

口頭発表

Oral Presentations

木材の年代決定に特化した過去 2500 年にわたる酸素同位体比 標準年輪曲線の構築

A 2500-year tree ring oxygen isotope chronology developed for dating wood

○佐野雅規 (名古屋大学)、李貞 (同左)、村上由美子 (京都大学)、神野恵 (奈良文化財研究所)、浦蓉子 (同左)、金田明大 (同左)、中塚武 (名古屋大学)

○Masaki SANO, Zhen LI (Nagoya University), Yumiko MURAKAMI (Kyoto University), Megumi JINNO, Yoko URA, Akihiro KANEDA (Nara National Research Institute for Cultural Properties), Takeshi NAKATSUKA (Nagoya University)

1. 研究の背景と目的

年輪年代法は、木材の年輪幅の広狭変動パターンを個体間で照合することにより、当該年輪が形成された年代を正確に決定できる。年代が定まった個体の年輪幅データを統合することによって、年代決定の基準となる標準年輪曲線が作られ、これを用いることで新規に収集したサンプルの年輪年代が定まる。日本では、過去 3000 年超の標準年輪曲線が年輪幅を用いて作成されているが、年代決定の対象となる樹種や年代決定に必要なサンプルの年輪数に制約がある。一方、年輪セルロースに含まれる酸素同位体比は、樹種依存性が低く、個体間での変動パターンが年輪幅に比べ良く一致する。そのため、これまで年代決定に不適であったサンプルも酸素同位体比を測ればその年代が定まることが分かってきた。既に日本において、酸素と水素の同位体比を結合した標準年輪曲線が過去 2600 年にわたって構築されているが、この標準曲線は、気候変動の復元を目的として作成されたものであり、長周期の変動成分を保持しているため、年代決定に最適化されていない。そこで本研究では、既存の標準曲線に含まれる短周期変動を抽出し、年代決定に特化した酸素同位体比の標準年輪曲線を新たに構築した。次いで、年代既知の現生木を用いて、その年代決定力を検証するとともに、平城京から出土した考古材の年代決定も実施した。

2. 材料と方法

中部・近畿地方において、ヒノキ、コウヤマキ、スギから取得した計 67 個体の年輪酸素同位体比の時系列データに対して、11 年の移動平均からの残差を個体別に計算し、全ての個体を平均することで、長周期の変動成分を除去した標準年輪曲線を構築した。次に、南アルプスの仙丈ヶ岳、および韓国南部の **Jirisan** で収集した現生木の針葉樹サンプル (年代既知) を用いて、上記と同様の処理をしたうえで、年輪数を 120 年から 30 年まで段階的に減らし年代決定に必要な年輪数を調べた。年代決定の評価には、自己相関を補正した t 値、 $1/p$ 値 (ボンフェローニ法で多重比較補正)、IF 値 (isolation factor: 1 番目と 2 番目に高い照合結果が得られた年代での p 値の比) を用いた。先行研究で使用されている $1/p > 100$ 、 $IF > 10$ を基準とし、これを満たした場合、高い信頼度で年代決定に至ったと判断した。平城京出土材は広葉樹を含み、年輪数が 30~

60年と少ないため、個々の時系列と標準年輪曲線の直接比較に加え、出土材間での変動パターンの照合も実施した。

3. 結果と考察

年代照合に使う標準曲線の年代幅を400年に絞った場合、南アルプスで60年輪、韓国南部で120年輪あれば、全てのサンプルで正確な年代決定に成功した(図1)。また、一部において統計基準を満たさないものの、南アルプスでは50年、韓国南部では70年まで年輪数を減らした場合でも、全個体で正しい年代を示した。一方、照合期間を年輪曲線の存在する全期間2470年に広げた場合、間違った年代で最も高い相関を示す個体があった。このことから、発掘調査や ^{14}C など別の方法で年代が限定されている場合は、照合に使用する年代幅を狭める必要がある。

平城京の出土材は、発掘調査により、平城宮への物資運搬用運河の護岸として使われていたことが分かっていたので、西暦700年を中心に前後200年を探索期間と定め年代を照合した。その結果、8個体中2個体は、標準曲線との直接比較により高い信頼度で年代決定に至った。また、直接比較で基準を満たさなかった個体同士で年代を照合し、それらを統合した時系列は、標準曲線と変動パターンがよく同調し統計基準も満たした(図2)。以上から、本研究で作成した標準曲線は、樹種を問わず年輪数の少ない木材であっても年代照合が可能であることが示された。

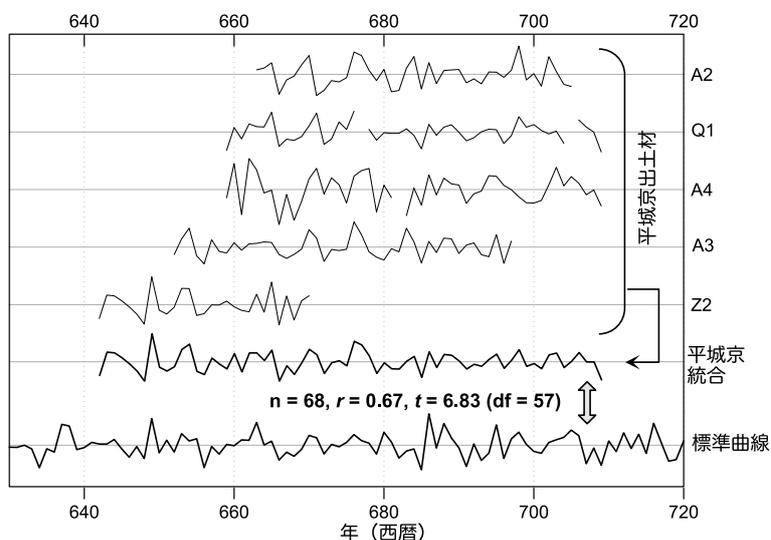
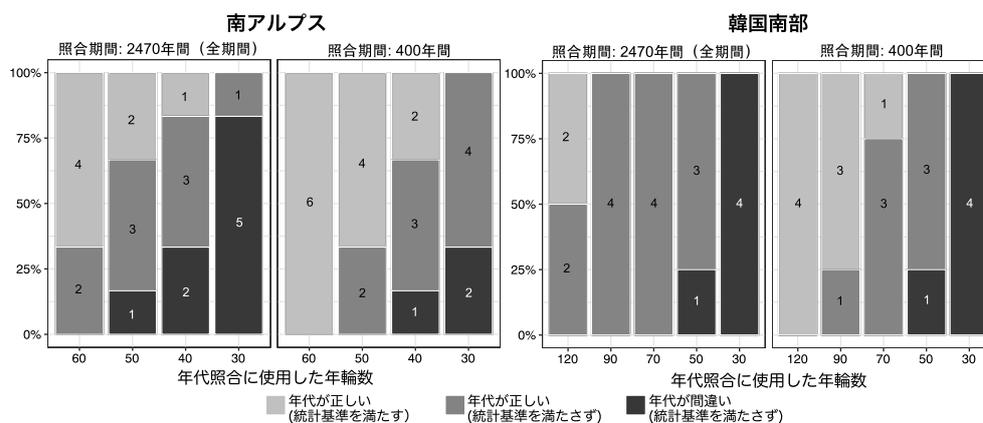


図1 (上)

年代既知の現生木を用いて、年輪数を段階的に減らした場合の年代照合結果(左: 南アルプス産の6個体、右: 韓国南部産の4個体)。標準曲線の照合範囲を全期間2470年と400年に分けて評価。

図2 (左)

