 両黒曜石は, 消磁でも急激に磁化強度が減少し, 約 20mT の消磁磁場で磁化が半減する. これらの結果から, 白滝と置戸産黒曜石は保磁力の低いマグネタイトが多く, 高い保磁力の磁性鉱物は少ないと考えられる. s-ratio も, 白滝が 0.989, 置戸が 0.979 と 1 に近い値が得られた.

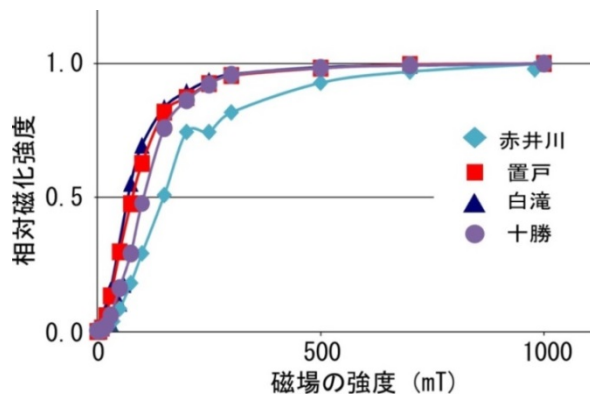


図 3-8-1. 北海道原産地黒曜石の IRM 獲得曲線.

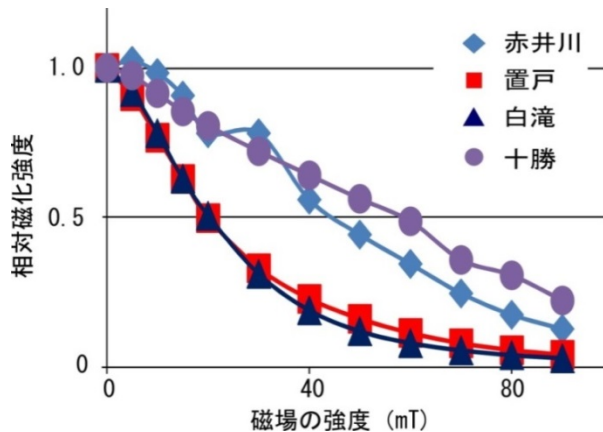


図 3-8-2. 北海道原産地黒曜石の IRM 消磁曲線.

一方、赤井川産黒曜石は、約 150mT の磁場で飽和磁化の 5 割を獲得し、磁場が 500mT 以上になるまで飽和しない。IRM の消磁曲線も緩やかに減少し、SIRM の 5 割になる磁場は約 50mT であった。また s-ratio は 0.866 と得られ、他産地の黒曜石に比べてやや低かった。

以上の結果から、赤井川産黒曜石は、保磁力の高い磁性鉱物（ヘマタイトやゲーサイト）が若干多く、マグネタイトと混在していると推定される。ただ、磁性鉱物が一定の場合、s-ratio の違いは磁性鉱物の粒径の違いを反映するため（堀井，1998）、マグネタイトの粒径が白滝・置戸産と異なる可能性もある。

十勝産黒曜石は、IRM 獲得曲線では高保磁力だが、その消磁や交流消磁の結果では低保磁力の傾向を示している。また s-ratio は 0.974 と 1 に近い。以上の様に統一する結果が得られなかったが、これは粒径や種類が異なる磁性鉱物が混在している為かもしれない。ただ、十勝産黒曜石は、試料点数が 1 点で結果の信頼性が低く、今後、測定点数を増やしての検討が必要である。

本研究では、黒曜石の磁気物性を IRM で検証したが、黒曜石の磁化（熱残留磁化）との対比では、非履歴性残留磁化（ARM : Anhysteretic Remanent Magnetization）の方が適する可能性がある。今後、ARM の獲得や磁気ヒステリシスなどの別の磁気物性から原産地黒曜石を研究する必要がある。

### 3.4. 遺跡出土黒曜石への応用-原産地推定

#### 3.4.1. 上ノ国町遺跡出土の黒曜石

檜山郡上ノ国町コンドウヤ遺跡から出土した黒曜石製遺物の磁気物性を研究した。図 3-9 に示した試料について非破壊の磁気分析を行い、北海道の主要原産地試料から求めた磁気物性と対比した。さらに、同じ試料について、蛍光 X 線分析による原産地推定も行い、磁気物性の結果と併せて検討した。

上ノ国町は、日本海に面する渡島半島西部に位置し、コンドウヤ遺跡は、昭和 30～40 年代に石鏃や石槍、ナイフ、異形石器等の石器が採取された遺跡である（図 3-10）。渡島半島には、北海道の主要な原産地の一つの赤井川が所在するが、頁岩の産地が近くにあり、出土する石器に占める黒曜石の割合は決して多くない。しかし、道南部から石狩低地帯の旧石器時代の遺跡では、赤井川産黒曜石が多用される傾向がある。また、距離が離れている他の産地の黒曜石も報告されており、十勝三股産が大多数を占める遺跡も見つかっている（寺崎，2005）。



図 3-9. 分析に供した遺跡出土黒曜石.

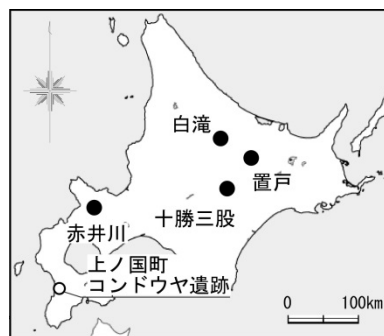


図 3-10. 上ノ国町コンドウヤ遺跡の位置図.

### 3.4.2. 蛍光 X 線分析による研究

黒曜石の主成分元素は、Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K である。建石・二宮 (2000) は、中でも Fe (鉄), Ca (カルシウム), K (カリウム) は、黒曜石の原産地間の識別および分類に特に有効であり、その 3 元素と挙動に相関性がある Mn (マンガン), Sr (ストロンチウム), Rb (ルビジウム) を加えた 6 元素での検討が有用であることを示している。そこで、東京学芸大学のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置セイコー電子工業製卓上型エレメントモニター SEA - 5120 を使用し、各元素の濃度比を求めた。測定は、試料室を大気雰囲気下、加速電圧 50 kV, 計測時間 120 秒として各 3 回ずつ行った。そして標準試料を用いないファンダメンタルパラメーター法で、各元素の酸化物の総和を 100 とする重量濃度比を求め、平均値を分析値とした。

表 3-5 は、北海道と周辺地域の主要原産地黒曜石の 6 元素組成である。北海道および周辺の主要な黒曜石原産地である北海道白滝、同赤井川、同置戸、同十勝三股、青森県出来島、同深浦で採取された原石の分析値を原産地データとした。

遺跡出土の黒曜石も同条件で測定し、MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrO, CaO, Rb<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O の 6 元素組成を変数とするクラスター分析 [多変量解析ソフト SPSS22.0J (IBM 社製)] により、最遠距離法で原産地データとの類似度を検証した。

図 3-11 にクラスター分析の結果を、表 3-6 に蛍光 X 線分析による産地推定結果の一覧表を示す。コンドウヤ遺跡出土黒曜石は、赤井川産 19 点、白滝産 23 点、十勝産 3 点、置戸産 1 点、不明 2 点と推定された。白滝産が赤井川産と同程度の割合で見られ、少量であるが他の産地の黒曜石も出土しており、当該地域の黒曜石の利用状況と少し異なる傾向が得られた。

表 3-5. 北海道および周辺の主要原産地黒曜石の 6 元素組成 (wt%).

	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	CaO	Rb <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
白滝	1.5	38.9	0.2	11.8	1.0	46.7
置戸	1.3	37.6	0.4	18.2	0.9	41.7
赤井川	1.5	36.2	0.3	18.0	0.8	43.1
十勝三股	1.6	36.1	0.3	16.6	1.0	44.4
出来島	4.9	32.7	0.7	19.6	0.6	41.4
深浦	1.4	55.9	0.0	4.1	0.6	37.9

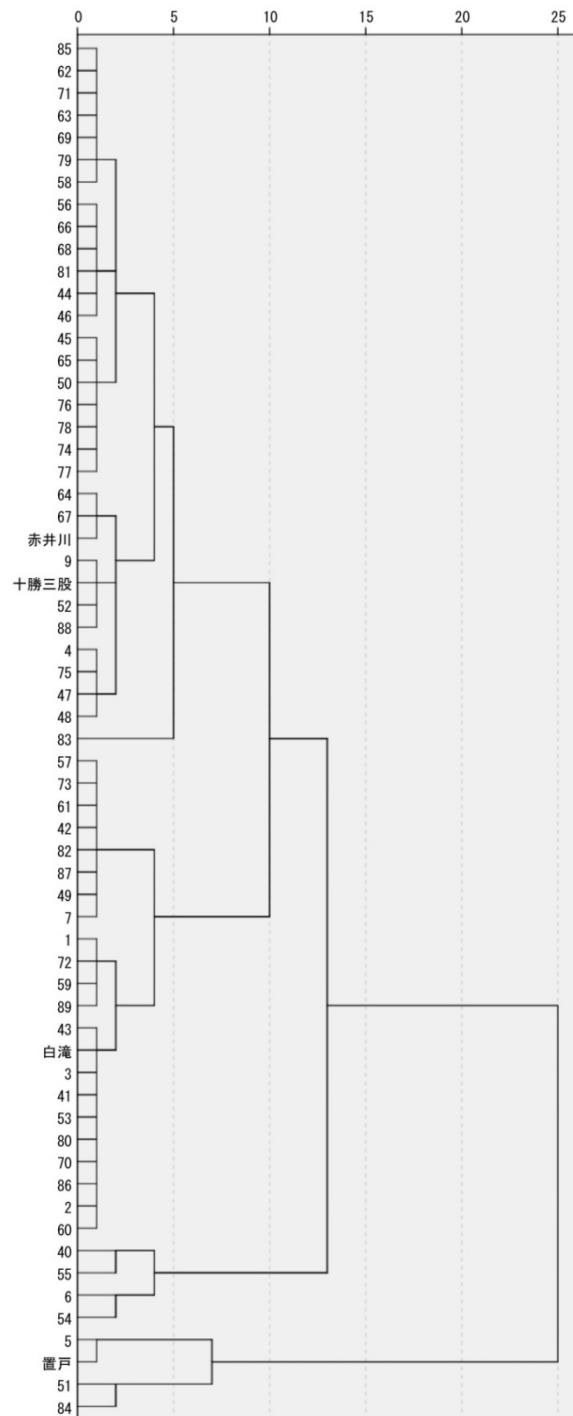


図 3-11. クラスター分析の結果.

表 3-6. コンドウヤ遺跡出土黒曜石の原産地推定の結果 (wt%).

No.	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	CaO	Rb <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	原産地	磁気物性
1	1.5	34.8	0.0	14.8	1.0	47.9	白滝	白滝
2	1.6	38.0	0.1	12.0	1.0	47.3	白滝	白滝
3	1.5	36.6	0.1	12.6	1.0	48.2	白滝	白滝
4	2.1	34.2	0.3	17.1	0.9	45.5	赤井川	赤井川
5	1.1	35.3	0.4	20.1	0.9	42.2	置戸	不明
6	1.3	33.7	0.1	12.1	0.9	51.9	白滝	不明
7	2.0	33.6	0.0	13.0	1.2	50.2	白滝	白滝
9	1.8	36.2	0.3	15.6	1.1	45.2	十勝	—
40	1.4	27.2	0.2	16.0	0.6	54.7	白滝	白滝
41	1.4	35.6	0.1	13.2	1.0	48.6	白滝	白滝?
42	2.1	35.2	0.0	11.1	1.2	50.3	白滝	白滝
43	1.6	37.5	0.2	14.1	1.0	45.5	白滝	置戸
44	2.2	34.0	0.3	15.6	0.7	47.2	赤井川	赤井川
45	2.2	33.6	0.3	18.2	0.8	44.9	赤井川	赤井川
46	1.9	34.0	0.3	15.9	0.8	47.2	赤井川	赤井川
47	2.0	34.1	0.3	18.3	0.8	44.5	赤井川	赤井川?
48	1.8	34.6	0.3	17.1	0.8	45.3	赤井川	赤井川
49	1.9	34.9	0.0	11.2	1.3	50.7	白滝	白滝
50	2.5	34.1	0.3	17.8	0.8	44.6	赤井川	赤井川
51	1.9	43.0	0.6	20.4	0.6	33.5	不明	赤井川
52	1.9	36.2	0.4	16.4	1.1	44.0	十勝	白滝
53	1.6	36.0	0.1	13.2	1.1	48.1	白滝	白滝
54	1.7	28.9	0.0	15.2	1.0	53.3	白滝	白滝
55	1.2	24.8	0.1	12.7	0.7	60.5	白滝	白滝
56	1.9	32.8	0.2	18.2	0.7	46.1	赤井川	赤井川
57	2.3	36.1	0.0	12.4	1.2	48.1	白滝	白滝
58	2.0	35.3	0.1	17.1	0.7	44.8	赤井川	赤井川
59	1.8	36.3	0.1	14.6	1.1	46.1	白滝	赤井川
70	1.7	35.7	0.1	13.1	1.0	48.5	白滝	白滝
71	2.2	33.3	0.2	17.8	0.8	45.7	赤井川	赤井川
72	1.5	37.3	0.0	14.4	1.0	45.8	白滝	白滝
73	2.3	36.1	0.0	11.9	1.2	48.6	白滝	白滝
74	2.3	33.5	0.2	16.7	0.7	46.5	赤井川	赤井川
75	2.0	34.0	0.3	16.7	0.9	46.2	赤井川	赤井川
76	2.3	35.5	0.2	16.2	0.8	45.0	赤井川	白滝
77	2.4	34.1	0.2	17.1	0.8	45.4	赤井川	赤井川
78	2.3	34.9	0.2	15.9	0.8	46.0	赤井川	赤井川
79	2.2	33.7	0.2	17.2	0.6	46.1	赤井川	白滝
80	1.7	36.7	0.2	12.5	1.0	48.0	白滝	白滝
81	1.8	33.9	0.2	17.2	0.8	46.0	赤井川	赤井川?
82	1.8	35.2	0.1	12.0	1.2	49.9	白滝	白滝
83	1.7	32.8	0.0	18.0	0.7	46.9	赤井川?	赤井川
84	1.5	37.2	0.5	22.1	0.5	38.2	不明	赤井川
85	2.2	33.7	0.2	16.9	0.7	46.3	赤井川	赤井川
86	1.7	35.9	0.1	12.6	1.0	48.7	白滝	白滝
87	1.9	35.9	0.0	11.5	1.2	49.6	白滝	十勝?
88	1.8	36.0	0.3	17.3	1.0	43.6	十勝	十勝
89	1.9	35.7	0.0	13.5	1.0	47.9	白滝	白滝

### 3.4.3. 磁気物性の研究結果

図 3-12 には、黒曜石試料の磁化測定の結果を示す。図 3-5 で示した北海道原産地黒曜石の帯磁率/磁化強度図にコンドウヤ遺跡出土黒曜石の結果を\*印でプロットしている。表 3-6 でその結果から推定される原産地と XRF 分析の推定結果を比較した。試料 No.9 は形状が大きく、測定ができなかった。原産地推定の結果はおおむね一致しており、磁気研究による原産地推定の有効性が示された。磁気物性では、白滝産黒曜石の測定結果に若干ばらつきが見られ、データ範囲を明確にするために原産地黒曜石のデータを蓄積する必要がある。

コンドウヤ遺跡に近い大岱遺跡で、縄文時代中期末から後期初頭の黒曜石製石器が出土しており、蛍光 X 線分析によって 30 点のうち 28 点が赤井川産と推定されている（竹原，2013）。今回の分析結果は、こうした様相と少し異なる。コンドウヤ遺跡では、他の原産地黒曜石も一定数見られ、近隣の赤井川から、直接もしくは仲介で黒曜石を入手し、道内の交換ネットワークの中で白滝産を主とした黒曜石も利用していた可能性が示唆される。

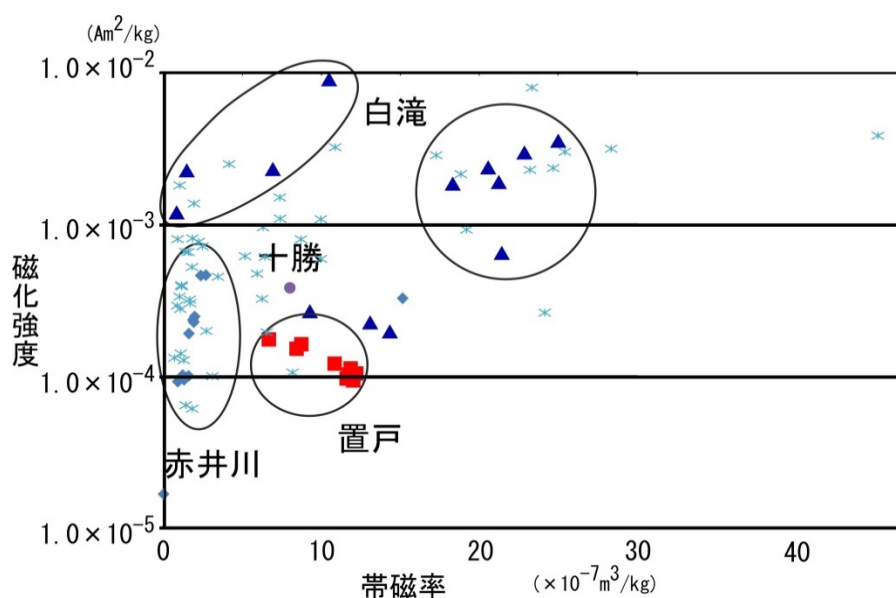


図 3-12. コンドウヤ遺跡出土黒曜石の帯磁率/磁化強度比.

## 3.5. 黒曜石の熱消磁とテリエ法実験

### 3.5.1. 原産地黒曜石

黒曜石の熱磁気特性を調査するため、表 3-7 で示す 3 箇所の原産地黒曜石について、熱消磁とテリエ法実験（酒井改良法，1986）を行った。各黒曜石の噴出年代はカリウム・アルゴン法（K-Ar）法やフィッシュントラック（FT）法によって、2.2~3.8Ma の年代値が得られている（和田他，2011，



2014, 杉原他, 2011). 試料は, 各ブロック試料から, 岩石カッターで 2cm 立方の大きさに切り出し, 耐熱ボンドで固めて加熱実験に用いた.

図 3-13 に実験結果の例を示す. 各試料の結果は, ザイダーベルト図, 磁化強度の変化, SNRM-TRM 図, および帯磁率の温度変化として示した.

**表 3-7. 北海道の原産地黒曜石の噴出年代とテリエ法実験の結果.**

原産地	噴出年代 (Ma)	NRM強度 (Am <sup>2</sup> /kg)	帯磁率 (×10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /kg)	温度範囲	標準偏差	推定磁場強度 (μT)
白滝	2.20±0.11, 2.24±0.05 *1	1.31 × 10 <sup>-3</sup>	16.1	500-580°C	0.99	32.5±1.7
赤井川	2.4±0.2 *2	1.83 × 10 <sup>-4</sup>	1.5	500-580°C	0.99	23.8±1.0
置戸	3.81±0.09 *1	5.79 × 10 <sup>-4</sup>	9.4	500-580°C	0.99	19.1±1.0

\*1はK-Ar年代法 (和田他, 2014, 2011), \*2はFT法 (杉原他, 2011) にて測定

ザイダーベルト図では, 500°Cで変化する 2 成分の磁化が読み取れる. 500°C以上の磁化は, マグマが噴出冷却した際に獲得した熱残留磁化であり, それより低温の成分は, その後の何らかの要因で獲得された 2 次磁化と考えられる. 磁化強度は 550~580°Cで失われるので, これらの原産地黒曜石の磁性鉱物はチタノマグネタイト (マグネタイト) である.

テリエ法実験 (SNRM-TRM 図) では, 各試料ともに pTRM テストは概ね良好であり, 加熱後の帯磁率変化も初期帯磁率の 20%以内で, 実験結果の信頼性は高い. SNRM-TRM 図では, ザイダーベルト図で変化した 500°Cまでの磁化はプロットの傾きが大きい. 500°C以上の高温成分はプロットに線形関係が得られ, この磁化は黒曜石の生成時の熱起源の磁化, 熱残留磁化 (TRM) と判断できる. 低温成分 (<500°C) の磁化は, SNRM-TRM 図での直線の急な傾きの特徴から (Sugiura & Nagata, 1975), 化学残留磁化 (CRM) の可能性が高い. CRM は熱水や水が関与して, 磁性鉱物が晶出したり, 変化する際に獲得される (Stacey & Banerjee, 1974).

黒曜石は石器製作時から, 剥離面が年代の経過とともに外界の水分を取り入れて, 水和層を形成する. CRM はその過程で獲得する可能性がある. 化学組成が同じ産地で, 気候や温度条件等が違わなければ, 水和層の厚さは経過時間に比例するので, 層厚の測定から剥離面の形成年代が推定でき, これを利用して, 黒曜石製石器の使用年代を調べる黒曜石水和層法も行われている (馬淵他, 2003). 黒曜石の磁化獲得が CRM に由来し, それが水和層に関係しているのならば, 層厚とテリエ法実験 (地磁気強度) から年代が推定できる可能性もあり, 今後の詳細な研究による検討が必要である.

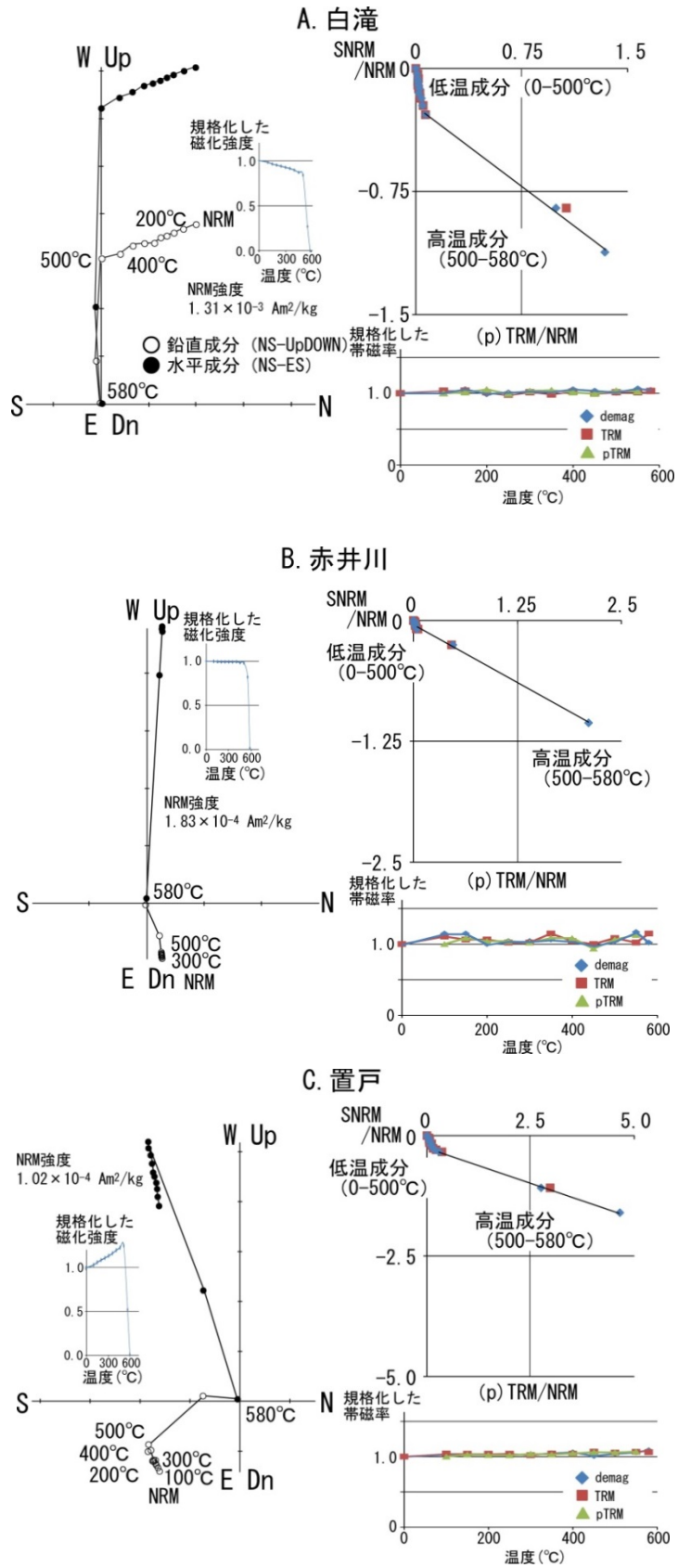


図 3-13. 原産地黒曜石の熱消磁・テリエ法実験の結果。A：白滝産，B：赤井川産，C：置戸産。

500°C以上の磁化の高温成分（3点のプロット）について、直線近似で各試料のテリエ法の標準偏差が 0.99 を超えたので、古地磁気強度を求めた。SNRM-TRM 図の近似直線から推定された地磁気強度と各原産地黒曜石の噴出年代を表 3-7 に示す。置戸産は 3 試料から得た平均値を示している。

これらの黒曜石の年代は、地磁気層序の松山逆磁極期とガウス正磁極期に対応する。現在の北海道の地磁気強度は 50 $\mu$ T であり、黒曜石から得られた地磁気強度は弱い。従来、数 Ma 頃の時代の地磁気強度についてはまだデータ数が少なく、得られた地磁気強度の詳細な検討はできないが、黒曜石が古地磁気の研究に利用できると判明したことは重要である。今後、白滝・赤井川の黒曜石について、露頭で定方位試料を採取することで、磁化方向から地磁気の逆転も議論できると考える。また、黒曜石のテリエ法実験で復元された各試料の地磁気強度の違いは、噴出年代と対応しているので、今後の研究結果の蓄積により、地磁気方向や強度のデータも黒曜石の原産地推定の判定指標の一つになると考える。

### 3.5.2. チャシコツ岬下 B 遺跡出土の発泡黒曜石

遺跡から出土する黒曜石には、ガラス光沢を失っていたり、剥離面の変質が起こっている場合がある。そうした特徴は、石器製作での民族事例や黒曜石の加熱実験から、人為的に石器が熱を受けた証拠と考えられており、黒曜石石器の製作や使用時の加工技術の研究において注目されている。しかし、これらの変質は被熱の場合だけでなく、表面に形成された水和層や土壌への埋没過程で受けた傷によっても容易に起こることが報告されている（中沢，2000）。そのため、遺跡出土の黒曜石が人為的な加熱を受けているかどうかの判別が必要とされている。黒曜石の磁化から熱履歴を研究し、遺跡出土黒曜石の被熱を証明できるか検討した。



図 3-14. 実験に用いたチャシコツ岬下 B 遺跡出土の黒曜石.

試料として、北海道斜里町のチャシコツ岬下 B 遺跡から出土した発泡が見られる黒曜石 3 点（No.12, 13, 14）を使用し、熱消磁とテリエ法実験を行った。図 3-14 に示した試料は、発泡や蒸し焼きになった可能性が考古学の観察から示唆されている。黒曜石は、自然界で形成される時に冷

却過程ではあまり発泡することは無く固化して、H<sub>2</sub>O を内部に含有する．その後高温まで加熱されると、H<sub>2</sub>O が気泡を作って黒曜石が膨張し、特有の光沢を失って白濁する．さらに高温の加熱を受けると発泡し、図 3-14No.12 の様な軽石の形状へ変化する(和田他, 2011)．

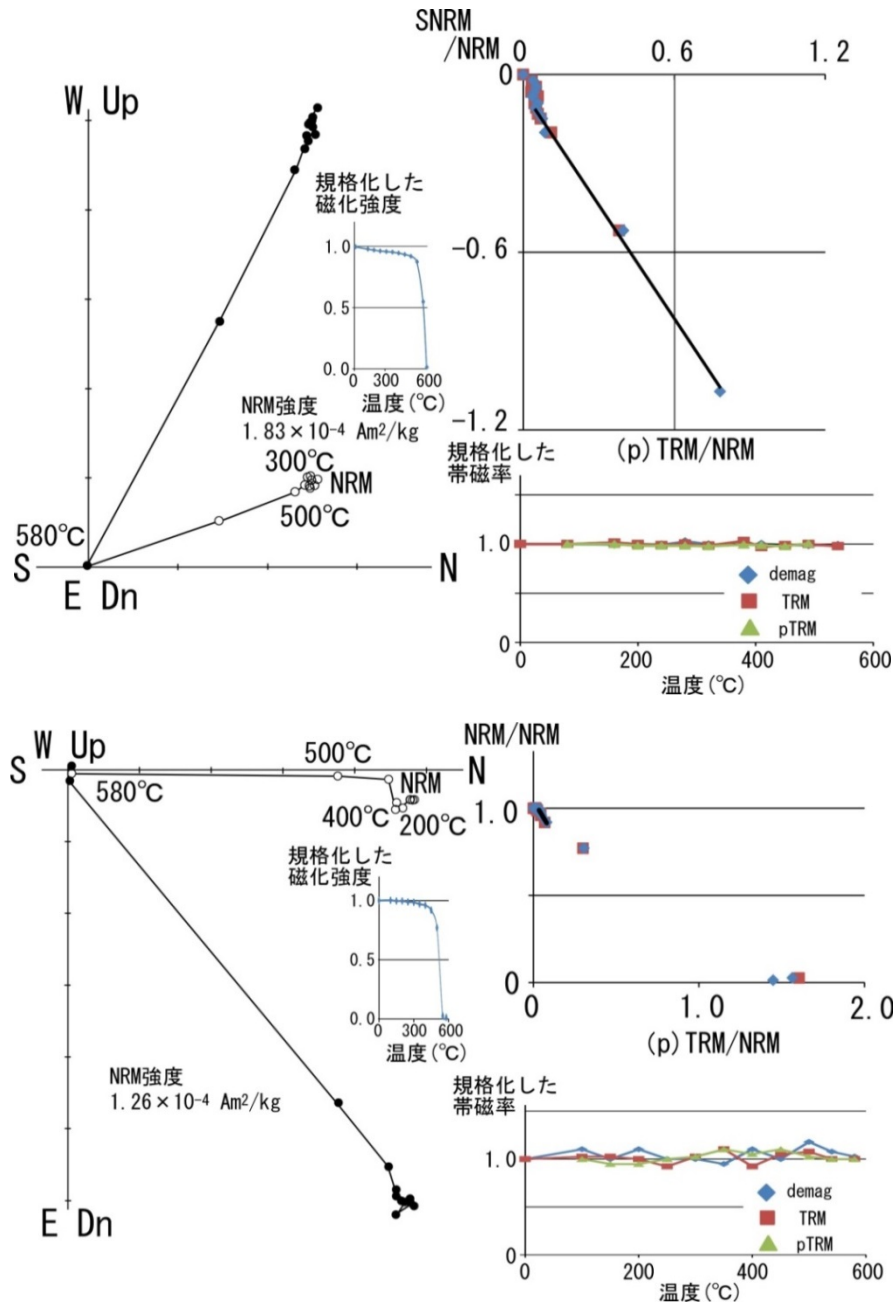


図 3-15. チャシコツ遺跡出土の黒曜石(No.13, 14)試料の熱消磁とテリエ法実験の結果，  
 上は試料 No.13，下は No.14 の結果である．各試料の結果は，熱消磁によるザイダーベルト図，テ  
 リエ法の SNRM-TRM 図，帯磁率の温度変化として示している．

図 3-15 には，試料 No.13, 14 の熱消磁実験の結果を載せている．各試料の左図のザイダーベルト

図では、プロットは原点に向かう直線上にあり、黒曜石の磁化は 1 成分であることを示している。試料 No.12 も含め、全ての試料で同様に安定な磁化を獲得していることが示された。

この熱消磁の結果より、実験で使用した黒曜石は、遺跡において人為的に 580°C以上の温度まで加熱され、当時の地磁気の下で再磁化したと推定される。黒曜石の被熱について、奥水・福岡(1991)は、加熱実験を行い、“黒曜石が光沢を失うには、古代の人達は木灰に黒曜石を埋め込んで 650°C以上の温度まで加熱する必要があった”と報告しており、本研究の磁化から求めた熱履歴と調和する。

図 3-15 の各試料の SNRM-TRM 図においてプロットに線形関係が得られ、黒曜石は遺跡での被熱による熱残留磁化を獲得していることが証明された。表 3-8 には、SNRM-TRM 図の直線から求めた地磁気強度を示している。試料 No.12 の結果では、直線性が悪かったので載せていない。2 試料から得た地磁気強度の平均は  $66.3 \pm 2.5 \mu\text{T}$  と求まった。

表 3-8. チャシコツ岬下 B 遺跡出土の黒曜石とテリエ法実験の結果。

sample No.	焼成状態	温度範囲 (°C)	標準偏差 直線回帰	推定磁場 強度 ( $\mu\text{T}$ )
13	蒸し焼き	350-580	0.99	$63.8 \pm 1.9$
14	発泡	200-450	0.99	$68.7 \pm 6.9$

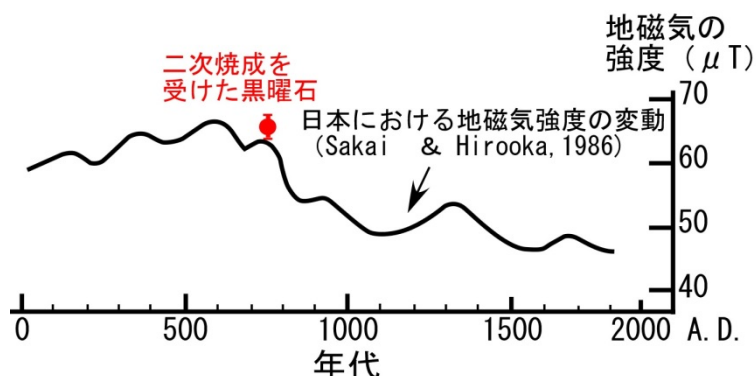


図 3-16. 発泡した黒曜石から得られた地磁気強度と過去 2000 年間の地磁気強度変化との対比。

チャシコツ岬下 B 遺跡の時代はオホーツク文化期 (8 世紀後半~9 世紀頃) であり、試料 No.13 の黒曜石はオホーツク文化期貼付文期の堅穴住居跡から出土している。図 3-16 では、黒曜石のテリエ法実験で得られた地磁気強度の平均値を過去 2000 年間に於ける日本の地磁気強度の変化 (Sakai & Hirooka, 1986) と比較している。得られた地磁気強度は現在よりかなり強く、A.D.400~800 年頃に対応する。実験試料が少なく、厳密な議論はできないが、オホーツク文化期の 8~9 世紀の地磁気強度として矛盾は無い。つまり、チャシコツ岬下 B 遺跡出土の黒曜石は 8~9 世紀頃に古代の人々が使用する為に被熱を受けたと考えられる。

本研究では、磁化を用いる熱履歴の研究が、遺跡出土黒曜石の被熱を実証するための従来にない有効な方法になり、更に考古地磁気の研究として年代推定も行えることを明らかにした。

### 3.6. まとめ

北海道内の遺跡で出土する黒曜石の主要な原産地である白滝、赤井川、置戸、十勝三股の黒曜石について磁気物性を研究した。超伝導磁力計や帯磁率計等を用いて、磁気物性のパラメータとして、残留磁化、帯磁率、等温残留磁化の獲得と交流消磁、s-ratio を測定した。その結果、帯磁率と磁化強度で産地が判別され、非破壊の磁化研究による黒曜石の原産地推定が可能であることが示された。

また、IRM の獲得消磁実験から得られた磁気物性のパラメータや s-ratio から黒曜石ごとの保磁力の違いが見られた。白滝産と置戸産黒曜石は保磁力が低く、マグネタイトを多く含むと思われる。一方、赤井川産黒曜石は保磁力が高く、白滝、置戸産黒曜石とは、磁性鉱物の含有比もしくはマグネタイトの粒径が異なることが推定された。

これらの結果を基に、上ノ国コンドウヤ遺跡出土の黒曜石について磁化特性から原産地を比較した。そして同資料について行った蛍光 X 線分析による産地推定の結果と対比した所、同様な結果が得られ、磁化特性による原産地推定の有用性が示された。

テリエ法実験からは、原産地黒曜石には生成時の熱残留磁化と共に、二次的な化学残留磁化が獲得されていることが分かり、黒曜石の水和層成長とも関連する磁化として注目される。また、黒曜石の残留磁化は安定で、原産地推定のバロメーターともなる古地磁気年代推定も行える可能性が示された。

また、先史時代の道具であった黒曜石遺物では、熱加工されている可能性が議論されていたが、磁化の熱実験から被熱が証明され、黒曜石遺物の発泡状態は、被熱による加工であるとする従来の説が支持できた。

本研究は、黒曜石の磁気物性による研究の基礎的な取り組みであり、今後さらに北海道における主要な原産地黒曜石の測定と、道内全ての地域から産出される黒曜石のデータを蓄積し、遺跡出土黒曜石の原産地推定の為の指標を研究していくことが望まれる。

黒曜石の磁化分析は、非破壊で効率よく試料が測定可能であり、蛍光 X 線分析と独立していることから、測定結果のクロスチェックにも適している。また、測定値が機械固有でないため、データの標準化を行う必要が無い。今後、別の磁気物性も用いてより精度良い磁気研究法を開発し、蛍光 X 線分析法と合わせた研究法で黒曜石原産地の研究を進めることが望まれる。

## 第4章 信州の原産地黒曜石と黒曜石製遺物の研究

### 4.1. 研究の概要

縄文時代において、信州産黒曜石は特に多様な流通形態で膨大な量が流通したと知られる(大工原, 2005)。信州は古代黒曜石の流通の中心を担う産地の一つであり、重要な研究対象となっている。本研究では、磁化研究を用いて、信州の黒曜石の産地の特徴を検討した。

長野県の信州原産地の黒曜石では、下諏訪、男女倉、和田峠等が原産地として知られている。和田峠・下諏訪の周辺では、黒曜石製石器を集中的に製作したと考えられる遺跡や、黒曜石原石を多量に貯蔵する遺跡が多くあり、原産地と消費地を中継していたと想定されている(宮坂・田中, 2001)。また鷹山遺跡群など大規模な黒曜石の採掘址も見つかっており、旧石器、縄文時代を通じて広範囲に流通する黒曜石の一大供給地であった。

本研究では、図4-1の男女倉、和田峠、下諏訪、長門、麦草峠の原産地で採取された黒曜石原石を対象とし、残留磁化、帯磁率、等温残留磁化の獲得と消磁特性、熱消磁、磁気ヒステリシスから各原産地の違いを検討した。その内容は Kanto & Sakai (2014) で示している。

帯磁率の測定では、信州産黒曜石の帯磁率は弱かったため、感度が高い Kappabridge 帯磁率計を使用した。また、帯磁率と磁化強度は、重量で規格化した。IRM の獲得は、パルスマグネタイザーで 1000mT までの磁場を与え、その後、交流消磁を行い、試料の保磁力分布の指標として s-ratio も研究した。また黒曜石に含有される磁性鉱物を推察する為、580℃までの加熱による熱消磁実験を行った。実験試料は、黒曜石を約 1cm 角の大きさに切りだして周りを耐熱ボンドで固めて用意した。



図 4-1. 信州の主要な黒曜石原産地.



## 4.2. 研究試料

信州産原産地は、麦草峠がある北八ヶ岳地区と下諏訪、和田峠、男女倉、長門の原産地が集まる霧ヶ峰地区に分かれ、さらに霧ヶ峰地区は分水嶺で二分される（宮坂，2012）．原産地は標高 1000m 以上に位置し，北八ヶ岳地区では露頭が多く認められているが，霧ヶ峰地区は二次堆積物に原石が分布することが多い（堤，2002）．

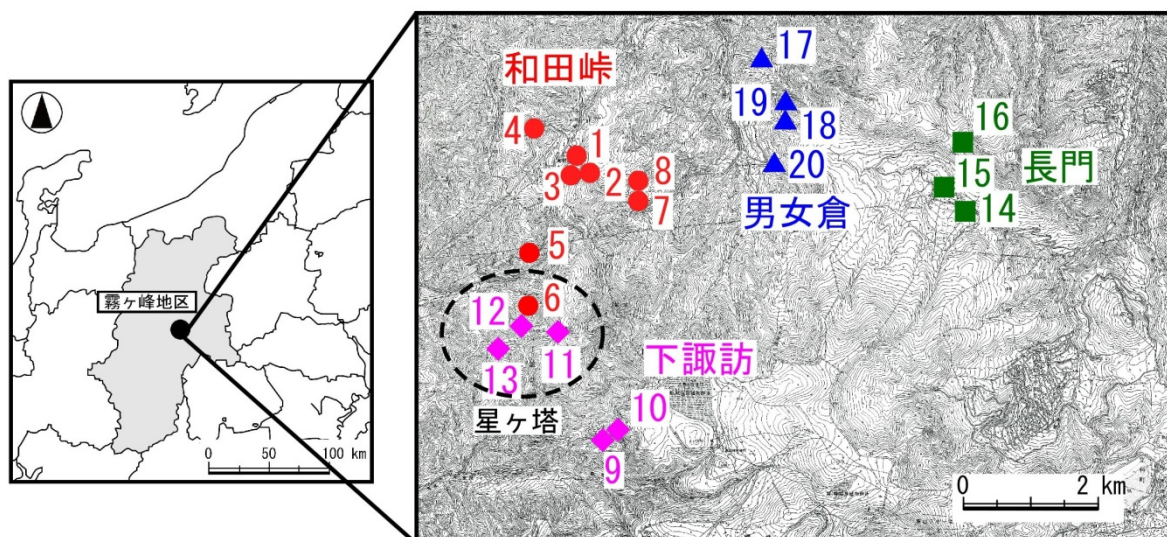


図 4-2. 霧ヶ峰地区の黒曜石原石の採取地点，図中番号は，表 4-1 の採取地点の欄に示した番号と対応している。

表 4-1. 研究試料.

地区	試料	原産地グループ	採取地点	試料数
霧ヶ峰		和田峠	東餅屋東 A(1), B(2), C(3)	17
			小深沢(4)	6
			和田峠西(5)	3
			星ヶ塔 A(6)	3
北八ヶ岳		下諏訪	ツチヤ沢(7)	7
			ツチヤ沢上(8)	5
			星ヶ台 A(9), B(10)	10
			星ヶ塔 B, 星ヶ塔_乗越(11)	23
霧ヶ峰		長門	星ヶ塔_1470m地点(12)	7
			鷹山川 A(14)	8
			鷹山川 B(15)	1
霧ヶ峰		男女倉	星ヶ塔_鉄塔下(13)	1
			高松沢(17)	14
			牧ヶ沢 A(18), B(19)	7
霧ヶ峰		長門	ブドウ沢右岸(20)	1
			星ヶ峠(16)	1



本研究では、図 4-2 の男女倉，和田峠，下諏訪，長門，麦草峠の各産出地点から採取した黒曜石原石を対象に、119 点の試料を分析した。黒曜石の採取地点と分析試料を表 4-1 に示す。各採取地点をまとめる原産地グループは、二宮（1993）が機器中性子放射化分析によって得られた各黒曜石の元素組成比から解析，判別した結果に基づいている。

### 4.3. 磁化研究の結果

#### 4.3.1. 残留磁化と帯磁率

表 4-2 に、各地点の黒曜石の磁化強度と帯磁率について平均と誤差を示している。帯磁率では、男女倉の試料の値が他地点の値に比べて大きかった。また磁化強度では、男女倉と下諏訪の試料が強い傾向を示した。

図 4-3 では、各原産地の磁化強度と帯磁率をまとめた。縦軸の磁化強度は対数で示している。図 4-4 は、4 つの原産地グループ毎に、各採取地点の黒曜石の帯磁率と磁化強度を示した。

図 4-3 の帯磁率と磁化強度による分類では、各原産地グループで特徴が得られ、さらにそれぞれ幾つかの採取地点にも差異が見られた。そこで、図 4-4 に示す様に各原産地グループにおいて採取地点毎でみると、より良く分類された。和田峠グループでは、距離が近い 4 つの地点の磁化特性には明確な違いがあり、各地点が分類できた。小深沢とツチャ沢上地点のデータは重複しているが、蛍光 X 線分析でもこの 2 地点は同じ群であると報告されており（明治大学古文化財研究所，2011），噴出起源を同じくする可能性が考えられる。

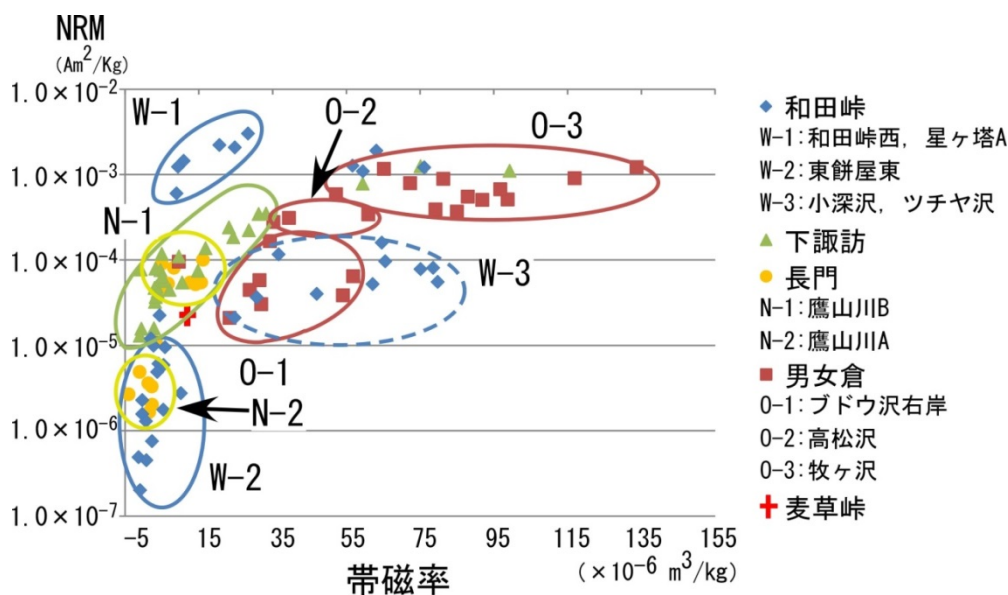


図 4-3. 信州産原産地黒曜石から得た磁化強度と帯磁率。

表 4-2. 原産地黒曜石の帯磁率と磁化強度の平均値.

原産地グループ	採取地点	試料数	帯磁率 ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ )	NRM ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ )
和田峠	東餅屋東	16	2.8 ( $\pm 3.1$ )	$5.09 \times 10^{-6}$ ( $\pm 5.95 \times 10^{-6}$ )
	小深沢・ツチヤ沢上	11	64.7 ( $\pm 30.3$ )	$6.43 \times 10^{-5}$ ( $\pm 4.66 \times 10^{-5}$ )
	ツチヤ沢	7	64.1 ( $\pm 12.1$ )	$7.91 \times 10^{-4}$ ( $\pm 7.64 \times 10^{-4}$ )
	和田峠西・星ヶ塔 A	6	17.2 ( $\pm 8.5$ )	$1.76 \times 10^{-4}$ ( $\pm 8.51 \times 10^{-4}$ )
下諏訪	星ヶ台	9	35.2 ( $\pm 35.4$ )	$4.33 \times 10^{-4}$ ( $\pm 4.80 \times 10^{-4}$ )
	星ヶ塔	21	5.8 ( $\pm 11.5$ )	$8.52 \times 10^{-5}$ ( $\pm 9.61 \times 10^{-5}$ )
男女倉	牧ヶ沢	12	88.4 ( $\pm 22.0$ )	$7.12 \times 10^{-4}$ ( $\pm 2.84 \times 10^{-4}$ )
	高松沢	4	36.3 ( $\pm 21.1$ )	$2.56 \times 10^{-4}$ ( $\pm 1.10 \times 10^{-4}$ )
	ブドウ沢右岸	7	37.3 ( $\pm 12.9$ )	$6.03 \times 10^{-5}$ ( $\pm 4.90 \times 10^{-5}$ )
長門	鷹山川 A	7	2.6 ( $\pm 2.5$ )	$2.26 \times 10^{-5}$ ( $\pm 3.52 \times 10^{-5}$ )
	鷹山川 B	8	6.2 ( $\pm 12.2$ )	$4.94 \times 10^{-5}$ ( $\pm 3.32 \times 10^{-5}$ )
	星糞峠	1	3.4	$1.09 \times 10^{-5}$
麦草峠		1	11.8	$2.28 \times 10^{-5}$

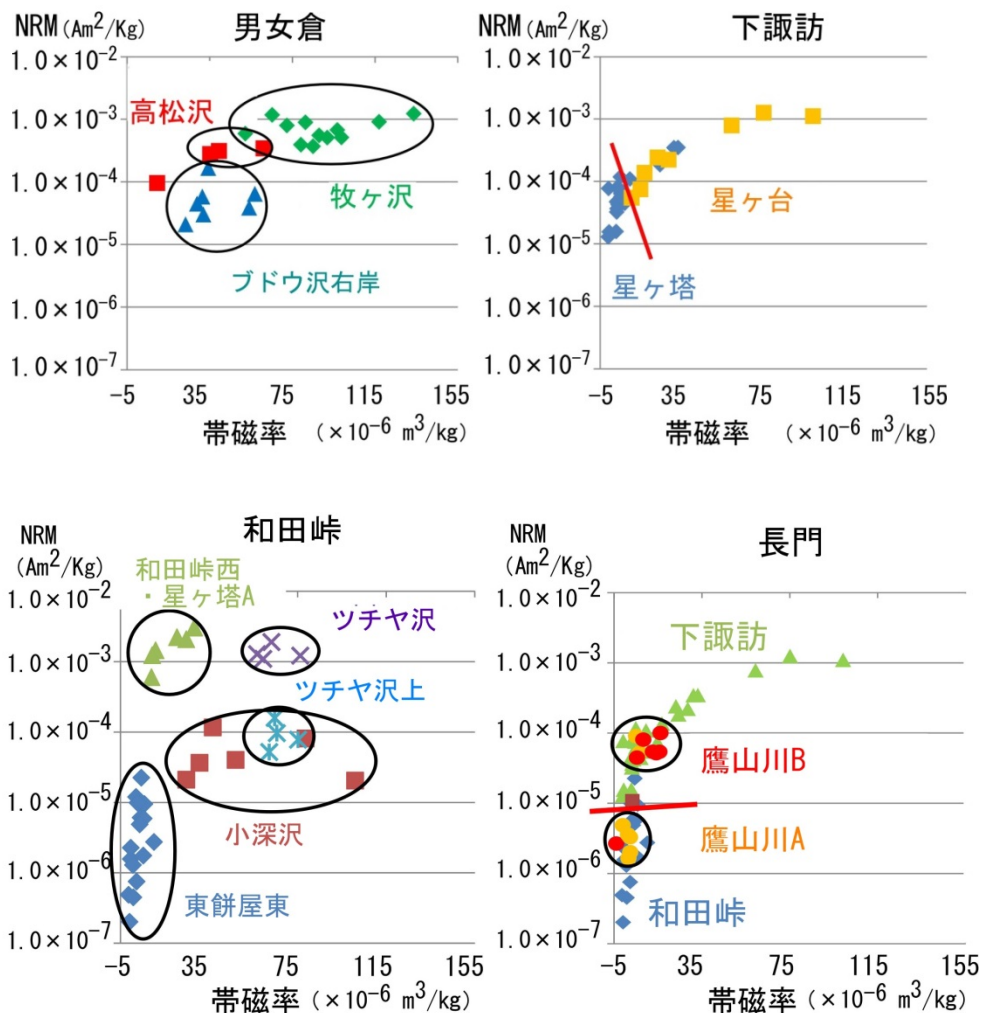


図 4-4. 各原産地での採取地点毎の磁化強度と帯磁率, 上左:男女倉, 上右:下諏訪, 下左:和田峠, 下右:長門.

長門グループは、和田峠・下諏訪のグループと似た磁化特性を持ち、グループとしての分類は難しかった。明治大学古文化財研究所（2011）でも、長門と和田峠の両グループは判別できないと報告されている。ただ元素分析と異なり、磁化特性では鷹山川 A 地点と鷹山川 B 地点が区別され、鷹山川 A 地点の特性は和田峠グループに、鷹山川 B 地点の特性は下諏訪グループに分類された。

和田峠グループの黒曜石の研究で認められたように、産出地点間の距離と元素分析や磁気物性の研究による分類区分が比例しないことがある。この原因は興味を持たれ、黒曜石の複雑な産出を磁気物性も含め様々な物性から研究することが必要だと思われる。

#### 4.3.2. IRM 獲得と SIRM 消磁

5つの産地グループの黒曜石について、IRM 獲得特性と SIRM の消磁特性を求め、表 4-3 と図 4-5 に結果をまとめている。図では、横軸には作用した磁場の強度を、縦軸には各段階の IRM を 1000mT で獲得させた SIRM で割った値を取っている。

5つの産地グループでは、下諏訪グループは磁化し易く消磁され易い特徴があり、保磁力が低い。対して麦草峠は、保磁力が最も高かった。表 4-3 には、SIRM, MDF (Median Destructive Field) と s-ratio を示している。MDF は SIRM が交流消磁で半減する時の磁場強度である。それらの結果からも、下諏訪グループの保磁力は低く、麦草峠の保磁力が高いことがわかり、保磁力の分布にも特徴がある。

また、IRM の獲得と SIRM の消磁から得た s-ratio は、表 4-3 の様に 1 に近いが、各産地で違いがあり、産地の特徴を示すと考えられる。測定結果から、信州産の黒曜石は、保磁力の低いマグネタイトが多いことを示している。

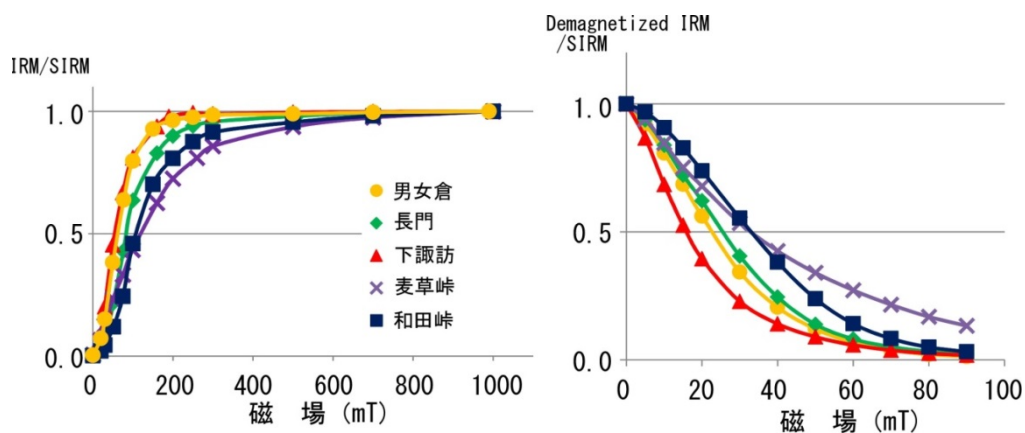


図 4-5. 左：等温残留磁化の獲得曲線，右：消磁曲線。

表 4-3. 原産地黒曜石の磁化特性.

原産地グループ	採取地点	試料数	SIRM (Am <sup>2</sup> /kg)	MDF (mT)	S-ratio
和田峠	東餅屋東	2	7.14 × 10 <sup>-4</sup> , 7.24 × 10 <sup>-3</sup>	108.5, 88.4	0.952
	小深沢・ツチャ沢上	5	5.30 × 10 <sup>-2</sup> (± 6.56 × 10 <sup>-2</sup> )	32.7 (± 10.5)	0.998
	ツチャ沢	2	6.80 × 10 <sup>-2</sup> , 1.94 × 10 <sup>-3</sup>	88.4	0.998
	和田峠西・星ヶ塔 A	3	1.13 × 10 <sup>-2</sup> (± 8.68 × 10 <sup>-3</sup> )	99.2, 98.2	0.974
下諏訪	星ヶ台	2	1.92 × 10 <sup>-2</sup> , 1.62 × 10 <sup>-2</sup>	55, 31.6	0.988
	星ヶ塔	2	2.24 × 10 <sup>-3</sup> , 3.35 × 10 <sup>-4</sup>	79.5	0.991
男女倉	牧ヶ沢	2	4.53 × 10 <sup>-2</sup> , 1.23 × 10 <sup>-2</sup>	63.4, 57.8	0.995
	高松沢	2	1.25 × 10 <sup>-3</sup> , 5.31 × 10 <sup>-3</sup>	83.9	0.950
	ブドウ沢右岸	2	4.87 × 10 <sup>-3</sup> , 2.65 × 10 <sup>-3</sup>	64.3	0.962
長門	鷹山川 A	2	8.63 × 10 <sup>-4</sup> , 4.34 × 10 <sup>-4</sup>	78.6	0.947
	鷹山川 B	3	7.37 × 10 <sup>-3</sup> (± 9.23 × 10 <sup>-3</sup> )	69.8 (± 18.8)	0.988
	星糞峠	1	5.09 × 10 <sup>-4</sup>	53.8	-
麦草峠		1	1.38 × 10 <sup>-2</sup>	120.4	0.910

### 4.3.3. 熱消磁実験, REM 値, 磁気ヒステリシス

#### (1) 熱消磁実験

図 4-6 に、下諏訪、男女倉、和田峠産黒曜石の段階熱消磁の結果を示す。横軸に加熱温度段階を取り、縦軸には各温度で獲得された磁化強度を加熱前の NRM で規格化した値を取っている。

3つの産地グループの黒曜石は、490~520℃付近から磁化強度は減り、580℃までには無くなる。マグネタイトのキュリー温度(580℃)から、これらの黒曜石の磁性は主にチタノマグネタイトが担っていると考えられる。

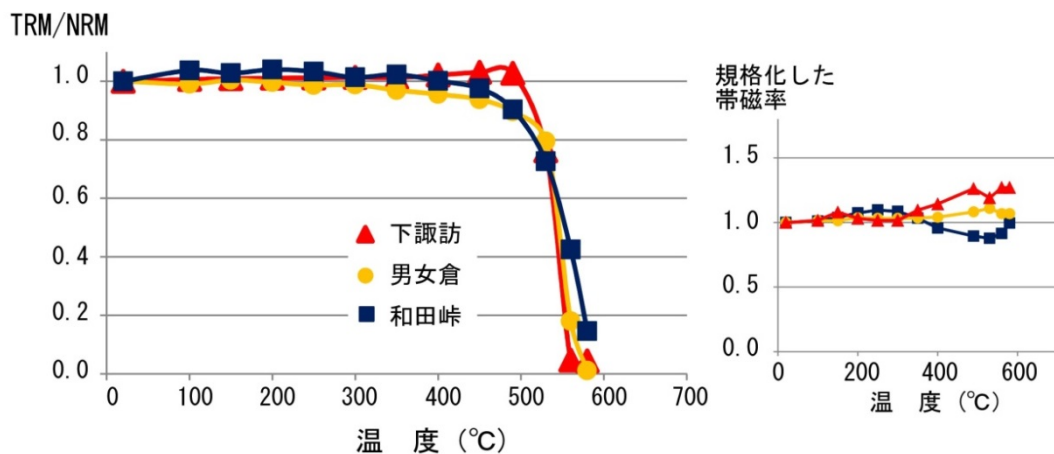


図 4-6. 段階熱消磁の結果.