平城京出土材の年代照合結果。出土材間で年代照合し、それら複数個体のデータを統合した時系列は標準年輪曲線と変動パターンが一致し、年代照合の成否として設定した統計基準を満たした。

古建築 ^{14}C 年代調査報告の記述について

How to describe the ^{14}C dating report of old buildings

○中尾七重（山形大学）、坂本稔（国立歴史民俗博物館）

○Nanae NAKAO (Yamagata Univ.), Minoru SAKAMOTO (National Museum of Japanese History)

1. 問題の所在

2003年に重要文化財関係家住宅で放射性炭素（ ^{14}C ）年代調査が行われて以来、古建築を対象にした ^{14}C 年代調査は文化財修理工事や文化財建造物調査において徐々に採用されてきた。しかし調査報告のフォーマットは整備されておらず、刊行された ^{14}C 年代調査報告書には、基礎データの記載が無いもの¹、最外層年代と部材年代を区別しないもの²、木取の推定が不適切なもの³、年代調査結果と様式史年代観を混同するもの⁴などが散見される。本論では年代調査報告に掲載すべき必要情報と、古建築年代調査における年代情報の取り扱いについて述べる。

2. 年代調査報告に必須の情報

データの公表は自然科学調査の基本である。 ^{14}C 年代調査報告に最低必要な情報は、①調査・建物情報：何をいつどこでどの目的で誰が調査したか。②部材情報：調査対象とした理由、最外年輪層の状況 ③試料情報：全測定試料の照会情報、測定データ、解析結果である。

①は、対象建物名、所在地、目的、所有者、調査・採取者、採取年月。

②は、部材名、番付（番付図付）、樹種、寸法、面皮か辺材か心材かの表面情報、芯去り（四方桁、二方桁）or 芯持ち（中芯、偏芯、四つ割、二つ割）or 板材（桁板、板目板）などの木取情報、建築痕跡調査データ（当初材、1次改造材、後補材など）。

③は、ラボコード、測定番号、年輪位置、暦年較正に用いた較正データ名（IntCalバージョンなど）、 ^{14}C 年代、解析結果。各測定施設は測定データを保管しているので、ラボコード・測定番号は、各測定施設にデータ照会するための必要情報である。年輪位置は暦年較正・ウィグルマッチ解析に必要である。 ^{14}C 測定で得られた炭素年代（ ^{14}C 年代）を暦年較正曲線（IntCalなど）でウィグルマッチ解析し得られた最外層年代や確率分布（ 2σ 暦年代範囲）・確率密度（%）も考察に必要である。

3. 部材の最外層年代から、建築年代判定に必要な部材年代を求める

建築年代判定には、部材年代が必要である。まず、部材最外層の炭素年代値（ ^{14}C 年代）を暦年較正・ウィグルマッチ法で解析し、部材最外年輪が形成された暦年代（最外層年代）が得られる。この最外層年代から部材年代を求める。部材年代は、その部材の元の樹木の伐採年である。最外層年代に、部材に加工された際に削除された表皮や辺材部分などの外側年輪数を加算した推定伐採年が部材年代である。部材最外層から表皮までの年輪数は樹種や平均年輪幅や

木取から推定する。較正曲線が水平や右肩上がりの年代域で2か所以上に確率が生じた時は、建築痕跡調査から1か所を選択できる場合がある。

¹⁴C測定して得られた柱や梁など多くの部材年代が集中する年代域が¹⁴C調査に基づく建築年代や大改造の時期と見做せる。新田村や新開地の初期建築物は新築の例が多く、部材年代全てが同時期の当初建築年代となる⁵。一方、複数期に部材年代が分散する場合は、①前身部材の転用古材 ②当初建築部材 ③後補建築部材の可能性がある。あるいは前身建物ではなく他の建物の古材使用もあるので、痕跡調査を行い部材の来歴を明らかにする必要がある⁶。改造により軸部と小屋組、あるいは土間部と上手座敷部で、年代が異なる場合もあるので、測定部材の選択が重要である。また、樹木が伐採されてから部材に加工されるまでの年数は数年以内と推定されるが、もっと多く見積もるべき特別な事情のある事例も存在する⁷。

4. 建築年代判定

¹⁴C年代調査は、古建築の価値を高め文化財指定や保存活用に活かす目的で行われることが多い。特に文字資料などの記録を欠く場合や、装飾が少なく様式で判断できない民家などに適用される。そのため様式による年代観や発掘遺構による年代観、文献記録や建造物に残された墨書の年代と、¹⁴C調査に基づく建築年代の整合性の検証は必要不可欠であるが、困難でもある。いずれにせよ¹⁴C年代調査による建築年代は、地域史や政治史との関連が必ず存在する。¹⁴C年代調査で得られた年代情報から何を読み取るか、調査者の力量が問われる。

一方、先入観に囚われて強引に想定年代への誘導を行うことは厳に慎まなければならない。建築年代についての自説や周囲の期待にこだわるあまり、調査結果が想定年代と異なる場合、ともすれば年代調査結果を建築年代判定や当該古建築の評価と切り離す、あるいは調査報告を行わない、あるいは調査報告を不誠実に記述するなどの、意図的または無自覚な操作が行われかねない。このような¹⁴C年代調査の悪用を防ぐためにも、古建築¹⁴C年代調査報告の記述に必要な項目を明確にし、基準を設けることが望まれる。

¹ 重要文化財内田家住宅保存修理工事報告書、編著：(公財)文化財建造物保存技術協会、2017

² 永井康雄、護国寺禅会寺の山門に関する一考察、日本建築学会東北支部研究報告集計画系第84号、pp53-56、2021

³ 雲州平田木綿街道の町家と町並み、編集：鳥取環境大学浅川研究室、2013

⁴ 重要文化財八勝寺阿弥陀堂保存修理工事報告書、編著：(公財)文化財建造物保存技術協会、2015

⁵ 利根川流域民家は新築の建物が多い。宮澤智士他、旧土肥家住宅移築保存工事記録報告書、国土交通省関東地方整備局・国営常陸海浜公園事務所、2012 など

⁶ 柱頂部に輪薙ぎ込む頭貫などは転用の痕跡をクリアに残す。一方合掌造りの軸部と小屋組のように、載せるだけの場合、痕跡調査では転用が分からなかった事例もある。中尾・坂本、合掌造りはいつ建てられたか、日本民家園叢書13、川崎市立日本民家園、2017

⁷ 国宝鏝阿寺本堂のアスナロ材(台輪、大斗)は、当初建築に用いた流木と推測され、最外層年代と流出年に数十年～数百年の開きが想定された。上野勝久他、鏝阿寺本堂調査報告書、足利市教育委員会、2011

9・10世紀の日本産樹木の単年輪 ^{14}C 測定

Annual radiocarbon dating of Japanese tree rings of the 9th to 10th century CE.

- 坂本稔（国立歴史民俗博物館・総合研究大学院大学）、門叶冬樹（山形大学）、
光谷拓実（奈良文化財研究所）
- Minoru SAKAMOTO (National Museum of Japanese History, The Graduate University for Advanced
Studies), Fuyuki TOKANAI (Yamagata University), Takumi MITSUTANI (Nara National Research
Institute for Cultural Properties)

1. はじめに

較正曲線 IntCal20 [Reimer et al. 2020] には、年輪1層ずつの炭素14年代が多く採用された。これは、宇宙線イベントに伴う ^{14}C 濃度の急増 (^{14}C スパイク) が年輪中に検出され [Miyake et al. 2014], その検証や発生頻度を検出する目的で測定が進展したことによる。IntCal20 では、 ^{14}C スパイクが認められた775年と993年周辺の単年輪 ^{14}C 測定が多く採用されたが、9世紀から10世紀中頃にかけては屋久スギの測定例 [Nakamura et al. 2013] があるものの、それを含め単年輪 ^{14}C 測定の採用はなく、形状はほぼ変更されていない。この時期は ^{14}C スパイクマッチ法で判明した白頭山の噴出年代 (946年) を含むが [Oppenheimer et al. 2017, Hakozaki et al. 2018], ^{14}C -ウィグルマッチ法による年代推定は芳しくなかった。これは [Nakamura et al. 2013] が指摘する、日本周辺の ^{14}C 濃度の地域効果による較正曲線の不安定さが影響している可能性がある。

2. 資料と測定

長野県飯田市の伊那山中で出土した埋没ヒノキから採取した資料 (NNIIH-1) は、 $t=9.2$ で中部日本の標準年輪曲線と合致し、795年から1055年までの年輪を有している。国立歴史民俗博物館で年輪面から1mm厚の板を切り出し、板状抽出法 [Kagawa et al. Sakamoto et al. 2017] によりセルロースを得、1年輪ずつ切り分けた。山形大学が試料のグラファイト化と加速器質量分析法による炭素14年代測定 (AMS- ^{14}C 法) を実施した。

3. 結果と考察

NNIIH-1 の、798年から970年にかけての単年輪炭素14年代測定の結果を図1に示す。実線は IntCal20, 破線は SHCal20 の範囲を示す。現状ではほぼ隔年 (偶数年) の測定である。IntCal20 から下方に外れた876年と878年の値は、再測定の結果、異常値と判断した。

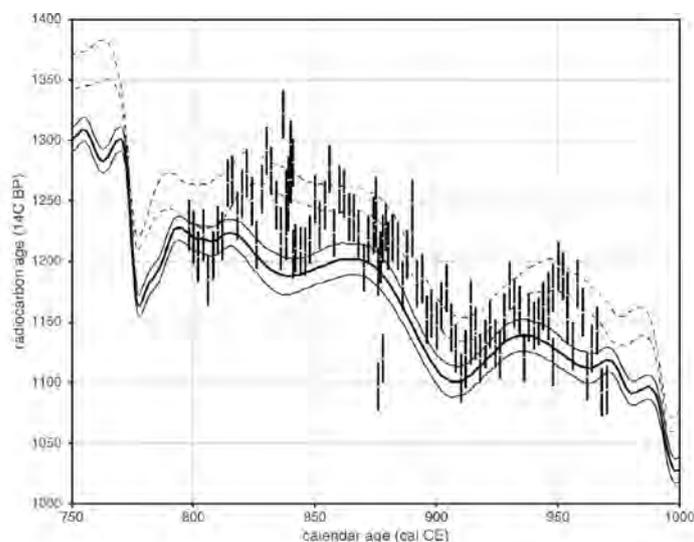


図 1 伊那山中ヒノキの単年輪炭素 14 年代と較正曲線との比較

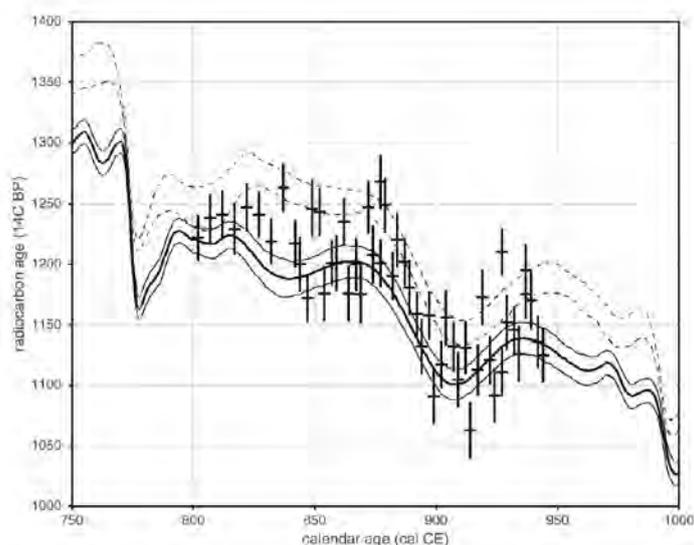


図 2 白頭山火砕流埋没樹年輪の炭素 14 年代と較正曲線との比較

^{14}C 濃度が IntCal 較正曲線と異なる挙動を示していた場合、年代較正が十分に機能しない恐れがある。また、伊那山中埋没ヒノキと白頭山埋没樹の炭素 14 年代の挙動に若干の違いが見られるのは、大気中 ^{14}C 濃度に対する地域効果の影響範囲を比較する上で興味深い。

本研究は JSPS 科研費 JP18H03594, JP22H00026 の助成を受けている。測定試料の調製には、箱崎真隆・国立歴史民俗博物館准教授と山本里絵・同元技術補佐員の助力を得たことを深謝する。

多くの炭素 14 年代が IntCal20 の上方にあり、微細な上下動を示している。

[Nakamura et al. 2013] でも屋久スギ年輪の炭素 14 年代は IntCal09 と SHCal04 (当時) の中間にあることが指摘され、その挙動と類似する。

白頭山の噴出年代が確定したことで、火砕流で埋没した樹木年輪に年代を与えることができる。それに基づき、これまで [Sakamoto et al. 2013] などで報告してきた白頭山山麓の埋没樹の炭素 14 年代を較正曲線と比較したグラフを図 2 に示す。NNIIH-1 に比べ、白頭山山麓の火砕流埋没樹は IntCal20 に近い炭素 14 年代を示すものの、やはり上方に位置する傾向にある。

^{14}C -ウィグルマッチ法による 10 世紀の白頭山の噴出年代の推定は [Yatsuzuka et al. 2010] などで試みられているが、白頭山周辺の大気中

石器残存脂質分析による「磨痕石」皮革加工具説の検証

Verification of the Leatherworking Tool Hypothesis of “Polished Pebbles” by Lithic Lipid Residue Analysis

○庄田慎矢 (奈文研・ヨーク大)、村上夏希 (奈文研)、柚原雅樹 (福岡大)、福田健司 (元東京都教育庁)、タルボット=ヘレン、クレイグ=オリヴァー (ヨーク大)、植月学 (帝京大)

○Shinya SHODA (NABUNKEN, Univ. of York), Natsuki MURAKAMI (NABUNKEN),
Masaki YUHARA (Fukuoka Univ.), Kenji FUKUDA (Tokyo Metropolitan Government),
Helen TALBOT, Oliver CRAIG (Univ. of York), Manabu UETSUKI (Teikyo Univ.)