#### (2) REM 値

REM 値は、試料の NRM と SIRM の比で表され、試料の磁化の獲得機構を示す指標の一つである。Wasilewski (1999) は、熱残留磁化 (TRM) によって磁化が獲得された鉱物や自然岩の試料は、磁性の強さや試料の種類に関わらず、REM 値は 0.05 より小さいことを示唆している。表 4-4 に、信州

産黒曜石とその比較に堆積残留磁化（DRM：detrital remanent magnetization）や熱残留磁化によって磁化を獲得した試料の REM 値を示す。

黒曜石の REM 値は、0.007～0.04 で 0.05 より小さく、焼土試料と近い値を示しており、黒曜石の磁化は熱残留磁化である可能性が高いと考えられる。

表 4-4. 様々な試料の REM 値.

試料		磁化獲得機構	REM	NRM (Am <sup>2</sup> )	SIRM (Am <sup>2</sup> )
堆積物		DRM	0.0050	$1.94 \times 10^{-7}$	$3.87 \times 10^{-5}$
			0.0049	$1.04 \times 10^{-7}$	$2.10 \times 10^{-5}$
			0.0020	$4.93 \times 10^{-8}$	$2.49 \times 10^{-5}$
焼土		TRM	0.0524	$2.17 \times 10^{-6}$	$4.15 \times 10^{-5}$
			0.0615	$2.50 \times 10^{-6}$	$4.07 \times 10^{-5}$
			0.0636	$3.99 \times 10^{-6}$	$6.27 \times 10^{-5}$
安山岩		TRM	0.0068	$1.63 \times 10^{-6}$	$2.38 \times 10^{-4}$
黒曜石	男女倉 長門 下諏訪 麦草峠 和田峠	TRM	0.0290	$1.87 \times 10^{-6}$	$6.47 \times 10^{-5}$
			0.0138	$6.22 \times 10^{-8}$	$4.50 \times 10^{-6}$
			0.0409	$1.38 \times 10^{-6}$	$3.38 \times 10^{-5}$
			0.0101	$4.14 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^{-6}$
			0.0072	$7.84 \times 10^{-9}$	$1.09 \times 10^{-6}$

### (3) 磁気ヒステリシス

磁性鉱物がマグネタイトかチタノマグネタイトの場合、磁気ヒステリシスから求まるパラメータから磁区構造を検討できる。解析では Day Plot 図が利用される（Day et al., 1977）。

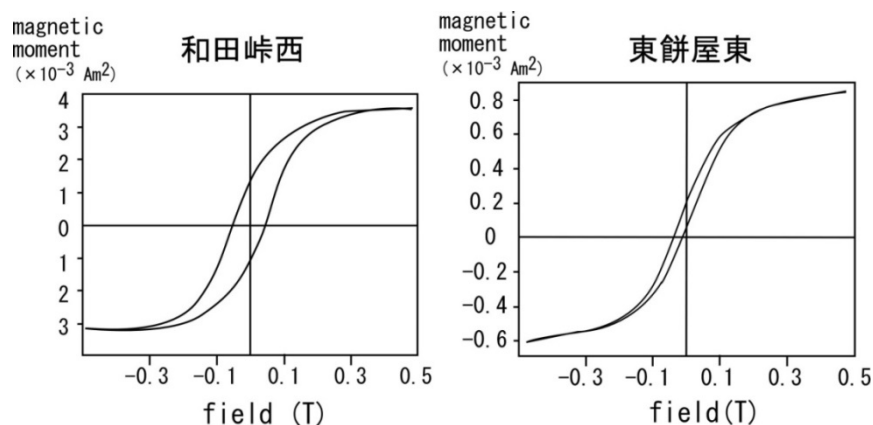


図 4-7. 磁気ヒステリシス曲線の例，左：和田峠西，右：東餅屋東の黒曜石の結果。

図 4-7 は、下諏訪グループの和田峠西地点と東餅屋東地点の黒曜石から得た磁気ヒステリシス曲線の例である。Day plot 解析の図では、飽和磁化(Ms)と飽和残留磁化(Mrs)の比および、保磁力(Hc)と残留保磁力(Hcr)の比を利用する。図 4-8 は、Dunlop(2002)がまとめた Day Plot 図における磁区構造の領域区分を示しており、縦軸と横軸には、Mrs/Ms と Hcr/Hc の値をそれぞれ表している。そして本研究で得た黒曜石の各採取地点のデータを、同図と表 4-5 に示した。Dunlop(2002)は、Day Plot 図での PSD 領域は、試料中の SD・MD 粒子の割合を示すと述べており、各試料の疑似単磁区 (PSD)

領域での違いは、各黒曜石内の単磁区 (SD)・多磁区 (MD) 粒子の割合の差を示すと考えられる。

図 4-8 での本研究の試料の磁区構造は、PSD の領域内かその近傍に集まっている。和田峠グループの和田峠西と星ヶ塔 A 地点のデータがプロットされた位置は、SD 粒子がより多いことを示唆する。和田峠西地点は、表面がざらつき、不透明な漆黒中に縞状に灰白色の球顆がみられ（下諏訪町教育委員会，2008），肉眼的にも特徴がある。この 2 つの採取地点は、帯磁率と磁化強度と同様に、磁区構造からも特徴的な試料だと得られた。

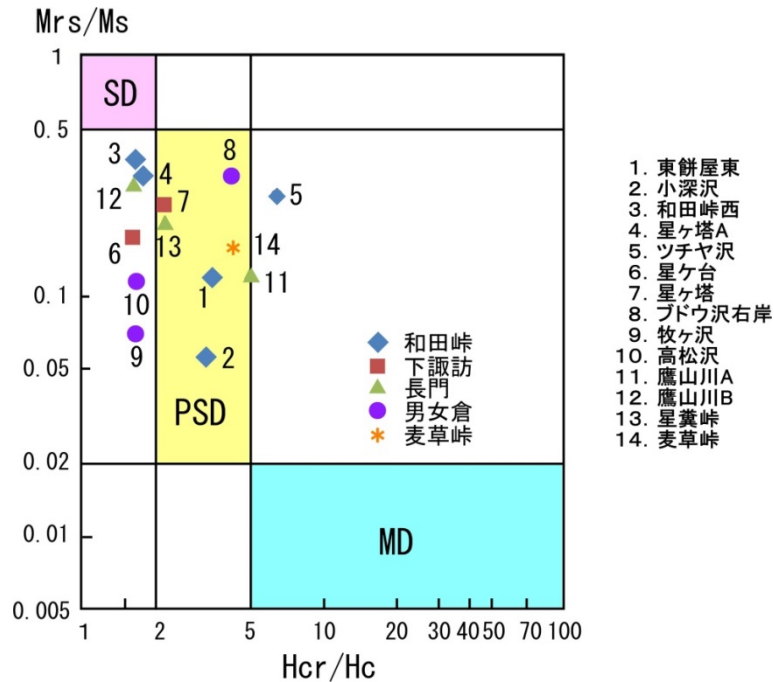


図 4-8. Day Plot 図，図中の番号は，表 4-5 のサンプル No.と対応している。

表 4-5. 原産地黒曜石の磁気ヒステリシスより得られた磁気特性。

No.	Ms (Am <sup>2</sup> )	Mrs (Am <sup>2</sup> )	Mrs/Ms	Hc (mT)	Hrc (mT)	Hrc/Hc	採取地点
1	7.24 × 10 <sup>-7</sup>	8.56 × 10 <sup>-8</sup>	0.12	14.72	52.29	3.55	東餅屋東
2	5.24 × 10 <sup>-5</sup>	2.93 × 10 <sup>-6</sup>	0.06	5.39	17.54	3.25	小深沢
3	3.42 × 10 <sup>-6</sup>	1.26 × 10 <sup>-6</sup>	0.37	47.58	79.57	1.67	和田峠西
4	9.23 × 10 <sup>-7</sup>	2.91 × 10 <sup>-7</sup>	0.32	40.88	73.70	1.80	星ヶ塔 A
5	8.16 × 10 <sup>-6</sup>	5.60 × 10 <sup>-7</sup>	0.07	6.59	42.63	6.47	ツチヤ沢
6	3.72 × 10 <sup>-6</sup>	6.48 × 10 <sup>-7</sup>	0.17	16.26	26.85	1.65	星ヶ台
7	2.24 × 10 <sup>-6</sup>	5.30 × 10 <sup>-7</sup>	0.24	20.68	45.52	2.20	星ヶ塔
8	1.95 × 10 <sup>-6</sup>	2.25 × 10 <sup>-7</sup>	0.12	10.35	42.77	4.13	ブドウ沢右岸
9	5.76 × 10 <sup>-6</sup>	1.81 × 10 <sup>-6</sup>	0.31	28.72	48.26	1.68	牧ヶ沢
10	7.73 × 10 <sup>-7</sup>	2.03 × 10 <sup>-7</sup>	0.26	27.92	47.67	1.71	高松沢
11	7.77 × 10 <sup>-8</sup>	9.68 × 10 <sup>-9</sup>	0.12	13.89	69.63	5.01	鷹山川 A
12	6.70 × 10 <sup>-7</sup>	1.96 × 10 <sup>-7</sup>	0.29	32.52	53.59	1.65	鷹山川 B
13	1.88 × 10 <sup>-7</sup>	3.85 × 10 <sup>-8</sup>	0.20	19.99	44.16	2.21	星糞峠
14	1.91 × 10 <sup>-5</sup>	3.01 × 10 <sup>-6</sup>	0.16	15.06	64.37	4.27	麦草峠



#### 4.4. 富山県内遺跡出土黒曜石との比較

##### 4.4.1. 魚津産黒曜石

富山県には魚津市の山中の大菅沼や坪野周辺に黒曜石原産地が所在することが報告されている。石器材料としてはあまり上質ではなく、産出量も限られている。麻柄（1981）により、図 4-9 に示す大菅沼から坪野への林道で、表土層下の砂礫層に二次的な堆積物として広範囲に含有されることが確認されている。図 4-10 に示すように、魚津産黒曜石は、不透明で不純物が多く含まれ、表面は風化により海綿状となっている。割れ口は光沢をもつが、貝殻状断口が認められず、肉眼観察で他の黒曜石と容易に区別可能であり、ピッチストーン（松脂岩）に分類される可能性が示唆されている（山本，2013）。富山県内では、縄文前期後半から中期前半を中心に信州産黒曜石が多く流通するが、中期後半に減少してくるにつれ、県東部の遺跡で魚津産黒曜石が利用されるようになる（魚津歴史民俗博物館，1993）。

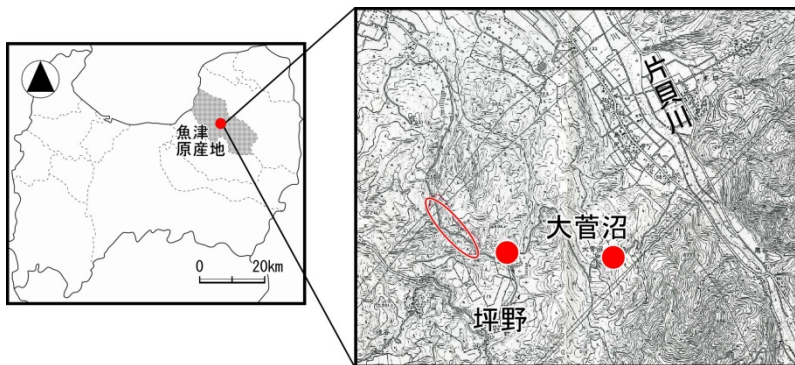


図 4-9. 魚津産黒曜石原産地の位置。



図 4-10. 魚津産黒曜石。

##### 4.4.2. 魚津市内遺跡出土黒曜石の原産地推定

魚津市内の遺跡出土黒曜石（魚津歴史民俗博物館収蔵）について、(1) MS-2 および Kappabride による帯磁率測定、(2) 超伝導磁力計による NRM 測定を行った。また磁気物性の結果を検証するため、蛍光 X 線分析による原産地推定も行った。図 4-11 に研究資料を示す。分析を行った資料は、天神山遺跡出土 6 点、天神野新遺跡出土 17 点、早月上野遺跡出土 1 点である。



図 4-11. 分析した黒曜石資料，左 6 点が天神山遺跡，右 1 点が早月上野遺跡から出土している。

#### 4.4.2.1. 蛍光 X 線分析による原産地推定

蛍光 X 線分析には東京学芸大学のセイコー電子工業製 SEA - 5120 を使用した。鉄、カルシウム、カリウムに、マンガン、ストロンチウム、ルビジウムを加えた 6 元素で測定し、各元素の酸化物の総和を 100 とする重量濃度比を算出した。試料室は大気雰囲気下、加速電圧 50kV、計測時間 120 秒での測定を各 3 回ずつ行った。

表 4-6. 東日本における主要な黒曜石原産地の 6 元素組成 (wt%)。

	MnO	FeO	SrO	CaO	Rb <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
高原山	1.4	48.5	0.6	20.7	0.6	28.2
小深沢	3.7	28.2	0.1	14.7	1.8	51.5
男女倉	2.5	32.0	0.4	16.1	1.0	48.0
星ヶ塔	3.1	27.3	0.2	13.8	0.9	54.6
麦草峠	1.6	33.8	0.7	17.2	0.6	46.0
神津島	3.2	33.8	0.5	19.1	0.6	42.8
畑宿	2.4	61.4	1.0	23.9	0.1	11.3
柏峠	1.4	51.1	0.6	24.0	0.3	22.7
上多賀	1.7	53.1	0.9	24.2	0.2	19.9
板山	3.3	29.0	0.4	17.7	1.1	48.5
月山	4.3	30.0	0.6	17.4	0.8	46.8

表 4-7. 魚津市内遺跡出土黒曜石製遺物の原産地推定結果 (XRF 分析は wt%で表している)。

No.	出土遺跡	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	CaO	Rb <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	XRF分析	磁気物性
1	天神新	3.2	26.3	0.3	14.2	1.1	54.9	星ヶ塔	下諏訪
2	天神新	2.0	38.5	0.5	18.5	0.5	40.0	男女倉?	男女倉?
3	天神新	3.3	25.8	0.3	14.3	1.0	55.3	星ヶ塔	下諏訪
4	天神新	3.0	24.9	0.3	14.1	1.0	56.8	星ヶ塔	下諏訪
5	天神新	0.1	77.1	6.6	3.0	0.0	13.3	不明	星ヶ塔A?
6	天神新	2.9	22.2	0.2	13.4	0.9	60.4	星ヶ塔	下諏訪
7	天神新	2.1	97.6	0.0	0.2	0.0	0.1	不明	下諏訪?
8	天神新	3.0	24.7	0.3	13.6	0.9	57.5	星ヶ塔	下諏訪
9	天神新	3.1	25.6	0.3	14.2	1.0	55.8	星ヶ塔	下諏訪
10	天神新	3.2	24.7	0.3	14.0	1.0	56.9	星ヶ塔	星ヶ塔A?
11	天神新	3.3	25.4	0.3	15.2	1.0	54.8	星ヶ塔	星ヶ塔A?
12	天神新	3.3	25.1	0.3	14.4	0.9	56.1	星ヶ塔	下諏訪
13	天神新	2.5	19.6	0.2	11.8	0.8	65.2	星ヶ塔	下諏訪
14	天神新	3.1	25.4	0.3	14.4	1.0	55.8	星ヶ塔	下諏訪
15	天神新	3.1	24.9	0.3	15.6	1.0	55.0	星ヶ塔	下諏訪?
16	天神新	3.4	25.7	0.1	13.1	0.8	56.8	星ヶ塔	星ヶ塔A?
17	天神新	3.1	25.2	0.2	13.5	0.9	57.2	星ヶ塔	下諏訪
18	早月上野	1.8	35.7	0.4	16.3	0.9	44.9	—	魚津
19	天神山	3.1	25.4	0.2	15.0	0.9	55.4	星ヶ塔	下諏訪
20	天神山	2.9	25.6	0.2	15.4	0.9	55.1	星ヶ塔	和田峠
21	天神山	3.2	25.4	0.2	15.9	0.8	54.6	星ヶ塔	下諏訪
22	天神山	2.9	23.8	0.1	13.0	0.7	59.5	星ヶ塔	下諏訪
23	天神山	2.3	19.8	0.1	12.2	0.6	65.0	星ヶ塔	下諏訪
24	天神山	3.1	24.9	0.1	16.1	0.8	55.1	星ヶ塔	下諏訪?





図 4-13 には、信州の原産地黒曜石から得られた帯磁率/磁化強度図に各遺跡出土黒曜石遺物の測定結果を併せてプロットした。富山県内では魚津産黒曜石が出土するため、原産地データとして魚津産も NRM と帯磁率を測定し、共にプロットしている。また、長門産黒曜石は和田峠産、下諏訪産黒曜石と判別できないため、帯磁率/磁化強度図より除外した。遺跡出土黒曜石の測定結果は、水色の◆で示している。表 4-7 では、図 4-13 より推定される原産地を XRF 分析の結果と比較している。XRF 分析での星ヶ塔は、下諏訪に対応する地点である。

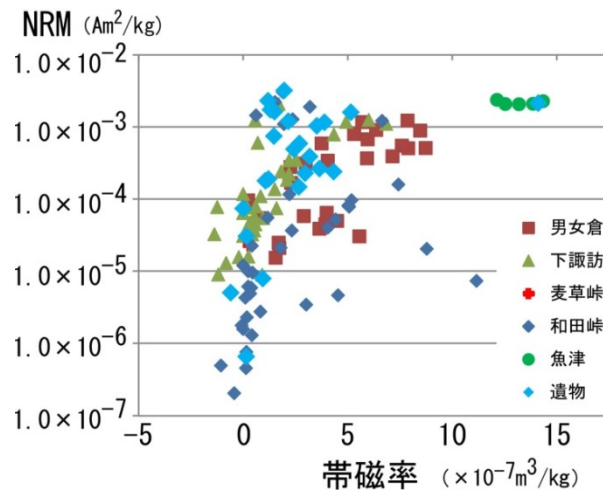


図 4-13. 信州産黒曜石の帯磁率/磁化強度図に魚津市内遺跡出土黒曜石の結果をプロットした。

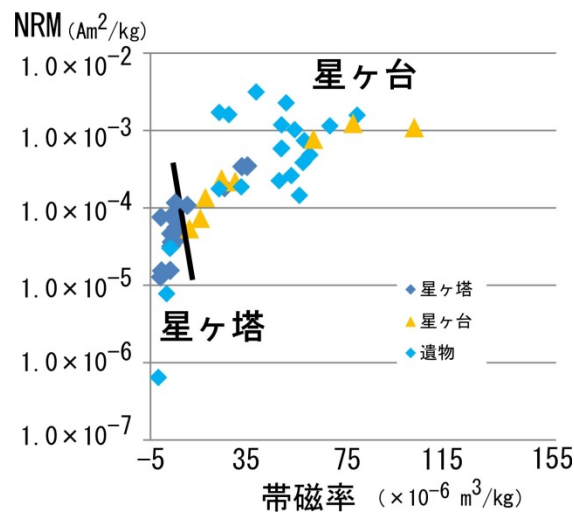


図 4-14. 下諏訪グループ内の磁化強度/帯磁率図に魚津市内各遺跡出土黒曜石の結果をプロットした。

魚津産黒曜石は、帯磁率も磁化強度も大きく、他の信州産黒曜石と明確に判別できる。早月上野遺跡出土資料である No.18 は魚津産黒曜石と同じ特徴を示し、魚津産であることが確認された。それ以外は、下諏訪産黒曜石の特徴を示す黒曜石が多く、XRF 分析と同様の傾向が得られた。星ヶ塔 A と和田峠西地点の領域にプロットされた黒曜石が数点あった。XRF 分析では、和田峠産黒曜石と

推定された黒曜石は見られておらず、この領域の黒曜石は、測定値のばらつきである可能性が高い。No.2 は男女倉産と下諏訪産の境界範囲にプロットされたため判断しにくいですが、男女倉産により近しく、XRF 分析結果が追認された。

次に、kappabridge を使用して帯磁率をより精度良く測定し得られた結果を、下諏訪グループ内の各採取地点の帯磁率/磁化強度図と併せてプロットした（図 4-14）。蛍光 X 線分析による推定で下諏訪産ではなかった No.2, 5, 7, 18 は除外している。その結果、下諏訪産と推定された黒曜石製遺物の多くが星ヶ台地点の特徴を示した。

#### 4.4.3. 長野県内遺跡出土黒曜石の原産地推定

##### 4.4.3.1. 和田峠フヨーライト（芙蓉パーライト）採掘坑産黒曜石

和田峠フヨーライト採掘場から採取された黒曜石原石 27 点を研究し、NRM と帯磁率の測定結果を和田峠内の産出地点毎の帯磁率/磁化強度図にプロットした（図 4-15）。

測定結果は、ほぼ和田峠西・星ヶ塔 A 地点の領域に集中している。和田峠西地域は現在もパーライト業者による工業用の黒曜石の採掘が行われており、今回測定を行った黒曜石もそれらの地点から採取されていることから、結果は妥当であると言える。

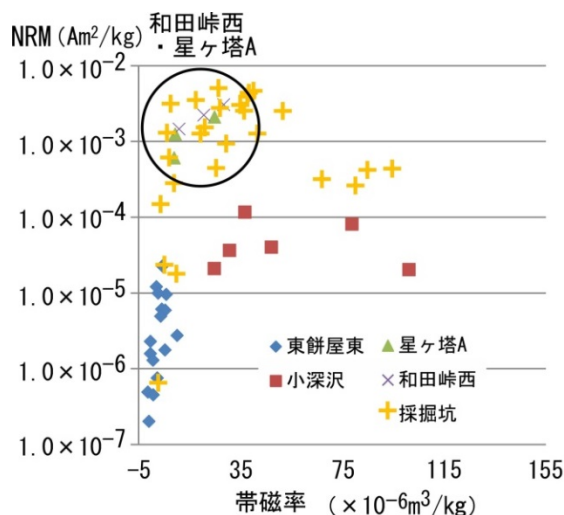


図 4-15. 和田峠グループ内の磁化強度/帯磁率図に採掘坑産黒曜石の結果をプロットした。

##### 4.4.3.2. 男女倉Ⅲ遺跡出土黒曜石

男女倉Ⅲ遺跡から採取された黒曜石 44 点について、磁気物性と蛍光 X 線分析による原産地推定を行った。

###### (1) 蛍光 X 線分析による原産地推定

男女倉Ⅲ遺跡で採取された黒曜石 15 点について、蛍光 X 線分析を行い 6 元素組成から原産地データとの類似度を検証した。図 4-16 にクラスター分析の結果を、表 4-8 に原産地推定結果の一覧表を示す。

表 4-8. 男女倉Ⅲ遺跡出土黒曜石製遺物の原産地推定結果 (XRF 分析は wt% で表している)。

No.	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	CaO	Rb <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	XRF 分析	磁気物性
1	3.3	25.6	0.1	13.2	0.8	57.0	星ヶ塔	下諏訪
2	3.1	28.5	0.1	12.8	1.3	54.2	星ヶ塔	男女倉
3	3.2	28.3	0.1	12.7	1.3	54.3	星ヶ塔	下諏訪?
4	3.9	26.7	0.0	12.9	1.7	54.7	小深沢	和田峠?
5	3.7	28.1	0.0	12.6	1.7	53.9	小深沢	男女倉?
6	2.7	30.2	0.4	16.4	1.1	49.3	男女倉	男女倉?
7	4.1	24.6	0.0	14.0	1.9	55.5	小深沢	下諏訪
8	3.4	26.8	0.0	14.9	1.7	53.3	小深沢	男女倉
9	3.1	29.2	0.1	15.3	1.6	50.7	小深沢?	和田峠
10	4.1	25.9	0.0	14.6	2.0	53.5	小深沢	和田峠
11	2.6	30.4	0.3	15.6	1.2	49.9	男女倉	男女倉
12	3.4	27.8	0.0	13.5	1.8	53.5	小深沢	和田峠?
13	3.4	25.6	0.3	15.3	1.0	54.5	星ヶ塔	下諏訪
14	2.4	29.9	0.3	14.9	1.1	51.3	男女倉	男女倉
15	2.6	29.5	0.3	15.6	1.1	50.9	男女倉	下諏訪

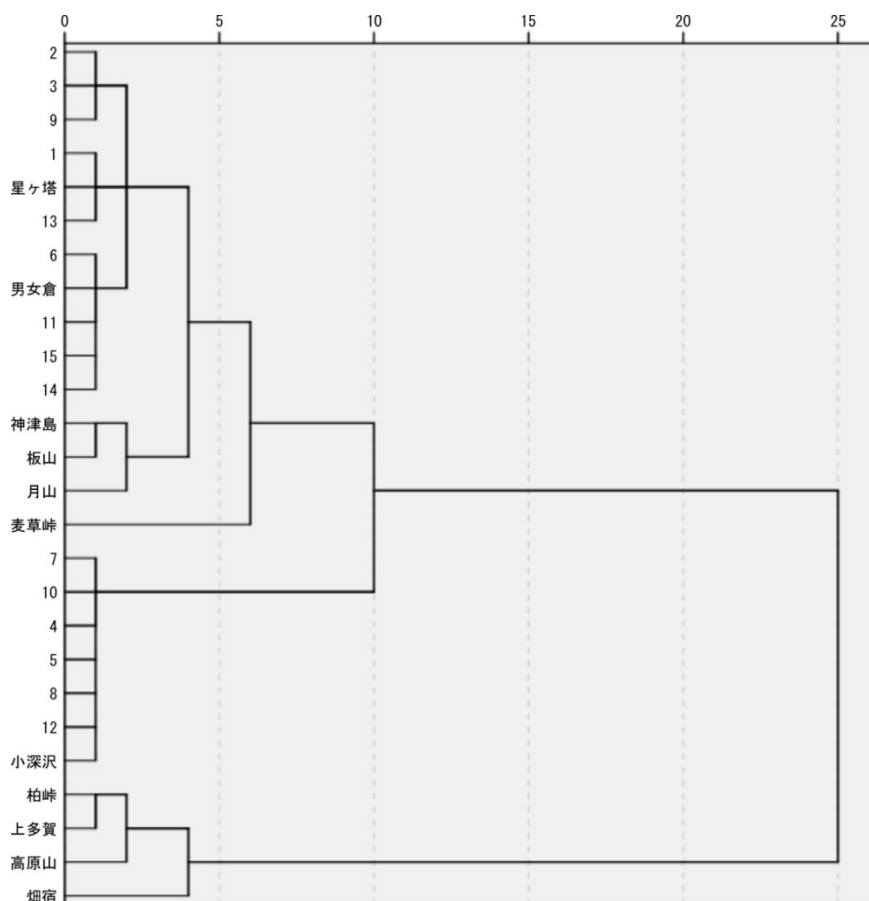


図 4-16. クラスター分析結果。

原産地推定では、小深沢、星ヶ塔、男女倉産黒曜石が同率の割合で推定された。全資料から無作為に 15 点を選択しているため確定的ではないが、男女倉原産地に隣接した遺跡にも関わらず、周囲

の星ヶ塔，小深沢産黒曜石が一定の割合で見られるのは興味深い。二宮他（1993）でも，男女倉遺跡詳細分布調査 6 地点から出土した黒曜石の原産地推定の結果から同様の傾向が得られており，特に小深沢産が多くみられる。

## (2) 磁気物性の測定

男女倉Ⅲ遺跡で採取された黒曜石 44 点の NRM と帯磁率の測定結果を，信州における原産地黒曜石の帯磁率/磁化強度図にプロットした（図 4-17）。

このうち黄色の◆で示した 15 点は蛍光 X 線分析を行っており，表 8 で磁気物性による結果と比較している。図 4-17 に示すように，男女倉産黒曜石の領域に最も多くプロットされたが，蛍光 X 線分析の結果と同様に，下諏訪と和田峠産の特徴を示す黒曜石も一定の割合で見られる。

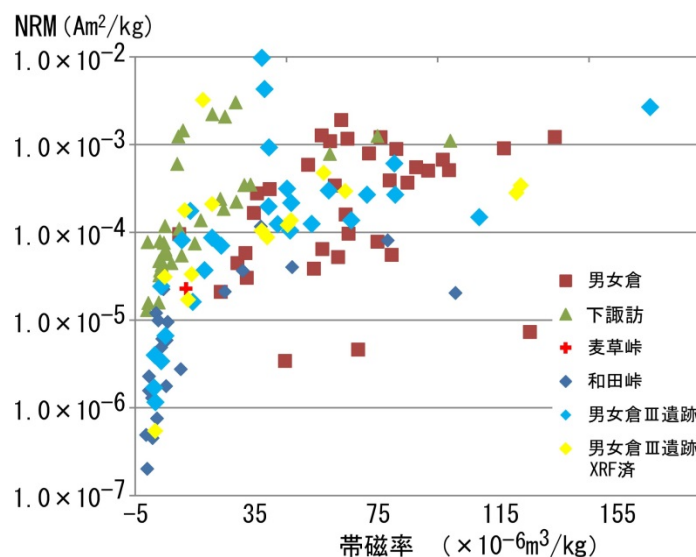


図 4-17. 信州産黒曜石の帯磁率/磁化強度図に男女倉Ⅲ遺跡出土黒曜石の結果をプロットした。

### 4.4.4. 富山県内各遺跡出土黒曜石の原産地推定

富山県内の各遺跡から出土した黒曜石資料の磁化強度と帯磁率（MS-2 使用）を調べた。分析を行った黒曜石は，魚津市佐伯遺跡 5 点，同早月上野遺跡 11 点，朝日町馬場山 D 遺跡 17 点，同柳田遺跡 23 点，立山町吉峰遺跡 16 点，同二ツ塚遺跡 8 点である（図 4-18）。今回分析を行った黒曜石は，藁科・東村（1985）と明治大学古文化財研究所（2011）による XRF 分析が行われており，各黒曜石遺物は西霧ヶ峰産，魚津産，和田峠産であることが判明している。

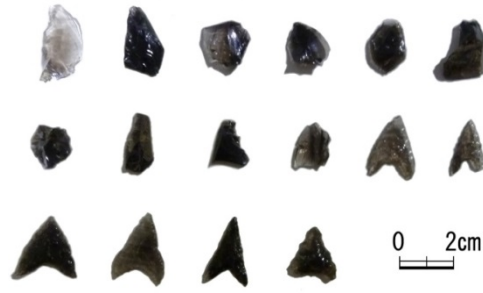


図 4-18. 分析に供した試料.

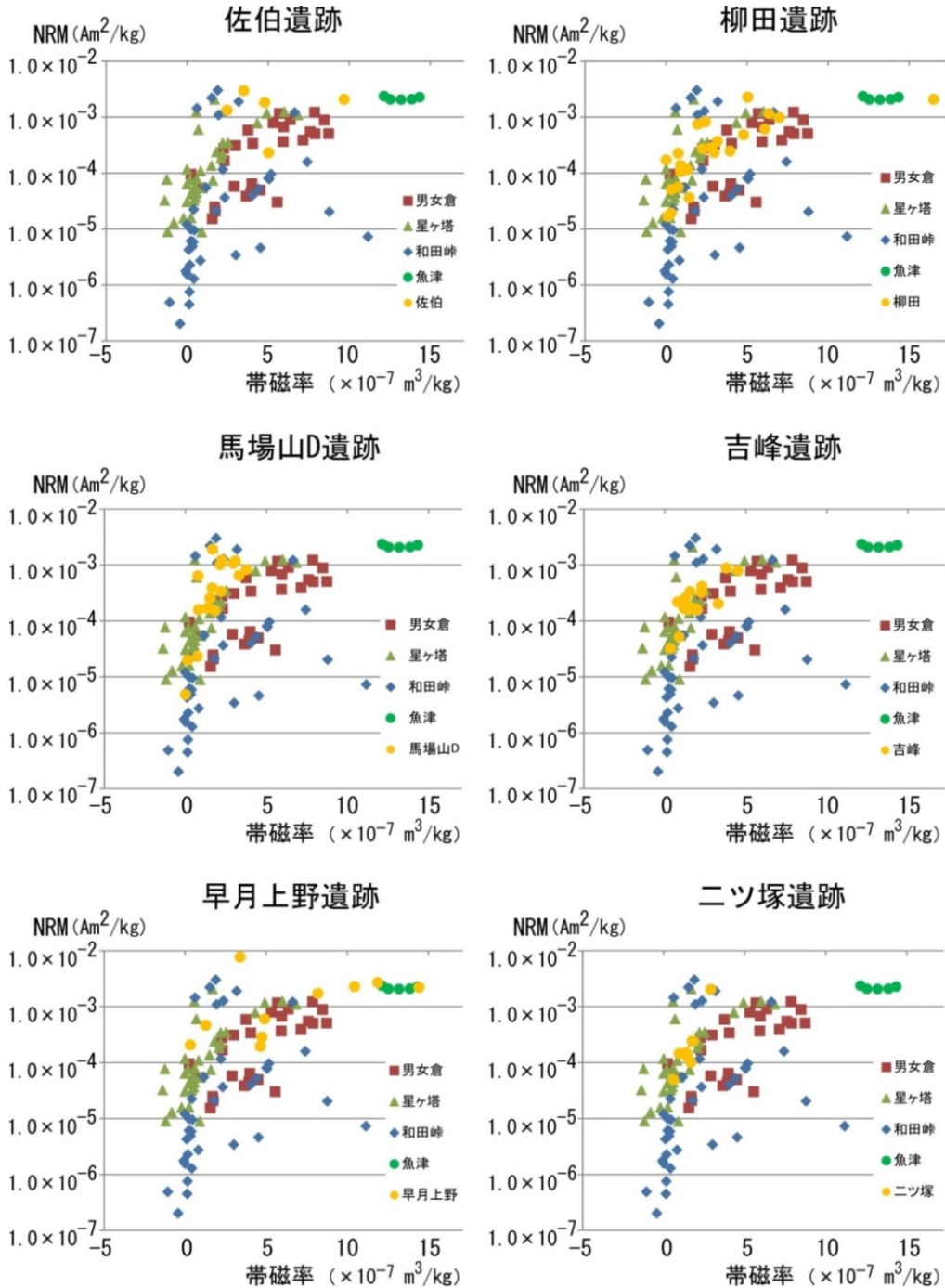


図 4-19. 信州産黒曜石と富山県内各遺跡出土黒曜石の帯磁率と磁化強度比.

表 4-9 には分析を行った資料の XRF 分析と磁気物性での原産地推定結果を比較している。なお、XRF 分析での原産地名は、明治大学古文化財研究所（2011）に準じており、西霧ヶ峰は本研究で使用する下諏訪に相当する。ほとんどの資料の原産地が下諏訪産で一致しており、磁化研究の妥当性が証明されたと考える。XRF 分析で原産地が未判明の黒曜石は、磁気物性でも不明瞭であったが、柳田遺跡、早月上野遺跡、馬場山 D 遺跡出土黒曜石数点が下諏訪産の範囲にプロットされ、早月上野遺跡出土黒曜石 1 点は魚津産に近い傾向を示した。

表 4-9. 富山県内各遺跡出土黒曜石の産地推定結果（XRF 分析は wt% で表している）。

sample No.	出土遺跡	重量 (g)	帯磁率 ( $\times 10^{-7} \text{m}^3/\text{kg}$ )	磁化強度 ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ )	XRF 分析	磁気物性
11	佐伯	2.65	2.45	1.34E-03	—	和田峠？
12	佐伯	1.29	3.49	3.00E-03	—	和田峠？
13	佐伯	6.21	5.02	2.33E-04	—	男女倉？
14	佐伯	32.04	9.69	2.09E-03	魚津	魚津
15	佐伯	36.14	4.78	1.85E-03	魚津	下諏訪？
16	馬場山D	4.07	2.95	1.08E-03	西霧ヶ峰	下諏訪
17	馬場山D	2.49	2.14	1.02E-03	西霧ヶ峰	下諏訪？
18	馬場山D	2.47	1.35	1.67E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
19	馬場山D	1.66	0.80	1.60E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
20	馬場山D	4.03	3.31	6.53E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
21	馬場山D	5.59	2.24	1.23E-03	西霧ヶ峰	下諏訪？
22	馬場山D	3.44	0.73	2.34E-05	—	下諏訪
23	馬場山D	3.67	0.14	2.01E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
24	馬場山D	1.27	0.00	4.87E-06	西霧ヶ峰	和田峠？
25	馬場山D	1.3	0.77	6.45E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
26	馬場山D	2.95	1.64	3.89E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
27	馬場山D	2.2	2.20	3.40E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
28	馬場山D	2.77	1.50	2.54E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
29	馬場山D	2.7	3.77	8.34E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
30	馬場山D	11.54	1.66	1.92E-03	西霧ヶ峰	—
31	馬場山D	2.09	1.83	1.52E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
32	馬場山D	1.3	3.08	1.19E-03	西霧ヶ峰	下諏訪
33	早月上野	3.13	4.63	1.95E-04	—	男女倉？
34	早月上野	1.94	4.90	6.05E-04	—	男女倉？
35	早月上野	1.33	3.38	7.74E-03	—	和田峠？
36	早月上野	2.12	11.87	2.71E-03	—	魚津
37	早月上野	1.12	8.18	1.73E-03	魚津	魚津？
38	早月上野	0.52	0.32	2.09E-04	—	下諏訪
39	早月上野	3.95	4.73	2.86E-04	—	男女倉？
40	早月上野	1.32	1.26	4.67E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
41	早月上野	5.03	14.41	2.23E-03	魚津	魚津
42	早月上野	1.9	10.44	2.31E-03	魚津	魚津
43	早月上野	—	—	—	魚津	測定不可

表 4-9. 富山県内各遺跡出土黒曜石の産地推定結果 (XRF 分析は wt%で表している).

sample No.	出土遺跡	重量 (g)	帯磁率 ( $\times 10^{-7} \text{m}^3/\text{kg}$ )	磁化強度 ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ )	XRF分析	磁気物性
44	柳田	1.58	0.74	2.28E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
45	柳田	1.87	0.89	1.07E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
46	柳田	4.01	4.78	4.87E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
47	柳田	6.67	1.42	3.66E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
48	柳田	0.77	0.00	1.73E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
49	柳田	2.95	3.16	3.72E-04	—	下諏訪
50	柳田	2.76	0.30	1.95E-05	—	下諏訪
51	柳田	4.11	6.08	6.20E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
52	柳田	3.03	0.33	5.14E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
53	柳田	3.75	1.96	7.49E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
54	柳田	3.41	1.32	1.16E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
55	柳田	3.8	0.75	5.66E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
56	柳田	5.26	2.25	2.74E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
57	柳田	3.24	0.10	1.69E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
58	柳田	3.44	6.98	9.95E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
59	柳田	3.23	2.79	2.86E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
60	柳田	0.62	2.42	8.31E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
61	柳田	1.87	0.89	1.39E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
62	柳田	4.01	3.95	2.49E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
63	柳田	0.92	6.34	1.16E-03	西霧ヶ峰	下諏訪
64	柳田	2.59	2.96	2.35E-04	—	下諏訪
65	柳田	45.53	5.04	2.29E-03	西霧ヶ峰	下諏訪
66	柳田	8.92	16.50	2.10E-03	魚津	魚津
67	吉峰	1.99	0.34	3.22E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
68	吉峰	2.74	3.28	2.03E-04	—	男女倉?
69	吉峰	1.7	1.18	1.68E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
70	吉峰	1.1	2.27	4.14E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
71	吉峰	1.4	1.43	1.60E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
72	吉峰	2.44	2.25	3.25E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
73	吉峰	0.95	1.93	1.66E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
74	吉峰	0.76	1.54	3.38E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
75	吉峰	0.74	4.50	8.00E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
76	吉峰	0.85	0.78	2.20E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
77	吉峰	0.95	0.88	5.21E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
78	吉峰	0.43	1.55	1.64E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
79	吉峰	1.59	1.57	1.76E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
80	吉峰	1.18	1.98	1.57E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
81	吉峰	0.88	3.79	8.89E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
82	吉峰	1.33	1.25	2.58E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
83	二ツ塚	1.23	0.95	1.46E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
84	二ツ塚	1.37	1.46	1.27E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
85	二ツ塚	0.7	1.67	1.02E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
86	二ツ塚	0.36	1.39	1.51E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
87	二ツ塚	35	1.75	2.44E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
88	二ツ塚	0.83	1.81	2.41E-04	西霧ヶ峰	下諏訪
89	二ツ塚	0.56	0.60	4.98E-05	西霧ヶ峰	下諏訪
90	二ツ塚	0.86	2.91	2.03E-03	和田峠	和田峠

#### 4.5. まとめ

信州の主要原産地グループである男女倉, 下諏訪, 和田峠, 長門, 麦草峠の黒曜石を試料として, 磁化研究を実施した.

帯磁率と磁化強度による分析では, 各原産地の特徴が得られた. 更に, 原産地グループ内の採取



地点の特徴はより明確にまとまった。特に、和田峠グループは、各採取地点がよく分類された。また長門グループは鷹山川 A 地点と B 地点ごとの特徴が見られ、それぞれが和田峠、下諏訪グループと異なる領域に分かれた。

IRM の獲得や SIRM の消磁特性からわかる保磁力の分布も、グループ毎で特徴が見られた。黒曜石の磁性を担う磁性鉱物は、熱消磁や IRM 獲得消磁特性から主にマグネタイト（チタノマグネタイト）と示され、REM 値の検討では、信州産黒曜石の磁化は、熱残留磁化の可能性が高いと分かった。そして、磁気ヒステリシスと Day plot の解析から磁区構造を推定した結果、疑似単磁区の特徴が得られた。

また、富山県・長野県内各遺跡より出土した黒曜石について磁気物性から原産地を比較した。同時に行った蛍光 X 線分析による産地推定結果と対比し、磁気物性による産地推定の妥当性が確認された。

磁化研究により黒曜石の原産地や産出地点の特徴は得られることが示された。各種の実験では、磁化強度と帯磁率による分類は非破壊であり、比較的短時間で行えるので実用的である。更に、磁気ヒステリシスと磁区構造分析も少量試料の分析により多くの磁気パラメータが得られるので、有効な方法になる可能性がある。黒曜石の磁化研究は、従来の蛍光 X 線分析による研究とは独立な研究方法として、その有用性は更に調べることが望まれる。

また、信州産黒曜石中の磁性鉱物は疑似単磁区の構造なので、安定な磁化を有し、古地磁気研究も可能だと考えられる。今後、テリエ法実験等で黒曜石の残留磁化から過去の地磁気を求めることで、信州産黒曜石の地磁気変動による生成年代の推定も行い、黒曜石の産地分類の要素とする研究の実施も望まれる。

## 第5章 磁化による遺物・遺構の使用状況の研究

### 5.1. 山東省臨淄齊国故城出土の漢代鏡範の研究

#### 5.1.1. 研究の概要と研究試料

本研究では、臨淄齊国故城より出土した鏡範および以前に採取された資料も含む4点について、非破壊の帯磁率と磁化測定および磁性に関する加熱実験を行った。そして鏡範の鑄造での使用時の状況を研究した。

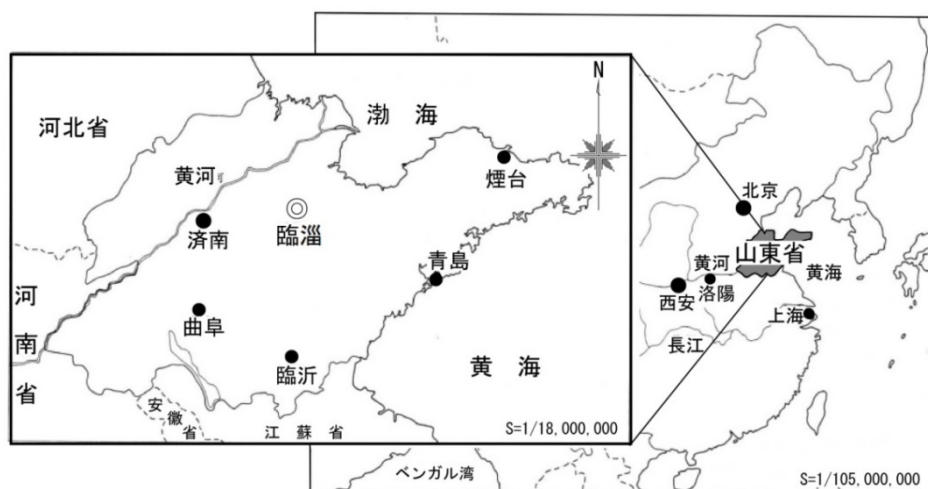


図 5-1. 中華人民共和国山東省臨淄の位置，奈良橿原考古学研究所他（2009）から抜粋，加筆した。



図 5-2. 鏡範資料，左から LQKJ14 と LQKJ05.

表 5-1. 分析に供した前漢時代の土製鏡範資料.

No.	試料	出土地点	短軸 (cm)	長軸 (cm)	厚さ (cm)
1	LQKJ14	闕家寨銅鏡製作工房址	10.9	13.5	2.4
2	LQKJ05	闕家寨銅鏡製作工房址	6.4	12.6	10.1
3	SLQJF05	石佛堂村東南地点 (2003年採集)	3.0	4.4	3.4
4	SLQJF25	蘇家廟村西 (2003年採集)	4.0	3.8	2.3

図 5-1 に示す山東省臨淄に位置する臨淄齊国故城は、漢の齊王の時代には齊国の都城の所在地となり、東方での商工業の中心地であった。表 5-1 に出土資料の番号、出土地点と大きさを、図 5-2 に資料 LQKJ14, LQKJ05 の写真を示している。資料のうち、LQKJ14, LQKJ05, SLQJF25 の 3 資料では鑄型面が確認されている。また、資料 SLQJF05 と SLQJF25 については、田賀井・橘（2009）の研究により、鏡範の素材に凝灰岩組成の微粒子素材が使用され、植物片も多く含まれることが明らかにされている。

非破壊の帯磁率調査と磁化測定を行った後で、熱消磁実験の為に、LQKJ14, 05 から 3 個の小試料（番号 No.1, 2, 3）を切り出して用意した。各小試料は、図 5-3 で示す様に、容量 10cc のプラスチック製ケースに発泡スチロールで固定して磁化測定に用いた。研究内容は菅頭他（2013）に示している。

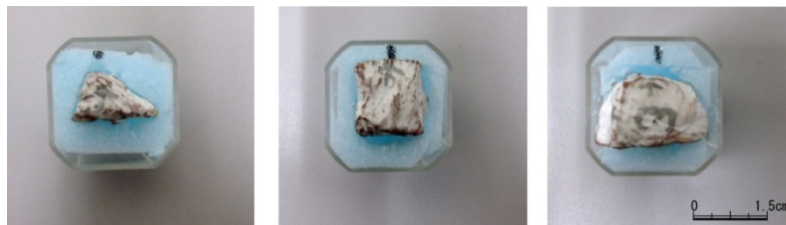


図 5-3. プラスチックケースに納めた試料，左から No.1, 2, 3.

## 5.1.2. 磁化研究の結果

### 5.1.2.1. 非破壊の帯磁率測定

帯磁率測定は、MS2 型帯磁率計と平面スキャニングセンターを用いて以下の様に行った。

(1) プラスチック製の箱の上に資料を置き、資料を発泡スチロールで固定する。(2) 資料の上に、1 cm 間隔のメッシュを描いた透明シートをかぶせる（図 5-4）。(3) 資料の 4 面について、メッシュの交点に帯磁率センサーを当てて測定する。



図 5-4. 鏡範資料の帯磁率測定の様子。

鏡範資料の各面について帯磁率の分布を求めた。図 5-5-1 と 5-5-2 に測定結果を示しており、各図では帯磁率の強弱を色相で表した。強度スケールは各資料の帯磁率の上限と下限に合わせている。帯磁率は体積帯磁率であり、無次元数で表される。

図 5-5-1 の図上と下には、資料 LQKJ14 の表面と裏面の結果を示している。鏡の鑄造面と推定される表面の方が帯磁率は強い。

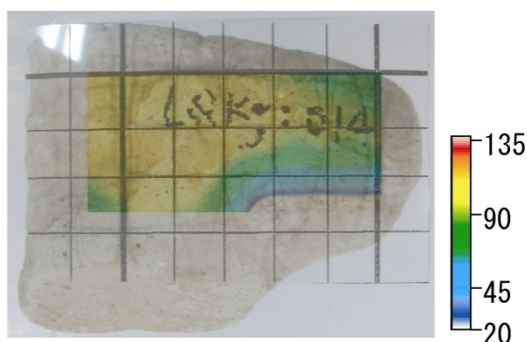
また、鏡範の白色の中心部付近は帯磁率が  $137 \times 10^{-4} \text{SI}$  を示し、極大領域となっている。総じて、目視での色の違いは帯磁率の強弱と良く対応していた。図右の資料 SLQJF05 は形状から一面しか測定できなかったが、測定面の左下隅の範囲では、帯磁率が強かった。

図 5-5-2 は、資料 LQKJ05 (左) と資料 SLQJF25 (右) から得られた帯磁率の分布を示している。資料 LQKJ05 の結果を見ると、湯道面 (表面) の帯磁率が  $41 \sim 45 \times 10^{-4} \text{SI}$  と裏面より顕著に強く、また側面の測定結果では湯道面から離れるにつれ、帯磁率は弱くなる傾向が認められた。湯道面では中央部で帯磁率が強くなっており、特に強い領域が 2 カ所認められた。資料 SLQJF25 でも、測定した三面の中で、表面が黒色化している鑄型面が帯磁率は  $44 \sim 56 \times 10^{-4} \text{SI}$  と最も強かった。視覚的には表面の黒色度の差は認め難いが、帯磁率では違いが良く表れている。

#### LQKJ14 (鑄型面)



#### LQKJ14 (裏面)



#### SLQJF05

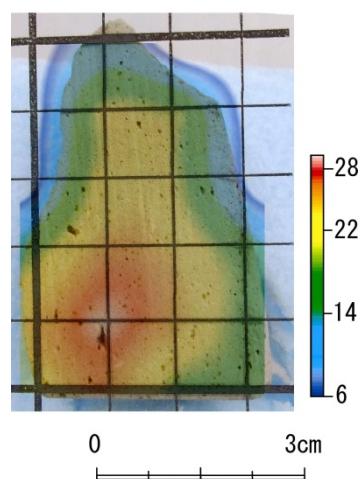


図 5-5-1. 左：鏡範資料 LQKJ14, 右：SLQJF05 の帯磁率分布を示している。

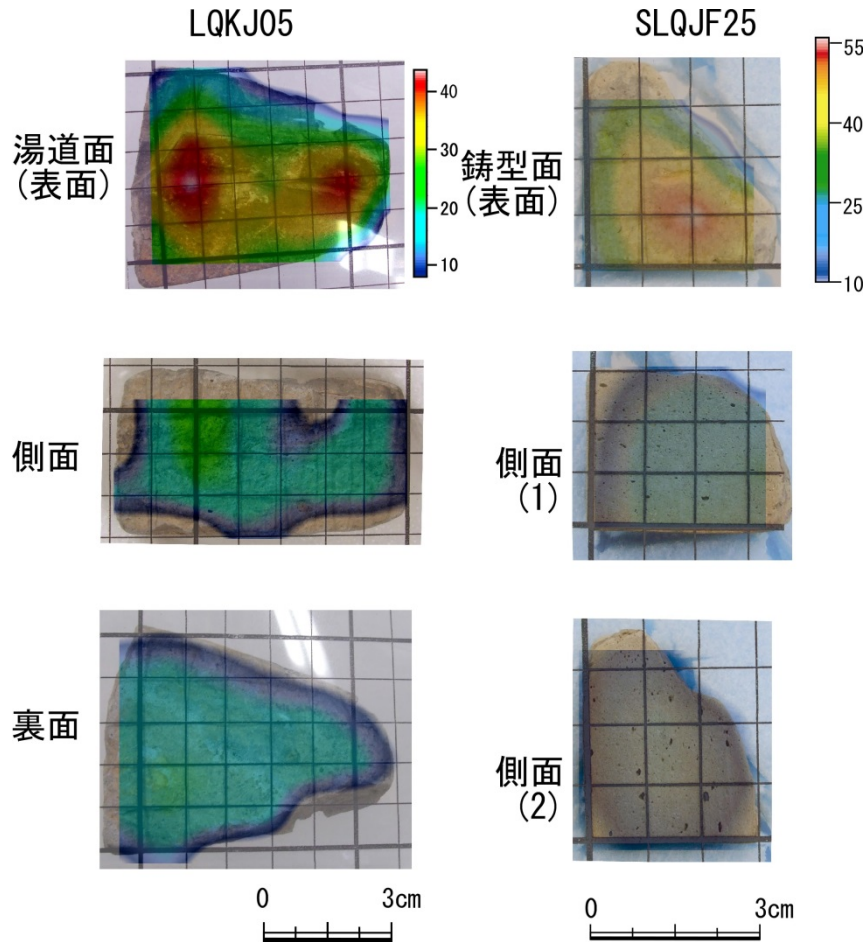


図 5-5-2. 左：鏡範資料 LQKJ05，右：SLQJF25 の帯磁率分布を示している。

このような帯磁率の分布の違いは、鏡範の鑄造使用時の熱影響によると思われる。鑄型面の帯磁率が強い原因の一つとして、注湯時に加熱を受けて、鑄型に含まれていた水酸化鉄 ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) が、脱水反応によりヘマタイト ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) となり、還元的状況からマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) へと変化、もしくは水酸化鉄から直接マグネタイトに変化したことが考えられる。帯磁率の強弱は、熱影響・酸化程度の違いにより、鑄型面の湯に接した時の状況や流れた速度に依存して出現した可能性が推測される。今回の資料は非破壊測定に限定された為に行えなかったが、熱磁化解析（キュリー一点）から磁性鉱物を同定する研究により帯磁率の変化が検討できるので、今後の課題としたい。

#### 5.1.2.2. 磁化方向と熱消磁の結果による使用状況の検討

##### (1) 磁化方向

各資料の残留磁化は超伝導磁力計を用いて測定した。測定時、資料に任意に N 方向を設定して測定面が水平になる様に測定部に固定し、5 mm の測定間隔で測定した。

表 5-2 に各資料の測定結果の伏角を示し、図 5-6 に代表的な資料の磁化方向をシュミットネット

図に示した。図中の写真は、測定時の資料の固定状況であり、上方向が資料に定めた N 方向になる。磁化伏角が下向き（正）の場合は赤丸で、上向き（負）の場合は白丸で示している。

図 5-6-1 の LQKJ14 では、資料の黒色面を表（図左）の場合と裏（図右）の場合で測定した。黒色面を表にした時の伏角は $-15.7^\circ$ 、裏の時は $15.5^\circ$ となり、両面で得た磁化方向は反平行で、測定された磁化方向の信頼度は高いことを示している。

図 5-6-2 の LQKJ05 では、湯道面を表（左）と裏（右）に固定して測定した結果、それぞれの伏角は $42.3^\circ$ 、 $-45.6^\circ$ と求められ、ほぼ反平行の磁化を示した。

図 5-6-3 の SLQJF25 は、黒色面（矢印①）とその右側面（矢印②）、左側面（矢印③）を表に固定して測定した。その結果、①の設置での伏角は $22.7^\circ$ 、②は $16.7^\circ$ 、③は $17.7^\circ$ と求められた。

鏡範の磁化測定の結果から、鑄造時の状況を検討する。前漢時代の地磁気伏角について、黄河河口域の堆積物の研究では、B.C.100-A.D.0年頃の伏角は $30\sim 40^\circ$ と得られている(Cong & Wei, 1989)。山東省付近では研究されていないが、周辺の西安での研究では $35\sim 40^\circ$ 、北京では $50\sim 55^\circ$ の伏角が報告されており、両都市の中間緯度に位置する臨淄では、前漢時代の地磁気伏角は $45^\circ$ 前後であったと推測される。

また、注湯の際の鏡範の置き方として、三船（2009）は、一般的には合範後鏡背範が下になる様に $45\sim 60^\circ$ 傾け、文様か鏡面の映像のどちらを重視するかによって、鏡背範が下か鏡面範が下かの傾け方を決めた可能性を指摘している。

磁化測定で得られた鏡範の伏角値が $20^\circ$ 近いことと、上述の様に当時の伏角が $45^\circ$ 前後であることを考慮すると、鏡範が置かれた角度は $60^\circ$ 程だったと推定される。図 5-7 には、鏡範の傾きが鑄造時の地磁気伏角より深い場合、鑄造時における鏡範の置き方と獲得する磁化方向を検討した。図の灰色で示した鏡範が測定資料、太線面が磁化測定時に上に向けた面とすると、鑄造時の鏡範の置き方として図の 4 つのパターンが考えられる。

表 5-2. 鏡範資料の残留磁化の測定結果.

No.	試料	伏角(°)		
		表面(①)	裏面(②)	③
1	LQKJ14	-15.7	15.5	
2	LQKJ05	42.3	-45.6	
3	SLQJF05	-23.1	-28	
4	SLQJF25	22.7	16.7	17.7



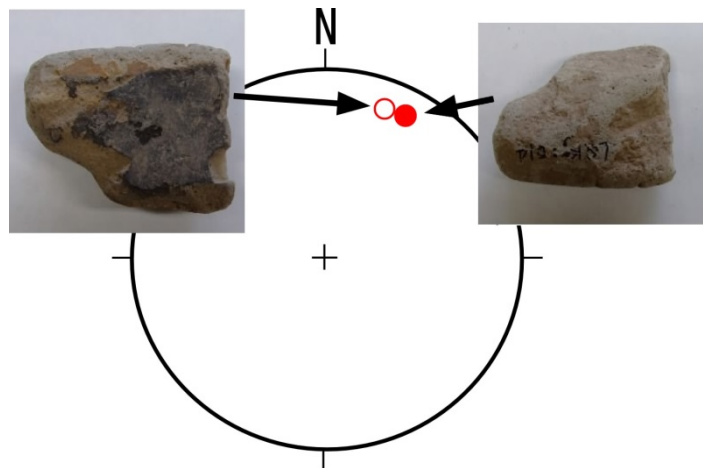


図 5-6-1. LQKJ14 の NRM 測定結果, 左: 鑄型面を表にした場合, 右: 鑄型面を裏にした場合.