1. はじめに

残存脂質分析は、遺物等の内部に遺存した脂質を抽出・同定することによって、過去におけるヒトの行動の対象となった有機物がどのような生物に由来するのかを推定し、過去の人間活動についてより深く理解しようとする方法である。この手法は、これまで多くの場合土器を対象に用いられてきた。それは、土器が多孔質であり、また調理や貯蔵の脈絡と直接結びつけやすいという点が主たる理由である。しかし、残存脂質分析の方法を土器以外の遺物にも適用することができれば、土器を使用する場面に限定されることなく、過去の生業活動における様々な側面を明らかにできることが期待される。

そこで本発表では、「磨痕石」と呼ばれる古代の用途不明石器を対象に残存脂質分析を行うことで、石器にもこの分析法が有効であるかを検討するとともに、出土した脈絡から推定された、同石器を牛馬皮革加工具とする仮説 (福田 2017) を、得られたデータをもとに検証した。

2. 試料と方法

分析対象としたのは、東京都の日野市と多摩市にまたがる落川・一の宮遺跡から出土した平安時代の「磨痕石」5点である。前稿 (庄田ほか 2022) において、残存脂質の抽出に成功したこと、石器の外側付近における残存脂質濃度が中心付近のそれよりも高い傾向があることを指摘した。これにつづき本発表では、①対象とした石器の岩石学的分析を行うとともに、②抽出された脂質の個別脂肪酸 (パルミチン酸およびステアリン酸) の安定炭素同位体比によるウンやウマの脂質との対応関係の検証を行った。

3. 結果

磨痕石の岩石鑑定結果および残存脂質濃度、個別脂肪酸安定同位体比を表1に示す。現生および遺跡出土の動物試料に基づく参照範囲 (Lucquin et al. 2016; Cubas-Morera et al. 2021) とと比較すると、いずれの試料も近似した値を示し、非反芻動物の範囲にプロットされる (図1)。

表1 岩石鑑定結果および残存脂質濃度、個別脂肪酸安定同位体比 ($\Delta^{13}\text{C} = \text{C}_{18:0} - \text{C}_{16:0}$)

試料 ID	岩石名	濃度 ($\mu\text{g g}^{-1}$)	$\delta^{13}\text{C}_{16:0}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{18:0}$ (‰)	$\Delta^{13}\text{C}$ (‰)
OCK001S	黒雲母花崗斑岩	3.3	-27.4	-28.0	-0.6
OCK002S	粗粒砂岩	4.5	-27.6	-28.0	-0.4
OCK003S	普通角閃石-黒雲母トータル岩	3.0	-27.1	-26.9	0.2
OCK004S	黒雲母-普通角閃石トータル岩	2.5	-27.1	-27.4	-0.3
OCK005S	普通角閃石-黒雲母トータル岩	6.9	-26.5	-26.7	-0.2

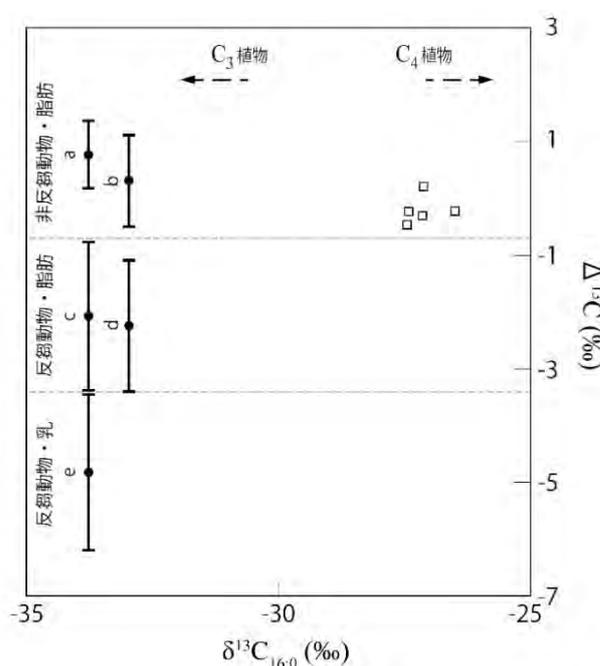


図1 「磨痕石」から抽出・分離した個別脂肪酸の安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{16:0}$ と $\Delta^{13}\text{C}$) のプロット。
参照範囲 : b, d (Lucquin, Gibbs et al. 2016)、a, c, e (Cubas-Morera et al. 2020)。

4. 考察・結論

小野牧との関係や同遺跡出土動物遺体から、磨痕石が用いられた可能性のある有力な対象種としてウシとウマが想定されるが、本分析結果からは、少なくとも反芻動物であるウシについては、可能性の低いものと判断できる。ウマの皮革加工に用いられた可能性について、今後さらに検討を進めたい。

謝辞 本研究の遂行にあたり、鈴木美穂、田尻理恵、中村亜希子、平田健、八重垣幸絵の各氏よりご協力いただいた。記して感謝申し上げます。また、本発表は科学研究費補助金 (21H04370 : 代表 庄田慎矢、22H007 22 : 代表 植月学) の成果の一部である。

引用文献

- 庄田慎矢・村上夏希・中村亜希子・鈴木美穂・八重垣幸絵・植月学「古代遺跡出土の磨痕石に遺された残存脂質」『奈良文化財研究所紀要』2022: 32-33.
- 福田健司 『土器編年と集落構造』ニューサイエンス社 2017.
- Cubas-Morera, M., et al., (2020). Latitudinal gradient in dairy production with the introduction of farming in Atlantic Europe. *Nature Communications* 11:2036, <http://eprints.whiterose.ac.uk/159166/>
- Lucquin, A., et al., (2016). Ancient lipids document continuity in the use of early hunter-gatherer pottery through 9,000 years of Japanese prehistory. *Proceedings of National Academy of Science*. 113 (15) 3991-3996, doi: 10.1073/pnas.1522908113

文化財を活用したユニークベニューにおける調査3 —活用科学のための調査— Research on the utilization of cultural properties at a unique venue 3 - For Utilization Science-

○松井敏也(筑波大学)、深見利佐子(筑波大学)、河崎衣美(奈良県立橿原考古学研究所)、
村野正景(京都文化博物館)、村上佳代(文化庁地域文化創生本部)
○ MATSUI Toshiya (University of Tsukuba), FUKAMI Risako (University of Tsukuba),
KAWASAKI Emi (Archaeological Institute of Kashihara, Nara prefecture), MURANO
Masakage (The Museum of Kyoto), MURAKAMI Kayo (Headquarters for Vitalizing
Regional Cultures, Agency for Cultural Affairs - Japan)

1. はじめに

歴史的建築物・構造物などの文化財の活用をすすめるための科学調査を“活用科学”と位置づけ、従来の保存科学的手法を応用しながら進めている。文化財をユニークな場所としてさまざまな活用を行うことは、利用者による文化財が持つ価値への理解や新たな発見などが期待できる一方で、本来の用途とは異なる活用によってどのような変化が生じているのか把握できずにいる。安全に文化財を活用するためには活用の態様に合わせた調査項目と調査基準が必要と考えるが明確に示されず、科学的根拠が乏しい状況である。

これまで文化財を活用する際の変化の可視化を試みている^{*1}。その結果、活用の内容によって特徴があることが示唆された。2018年から時代や構造、材質の異なる遺産において活用時の環境変化を把握した結果を報告する。

2. 調査箇所 (公開は常時公開を示し、非公開はイベント時のみ)

①京都文化博物館別館 [京都市] (国重要文化財、公開)、②元離宮二条城二の丸御殿台所 [京都市] (国重要文化財、公開)、③旧萩藩校明倫館 [萩市] (国史跡、公開)、④旧萩藩御船倉 [萩市] (国史跡、非公開)、⑤熊谷家住宅 [大田市] (国重要文化財、公開)、⑥白川郷旧中野長治郎家住宅 [白川村] (岐阜県重要文化財、公開)、⑦白川郷旧遠山家住宅 [白川村] (国重要文化財、公開)、⑧牛久シャトー本館 [牛久市] (国重要文化財、非公開)、⑨富岡製糸場西置繭所 [富岡市] (国宝、公開)

3. 使用機器

温度湿度 CO₂ データロガー : Onset 社 HOB0 MX1102A

微小粒子状物質 (PM) 計測 : Purple Air 社 PA-II Dual Laser Air Quality Sensor

有機ガス TVOC 計測 : TENAX 管 GC-MS 分析

検知管計測 : 北川式検知管 (No. 900NHH、710、910)

4. 結果

京都文化博物館別館は年間200日以上を活用イベントを行っている^{*1}。新型コロナ対策として来館者人数の制限、換気の励行、イベント内容の見直しなどにより、CO₂濃度が抑制されていることが見て取れた。しかし7月下旬からイベントが頻繁になる時期は蓄積する傾向が見られた(図1)。ARTISTS' FAIR KYOTO 2022 (22年3月3日-10日)における揮発有機ガスの経時変化調査を行った。閉館後ではおよそTVOCが1割減少した。空調機が停止し翌日朝6時からの計測ではさらにTVOC量の増加が見られた。これら成分の増減を確認するために各測定間の差分を図2に示す。

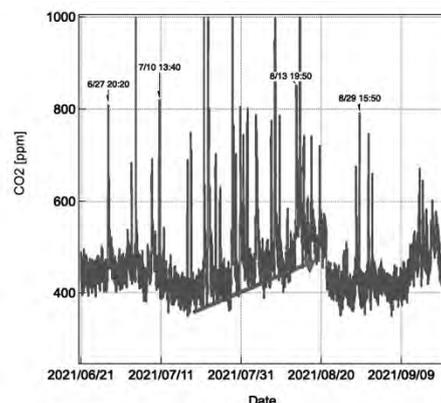


図1 連日開催される時期のCO₂の増加

世界遺産石見銀山内の熊谷家住宅は施設では冬期に石油ストーブを使用しており、それにより 1200ppm にまで上昇し、その後緩やかに下降し日付が変わるころに元の値（点火前）まで戻っている。当該施設の空気質の挙動をよく示している。PM 挙動は大田市内と似ており外気からの影響によるものと考えられた。

白川郷旧遠山家住宅の CO₂ 挙動はピークのほとんどが昼近くもしくは午後集中しているが、イベント人数と CO₂ 濃度の関係は見られなかった。元の状態に戻る前に減少傾向が鈍化する傾向が見て取れた。あと 30 分換気を試みる良い。

牛久シャトー本館は非公開施設であり催事のみ利用に限られている。2/9 の催事に CO₂ 機器の計測限界値（5000ppm）を超えた。家庭用の石油ファンヒーターを用いたとのことである。出入り口の扉は開放したままであったとのことであったが、CO₂ 濃度の上昇は著しい。2/9 の夕方の催事は 16 時に開始され 18 時半ころに終了した。CO₂ 濃度は翌日の朝まで緩やかに減少している。上記のことから、当該部屋は非常に気密性が高く、その使用にあたっては現行の換気方法を改良する必要がある、使用後の換気（特に使用後）も重要である。牛久シャトーでの PM 計測結果からはいくつかピークが認められるが上記のイベントとの関係は見られなかった。

ハウスインハウスでの活用をすすめる世界遺産旧富岡製糸場のイベントでは短時間で速やかに元の状態にまで戻っていることがわかった。非常に換気の効率がよく、イベントにより一時的に空気質の変化があったとしても、現状の対応で良いものと思われた。

4. まとめ

新型コロナウイルス感染症対策による影響で従前行われてきた活用形態の挙動は把握することができなかった。このような特殊な状況下でのデータは未活用の状態でも、従前の活用状態でもないデータとして貴重であり、今後の活用をすすめる上での知見となる。微小粒子状物質は外気の挙動と類似した変化を示すところが多かった。現段階までに得られた結果から、建物の気密性（自然換気性能）を把握することにより、イベント後のケアによって、変動した施設内空気を速やかに平時（イベントがない基底の状態）にまで戻すことができる。施設の利用時期でイベント内容にも特徴があり、ケアもそれに合わせて変化させる必要があるだろう。

本研究は文化庁「大学・研究機関等との共同研究事業」において実施した「文化財の活用をすすめるための科学調査」の成果である。調査にあたっては各市町村、関係機関の協力を頂きました。

※1 松井ら“文化財を活用したユニークベニューにおける調査－保存科学から活用科学へ”“同左 2”、日本文化財科学会第 36 回および 37 回大会要旨集

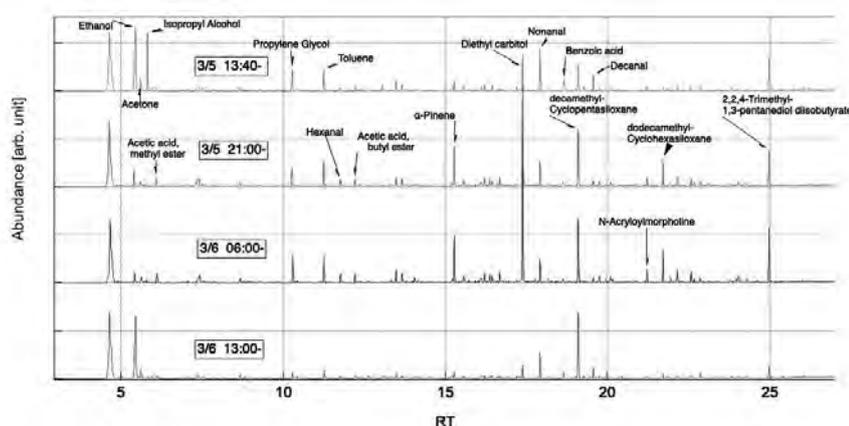


図 2 京都文化博物館別館イベント GC-MS 分析結果

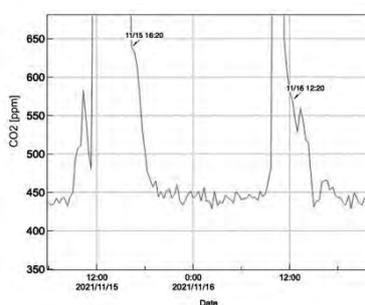


図 3 白川郷遠山家の CO₂ 挙動

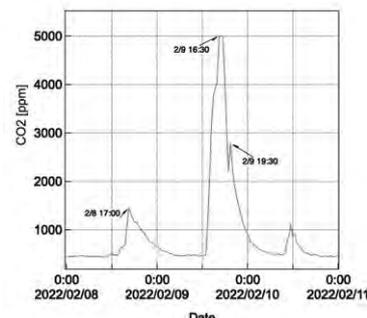


図 4 牛久シャトーの CO₂ 挙動

収蔵庫における汚染物質濃度低減について

Reduction of pollutant concentration in storage

○及川雅史（グリーンブルー株式会社）、長宗寧（同左）

○Masafumi OIKAWA, Yasushi NAGAMUNE (Green Blue Corporation)

概要

ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、酢酸及びギ酸の4物質について東京都文化財研究所の目安、東京国立博物館の指針濃度を超過していた収蔵庫を対象に、低減対策として空気清浄機を導入した。稼働中に再度測定を行ったところ、想定よりも濃度が低減しておらず、その要因について検討した。検討の結果、空気清浄機により発生源からの放散量が増加し枯らしが進み、ある時点から室内濃度が低減すると考えられ、空気清浄機の継続稼働により濃度低減効果が期待できると想定された。

1. はじめに

空気中の化学物質が文化財の変質や劣化を引き起こすことは明らかであり、文化財を保管する収蔵庫などの空気質を把握、モニタリングすることは重要とされている。今回の報告では、施設管理者から収蔵庫内で酸っぱい臭いがするなどの指摘があったため、現状把握のために2020年9月にホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、酢酸及びギ酸をパッシブ法にて測定した。その結果、4物質とも目安及び指針を超過していた(表1)。そこで汚染物質濃度低減のために空気清浄機を導入した経緯、使用中の状況及び効果の評価について報告する。