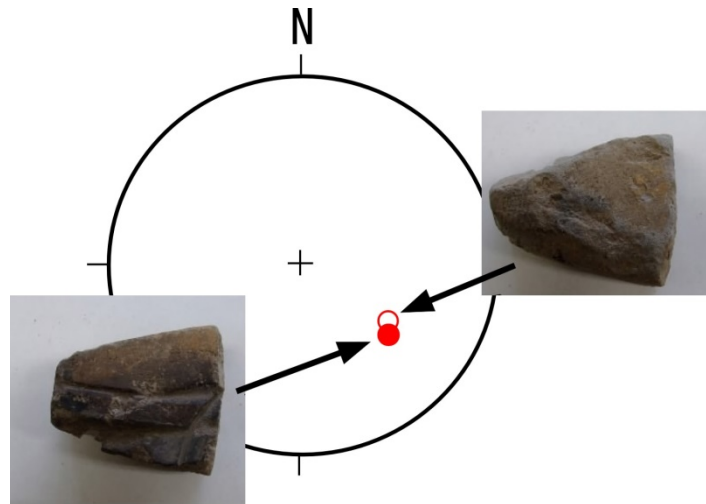


図 5-6-2. LQKJ05 の NRM 測定結果, 左: 湯道面を表にした場合, 右: 湯道面を裏にした場合.

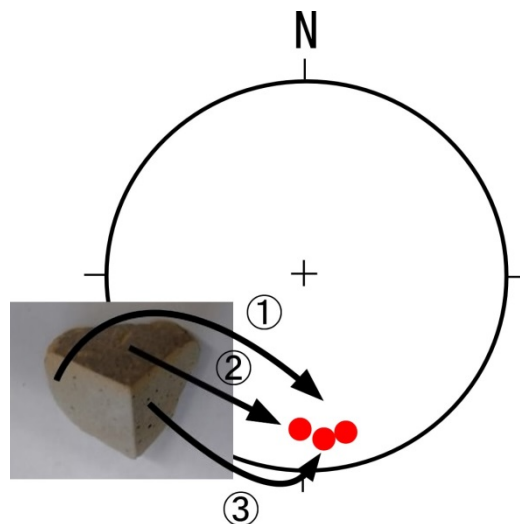


図 5-6-3. SLQJF25 の NRM 測定結果, ①: 鑄型面を表にした場合, ②: 鑄型面の右側面を表にした場合, ③: 鑄型面の左側面を表にした場合.

鏡範は、注湯後の冷却過程で当時の地磁気方向を獲得する。太線の面（鋳型面）を上に向けると、獲得された磁化方向は図7の①～④の方向になる。①は伏角が負（上向き）でかなり浅い。②は伏角が正（下向き）でかなり深い。③の伏角は正で浅く、④の伏角は負で深い。測定結果と対比すると、LQKJ14は①、LQKJ05は②、SLQJF25は③、SLQJF05は①の様にして使用されたと考えられる

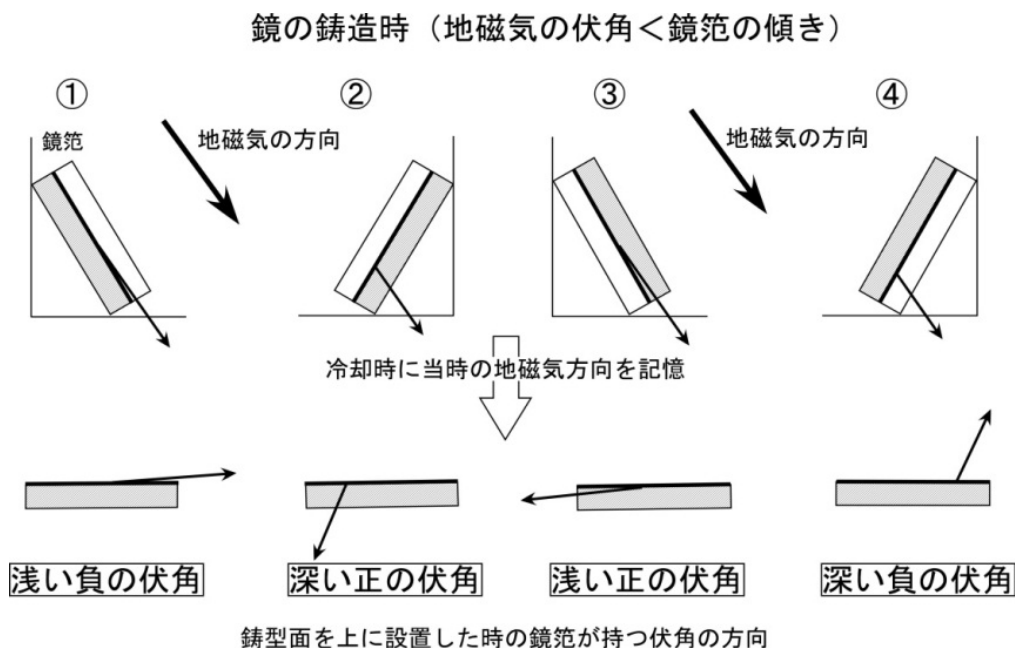


図 5-7. 推測される鋳造時の鏡範の置き方のパターンと獲得される磁化方向.

## (2) 熱消磁実験

熱消磁実験を行う為、資料 LQKJ14 と 05 の范底面（范裏面）から約 1 立方cmの大きさに切り出し、周囲を耐熱ボンドで固めた実験試料を準備した。加熱は、磁性鉱物の変質を避けるためアルゴン雰囲気中で、温度は 50～450℃までは 50℃間隔で昇温し、その後、490、530、560℃の温度段階を採用した。

図 5-8 に、切り出した小試料 No.1～3 の熱消磁実験の結果をザイダーベルト図で示している。図において、3つの試料は全て、加熱温度が 350～560℃のプロットがほぼ直線上にあり、原点へ向かうことから安定な磁化を獲得していることが分かる。この結果は、鏡範が 560℃以上の高温の加熱を被ったことを示している。鏡範に流し込まれる青銅は、1000℃近くに熱するため、実験結果は矛盾しない。350℃以下のプロットは、不安定で直線からずれている。漢鏡の製作時に、鏡範が 350℃まで冷却するには、1時間がかからないと思われ、鏡範内の青銅鏡が固まり、鏡範が高温から 350℃まで冷えた段階で動かされた状況が考えられる。



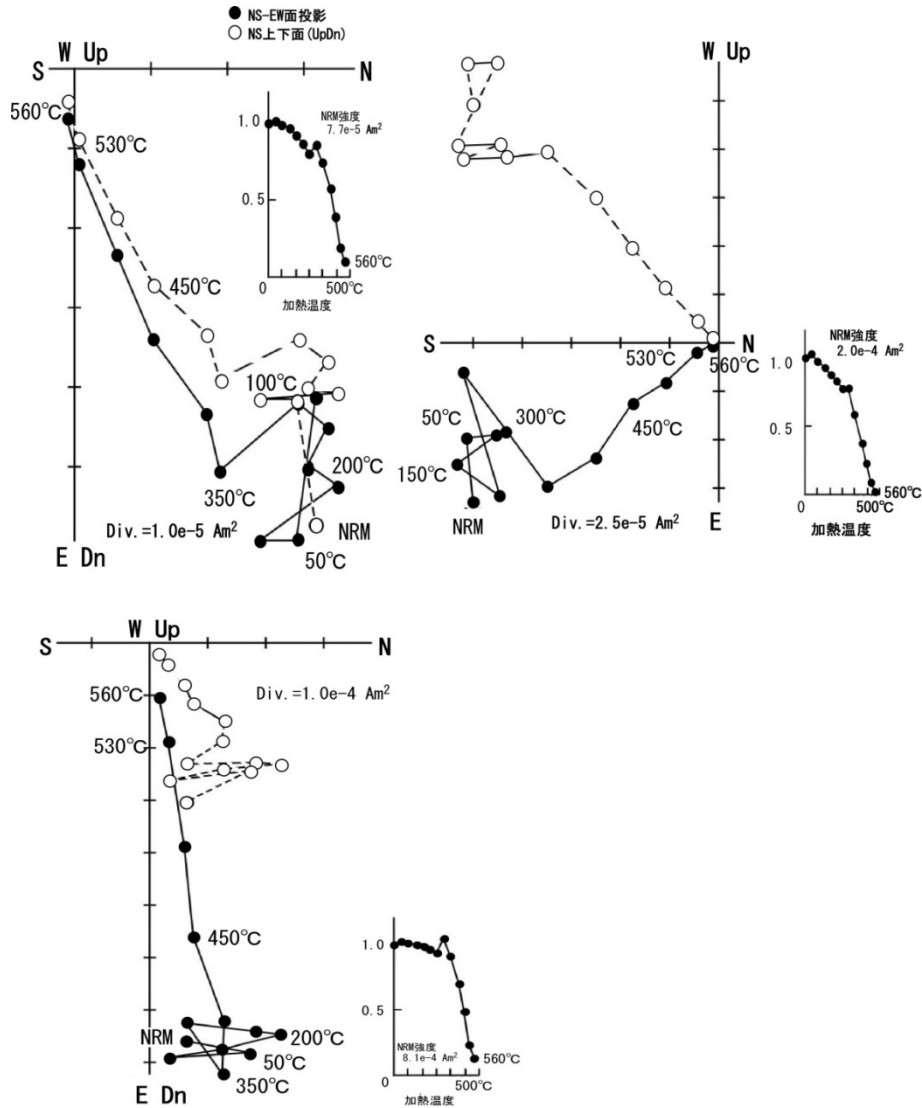


図 5-8. 熱消磁のガイダーベルト図と磁化強度の変化，上左：No.1，上右：No.2，下左：No.3.

### 5.1.2.3. 鏡範の使用年代の推定

熱消磁実験と併行してテリエ法実験を行い，当時の地磁気強度も研究した．図 5-9 に，実験結果を示す．各試料の図左が SNRM-TRM 図，図右が帯磁率の温度変化の図である．また，表 5-3 に各試料の測定結果を示す．

SNRM-TRM 図では，各試料で 350°C 以上の温度において線形関係が得られた．各試料ともに pTRM テストは概ね良好であった．帯磁率の温度変化の変動については，帯磁率が弱いので割合は大きいですが，数値では 1~3 位の間での変化であるため，実験時の加熱における磁性鉱物の変質はなく，実験結果の信頼性は高いと言える．また，線形関係を示す 3 点以上のプロットで直線近似を行うと，各試料ともに標準偏差 0.99 を越えた．

以上の過程を経て、SNRM-TRM 図のプロットの近似直線から当時の地磁気強度は、 $28.2\sim 32.0\mu\text{T}$  (平均は  $29.5\pm 5.4\mu\text{T}$ ) と推定された。

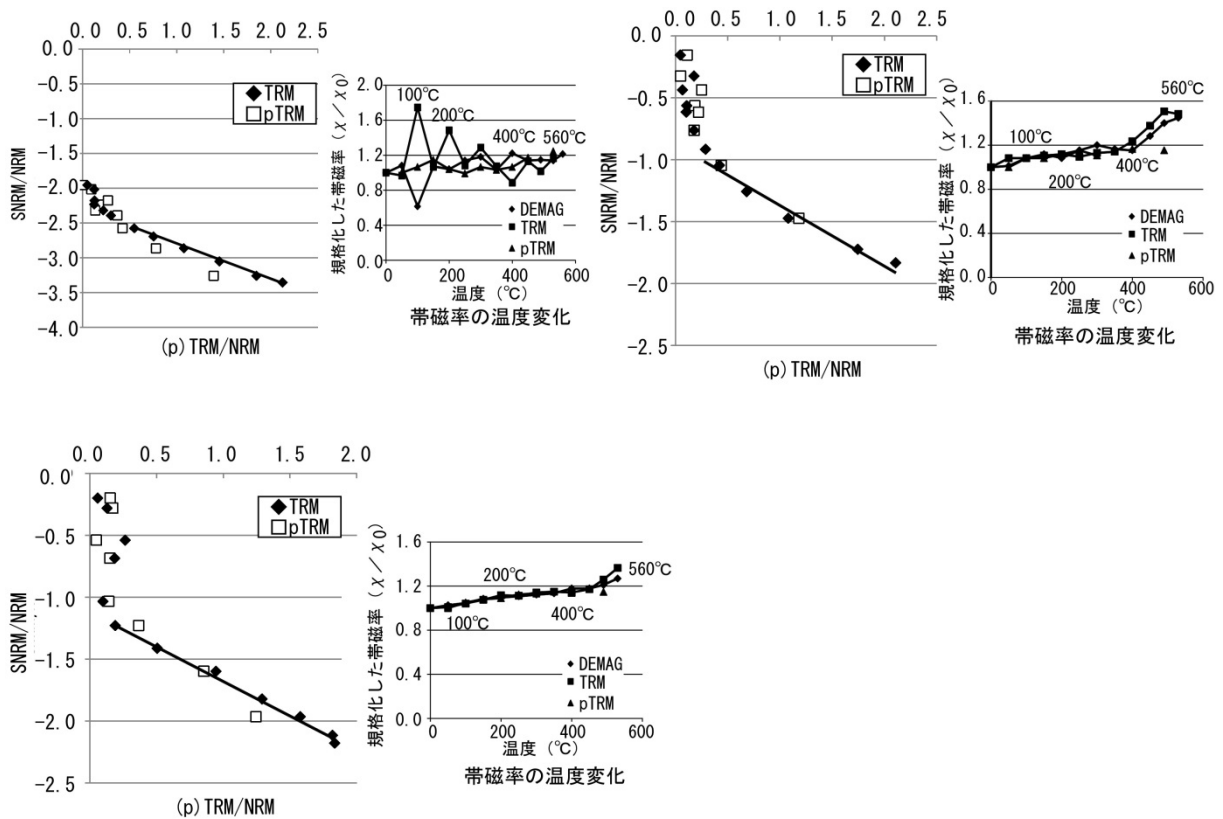


図 5-9. 小試料のテリエ法実験の結果，上左：No.1，上右：No.2，下左：No.3.

表 5-3. テリエ法実験の結果.

試料No.	温度範囲 ( $^{\circ}\text{C}$ )	標準偏差 直線回帰	推定磁場 強度 ( $\mu\text{T}$ )	誤差 ( $\mu\text{T}$ )
1	350-530	0.99	28.3	1
2	400-490	0.99	32	3.7
3	350-560	0.99	28.2	1.4

図 5-10 に、実験結果より求められた地磁気強度を Wei et al. (1983) が報告した山西省における B.C.1800 以降の地磁気強度変動と対比した。この地磁気変動は、窯跡の焼土やレンガなどの考古遺物の磁化の研究から求められている。小試料のテリエ法実験から得た考古地磁気強度年代は白丸でプロットしている。また、B.C.200 年頃の北京では、 $42\mu\text{T}$  (Wei et al., 1983)，B.C.200~100 年頃の山西省では  $36.8\mu\text{T}$  との古地磁気強度も報告されており (Wei et al., 1987)，特にこの時期は、地磁気強度が弱い傾向にある。本研究で得られた地磁気強度は、前漢前半時期 (B.C.200~100 頃) の地磁気強度に近く、鏡範の使用は前漢前半であることを示している。臨淄齊国故城の銅鏡製作工房址の主たる時代は、前漢前期から中期で、より詳細には秦漢以前か前漢初年から前漢後期までで、後

漢時期までは下らないと考えられており（白，2009），本研究の年代と調和する．この実験は非破壊ではないので，貴重な鏡筭にはなかなか行うことができない．しかし，製作遺構や周囲の焼土や関連遺物を用いた研究を進めてデータを蓄積していくことで，磁化と地磁気の研究から鏡筭が鑄造に使用された時期の推定が可能になると思われる．

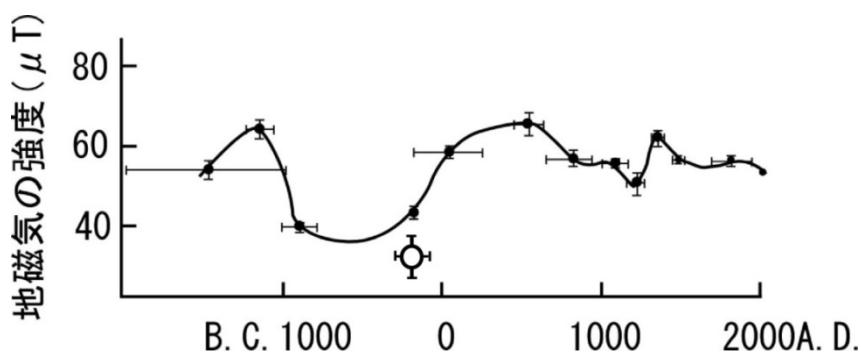


図 5-10. 山西省の B.C.1800~A.D.2000 までの地磁気強度変動と小試料のテリエ法実験の結果との比較，Wei et al. (1983) を抜粋して改変加筆した．

### 5.1.3. まとめ

臨淄齊国故城出土の前漢時代の鏡筭について，磁気物性の分析から，鏡筭の使用と銅鏡の鑄造時の状況を研究した．帯磁率の調査では，溶けた青銅を流し込んだ面と裏面で強度の分布が異なり，鏡筭としての使用時の加熱状況を反映する結果が得られた．鏡筭の表面と裏面での帯磁率分布の違いは，鏡面の鑄造での使用時の熱影響を示しており，帯磁率測定は鑄型面の判断に利用できる．そして研究の発展により，帯磁率の強さから鏡筭が受けた熱影響の定量化も可能になると考えられる．残留磁化の研究では，560℃以上の高温を受けたことが示され，また磁化方向と熱消磁特性の分析も併せて，鑄込み時の状況が推察された．地磁気強度の研究により鑄型の使用時期を推定した結果，前漢前半と示され，臨淄齊国故城の銅鏡製作工房址の使用時期の考古学的見解と調和する結果が得られた．

本研究で行った鏡筭の磁性物性と古地磁気の研究は，従来行われていない．鏡筭は貴重な遺物であり，適用できる科学的研究は限られるため，非破壊の帯磁率や自然残留磁化（NRM）の測定の有用性が示せたことは重要と考える．今後，鏡筭に関連する遺物や製作遺構の磁気研究も行って地磁気データを蓄積することで，鏡筭の使用状況の解明に有用な情報を得ることができると考える．

## 5.2. 焼失竪穴住居の焼土の研究

### 5.2.1. 富山市打出遺跡

#### 5.2.1.1. 研究の概要

富山市打出遺跡は旧神通川河口に位置し，弥生後期から古墳前期および中世の時代に集落が営まれていた（富山市教育委員会，2006）．打出遺跡では弥生時代終末期の焼失竪穴住居跡が発掘され，火災時の状況を検討するため，上屋の屋根土と推測される焼土の磁化特性を研究した．

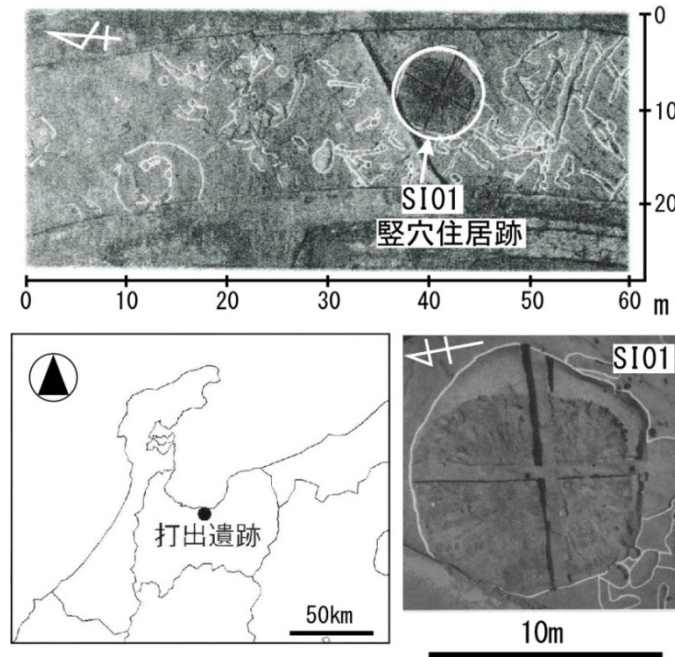


図 5-11. 打出遺跡と調査した竪穴住居跡 SI01，富山市教育委員会（2004）より抜粋，加筆した．

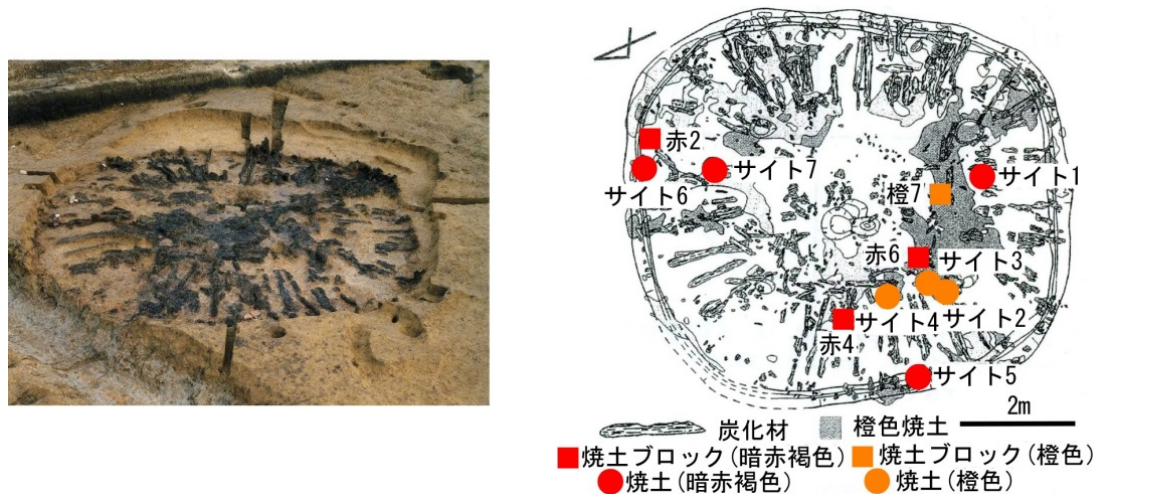


図 5-12. 左：SI01 の炭化材と焼土の出土状況，右：焼土試料の採取地点，富山市教育委員会（2006）より抜粋，加筆した．

図5-11に示す焼失竪穴住居SI01 (大きさ8.4mx7.6m, 深さ約60cm) からサンプリングした。試料は、上屋から落下したと考えられる焼土の集積域で7つのサイトを設定し、10ccプラスチックキューブを用いて採取した。図5-12右図に試料の採取サイトを示す。

試料の自然残留磁化を測定後、6段階 (2.5~20mT) の交流磁場で消磁を行った。また、焼土面からブロックで試料を採取し、熱消磁と帯磁率の研究も行った。研究内容は酒井他 (2013) に示している。

### 5.2.1.2. 残留磁化の方向と年代推定

交流消磁の結果として、図 5-13 にザイダーベルト図を示す。試料の多くは、プロットが原点に向かっており、二次磁化は少なく、地磁気方向の安定な磁化を獲得していた。

表 5-4 に、キューブ試料から得られた残留磁化の測定結果をまとめた。図 5-14 (a) は、遺構面の西側に位置するサイト 2 以外の 3 サイトの結果である。3 サイトの磁化方向は似ており、各サイトの  $\alpha_{95}$  も  $8^\circ$  以下で、比較的集中していた。図 5-14 (b) には、北側と南側の 3 サイトの結果を示している。図 5-14 (a) に較べてまとまりが悪く、サイト 6 は、 $\alpha_{95}$  の誤差円が図の範囲内にプロットされなかった。また、図 5-14 (c) に示す西側領域のサイト 2 は、磁化方向は集中したが、磁北から  $80^\circ$  以上もずれ、他のサイトの磁化方向とも大きく異なっていた。

図 5-14 (a) の平均の磁化方向は、A.D.200~250 年頃の地磁気方向に近く、竪穴住居の焼失時期は 3 世紀前半と推定された。遺構の年代である弥生時代終末期とも合う年代を示した (図 5-15)。近接している各サイトの磁化が同じ方向で集中する事からも、焼土は冷却時に殆ど乱されず、その後動いていないことを示している。

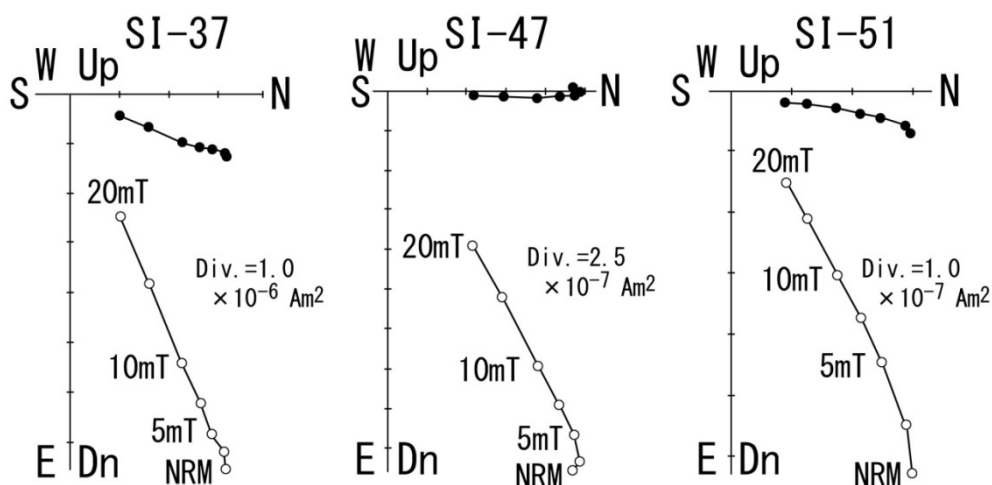


図 5-13. 交流消磁の結果。

表 5-4. 残留磁化の測定結果.

サイト番号 (焼土の色)	解析数/ 測定数	偏角 (°)	伏角 (°)	磁化強度 (Am <sup>2</sup> /kg)	$\alpha_{95}$ (°)
1(暗赤褐色)	4/5	-5.4	56.6	$4.46 \times 10^{-5}$	8.4
2(橙色)	7/7	76.6	57	$6.33 \times 10^{-4}$	4.6
3(橙色)	5/7	14.5	64.5	$2.59 \times 10^{-4}$	7.7
4(橙色)	5/7	2.7	61.4	$1.87 \times 10^{-4}$	4.2
5(暗赤褐色)	3/3	7.8	61.8	$5.18 \times 10^{-5}$	3.4
6(暗赤褐色)	3/3	-4.7	52.2	$3.69 \times 10^{-5}$	25.2
7(暗赤褐色)	4/7	2.1	59.6	$9.28 \times 10^{-5}$	11.6
サイト3,4,5の平均	13	8.1	62.8	—	3.1

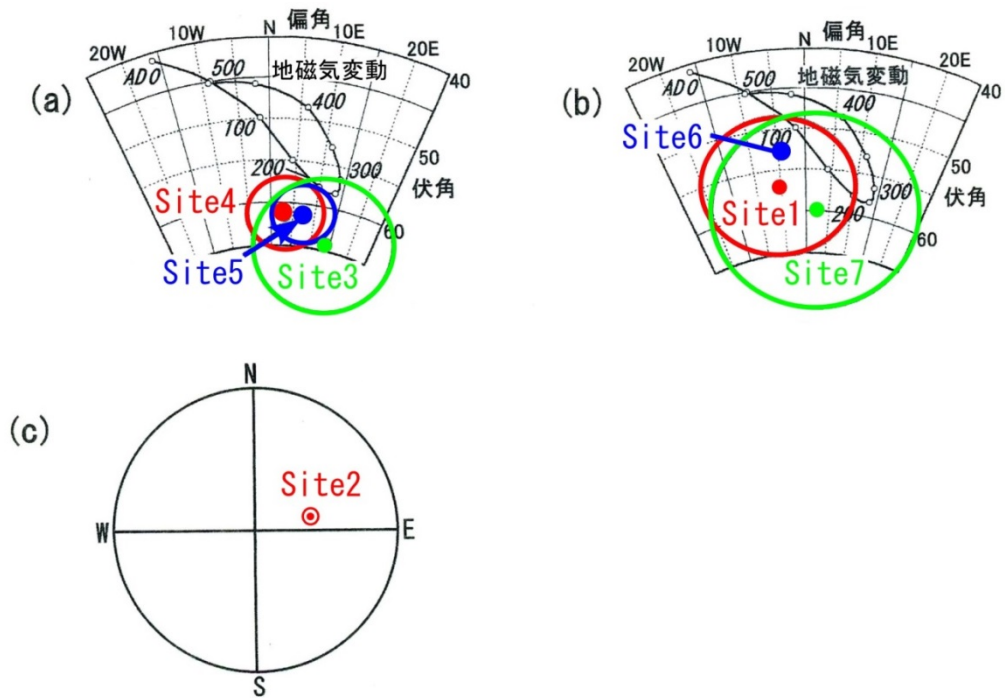


図 5-14. 焼土の磁化方向と地磁気変動, (a) 遺構西側領域の磁化方向が比較的集中したサイト, (b) 北側と南側のサイト, (c) 西側領域で磁化方向が大きくずれたサイト.