2. 空気清浄機の効果の想定と実測の比較

美術館・博物館のための空気清浄化の手引き(東京文化財研究所)より、空気清浄化の基本として、換気量、ケミカルフィルター、枯らし、遮断材・吸着剤などが挙げられている。今回の対策検討時の条件として、発生源と想定される美術品の運び出しは不可(発生源除去難)、壁面の封じ込め作業も難しい(遮断剤使用難)、周辺環境の影響によるカビの増殖や塩害が想定され機械換気を使えない(換気量少ない、枯らせない)ことがあげられ、ケミカルフィルターを搭載した空気清浄機の活用が望ましいと考えた。空気清浄機活用時の化学物質について、換気率を0.03回/h、0.3回/hと仮定し表2の条件にて想定濃度を算出した。空気清浄機はピュアテック株式会社製のSATNDBYME(SBM-S)、ケミカルフィルターは同社製のA3H(有機酸用)、GAR(アルデヒド用)を用いた。表2よりこれらでは濃度目安及び指針値を下回

表1 収蔵庫の現況

項目	測定日		
	9月20日	目安*	指針**
ホルムアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	170	100	60
アセトアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	39	48	19
酢酸(ppb)	230	170	50
ギ酸(ppb)	11	10	10

*東京都文化財研究所[濃度上限の目安]

**東京国立博物館[空気汚染物質濃度指針]

表2 空気清浄機稼働中の収蔵庫濃度想定

項目	試算値	試算値
	[N=0.3回/h]	[N=0.03回/h]
ホルムアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	33	3
アセトアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7.6	0.8
酢酸(ppb)	45	5
ギ酸(ppb)	2.2	0.2

※高气密建物の必要換気回数 $N=0.5$ 回/hより、収蔵庫の換気回数は機械換気を停止していることからそれ以下と判断し最大0.3回/h、最小0.03回/hと設定した。設定換気回と表1より放散量 M を算出した。数空気清浄機の風量 $300\text{m}^3/\text{h}$ 、除去性能100%(メーカー聞き取り)、収蔵庫の推定気積 244m^3 から、疑似的に換気回数が1.2回/h増加している事と同じ効果であると設定した。

る濃度になると想定された。次に稼働中の実際の濃度を確認するために、2021年の夏季に空気清浄機稼働前と稼働中(稼働してから3日後)にパッシブ法にて測定した。その結果、空気清浄機稼働中の濃度は想定値(表2)と比較して高く、また化学物質によって低減率は異なっていた(表3)。

3. 想定値と実測値が異なる理由について

想定値と実測値が異なった原因として以下の4点の仮説を考えた。①空気清浄機の除去性能が100%ではない、②収蔵庫の換気量が想定より大きい、③部屋濃度が均一ではなく測定値が代表的ではない、④発生源

の放散量が変動している可能性がある。以下、仮説の検討について記載する。①については、アクティブ法で給気口と排気口の濃度を測定した(表4)。アセトアルデヒドを除く3物質の除去性能は十分で、アセトアルデヒドの除去性能がやや低いように見られるが、これは空気清浄機稼働中では給気口の濃度が低いため、効果が低く見えていると思われる。よって、除去性能は十分と判断し、仮説①を棄却した。②炭酸ガスを用いてCO₂濃度減衰量から換気量を算出した。換気回数は0.07回/hであり、仮説②を棄却した。③収蔵庫の中央及び奥でアクティブ法にて測定を行ったところ、濃度差はほとんどなく、室内では著しい濃度差は生じていないと思われる、仮説③を棄却した。

仮説④については以下に記載する。建材からの化学物質の放散は必ずしも一定とみなせない場合がある。それは、建材内部に多くの化学物質を含んでいる場合、化学物質の放散量は建材表面の気相濃度と室内空气中濃度の濃度差によって変化する。この段階では、機械換気や空気清浄機の効果が濃度の低減として表れにくいことがある。例えば室内空气中の濃度が低減すると、建材表面との濃度差が大きくなり、放散量が増大する(遷移状態)²⁾。本収蔵庫は施工後20年程度経過しているが、換気量の少なさから遷移状態であると思われる。そこで、放散量の変化を算出したところ、特に有機酸は10倍以上放散量が増加していた(表5)。本収蔵庫では仮説④の放散量が室内濃度によって変動していると考えられた。

4. まとめ

以上のことから、換気の少ない空間でケミカルフィルター付き空気清浄機を用いることで、フィルターに化学物質が吸着しその空間から除去されるため、発生源からの放散が促進され、枯らし期間が短くなり、結果として室内濃度が低減することが期待できると考えられた。今後は、室内化学物質濃度のモニタリングを行い、室内化学物質濃度低減に関する空気清浄機の効果の検討を継続する。

1)美術館・博物館のための空気清浄化の手引き、東京文化財研究所

2)室内環境学会,住まいの化学物質 リスクとベネフィット,2015年11月10日,第1版1刷発行

表3 空気清浄機稼働前、稼働中の濃度

項目	測定タイミング	
	導入前	導入後
ホルムアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	180	82
アセトアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	66	10
酢酸(ppb)	280	210
ギ酸(ppb)	40	25

※ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒドは2回の測定の平均値を示した。

表4 空気清浄機の除去性能

項目	給気口	排気口	除去性能
ホルムアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	46	9.4	80%
アセトアルデヒド($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10	5.2	48%
酢酸(ppb)	180	4.4	98%
ギ酸(ppb)	32	0.81	97%

表5 空気清浄機稼働前と稼働中の放散量

項目	導入前	導入後	割合
ホルムアルデヒド(m^3/h)	2.40E-03	1.70E-02	7.1倍
アセトアルデヒド(m^3/h)	6.15E-04	9.11E-04	1.5倍
酢酸(m^3/h)	4.78E-03	6.51E-02	13.6倍
ギ酸(m^3/h)	6.83E-04	7.73E-03	11.3倍

文化財建造物の障壁画の保存・公開時における環境調整方法に関する研究

—二条城御常御殿の温湿度環境予測に基づく公開方法の検討—

Study on environmental adjustment methods for the conservation and exhibition of wall paintings in cultural properties

- Investigation of exhibition method considering hygrothermal environment -

○小椋大輔(京都大学)、米田昌弘(同左)、伊庭千恵美(同左)、高取伸光(同左)、岡村知明(京都市)

○Daisuke OGURA, Masahiro YONEDA, Chiemi IBA, Nobumitsu TAKATORI (Kyoto University), Tomoaki OKAMURA (The City of Kyoto)

1. はじめに 文化財建造物内の障壁画の周辺環境は日射、外気の温湿度の影響に加え、観覧者の熱水分発生等の影響を受ける。本研究の最終的な目的は、これらを踏まえ、障壁画の公開・非公開時の温湿度等の環境を予測し、障壁画の保存と公開における適切な環境調整手法を提案することである。研究対象は、障壁画の現地公開が予定されている二条城本丸御殿の障壁画である。既報¹⁾では、障壁画の現地公開が行われている二の丸御殿の屋外建具である透明雨戸の紫外線と日射の透過量と廊下周辺の温湿度環境を明らかにした。ここでは、本丸御殿の御常御殿における障壁画の公開時・非公開時の温湿度環境に着目し、二の丸御殿の透明雨戸を御常御殿に設置する場合の環境の予測とその調整方法について検討を行った結果を報告する。

2. 御常御殿の多数室温湿度解析 本丸御殿の御常御殿における公開時・非公開時における各室の温湿度を再現するために多数室温湿度解析のモデルを作成した。以下で概要を説明する。