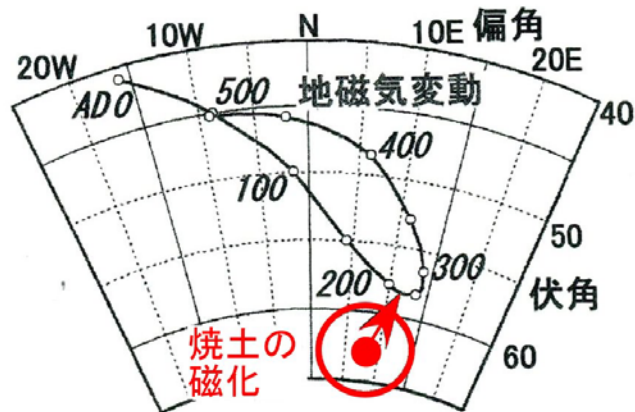


図 5-15. サイト 3, 4, 5 の平均の磁化方向.

### 5.2.1.3. 焼土の色と磁化特性

試料を採取した各サイトの焼土は、暗赤褐色と橙色の2つの領域に識別された。焼土の色は、加熱時の温度や雰囲気を変えて変わる。表 5-4 では、橙色焼土の方が磁化強度は強く、磁化方向はまとまっており、焼土の色の違いに磁化特性の差と対応する傾向が認められた。

そこで、焼土の色と磁化特性を更に検討する為に、ブロック試料を用いた。暗赤褐色土壌については3地点の各ブロック試料より5個の試料を、橙色土壌では、1地点のブロック試料より3個の試料を作成し、熱消磁を行った。

各試料の帯磁率と残留磁化を測定した結果を表 5-5 に示す。帯磁率、磁化強度共に橙色試料の方が大きく、これは含有する磁性鉱物の多寡に起因すると考えられる。

次に、加熱の際の磁性鉱物の変化の有無を、各温度での帯磁率の変化により検討した。図 5-16 に示す様に、暗赤褐色試料の帯磁率は500℃付近より大きくなり、600℃では初期値の5割以上まで増加した。一方、橙色試料の帯磁率は高温部で多少減少している。

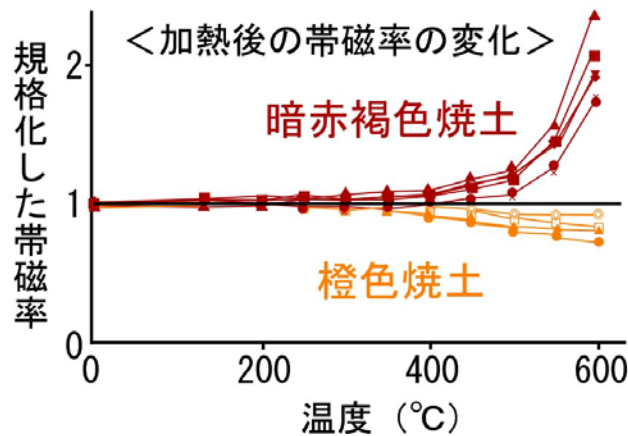


図 5-16. 帯磁率の温度変化.

表 5-5. 焼土の色と磁化特性の違い.

焼土試料 (色)	磁化強度 平均 ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ )	磁化強度範囲 ( $\times 10^{-5}\text{Am}^2/\text{kg}$ )	帯磁率平均 ( $\times 10^{-6}\text{SI}$ )	帯磁率範囲 ( $\times 10^{-6}\text{SI}$ )
暗赤褐色	$4.63 \times 10^{-5}$	2.82-6.23	63	46-70
橙色	$2.09 \times 10^{-5}$	0.54-3.75	296	237-351

図 5-17 に、熱消磁の結果を示す。各試料の磁化は600℃付近で消失しており、焼土の磁化は主にマグネタイトが担っていることを示している。上図の橙色試料 7c や下図の暗赤褐色試料 6c のザイダーベルト図では、600℃まで磁化方向は殆ど変化していない。中図の暗赤褐色試料 4d では、500℃を境に高温部の磁化方向がずれるが、大きなずれでは無い。



一般に、土壌が加熱を受けると、含まれる非磁性の水酸化鉄が磁性鉱物（赤鉄鉱や磁鉄鉱）に変わり、高温になるほど進行する。焼土試料も焼成時にこの反応を起こし、特に橙色焼土では、高温まで加熱されて磁性鉱物が多くなったと考えられる。一方、暗赤褐色焼土は焼成が十分で無かったため、実験時の加熱で鉱物変質が起き易く、帯磁率変化が大きかったと推測される。つまり、橙色焼土の方が暗褐色焼土より被熱温度が高かったと考えられた。そして熱消磁における磁化方向から、焼土は600°C以上（一部は500°C以上）まで焼成され、その状態から殆ど動かずに冷却したことが示された。

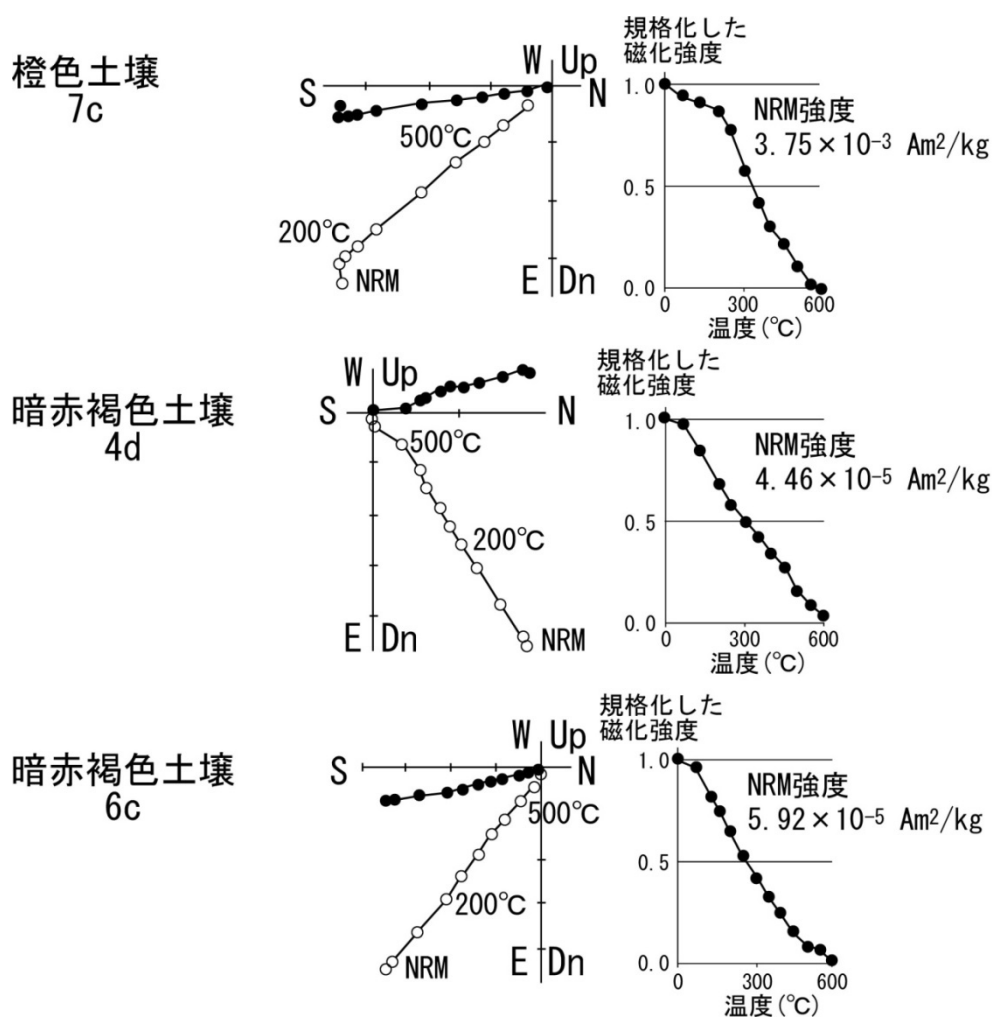


図 5-17. 熱消磁の例、各結果はザイダーベルト図と磁化強度の温度変化で示している。

#### 5.2.1.4. 屋根土の落下過程

今まで述べた結果を基に、屋根を覆っていた土壌が火災で焼土になった過程を考える。本論で用いる“床面の温度”とは、屋根上の土が遺構面へ落ちて加熱される際の温度を表している。

図 8 (a) に、土屋根が高温になり冷却して磁化を獲得することを示した。その磁化獲得には、以



下の、図 8 (b) ~ (e) に示す 4 つの過程が考えられる。

(b) 屋根上で土壌は  $600^{\circ}\text{C}$  以上の高温になり、冷却時に熱残留磁化を獲得した。そして十分に冷却した後で落下した。床での焼土の温度は高くなく、再加熱による新たな磁化の獲得は無かった。

(c) 屋根で高温になった土壌は冷えずに落下し、床面への落下時点でも  $600^{\circ}\text{C}$  以上の高温を保っていた。その後、床で冷却して熱残留磁化を獲得した。床の温度は低かった。

(d) 屋根土が落下した際に床面は  $600^{\circ}\text{C}$  以上の高温であった。その為、落下した屋根土は床で加熱されて冷却過程で熱残留磁化を獲得した。屋根土が落下前に屋根で熱残留磁化を獲得していても、床で  $600^{\circ}\text{C}$  以上の再加熱を受け、元の磁化は全て消失し新たな磁化が獲得された。

(e)  $600^{\circ}\text{C}$  以上の高温になった屋根土は冷却する途中で落下した。その時の床面は  $580^{\circ}\text{C}$  以下の温度であった。その為、屋根上で獲得されていた磁化の高温成分は残り、床での再加熱・冷却で新たに低温成分が獲得されて、焼土の磁化は二成分の合成磁化になった。

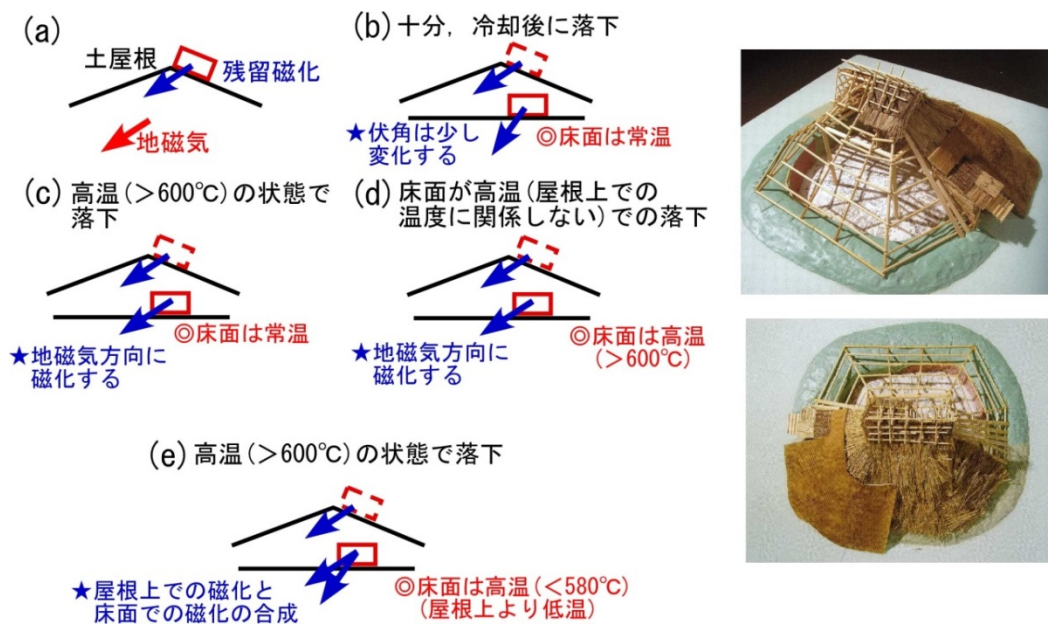


図 5-18. 左:屋根上の土壌の加熱による磁化獲得の過程, 右:浅川・藤井 (2006) による焼失住居の復元.

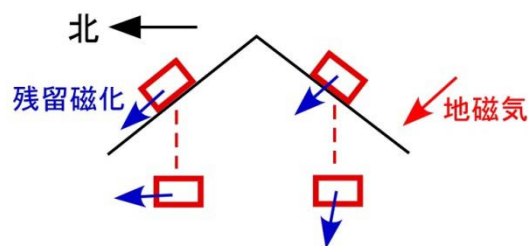


図 5-19. 屋根上の土壌 (焼土) の落下による磁化伏角の変化.

次に、上記の4つの過程の可能性を検討する。図8の右には、浅川・藤井(2006)による本研究の焼失住居の復元モデルを示しており、土屋根の高さは、場所によっては2m以上あったと推測されている。過程(b)、(e)の場合には、屋根上で磁化した焼土が崩れずに方向を保って床面へ着地しないと、磁化方向はまとまらず、一成分の磁化は得られない。また、屋根の傾斜角は30°程度であったと推定されていることから、土壌が屋根上で熱残留磁化を獲得して落下する場合、傾斜の緩い床面への着地によって磁化の方向は変わる。特に遺構の南側と北側のサイトでは伏角値が大きく変わる筈であるが(図9)、測定結果にはその様な傾向は無い。

以上の様に、磁化測定による検討では、焼土は過程(c)か(d)により形成された可能性が高い。

#### 5.2.1.5. まとめ

富山県富山市の打出遺跡から発掘された弥生時代終末期の時代の焼失竪穴住居跡において、上屋根から落下した焼土の磁気物性を研究し、火災時の状況を検討した。

焼土の残留磁化は安定な一成分であり、600°C以上の被熱を示した。そして地磁気年代では、火災はA.D.200~250年の発生と得られ、遺構の考古学年代と一致した。遺構面では暗赤褐色の焼土と橙色の焼土が識別され、磁化特性にも顕著な差が認められた。比較すると、橙色焼土の方が磁化強度・帯磁率が強く、また熱消磁により被熱温度は600°C以上(一部は500°C以上)と推定された。この磁化特性の違いは、被熱の温度と環境の影響を示すと考えられる。

以上の結果から、屋根土は火災で落下し、着地後に600°C以上の高温状態から乱れずに冷却しており、その過程で安定な磁化を獲得したと考えられた。つまり屋根土は、落下時点でも600°C以上の高温であったか、或いは床面が600°C以上の高温であって落下後に再加熱を受けたと考えられ、上屋根で高温になった後で十分に冷えてから崩落した可能性は低い。

本研究で初めて実施した焼失竪穴住居の磁化研究は事例を増やす必要がある。今後は更に詳細な磁気物性を用いて、特に土屋根の崩落過程の研究を進めることが望まれる。また、村本他(2006等)で行われた様な焼失実験で、考古学調査と共に磁化研究および熱電対による土屋根・床面の温度実測を併用する研究を実施することも有効と考える。

### 5.2.2. 高岡市下老子笹川遺跡

#### 5.2.2.1. 研究の概要

図5-20に示す高岡市下老子の下老子笹川遺跡は、庄川扇状源地扇端部の佐野台地上に位置し、弥

生時代中期～終末期の大規模な集落跡が発掘により認められている（富山県文化振興財団，2006，2014）。

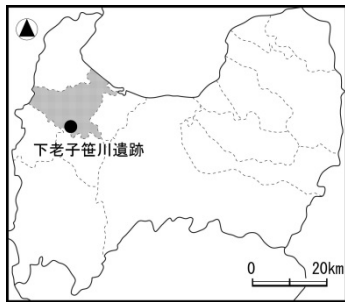


図 5-20. 下老子笹川遺跡の位置。

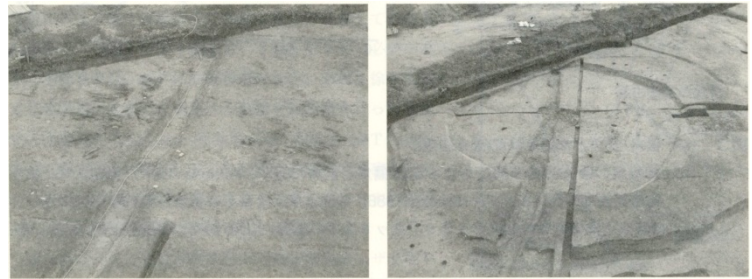


図 5-21. 左:SI12 遺構の上層の焼土と炭化材の状況，  
右:貼床面での噴砂の状況，共に北からみている。



図 5-22. 上：現地調査状況（北西から），  
下：サイト 5 の焼土状況（北から）。

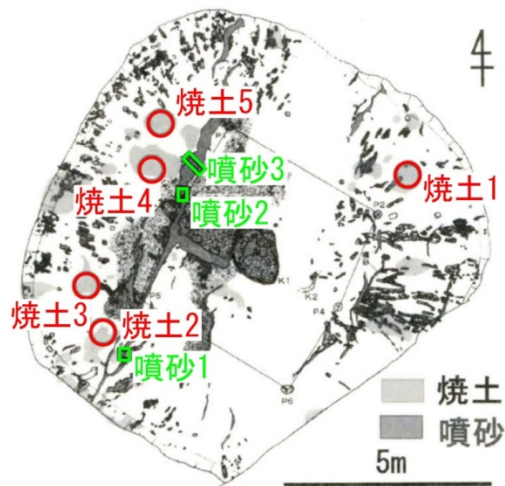


図 5-23. 竪穴建物(SI12 遺構)と試料採取地。

遺跡 G2 地区の SI12 遺構は、玉作りが行われた弥生時代後期の周溝式竪穴建物であり、垂木・支柱・壁板茅の一部と推定される炭化材および、屋根に葺かれた土の一部と推定される焼土が検出され、焼失竪穴建物であったと判明した（越前，2014）。また，同遺構では，図 5-21 に示すように地震に伴う液状化現象を示す噴砂も検出された。

噴砂は貼床・柱穴・炉を引き裂いており，柱穴の一つは噴砂によって断面が斜めに変形し，炭化した柱根が傾いた状態で出土した。貼床を噴砂が切っており，その上層を焼土と炭化材を含む埋土が覆っているので，住居は地震後に焼失したと考えられた。

竪穴建物の SI12 にある焼土領域の磁化を研究するため，図 5-22，5-23 に示すように，焼土の 5

つの範囲で 7cc プラスチックキューブ試料とブロック状試料を採取した。磁化研究では、交流消磁を 60mT までの 12 段階の磁場で行った。また測定結果の偏角補正には、国土地理院による計算式から得た調査地の偏角（西偏 7.62 度）を用いた。

### 5.2.2.2. 焼土の磁化と年代推定

図 5-24 に交流消磁の結果例を示すが、同様に多くの試料では消磁に伴う磁化の変化は原点に向う直線で近似でき、焼土は安定な磁化を獲得していた。

消磁で安定な磁化が求められなかった試料を除き、各サイトの測定結果から平均の磁化を求めて表 5-5 にまとめた。サイト 3 の磁化方向は他のサイトとかなり違っており、また集中度も低い。この地域は、焼土となった後で試料採取までに移動や変形を受けた可能性がある。

その他の 4 つのサイトの磁化方向は比較的似ている。4 つのサイトの平均の磁化方向と紀元後 600 年間の地磁気変化を対比して年代を検討した（図 5-25）。磁化方向は A.D.140 年頃もしくは、A.D.350 ~400 年頃に近い方向を示し、前者の方向により近い。考古学から弥生時代までの時代と考えられていることも考慮し、焼土の年代は 2 世紀中頃（A.D.140±25 年）と推定した。

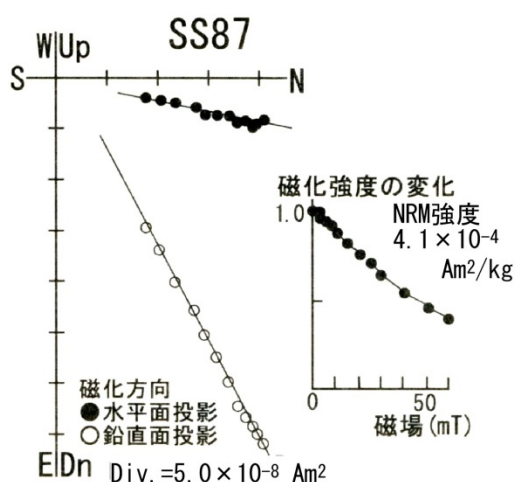


図 5-24. 焼土試料の交流消磁の結果例.

表 5-5. S112 遺構の焼土の磁化測定結果.

サイト名	試料数	偏角 (°)	伏角 (°)	磁化強度 (Am <sup>2</sup> /kg)	$\alpha_{95}$ (°)
1	7	4.4	50.7	$2.68 \times 10^{-4}$	2.8
2	8	2.1	52.1	$3.15 \times 10^{-4}$	3.2
3	8	14.8	58.3	$4.64 \times 10^{-4}$	5.3
4	8	3.1	53.8	$5.41 \times 10^{-4}$	3.4
5	9	7.2	55.3	$4.50 \times 10^{-4}$	2.5
サイト1, 2, 4, 5の平均		4.1	53.0	—	2.7



図 5-25. 焼土の磁化方向と紀元後 600 年間の地磁気変化との対比, 地磁気方向の変化は, 広岡(1977)より抜粋し加筆した.

建物に使用された柱の放射性炭素年代が調べられており, その年代から建物は 1 世紀後半以降の築造とされていた. 先述の様に, 床面の層には噴砂があり建物は地震被害を受けていたが, 噴砂で持ち上げられ傾いた状態の柱 (炭化材) もあることから, 地震後に建物は使われなかったと考えられている. 酒井・木村 (2014) は, 噴砂の地磁気年代を求めており, A.D.120±15 年と得られたことから, 建物は 2 世紀前半の地震で廃絶されたと推定されている.

今回, 焼土は噴砂より新しい年代が得られたが, 焼土を含む層は貼床や噴砂層を覆っており, 考古学の見解とも一致する. しかし年代誤差の範囲では, 焼土と噴砂はほぼ同年代と見なせ, SI12 は 2 世紀前半の地震被害で廃絶され, それに関連してあまり時間を置かずには焼失した可能性も考えられる.

### 5.2.2.3. 焼土の磁化獲得の過程

焼土の磁化方向は, 1 サイトを除く各サイトで揃っており, また 4 つのサイトで平均した方向も誤差は少なく集中していた. 以上の結果は, 各サイトにおいて焼土は高温状態から冷却時に地磁気の方に磁化を獲得したことを示している.

焼土は, 元は土葺き屋根の土であり建物の焼失により焼土になったと推測される. 屋根土から焼土になった過程と磁化の獲得について二つの可能性を検討した.

①: 焼失の際に土屋根として被熱した焼土が, 冷却後に屋根が壊されて落下する場合には, 屋根上で地磁気方向に獲得された土の磁化は落下により方向が乱れる筈である. つまり, 本研究で焼土の磁化が地磁気方向に集中したことは, 焼失の際, 屋根で土は高温になっていた可能性はあるが, 高温で落下しており, 地上での冷却過程で磁化が獲得されたと考えられる.



②：地震の際に、竪穴建物の土屋根は既に崩壊していたことも考えられる。噴砂が床面を貫き、柱が傾いていたことから、建物は全壊まで至らなくてもかなり被害を受け、屋根土は落下していた可能性もある。そのような場合、その後の焼失によって屋根土は床の上で焼土となり、地磁気方向の磁化を獲得する。

SI12 遺構における遺物出土の状況は、周溝等から土器が一定量出土しているが、屋内部の床面上には完形または完形に近い土器がなく、破片もあまり残っていなかった。このことから考古学的には、同遺構の焼失は、地震時の失火ではなく、地震後に必要な道具を持ち出した後でしばらくして故意に燃やされた可能性が高いと考えられている。一方、覆土上面付近の炭化材と同じ高さからは、比較的形を留めた壺等が出土しており、建物を燃やした後に儀礼的な行為が行われた可能性もある。

また倒れたことが確認された柱は、柱の太さ・樹種・並び方から、補助的な支えであった柱と考えている(越前, 2014)。先述の道具が持ち出された可能性を合わせて考えると、②の可能性は低い。

更に、サイト1・2・4・5の位置が建物域にほぼ平均に散布し、倒れた柱に近いサイト4も含めてほぼ一定の磁化方向を示していることは、一部の屋根土のみが先に落下したのではないことの傍証となる。つまり地震による噴砂で補助柱が倒れても土屋根の大部分は未だ床面には落下していなかったと考えられ、焼土の磁化獲得の過程としては①の可能性が高いと考えられる。

#### 5.2.2.4. まとめ

下老子笹川遺跡の焼失竪穴建物 SI12 において、遺構で認められた5箇所の焼土について磁化を研究し、地磁気変化との対比から年代を検討した。その結果、建物は紀元2世紀の中頃(A.D.140±25年頃)に焼失したことが示された。

SI12は、柱の放射性炭素年代から1世紀後半以降の築造とされていた。そして貼床には噴砂が認められており、地震の被害(A.D.120±15年頃)を受けていた。噴砂に持ち上げられ傾いた柱も炭化材となって遺存していたことから、地震後には建物は使用されることなく廃絶したと考えられる。本研究より、下老子笹川遺跡のSI12は、2世紀前半の地震に伴い廃絶し、ほぼ同時期かしばらく後で焼失したと考える。焼土は、元は土屋根に使用されていた土壌と推測されるが、磁化は地磁気方向に集中していることから、土壌は屋根から落下後に高温状態から冷却して磁化を獲得したと考えられる。建物の床面には土器等の道具類はあまり残されていないので、地震と同時に土屋根が崩壊して床上に落下し失火によって焼けたのではなく、地震による半壊を契機とする解体処分または忌避のために焼かれて土屋根が崩れた可能性が挙げられる。

### 5.3. 沖縄県久米島における考古遺物の熱履歴

沖縄県島尻郡の久米島は、那覇市の西方 100km に位置し、中国との朝貢貿易の航路上にあたり、琉球王国の玄関口として機能していた。久米島に所在する重要なグスクとして、宇江城と具志川城が挙げられる（図 5-26）。両グスクは、14～5 世紀に築城され、16 世紀初頭に中山王尚真の中央集権化政策の過程で、王の一軍に討伐されたと考えられており、落城の際に火災が発生し被熱したと考えられる遺物が出土している。この宇江城での戦禍の証明の為、二次焼成されたと判断される陶磁器の磁化から被熱の痕跡を研究した。その際、遺物による地磁気の研究では非破壊測定が必要となる場合も多いので、二次焼成を受けていない陶磁器底部を用いて非破壊の地磁気研究法の有用性も検討した。

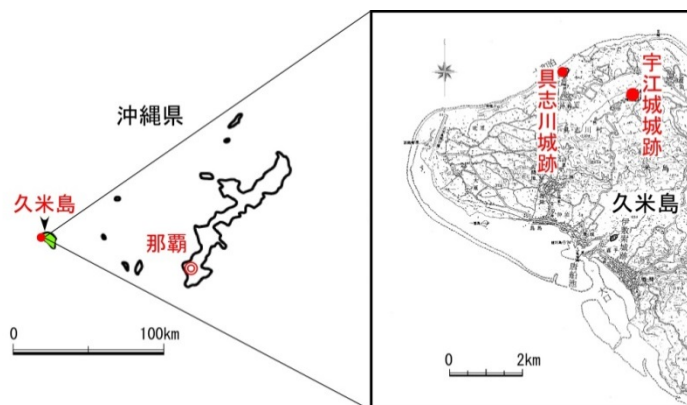


図 5-26. 宇江城城跡と具志川城城跡の位置図，當眞（1995）より抜粋加筆した。

#### 5.3.1. 久米島具志川城跡の石積みの研究

##### 5.3.1.1. 研究概要

最初に、久米島の具志川城跡において、石積み遺構の石灰岩について行った磁化研究（酒井・米原，2008）を述べる。

具志川城跡は、久米島の北西部に所在し（北緯 26°23'00"，東経 126°45'04"），海に突出する琉球石灰岩の独立丘に営まれている。同城跡は 4 つの郭を持ち、琉球石灰岩による外郭石積，区画石積や基壇跡が確認されている（図 5-27）。そして、三方が断崖に面する立地状況，安山岩・石灰岩を組み合わせた独特な城壁の積み方や，海外貿易に係る出土遺物等の学術的価値から，昭和 50 年には国史跡に指定されている（沖縄県久米島町教育委員会，2007）。

城跡の舎殿跡中央から焼土や二次的に被熱した遺物が出土しており，落城時に広範囲に火災が起きた事が示唆されていた（沖縄県久米島町教育委員会，2007）。研究では，戦火の影響を探る為，II

の郭の石積みから石灰岩の小片を採取して磁化研究を実施した。



図 5-27. 具志川城跡と石積み遺構，黄色の点の石灰岩を採取した。

### 5.3.1.2. 石積みの磁化と地磁気方向変化との対比

石積み試料の磁化は安定しており，交流消磁後の平均磁化方向は，偏角  $4.1^\circ$ ，伏角  $28.1^\circ$ ，信頼角  $\alpha_{95}$  は  $2.7^\circ$  と比較的集中していた．図 5-28 左図では，各試料の磁化方向をシュミットネット図にプロットした．石積みの石灰岩は，海底で堆積した後で運ばれているため，磁化方向は揃っていない筈だが，石積みの別々な場所から採取した各試料の磁化は，ほぼ同方向を向いている．さらに，各試料の磁化の平均強度は  $7.90 \times 10^{-4} \text{Am}^2/\text{kg}$  と得られ，石灰岩が形成時に獲得する堆積残留磁化より非常に強かった．以上の事から，石積みの石灰岩は，ある時に加熱されて初生の堆積残留磁化を失い，当時の地磁気方向に熱起源の磁化を獲得した可能性が示された．

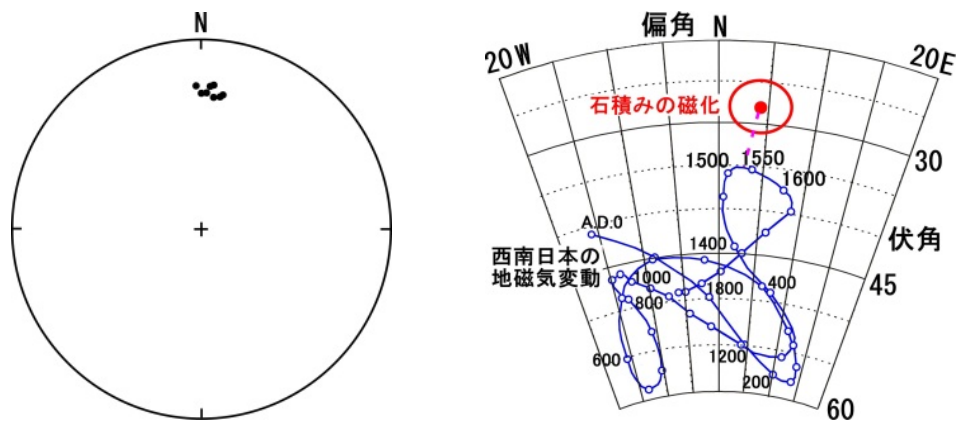


図 5-28. 左:石積みの各試料の磁化方向のシュミットネット投影，右:拡大シュミットネットでの石積みの平均磁化と西南日本の地磁気変化.

図 5-28 右図には，各試料の磁化を平均した方向を拡大したシュミットネットに投影し，京都を基準とする西南日本版の地磁気変化（広岡，1977）と比較している．沖縄は京都と緯度差が約  $9^\circ$  で



あり、伏角は浅くなる事を考慮すると、磁化方向から A.D.1500~1550 年の地磁気年代が推定され、具志川城が 16 世紀始めに戦禍で落城したとの古文書の記録と一致する。

石積みの石灰岩の磁化から、戦禍の際の火災で石積みが加熱され、熱残留磁化を獲得していることが示された。

### 5.3.1.3. 地磁気強度変化との対比と石積みの熱履歴

図 5-29 には石積み試料の熱消磁とテリエ法実験の結果の例を示している。左図の熱消磁のダイダグラムでは、磁化は 350~420°C まで直線関係が得られ、石積みは同温度まで加熱されていたと考えられる。右図にはテリエ法実験で得られた SNRM/TRM 図を示すが、350°C までの温度段階のプロットが直線上にある。この結果は、石灰岩試料の磁化 (NRM) が熱起源の磁化に置き換わり、石灰岩は少なくとも 350°C の熱を受けていることを証明している。

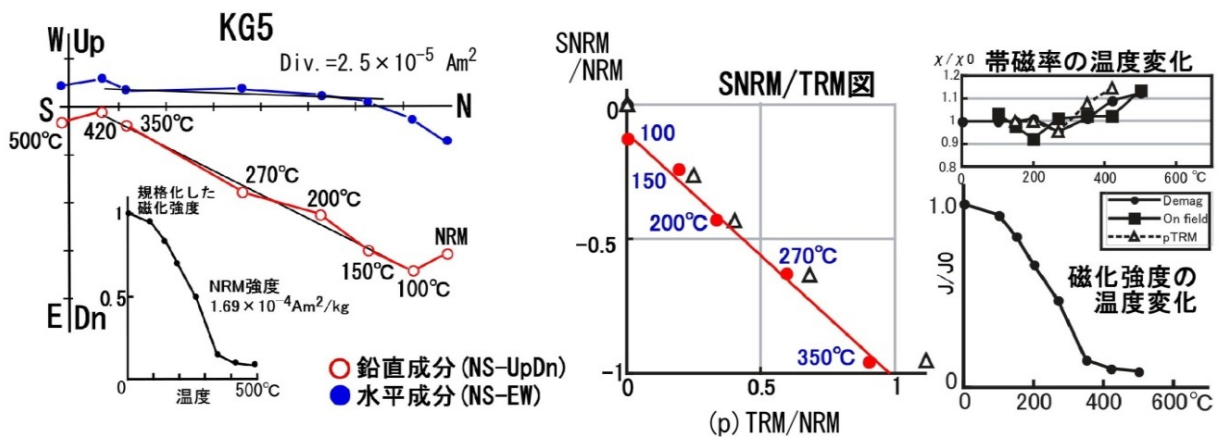


図 5-29. 左：石積み試料の熱消磁の結果，右：テリエ法実験の結果。

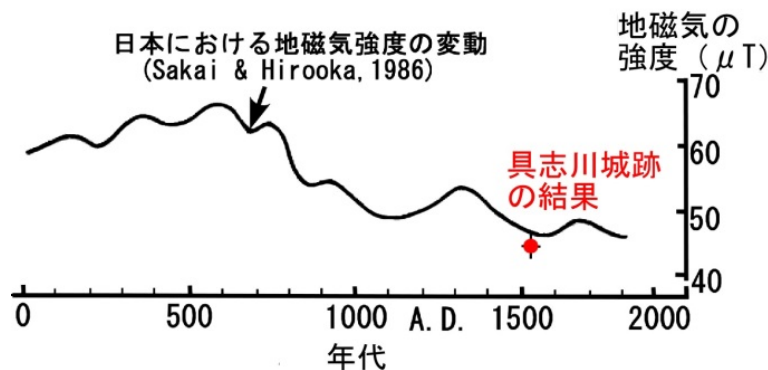


図 5-30. テリエ法で得た石積み石灰岩の地磁気強度と過去 2000 年間の地磁気強度変化の対比。

また、図 5-29 右の SNRM-TRM 図より石灰岩が加熱された時の地磁気強度を求めた結果、 $44.4 \pm 1.7 \mu\text{T}$  と得られた。図 5-30 では、得られた地磁気強度を過去 2000 年間に於ける日本の地磁気

強度の変化 (Sakai & Hirooka, 1986) と比較しているが, A.D.1500-1550 年頃の地磁気強度に近い。地磁気強度の変化は主に西南日本の遺物の研究で得られている。地磁気強度も緯度に依存し低緯度では弱くなるので, 図の曲線より若干弱くなっていることも妥当である。以上の地磁気強度の研究でも, 石積みの石灰岩が 16 世紀初めから半ば頃に加熱を受けたことが示された。

### 5.3.2. 宇江城城跡から出土した陶磁器片の研究

#### 5.3.2.1. 研究概要

宇江城城跡は, 具志川城跡が海際に立地するのに対して島の内陸部に位置し, 島内随一の高地である宇江城岳の山頂に築かれている。島内を掌握できる立地や, 主郭部を堅牢に囲み, その下に腰曲輪群が無数に配置されるなど城の防御を重視した構造から, 久米島における拠点的なグスクであったと考えられている (當眞, 1995)。また, 各曲輪の遺物包含層からグスク系土器や 14~15 世紀に属する輸入陶磁器の破片が大量に出土している。

宇江城跡から出土した陶磁器片には, 中山王の侵攻の際に焼かれているものも多いと考えられ, 肉眼観察でも二次加熱の可能性が推察される陶磁器片があった。そこで, 出土した陶磁器片について, 戦禍の際の二次焼成の検証を目的として磁化研究を行った。また, 二次焼成を受けていない試料(陶磁器底部)について, 非破壊の磁化測定で地磁気復元の可能性を研究した。

研究試料として, 宇江城の一の郭より出土した陶磁器片 38 点を扱った。そのうちの 22 点は, 二次焼成を受けたと考古学的に観察された資料であり, 16 点は二次焼成を受けていない資料である。図 5-31 に用いた陶磁器片の一部を示している。

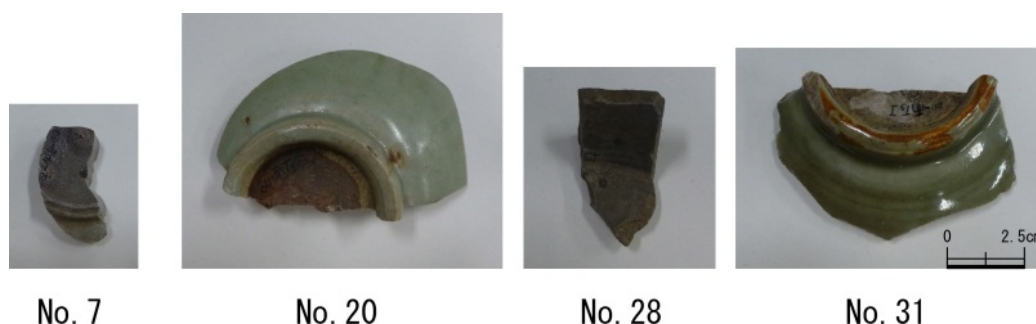


図 5-31. 実験に用いた宇江城跡から出土した陶磁器片.

まず, 超伝導磁力計を用いて, 陶磁器片の各試料を加工しない状態で NRM を測定し, その後 11 段階の交流磁場で消磁を行った。測定時は図 5-32 の様に, 試料に任意の北方向を設定して超伝導磁力計の測定トレイに, 試料の高台の残存状態が良好な場合は自立させて固定し, 自立が難しい場合

は、高台下に粘土を置いて底部が水平になるように固定した。自立可能な試料については、測定間隔 5 mm, 20 回連続での測定を行い、磁化強度が最も強い測定点での磁化方向を測定結果として採用した。

数点の陶磁器片試料については熱履歴を調べるため、熱消磁実験とテリエ法実験を行った。その為、陶磁器底部の水平部分を岩石カッターで 1.5 cm 四方に整形して準備した。加熱実験では、100～500℃まで 50℃毎に設定し、アルゴン雰囲気下で加熱を行った。



図 5-32. 超伝導磁力計で磁化測定を行う際の試料トレイでの陶磁器片試料の様子。

### 5.3.2.2. 陶磁器片の磁化方向の非破壊測定

超伝導磁力計を用いた陶磁器片の磁化測定の結果を表 5-6 に示している。陶磁器片の二次焼成の有無は、考古学の観点を基に判別している。

陶磁器片では磁化の偏角は復元できないので、磁化伏角について検討した。図 5-33 で示される様に、二次焼成の無い試料 (No.22～38) の伏角は 40～50°に集中した。それに対し、二次焼成された試料 (No.1～21) の伏角は揃っていない。これは陶磁器が製作された時 (一次焼成時) は高台で自立した状態で焼成されたが、その後ある時期にばらばらの向きで再磁化している為と考えられる。

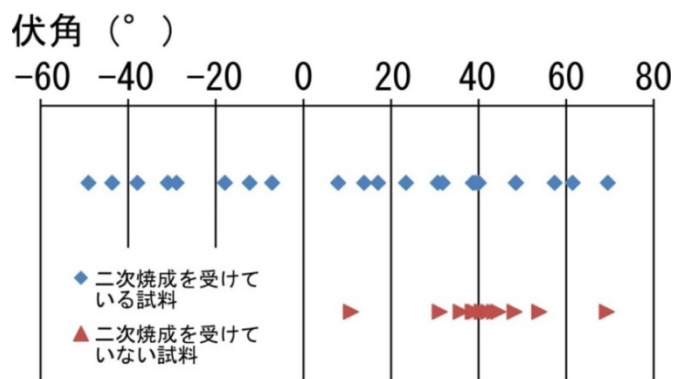


図 5-33. 陶磁器片試料の磁化伏角の分布。

表 5-6. 陶磁器片の磁化の測定結果, 左は二次焼成を受けた試料, 右は二次焼成を受けていない試料の結果を示している.

試料No.	伏角 (°)	磁化強度 (Am <sup>2</sup> /kg)	帯磁率 (×10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /kg)	試料No.	伏角 (°)	磁化強度 (Am <sup>2</sup> /kg)	帯磁率 (×10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /kg)
1	-43.7	1.65 × 10 <sup>-4</sup>	1.23	23	43.6	2.06 × 10 <sup>-5</sup>	0.43
2	38.6	1.23 × 10 <sup>-6</sup>	0.33	24	53.8	6.46 × 10 <sup>-5</sup>	0.26
3	57.3	9.21 × 10 <sup>-7</sup>	0.25	25	41.0	1.45 × 10 <sup>-5</sup>	0.26
4	7.9	1.05 × 10 <sup>-5</sup>	0.38	26	69.3	8.65 × 10 <sup>-7</sup>	0.17
5	-12.3	3.00 × 10 <sup>-6</sup>	0.33	27	-3.6	1.36 × 10 <sup>-3</sup>	16.33
6	-31.0	3.32 × 10 <sup>-6</sup>	0.36	28	-47.4	2.07 × 10 <sup>-3</sup>	10.15
7	-37.9	1.37 × 10 <sup>-5</sup>	0.42	29	-40.6	6.74 × 10 <sup>-3</sup>	8.92
8	30.7	7.32 × 10 <sup>-4</sup>	5.47	30	44.5	1.43 × 10 <sup>-6</sup>	0.08
9	-17.9	2.98 × 10 <sup>-7</sup>	0.17	31	48.2	1.29 × 10 <sup>-4</sup>	0.49
10	48.5	3.64 × 10 <sup>-6</sup>	0.32	32	40.6	1.72 × 10 <sup>-5</sup>	0.16
11	17.0	9.41 × 10 <sup>-5</sup>	0.37	33	35.9	2.12 × 10 <sup>-4</sup>	0.49
12	-49.1	2.97 × 10 <sup>-6</sup>	0.13	34	38.6	2.24 × 10 <sup>-5</sup>	0.15
13	40.0	3.57 × 10 <sup>-6</sup>	0.10	35	31.1	3.30 × 10 <sup>-5</sup>	0.11
14	61.4	1.97 × 10 <sup>-6</sup>	0.56	36	42.2	2.93 × 10 <sup>-5</sup>	0.28
15	23.4	2.48 × 10 <sup>-6</sup>	0.12	37	10.8	1.20 × 10 <sup>-6</sup>	0.35
16	13.9	2.16 × 10 <sup>-6</sup>	0.39	38	39.1	3.44 × 10 <sup>-6</sup>	0.17
17	48.5	7.01 × 10 <sup>-6</sup>	0.34				
18	39.3	6.11 × 10 <sup>-5</sup>	0.45				
19	-29.0	2.09 × 10 <sup>-5</sup>	0.38				
20	69.4	3.02 × 10 <sup>-6</sup>	0.16				
21	31.8	1.04 × 10 <sup>-5</sup>	0.12				
22	-7.2	2.06 × 10 <sup>-5</sup>	0.31				

二次焼成の無い試料のうち, 試料 No.27~29 は青磁ではなく, 磁化強度と帯磁率も他の試料と異なり, 強い. 試料 No.28 と 29 は負の伏角 (-47.4, -40.6°) を示しており, 底部を上にした状態で二次焼成された可能性が推測される.

### 5.3.2.3. 陶磁器片の磁化方向と地磁気変動との比較

二次焼成のある試料 7 点と無い試料 6 点の交流消磁を行った. 図 5-34 に実験結果の例をザイダーベルト図と磁化強度変化として示している. 試料の多くは, 図の例と同様に, 10mT までの交流磁場で VRM (粘性残留磁化) が消えて安定な磁化が得られた. 表 5-7 に, 二次焼成の無い各試料の消磁後の伏角をまとめている.

研究した陶磁器片は 14~15 世紀に属する青磁で, 竜泉窯で製作され朝貢貿易により輸入されたと考えられている. 竜泉窯は中国浙江省竜泉県と周辺 (北緯 28°, 東経 119°付近) に位置しており, 浙江省地域でも考古地磁気研究は殆ど無いが, 緯度は久米島とほぼ等しい. また, Cong & Wei (1989) は, 中国東部 (北緯 34~38°, 東経 107~120°の範囲) の遺跡焼土の磁化から, 14~15 世紀の当該地域の伏角を約 40°と報告している.

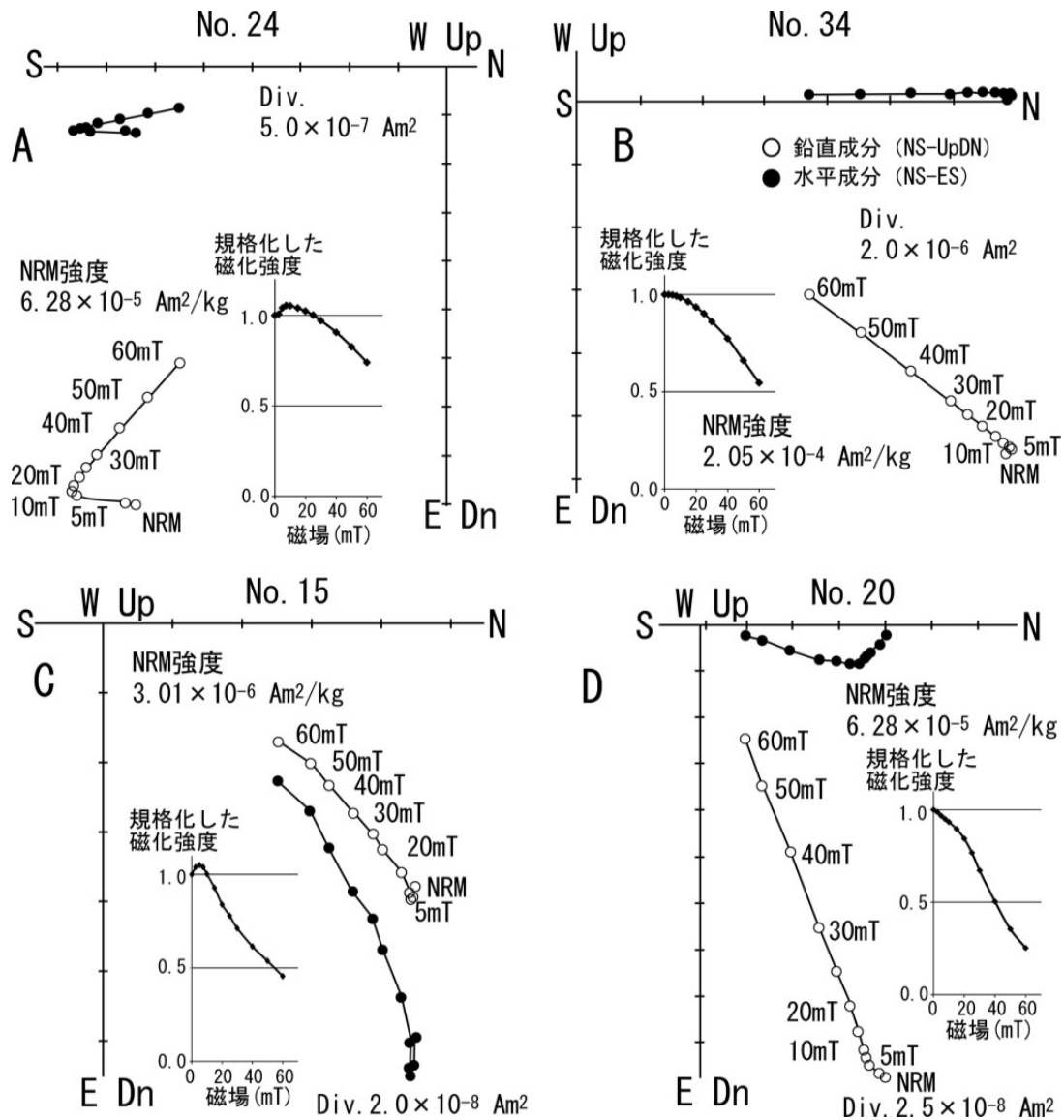


図 5-34. 交流消磁の結果例, A, B は二次焼成の無い試料, C, D は二次焼成を受けた試料.

表 5-7. 交流消磁後の各試料の磁化伏角.

試料No.	消磁磁場の範囲(mT)	伏角(°)
34	10-60	37.2
37	10-60	40.2
24	25-60	47.6
38	40-60	46
25	10-60	43.8
39	15-50	41.4
平均伏角		42.7

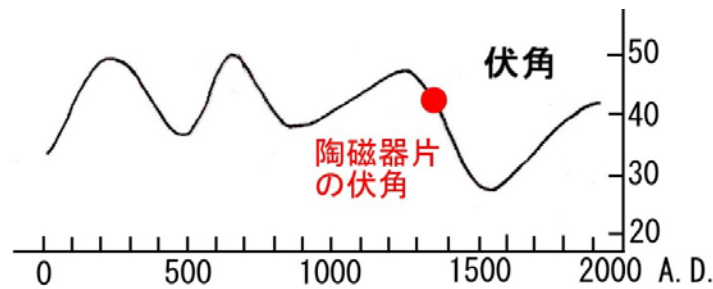


図 5-35. 陶磁器片の磁化伏角と過去 2000 年間の地磁気伏角の変化との比較，西南日本版の地磁気伏角変化 (Hirooka, 1971) の図を抜粋し， $8^{\circ}$  浅くしている。

そこで，前節で述べた具志川城跡の研究で示した様に，図 5-35 では緯度差による地磁気伏角の違いを考慮し，伏角を  $8^{\circ}$  浅くした西南日本版地磁気変化を第一次近似として，陶磁器片の伏角と比較した。本研究で得られた伏角の平均値 ( $42.7 \pm 3.5^{\circ}$ ) は 14 世紀頃の地磁気伏角に近く，14～15 世紀との陶磁器編年と調和する結果であった。

#### 5.3.2.4. 陶磁器片の熱履歴

二次焼成の無い試料は非破壊実験のみと制限があったため，熱消磁とテリエ法実験は二次焼成のある 6 試料 (表 5-6 の No1, 4, 6, 7, 8, 10) について行った。図 5-36 に熱消磁の結果の例をザイダーベルト図で示している。

図の試料 No.1 と 7 では， $350^{\circ}\text{C}$  までの低温成分と  $350^{\circ}\text{C}$  以上の高温成分の 2 成分の磁化が読みとれた。No.8 以外の他の試料でも， $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$  を境に 2 成分の磁化が見られたが，全試料で高温成分の磁化は原点に向かう直線に乗り，安定な磁化が示された。

図 5-37 には，同じ試料のテリエ法実験の結果を示している。SNRM-TRM 図のプロットは低温と高温成分で線形関係が得られている。他の試料でも，同様の線形関係が得られ，試料 No.8 は低温成分でのみ線形関係が得られた。以上の結果は，陶磁器が製作された時の高温部の一次磁化と共に，低温部の二次磁化も加熱によって獲得された熱残留磁化であることを示している。つまり，試料は高温で焼成され陶磁器として完成した後，再度  $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$  で加熱されている。具志川城跡の石積み石灰岩も戦火で  $350^{\circ}\text{C}$  程度の加熱を受けたことが指摘されており，調和している。

次にテリエ法実験の結果から当時の地磁気強度を復元する解析を行った。各試料の pTRM テストは概ね良好で，帯磁率の温度変化も 1～2 の変化であった。また線形関係を示す 3 点以上のプロットでの直線近似は，各試料で標準偏差が 0.98 を越えた。以上の結果は，テリエ法実験結果の信頼性が

高いことを示している。

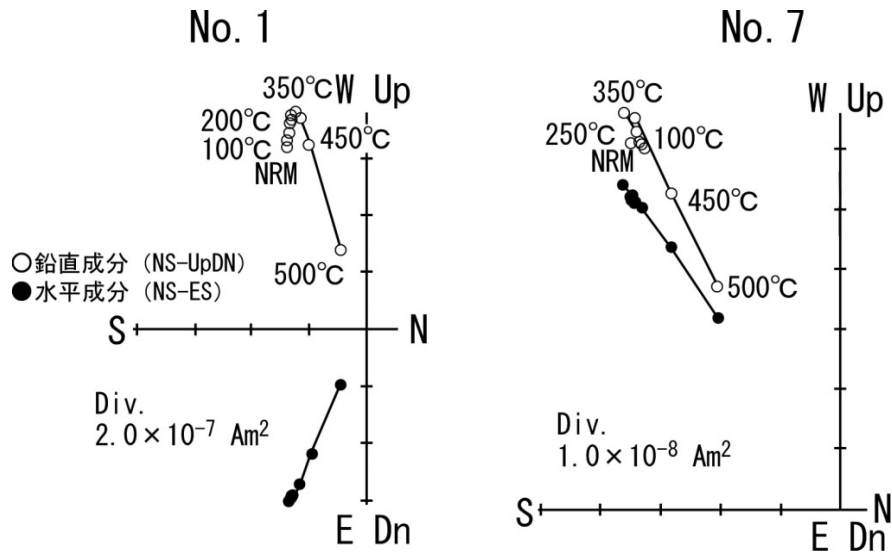


図 5-36. 熱消磁実験の結果例。

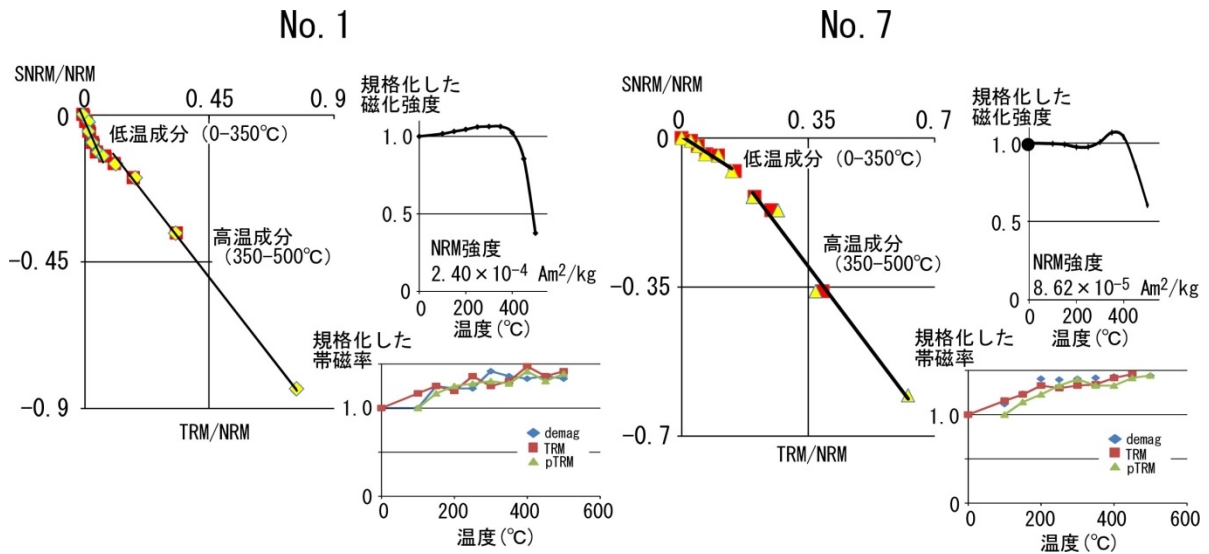


図 5-37. テリエ法実験の結果例 (SNRM-TRM 図, 磁化強度の変化, 帯磁率の温度変化)。

各試料の SNRM-TRM 図の高温部と低温部の磁化から地磁気強度を求めた。表 5-8 に両温度帯で推定された地磁気強度を示している。試料 No.6 は低温部, No.8 は高温部で近似した直線の標準偏差が低かったため, 地磁気強度を得られなかった。地磁気強度の平均は, 高温部で  $50.5 \pm 2.7 \mu\text{T}$ , 低温部で  $43.2 \pm 1.56 \mu\text{T}$  と求まった。

図 5-38 では, 各温度帯で得られた平均値を過去 2000 年間の日本の地磁気強度の変化と比較している。高温部で得られた結果は, 陶磁器が製作された 14~15 世紀の地磁気強度として妥当である。



これは、陶磁器片の低温成分の磁化獲得は、高温成分より後である筈なので、陶磁器片が約 350°C の二次焼成を受けたのは 15 世紀以降である事を示している。さらに、低温部の平均値は A.D.1500 ~1550 年頃の地磁気強度に近く、具志川城跡の石積みから得られた地磁気強度 (44.4±1.7μT) とほぼ同じである。同時期の西南日本の地磁気強度より若干弱い傾向も同様であり、陶磁器片は 16 世紀初めから中頃にかけて二次焼成を受けたと考えられる。以上の結果から、宇江城跡より出土した陶磁器片は 16 世紀初頭の落城に伴い火災が起きた際に、再度焼成されたと推測される。

表 5-8. テリ工法実験の結果.

試料No.	温度範囲 (°C)	標準偏差 直線回帰	推定磁場 強度(μT)	誤差 (μT)
1	250-350	0.99	28.1	1.8
	350-500	0.99	57	1.8
4	150-250	0.99	47.4	2.1
	250-500	0.98	18.8	1.2
6	—	—	—	—
	250-400	0.99	40.7	0.8
7	250-350	0.99	51.2	0.8
	350-500	0.98	58.5	6.1
8	150-300	0.99	44.8	1.7
	—	—	—	—
10	100-350	0.99	44.5	1.4
	350-500	0.99	45.6	2.1

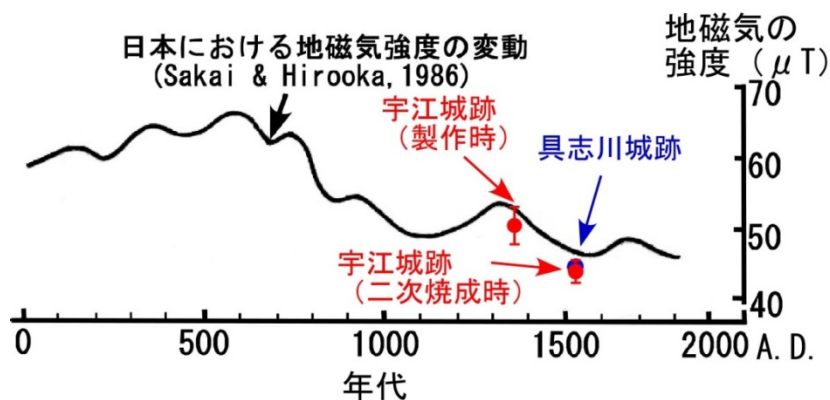


図 5-38. 宇江城跡の陶磁器片から得た地磁気強度と日本の地磁気強度変化との比較, ●は宇江城跡, ●は具志川城跡の結果を示し, 地磁気強度の変化は, Sakai & Hirooka (1986) より抜粋加筆した.