2.1 基礎方程式 法隆寺金堂壁画収蔵庫の多数室温湿度解析²⁾と同様に、土壁等材料内の熱湿気移動は熱水分同時移動方程式を用い、室の温湿度は1質点系の収支式より求めた。透明雨戸室間の開口部や隙間の換気量は圧力仮定法を用いて換気回路網解析で求めた。なお、二の丸御殿の透明雨戸と障子の間の空気層の温湿度の測定値を用いて、日射の透過や建具の隙間の大きさの同定を行った。

2.2 解析モデル 解析対象は、本丸御殿御常御殿に存在する26室であり、外部及び内部の太線は御殿内で常時開いている開口と開け閉めする雨戸の位置を示したものである(図1)。内部に示した開口及び、御殿の各建具に存在する隙間を考慮し、86の枝を設定した。

2.3 解析条件 解析期間は2004年7月6日~2005年7月6日とし、各室における温湿度の初期値は、一の間における測定値を与えた。境界条件は、外気について、温湿度、雲量、日射量、風向風速を気象庁の測定値より与えた。日射は1階部分の雨戸部分のみ考慮した。開口部は、木製と透明雨戸の違いと公開・非公開の建具の有無を考慮して日射の透過や壁体の熱湿気移動の違いを考慮する(図2)。透明雨戸が設置されている場合、透明雨戸の日射の透過を考慮し、障子の紙は、熱湿気抵抗を考慮した。来館者からの熱水分の発生量は、二条城本丸御殿、御常御殿における特別公開期間の一日当たりの来館者数から式($N_{hour} = N_{day} * t * 1/nh$)を用いて、1時間当たりの滞在人数を算出し、一人当たりの熱水分発生量をかけて求めた。

3. 多数室温湿度解析モデルの再現性の確認 図3に秋季公開時公開時(公開期間2004年9月18日~27日)の一の間における温湿度解析結果および実測結果を示す。開口部は非公開時に木製雨戸と障子が設置されており、公開時に障子のみ設置されている(図2)。図より、解析結果は温湿度ともに実測結果を概ね再現できている。また、非公開期間もやや温度変動が大きくなるものの同様の結果が得られた(図省略)。次章では本解析モデルを用いた数値シミュレーションにより検討を行う。

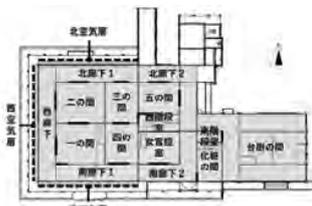


図1 御常御殿

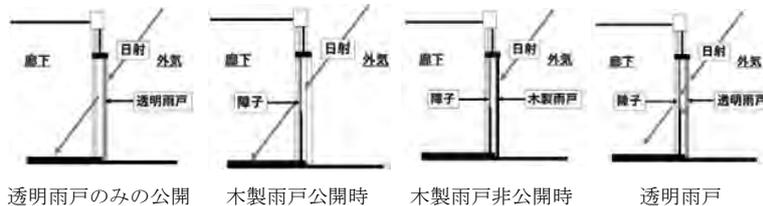


図2 開口部の雨戸の有無による日射の考慮

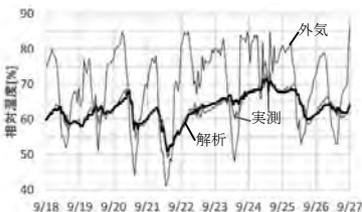


図3 相対湿度の解析値と実測値の比較

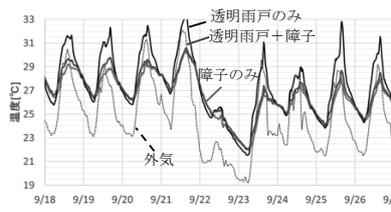


図4 公開時における一の間の温度

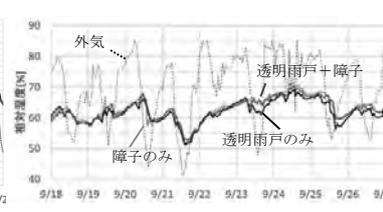


図5 公開時における一の間の相対湿度

4. 御常御殿における一般公開の検討

4.1 障壁画保存における適切な保存環境 ここでは温湿度環境が障壁画へ及ぼす影響を、紙の亀裂、カビ・生物被害、膠の劣化の観点から考察を行う。障壁画の紙の化学的劣化は加水分解により劣化を考慮し高温高湿、および乾湿の繰り返しの抑制が必要と考えられる。紙の物理的劣化は弾性範囲を超えた時、ひずみが残り、劣化が起こると考える。障壁画本紙の相対湿度を変動させた時の紙の自由膨張ひずみと紙の弾性範囲が、紙の引張試験で線形な変形の範囲と想定すると相対湿度の変化範囲は±15%の範囲程度と考えられる³⁾。カビ・生物被害、膠の劣化は、文献値からそれぞれ温度が20℃以下、相対湿度が60%以下、および相対湿度が40~70%を適切な温湿度範囲と考えられる⁴⁾⁵⁾。また、筆者らは展示環境下における障壁画ならびに障壁画に塗られた絵具の劣化・変褪色傾向とその要因を明らかにすることを目的として、支持体構造の異なる複数の模擬障壁画の暴露実験も行っており⁶⁾、絵具の劣化、変褪色の抑制の観点からの環境調整の条件について今後明らかにする必要がある。本論では、これらを踏まえた温湿度環境等の評価までは行ってないが今後、劣化を抑制する環境条件の範囲等の設定が必要と考えられる。

4.2 透明雨戸を用いた公開 御常御殿で設置が検討されている透明雨戸を用いた公開について、①春、秋のみ公開、②障子を明け放ち、透明雨戸のみによる春、秋の公開、③通年公開、における一のための温湿度結果について検討を行い、透明雨戸を設置した場合に④人数制限、⑤透明雨戸の透過率の変更を行った結果を示す。①春、秋のみ公開：公開時期に関して相対湿度の差は、木製雨戸を開放した時を比べほとんど差がない。しかし、温度が上昇するとともに、絶対湿度が上昇しており、建具の吸放湿性が作用している。このため、透明雨戸を設置した場合、室において、相対湿度が変化しないが、壁体はより吸放湿を繰り返している(図省略)。②透明雨戸のみによる春、秋特別公開：障壁画を鑑賞するとともに庭を観覧するため、障子を開放し透明雨戸のみを設置し、公開を行った場合は、日射が廊下に入り込むことによって温度が上昇し、絶対湿度、相対湿度ともに変動が大きくなった(図省略)。③通年公開：図6に通年公開と春、秋のみ公開(限定公開)の相対湿度の比較を示す。通年公開の方が限定公開より、相対湿度が平均で5%ほど高くなっていることがわかる。これは透明雨戸の気密性および、雨戸面から湿気を透過しないことにより、見学者の発湿・発熱により建物内部の絶対湿度が上昇していることおよび温度が上昇することにより、壁体から水分が室へと流れていることが原因としてあげられる。④人数制限：通年公開で1日当たりの入場者数を半分に制限した場合、相対湿度は、平均で約3%減少し、人数制限による高湿抑制効果が確かめられた(図7)。⑤透明雨戸の透過率の変更：日射透過により室温が上昇していることから、透明雨戸の日射透過率を0.85から0.5に変更した場合、室温の上昇を抑えられたことがわかった(図8)。また日射透過率の違いによる室の相対湿度の両者の差は小さかった(図省略)。

5. まとめ 本研究では、本丸御殿の御常御殿における障壁画周辺の温湿度環境に着目し、本丸御殿の環境調整方法について検討することを目的とし、多数室温湿度解析により木製雨戸を用いていた時期の御常御殿において