### 5.3.2.5. まとめ

久米島宇江城城跡から出土した二次焼成を受けたと観察された陶磁器片について、磁化から熱履歴を研究した。また、比較対象として、二次焼成を受けていない陶磁器の底部の磁化研究も行った。

自然残留磁化では、二次焼成のある試料と無い試料では、磁化伏角のまとまりに明らかな違いが



見られた。これは陶磁器の製作時、高台で自立した状態で磁化を獲得した試料と製作後移動し、ばらばらに磁化を再獲得した試料があることが示唆された。二次焼成を受けていない試料の磁化方向を、8°浅くした西南日本の伏角変化と比較したところ、14世紀頃の伏角に近く、陶磁器は14～15世紀に属するという考古学的見解を支持する結果が得られた。

試料の熱消磁特性とテリエ法実験の結果から、250～350°Cで獲得された熱起源と思われる熱残留磁化が示された。また、高温成分から求めた地磁気強度は14～5世紀、低温成分は16世紀初めから中頃の地磁気強度と推定され、具志川城跡と同様に16世紀初頭の戦火によって再度焼かれたことが示された。

遺物からの地磁気研究では、非破壊測定が必要な場合も多い。本研究で示した陶磁器の底部を用いた地磁気方向の復元により、土器・陶磁器が非破壊の新たな遺物年代推定法に利用できることが分かった。さらに、西南日本の地磁気変化が第一近似として遺物から地磁気方向や強度が復元可能なことが示されたことは、地磁気データが十分でない沖縄や中国地域の地磁気の復元に結びつく。

今後、さらに土器・陶磁器を用いた磁化研究の事例を蓄積し、研究手法の改良や各地の詳細な地磁気データを増加していくことで、考古遺物の原産地や年代推定といった新たな情報を提供できると考える。

## 第6章 総括

考古遺物の残留磁化や帯磁率等の磁気物性には、年代、生産地や被熱状況等の遺物研究における重要な情報が残されている。従来の考古学や主な理化学分析では読みとられていない情報も多い。本研究では、考古遺物の磁化研究を考え、黒曜石の遺物や二次加熱を受けた出土資料を調査した。得られた成果を以下に示す。

### 1. 黒曜石製遺物の磁化研究

黒曜石は産出地域が限られるにも関わらず、日本全国の遺跡から出土し、先史時代の人々や物資の移動・流通を検討する重要な研究対象である。そのため、遺跡出土黒曜石の原産地推定は必須であり、現在、主として蛍光 X 線分析を用いた研究が行われている。しかし、従来の蛍光 X 線分析の研究には、(1) 測定上の誤差が明確でない（例えば重量濃度比の算出で 100%に揃わないことがある）、(2) 標準試料による測定値の統一化がなされていない、(3) 判別できない原産地があるなどの問題があった。

こうした状況を踏まえて本研究では、蛍光 X 線分析と独立な方法として磁化による研究を考え、北海道と信州の主要原産地の黒曜石を研究した。その結果、磁気物性に原産地の違いが認められ、磁化研究の有用性が明らかになった。

北海道産黒曜石では、特に帯磁率と磁化強度で産地毎の明確な特徴が得られ、磁化による原産地推定が可能なが分かった。また磁化の保磁力も、各産地の黒曜石毎に異なる磁性粒子の種類・粒径の指標として利用できることが示された。信州産黒曜石では、採取地点が詳細に判明している試料を多数研究したことで、原産地の詳細な分類に成功し、蛍光 X 線分析では不明瞭だった産地グループの分類も行えた。更に、北海道と富山県の黒曜石遺物では磁化により原産地が判別でき、蛍光 X 線分析による推定結果との比較から、磁化研究の有用性が実証された。

黒曜石はマグネタイトやチタノマグネタイトを微量（1%以内）含み、これが磁性の特徴を生じている。これらの磁性鉱物は疑似単磁区構造を持ち、黒曜石の残留磁化は安定であることが確認された。そのため、古地磁気研究も可能であり、地磁気年代を用いた原産地推定も行える。北海道産黒曜石は噴出年代が 2~3Ma と推定されており、地磁気逆転の研究にも重要な資料になると考えられる。また黒曜石には、生成時の熱残留磁化と共に、二次的な化学残留磁化が獲得されているとの結果が得られ、水和層形成とも関連する磁化として注目される。

また、黒曜石遺物は熱加工された可能性も指摘されていたが、磁化の熱実験を適用した結果、被熱痕が証明された。

黒曜石に含まれる僅かな磁性鉱物が持つ残留磁化や帯磁率は殆ど研究されていなかったが、本研究により精度良い実験で抽出できること、微量の磁性鉱物に着目したことで従来にない黒曜石の各種課題における有用な研究方法になると判明した。磁化獲得の機構も含めて、黒曜石の磁化研究は今後多方面に発展すると考える。

## 2. 磁化による遺物・遺構の使用状況の研究

### (1) 漢代の鏡範の研究

東アジアにおける古代銅鏡の発生と発展では中国の古代銅鏡が大きく関わっており、その技術伝播は東アジアの文化交流にも重要な役割を果たしている。その中で特に漢式鏡は、当時の人々の日常用品として広く流通し、年代や文様、製作技術など多くの研究が行われている。銅鏡の鑄型である鏡範も、銅鏡製作の研究で重要な対象であるが発見は少なく、研究は進んでいない。

本研究では、中国山東省の臨淄齊国故城より出土した鏡範の残留磁化と帯磁率の研究を行った。その結果、銅鏡製作時の鏡範の使用状況や鏡範に湯が流入されて高温になった被熱過程が復元できた。当時の地磁気強度（約  $30\mu\text{T}$ ）も得られ、鏡範の使用時代は前漢時代前半と求まり、考古学で推定されていた銅鏡製作工房址の稼働年代と調和した。研究成果はアジア鑄造技術史学会 2012 年度研究奨励賞若手部門受賞を受賞した。

鏡範では化学分析が中心となっており、磁化研究は殆ど行われていないが、本研究により有用性が明らかにできた。また反磁性である銅鏡（銅、鉛の合金）も、黒曜石と同様に微量の強磁性鉱物を含んでいるため磁化の研究は可能であり、鏡範と合わせて新たな研究の展開が期待される。

### (2) 焼失竪穴住居

縄文から弥生時代の竪穴住居には、故意に焼失されたと推測されるものが多くある。その焼失の要因や過程は古代住居の研究でも重要だが不明な点が多い。富山市打出遺跡と高岡市下老子笹川遺跡で発掘された弥生時代の焼失竪穴住居を研究した結果、上屋根の土は安定な磁化を持ち、多くは  $600^{\circ}\text{C}$  以上まで加熱されて焼土になっていた。焼土の磁化から得た地磁気年代は考古学の推定年代と一致し、焼土は屋根から落下後に冷却して地磁気方向に磁化を獲得したとわかった。つまり屋根土は高温で落下したか、落下時に床面が高温で再加熱されたと推定され、従来考えられていた屋根上

で焼かれて冷却後に落下したとの説は可能性が低いと判断できた。考古学，古建築学で注目される  
竪穴住居について重要な成果が得られ，磁化研究を用いる有用性が示された。研究成果は日本情報  
考古学会論文賞受賞を受賞した。

### (3) 陶磁器遺物の熱履歴

沖縄県久米島の具志川城と宇江城は，遺跡調査や古文書から 16 世紀初頭に中山王の討伐で落城し  
たと推測されていたが，明確な証拠は無かった。具志川城の石積みの石灰岩と宇江城の二次焼成が  
示唆される陶磁器の磁化を研究し，戦火の可能性を探った。研究の結果，石灰岩は約 300℃まで加  
熱されたことがわかり，更に磁化方向から被熱の年代は 16 世紀初めと求まった。宇江城の陶磁器の  
磁化は，陶磁器が生成後に動かされて再磁化したことを示していた。250～350℃の二次焼成が確認  
され，地磁気年代から，具志川城跡の石積みと同様に 16 世紀初めに被熱したとわかった。以上より，  
16 世紀初頭に中山王の討伐による落城が実証され，中世の歴史でも重要な研究となった。

また，二次焼成のない陶磁器では非破壊の伏角測定が行え，製作時の地磁気が復元できた。西南  
日本の地磁気変化との対比から，対象の陶磁器は 14～15 世紀に作られたとの考古学の見解に合う結  
果が得られた。陶磁器の底部を用いて，非破壊で遺物年代を研究できる可能性が示された。

本研究では，様々な考古遺物について磁化研究が有用であることを示した。黒曜石で示した様に，  
遺物や文化財に含まれる微量の磁性鉱物の磁化の測定が，超伝導磁力計や各種の精度良い機器の利  
用と実験法の改良で可能になり，年代，製作地や産地，使用状況，熱履歴など，考古学や文化財科  
学で重要な課題を研究できるようになった。また，従来は対象とされていなかった重要な資料の研  
究により，多くのオリジナルな成果を得ることができた。磁化研究はこれから更に発展できると考  
えられ，文化財・考古遺物に関する様々な課題の研究を進めることが望まれる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、富山大学大学院理工学研究部の酒井英男教授にご指導頂いた。同部の清水正明教授、楠本成寿准教授、東京学芸大学の二宮修治教授には有益なご助言を頂いた。

黒曜石の研究においては、東京学芸大学の二宮修治教授並び研究室の学生諸氏、魚津埋没林博物館の麻柄一志館長、富山県埋蔵文化財センターの山本正敏前センター長、上ノ国町教育委員会の塚田直也氏から多大なるご指導とご支援を頂いた。漢代鏡範の研究においては、富山大学の三船温尚教授、榎原考古学研究所の清水康二先生、中国社会科学院考古研究所の白雲翔先生から多大なるご指導とご支援を頂いた。焼失竪穴住居の研究においては、富山市教育委員会の小黒智久氏、富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所の越前慎子氏から多大なるご指導とご支援を頂いた。沖縄県内遺跡出土遺物の研究においては、久米島自然文化センターの中島徹也氏、仙台市教育委員会の関根信夫氏から多大なるご指導とご支援を頂いた。

末筆ながら心より感謝致します。

## 引用文献

- 浅川滋雄・藤井利史 (2006) : 打出遺跡 SIOI の復元, 富山市打出遺跡発掘調査報告書. 富山市埋蔵文化財調査報告 7, 富山市教育委員会, 190-199.
- Bloemendal, J., King, J.W., Hall, F.R. and Doh, S.J. (1992) : Rock magnetism of Late Neogene and Oligocene deep-sea sediments : relationship to sediment source, diagenetic process, and sediment lithology. *J. Geophys. Res.* 97, American Geophysical Union, 4361-4375.
- Cong, Y.Z. & Wei, Q.Y. (1989) : Study of secular variation (2000BC-1900AD) based on comparison of contemporaneous records in marine sediments and baked clays. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 56, 69-75.
- 大工原豊 (2005) : 黒曜石の流通の多様性と研究視点. 月刊考古学ジャーナル 1月号 No.525, ニューサイエンス社, 3-4.
- 大工原豊 (2008) : 縄文石器研究序論. 六一書房, 253pp.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A. (1977) : Hysteresis properties of titanomagnetites : grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 13, 260-267.
- Dearing, A. J. (1999): Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 system (2nd edition). *Chi Publ.*, Kenilworth, 54pp.
- Dunlop, D.J. (2002) : Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.*, vol.107, Issue No.B3, EPM4-1-22.
- 越前慎子 (2014) : 弥生時代後期, 下老子笹川遺跡・江尻遺跡発掘調査報告. 富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所, 34-44.
- Fisher, R.A. (1953) : Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc. London, A*, 217, 295-305.
- 白雲翔 (2009) : 漢代臨淄の銅鏡製作業に関する考古学的研究. 鏡範—漢式鏡の製作技術—, 奈良県立橿原考古学研究所, 中国社会科学院考古研究所, 山東省文物考古研究所編, 八木書店, 149-182.
- 広岡公夫 (1999) : 古地磁気法・考古地磁気法. 考古学のための年代測定学入門, 古今書院, 39-57.
- 広岡公夫 (1997) : 北陸における考古地磁気研究. 中世・近世の北陸. —考古学が語る社会史—, 北陸中世土器研究会編, 桂書房, 560-583.
- 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. 第四紀研究第 15 巻, 第 4 号, 日本第四紀学会, 200-203.
- Hirooka, K. (1971) : Archaeomagnetic study for the past 2000 years in southwest Japan. *Mem. Fac. Sci.*,

- Kyoto Univ., Ser. Geol. and Mineral., 38, 167-207.
- 広岡公夫・藤澤良祐 (2002) : 東海地方の地磁気永年変化曲線. 考古学と自然科学第 45 号, 日本文化財科学会, 29-54.
- 広岡公夫・南依里 (2006) : 金屋南遺跡の考古地磁気学的研究. 富山市金屋南遺跡発掘調査報告書Ⅲ, 富山市埋蔵文化財調査報告 5, 富山市教育委員会, 155-159.
- 堀井雅恵 (1998) : バイカル湖堆積物の岩石磁気学的測定による過去 250 万年の古地磁気変動の解析. 金沢大学大学院博士論文, 131pp.
- 石岡智武・五十嵐俊雄 (2012) : 黒曜石の産地別薄片観察記載. PALYNO 4 号, パリノ・サーヴェイ株式会社, 26-38.
- 磯貝基一 (2003) : 岩石としての黒曜石. ストーンロード—縄文時代の黒曜石交易—, 安中市ふるさと学習館, 52-53.
- 金山喜明 (1992) : 先史時代の黒曜石研究史. 法政考古学 17 号, 法政考古学会, 51-71.
- Kanto, A. & Sakai, H. (2014) : Identifying the sources of ancient obsidian artifacts in Shinshu based on their magnetic properties. *Journal of computer archaeology* Vol.20, Japan Society for Archaeological Information, 33-41.
- 菅頭明日香・酒井英男・白雲翔・三船温尚 (2013) : 山東省臨淄齊国故城から出土した漢代鏡範の磁気物性の研究. *アジア鑄造技術史学会誌(FUSUS)* Vol.6, アジア鑄造技術史学会, 15-24.
- Kawai, N., Hirooka, K., Sasajima, S., Yaskawa, K., Ito, H. and Kume, S. (1965) : Archaeomagnetic studies in southwestern Japan. *Ann. Geophys.*, 21, 574-577.
- 勝井義雄・近堂祐弘 (1967) : 黒曜石の水和層による年代測定法. 第四紀研究第 6 巻, 第 4 号, 日本第四紀学会, 168-171.
- 木村英明 (2000) : 北海道地域における黒曜石研究の展望—特に白滝黒曜石原産地を中心に—. 黒曜石文化研究 創刊号, 明治大学人文科学研究所, 69-82.
- Kirschvink, J.L. (1980) : The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62, 699-718.
- 輿水達司 (1981) : 石狩低地帯に出土する黒曜石片の原産地. 地球科学 35 巻 6 号, 地学団体研究会, 267-273.
- 輿水達司・福岡孝 (1991) : 黒曜石の表面光沢損失に関する熱の影響. 考古学と自然科学第 24 号, 日本文化財科学会, 63-68.

- 町田賢一・上田尚美 (2000) : 下老子笹川遺跡の“焼失住居”について. 富山考古学研究 紀要第 3 号, 富山県文化振興財団, 19-26.
- McDougall, J.M., Tarling, D.H. and Warren, S.E. (1983) : The magnetic Sourcing of Obsidian Samples from Mediterranean and Near Eastern Sources. *Journal of Archaeological Science* 10, Academic Press Inc, 441-452.
- 馬淵久夫・杉下龍一郎・三輪嘉六・沢田正昭・三浦定俊編 (2003) : 文化財科学の事典. 朝倉書店, 522pp.
- 麻柄一志 (1981) : “魚津産黒曜石”と縄文遺跡. 富山市考古資料館報 No.5, 富山市考古資料館, 5-7.
- 明治大学古文化財研究所 (2011) : 蛍光 X 線分析装置による黒曜石製遺物の原産地推定—基礎データ集<2>—. 明治大学古文化財研究所, 294pp.
- 三船温尚 (2009) : 青銅鏡製作技術研究の経緯と前漢鏡範の検証実験. 鏡範—漢式鏡の製作技術—, 奈良県立橿原考古学研究所, 中国社会科学院考古研究所, 山東省文物考古研究所編, 八木書店, 235-254.
- 三浦麻衣子・建石 徹・二宮修治 (2012) : ICP 発光分光分析を用いた遺跡出土黒曜石石器の原産地推定に関する基礎的研究. 日本文化財科学会第 29 回大会研究 発表要旨集, 242-243.
- 宮坂清 (2012) : 縄文石器における黒曜石の利用形態. 季刊考古学第 119 号, 雄山閣, 50-54.
- 宮坂清・田中慎太郎 (2001) : 黒曜石原産地遺跡詳細分布調査報告書 (和田峠・霧ヶ峰). 下諏訪教育委員会, 110pp.
- 向井正幸 (2009) : 北海道から産出する黒曜石ガラスの化学組成. 旭川市博物科学館研究報告 第 2 号, 旭川市博物館, 1-33.
- 向井正幸・和田恵治・大倉千加子 (2002) : 置戸地域・赤井川地域から産出する黒曜石ガラスの化学組成. 旭川市博物館研究報告 No.8, 旭川市博物館, 47-58.
- 村本周三・高田和徳・中村明央 (2006) : 岩手県御所野遺跡における竪穴住居火災実験, 考古学と自然科学第 53 号, 69-84.
- 中井睦美 (2004) : 地学双書 34 ジオロジストのための岩石磁気学. 地学団体研究会, 178pp.
- 中島正志・夏原信義 (1981) : 考古学ライブラリー9 考古地磁気年代推定法, ニューサイエンス社, 95pp.
- 中沢祐一 (2000) : 黒曜石石器群に認められる被熱痕跡の生成実験と量的評価. 第四紀研究第 39 号, 6 冊, 日本第四紀学会, 535-546.



- 奈良県立橿原考古学研究所・中国社会科学院考古研究所・山東省文物考古研究所編（2009）：鏡範－漢式鏡の製作技術－，八木書店，366pp.
- 二宮修治・網干守・藁科実・友廣秀尚・大沢眞澄（1991）：微量成分元素存在量による原産地黒曜石の識別・分類と遺跡出土黒曜石石器の原産地推定への適用．黒曜石の化学組成，平成2年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書，54-68.
- 二宮修治・網干守・大沢眞澄（1993）：男女倉遺跡群詳細分布調査における黒曜石資料の原産地推定－機器中性子放射化分析による微量成分元素存在量からの検討－．長野県黒曜石原産地遺跡分布調査報告書（和田峠・男女倉谷）Ⅲ，和田村教育委員会，178-202.
- 野内英明・鈴木正男・戸村健児（1991）：三浦半島出土黒曜石の産地推定と水和層法年代推定値について．横須賀市博物館研究報告（人文）36号，横須賀市人文博物館，1-30.
- 沖縄県久米島町教育委員会（2007）：具志川城跡発掘調査報告書Ⅱ，88pp.
- 大沢眞澄（1991）：黒曜石の化学組成．平成2年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書，69pp.
- 杉原重夫・弦巻賢介・檀原徹・岩野英樹（2011）：北海道，白滝産黒曜石，置戸産黒曜石，上士幌産黒曜石，赤井川産黒曜石のフィッシュン・トラック年代測定．環境史と人類第4冊，環境変遷史と人類活動に関する学際的研究，109-117.
- 酒井英男・泉吉紀・菅頭明日香・越前慎子（2014）：高岡市下老子笹川遺跡の焼失竪穴建物の焼土の磁化の研究．富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所紀要 富山考古学研究第17号，富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所，33-38.
- 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 vol.19，日本情報考古学会，28-35.
- 酒井英男・木村克之（2014）：高岡市下老子笹川遺跡の噴砂の磁化と年代の研究．下老子笹川遺跡・江尻遺跡発掘調査報告，富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所，261-264.
- 酒井英男・木村克之（2011）：長岡市五千石遺跡4区の噴砂の分布と年代の研究．長岡市埋蔵文化財発掘調査報告書 五千石遺跡 1区・3区・4区東地区・5区 ー特定構造物改築事業（大河津可動堰改築）に伴う埋蔵文化財発掘調査報告書ー，加藤・竹部他編，長岡市教育委員会，351-356.
- 酒井英男・田中清美・前川要（1998）：青森県十三湊遺跡から出土した焼石の磁化測定による被加熱状況の研究．市浦村埋蔵文化財調査報告書第9集，十三湊遺跡，青森県市浦村教育委員会，富山大学人文学部考古学研究室，125-134.

- 酒井英男・平井徹・広岡公夫（1991）：磁化測定による考古学遺物の熱履歴の検討．能登滝・柴垣製塩遺跡群，富山大学人文学部考古学研究室・石川考古学研究会，157-165.
- Sakai, H. & Hirooka, K. (1986): Archaeointensity determinations from western Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, 38.,1323-1329.
- 酒井英男・米原実秀（2008）：沖縄県久米島具志川城跡の石垣の磁化研究．久米島町文化財調査報告書第4集，具志川城跡発掘調査報告書Ⅱ，沖縄県久米島町教育委員会，62-70.
- 下諏訪町教育委員会（2008）：長野県下諏訪町黒曜石原産地遺跡分布調査報告書Ⅱ一星ヶ塔遺跡一．下諏訪町教育委員会，94pp.
- 下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明・中田節也編（2008）：火山の事典．朝倉書店，592pp.
- Stacey, F.D. & Banerjee, S.K.(1974) : The physical principles of rock magnetism. Elsevier Scientific Pub. Co., 195pp.
- Sugiura, N. & Nagata, T. (1975) :Remanent magnetization of Fe-Ni alloy acquired in the process of transition. *Abst. 58th Ann. Meeting Geoelectr. Geomag. Japan*, 75.
- Suzuki, M. (1973) : Chronology of Prehistoric Human Activity in Kanto, Japan. Part I . *J. Faculty of Science, University of Tokyo*, sec. V, Vol.IV, Part3,241-318.
- Suzuki, M. (1974) : Chronology of Prehistoric Human Activity in Kanto, Japan. Part II . *J. Faculty of Science, University of Tokyo*, sec. V, Vol.IV, Part4, 395-469.
- 鈴木淑夫（2005）：岩石学辞典，朝倉書店，877pp.
- 田賀井篤平・橘由香里（2009）：草葉文鏡範の物質科学的研究．鏡範—漢式鏡の製作技術—，奈良県立橿原考古学研究所，中国社会科学院考古研究所，山東省文物考古研究所編，八木書店，278-291.
- 田口勇・齋藤努編（1995）：考古学ライブラリー65 考古資料分析法．ニューサイエンス社，127pp.
- 高田和徳・麻柄一志・岡野雅則・西原雄大・石守晃（2003）：特集 列島各地の焼失住居．月刊考古学ジャーナル 509号，4-20.
- 竹原弘展（2013）：大岱遺跡出土黒曜石製石器の産地推定．大岱遺跡，上ノ国町教育委員会．
- 高倉純・金成太郎・杉原重夫（2013）：北海道東部の縄文時代における黒曜石利用—釧路・根室地域の遺跡を対象とした原産地推定分析にもとづいて—．考古学と自然科学 第64号，日本文化財科学会，27-46.
- 建石徹（2012）：黒曜石の縄文石器の産地分析と流通．季刊考古学 119号，（株）雄山閣，71-78.
- 建石徹・津村宏臣・二宮修治（2004）：加曾利南貝塚出土黒曜石の原産地推定．貝塚博物館紀要 31，千

- 葉県銚子市教育委員会, 1-15.
- 建石徹・二宮修治 (2000) : 蛍光 X 線分析による粟島台遺跡出土黒曜石の原産地推定. 粟島台遺跡, 千葉県銚子市教育委員会, 435-439.
- 寺崎康史 (2005) : 北海道赤井川産黒曜石の産状と旧石器時代におけるその利用. 月刊考古学ジャーナル No.525, ニューサイエンス社, 8-11.
- Thellier, E. & Thellier, O. (1959) : Sur l'intensite du champ magnetique terrestre dans le passe historique et geologique, Ann. Geophys.,15, 285-376.
- 當眞 嗣一 (1995) : 久米島の国・県指定史跡グスク—縄張りを中心に—. 久米島総合調査報告書・論文編・資料編, 沖縄県立博物館, 183-204.
- 富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所 (2006) : 下老子笹川遺跡発掘調査報告,332pp.
- 富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所 (2014) : 下老子笹川・江尻遺跡発掘調査,414pp.
- 富山市教育委員会 (2004) : 富山市打出遺跡発掘調査報告書. 富山市埋蔵文化財調査報告 138, 富山市教育委員会, 178pp.
- 富山市教育委員会 (2006) : 富山市打出遺跡発掘調査報告書 富山市埋蔵文化財調査報告 7. 富山市教育委員会,205pp.
- 堤 隆 (2002) : 中部高地における黒曜石研究の現状と課題. 黒曜石文化研究 創刊号, 明治大学人文科学研究所, 13-30.
- 魚津歴史民族博物館 (1993) : 新川地方の縄文時代—翡翠 (ヒスイ) と石斧 (いしおの) づくりの村々—. 魚津歴史民俗博物館, 25pp.
- Vasquez, C.A., Nami, H.G. and Rapalini, A.E. (2001) : Magnetic Sourcing of Obsidians in Southern South America : Some Successes and Doubts. Journal of Archaeological Science 28,:Academic Press Inc, 613-618.
- 和田恵治・佐野恭平 (2014) : 白滝黒曜石の化学組成と微細組織—原産地推定のための地質・岩石資料—. 黒曜石の流通と消費からみた環日本海北部地域における更新世人類社会の形成と変容 (Ⅱ), 東京大学大学院人文社会系研究科附属北海文化研究常呂実習施設, 24-42.
- 和田恵治・佐藤鋭一・佐野恭平・向井正幸 (2011) : 七輪を使った黒曜石発泡実験—黒曜石火山学習教室の実践—. 日本火山学会講演予稿集 2011, 日本火山学会, 2.
- 和田恵治・鹿野貴広・佐野恭平・向井正幸 (2011) : 北海道北東部における黒曜石産地群の地質学的形成場と黒曜石化学組成. 日本文化財科学会第 28 回大会研究発表要旨集, 日本文化財科学会,

212-213.

藁科哲男・東村武信 (2000) : 上白滝 7 遺跡出土の黒曜石製石器の現材産地分析および非破壊分析による水和層の測定. 北海道埋蔵文化財センター調査報告書第 140 集 白滝遺跡群 I, 財団法人北海道埋蔵文化財センター, 219-233.

藁科哲男・東村武信 (1985) : 美利河 1 遺跡出土の黒曜石遺物の現材産地分析. (財) 北海道埋蔵文化財センター調査報告書第 23 集 今金町美利河 1 遺跡, 財団法人北海道埋蔵文化財センター, 270-281.

藁科哲男・東村武信 (1985) : 富山県下遺跡出土の黒曜石遺物の石材産地分析. 大境第 9 号, 富山考古学会, 7-20.

Wasilewski, P. & Kleteschka, G. (1999) : Lodestone: Natures only permanent magnet- what it is and how it gets charged. *Geophys. Res. Lett.*, vol.26, 2275-2278.

渡辺圭太・比屋根肇・鈴木正男 (2007) : 二次イオン質量分析 (SIMS) を用いた H<sup>+</sup>プロファイリングによる黒曜石水和層の研究. 日本文化財科学会第 24 回大会研究発表要旨集, 日本文化財科学会, 60-61.

Watanabe, N. (1959) : The direction of remanent magnetism of baked earth and its application to chronology for anthropology and archaeology in Japan. *Journal of the Faculty of Sciences, University of Tokyo*, Sec.V.2, 188pp.

Watanabe, N. & Suzuki, M. (1969) : Fission Track Dating of Archaeological Glass Materials from Japan. *Nature* 222, 1057-1058.

Wei, Q.Y., Li, D.J., Cao, G.Y., Zhang, W.X., Wang, S.P. and Wei, S.F. (1983) : Archaeomagnetism of baked clays: results from China. In *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*, Elsevier Science Publishing Company, 138-150.

Wei, Q.Y., Zhang, W.X., Li, D.J., Aitken, M.J., Bussell, G.D. and Winter, M. (1987) : Geomagnetic intensity as evaluated from ancient Chinese pottery. *Nature*, vol.328, 330-333.

山本正敏 (2013) : 魚津産黒曜石の流通. 大境第 32 号, 富山考古学会, 75-82.

吉谷昭彦・片山博臣・鈴木邦輝・吉田清人・鈴木力・涌嶋三奈 (1999) : 名寄盆地およびその付近に産出する黒曜岩の微量元素からみた化学組成の特徴. 北国研究集録 3, 名寄市北国博物館, 37-44.

Zijderveld, J.D.A. (1967) : A.C. Demagnetization of rocks : analysis of result, in *Method in Paleomagnetism*. edited by Collinson, D.W., Creer, K.M., and Runcorn, S.K., Elsevier, 254-286.