解析を行い、公開・非公開期間を含む御常御殿での温湿度を再現し解析モデルの妥当性を確認した。次に御常御殿の一般公開に向けた検討として、透明雨戸を設置した場合の各公開方法における一のための温湿度状態について検討を行った。その結果、透明雨戸の設置による、気密性の向上、および日射の影響の増加が室における温湿度に影響を与えることを示した。また温度および相対湿度を調整する方法として、人数制限および透明雨戸の透過率を下げるこの効果を確認した。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (B) (課題番号: 21H01491、研究代表者: 小椋大輔)の助成を受けたものである。障壁画や紙等の劣化については、京都市立芸術大学・高林弘実准教授、東京芸術大学・貴田啓子准教授に多くご助言を頂いた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

記号の説明 N_{hour} : 1時間当たりの御常御殿の各室における[人/h.個], N_{day} : 1日当たりの御常御殿における入場者数[人/day], t : 御常御殿における滞在時間比率[h/h]=0.25, h : 1日あたりの公開時間[h/day]=6.5, n : 御常御殿における部屋の個数(=10個)

参考文献 1)米田昌宏他, 日本文化財科学会第38回大会研究発表要旨集, pp.216-217, 2021, 2)藤原良輔他, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境系, 58号, pp.169-172, 2018., 3)米田昌宏: 京都大学大学院建築学専攻修士論文, 2022, 4)見城敏子: にかわの劣化と顔料の変褪色, 保存科学 12, p.83-94, 1974, 5)三浦定俊他, 文化財保存環境学, 朝倉書店, 2004, 6)高取伸光他, 日本文化財科学会第38回大会研究発表要旨集, pp.198-199, 2021

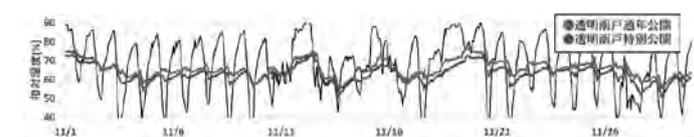


図6 通年公開と春、秋のみ公開(特別公開)の一のための室内相対湿度の比較

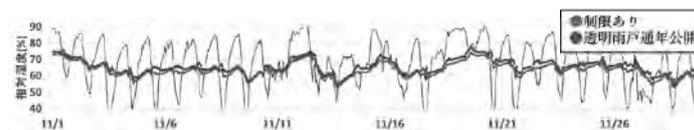


図7 人数制限の有無による一のための室内相対湿度の比較



図8 透明雨戸の日射透過率の違いによる一のための室温の比較

モザイク装飾の物理的劣化に関する研究 その1) ビザンティン建築に残る壁面モザイクを対象とした塩類風 化の数値解析

Study on the physical deterioration of mosaic decoration. Part 1, Numerical analysis of salt weathering on historical wall mosaics in Byzantine architecture.

○箭野早耶華(近畿大学)、安福勝(同左)、佐々木淑美(東北芸術工科大学)、小椋大輔(京都大学)
○Sayaka YANO, Masaru ABUKU (Kindai University), Juni SASAKI (Tohoku University of Art),
Daisuke OGURA (Kyoto University)

1. はじめに

本研究の目的は、ビザンティン建築などに施されているモザイク装飾が抱えている、塩類風化、乾湿サイクルなどによる物理的な劣化メカニズムを解明することである。一般的なビザンティン建築などに見られる壁面モザイクの層構成は内部よりレンガや石材とモルタルで構成される構造壁体、第1モルタル層、第2モルタル層となっており、表面はモルタル下地(第3モルタル層)とガラスや大理石などのテッセラで構成されている¹⁾(図1(a))。劣化した壁面モザイクの修復においては伝統的・経験的な方法が用いられているが、上記の通りモザイクは複雑な層構成を持ち、塩の結晶は状況に応じて壁体表面、壁体内部あるいはその層間に析出するため、壁面モザイクの材料の物理的特徴を理解した修復方法が必要であると考えられる。本研究ではまず、代表的な壁面モザイクの特徴を捉えた壁体モデルを作成し、劣化の原因となる濡れた壁面モザイクからの水分の蒸発過程や塩の析出過程の特徴を数値解析により明らかにする。

2. 数値解析

ビザンティン建築に残る壁面モザイクの多くは、図1(a)に示されるようにモルタル3層とレンガ・モルタルの層で構成されており、これを参考にモデルを作成した。幅0.5mの壁体を想定した解析対象(2次元)の模式図を図1(b)に示す。ただし、壁体は上下対称であると想定し、図中の解析対象の下端に対称境界条件を適応する。Derluyn²⁾が提案した解析モデル³⁾を用い、この解析対象内部における熱・水分・塩移動を予測する数値解析を行った。

物性値を決める際には、様々な文献を参照し^{2,4-7)}、文献から得られない場合は、値を各層の乾燥密度の関数としてモデル化した。テッセラの物性値には一般的なガラスの値を用いた。

各種解析の境界条件を図1(c)に示す。壁面に接する空気の温湿度には、ビザンティン建築の代表的な室内環境として、イスタンブールのアヤソフィアモスクの地上階小屋(Mahfili)上とコーラ修道院聖堂の内ナルテックスで測定した値を参照した。両箇所共に、塩類の析出が確認されている壁面モザイクが存在する場所である。温度については年変動の近似値を周期的に与え、湿度については年平均相対湿度(70%)を使用した。

今回の解析では、そして、テッセラの有無による乾燥過程の違いと、塩化ナトリウム (NaCl) を含む溶液の乾燥過程と純水のそれとの違いを検討した。イオン (Na^+ と Cl^-) の初期濃度は 1 mole/kg-solution とした。

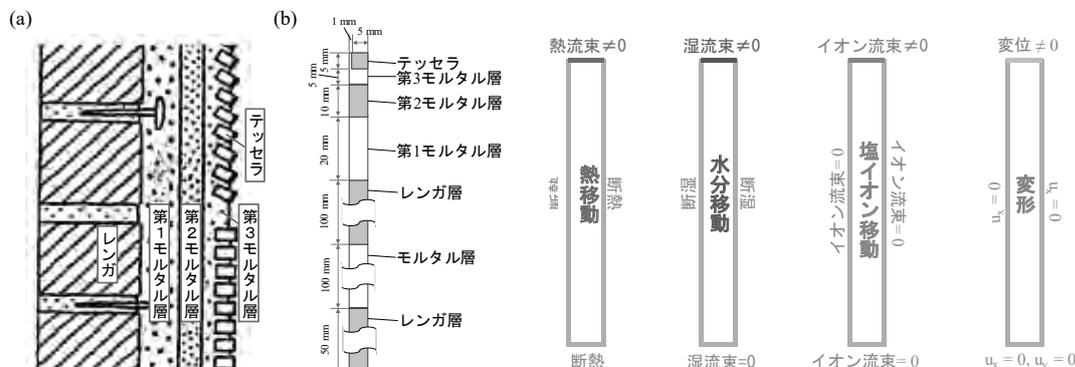


図1 (a)壁面モザイクの断面図¹⁾と(b)解析対象の模式図、(c)境界条件

3. 解析結果および考察

テッセラの有無による乾燥過程の違いと、塩化ナトリウム (NaCl) を含む溶液の乾燥過程と純水のそれとの違いを図2に示す。なお、図2に示される各色の領域の値は、各領域内の値の平均値である。各図中の実線と破線の比較から、テッセラを有する場合はそうでない場合に比べて、乾燥速度が非常に遅くなることがわかる。

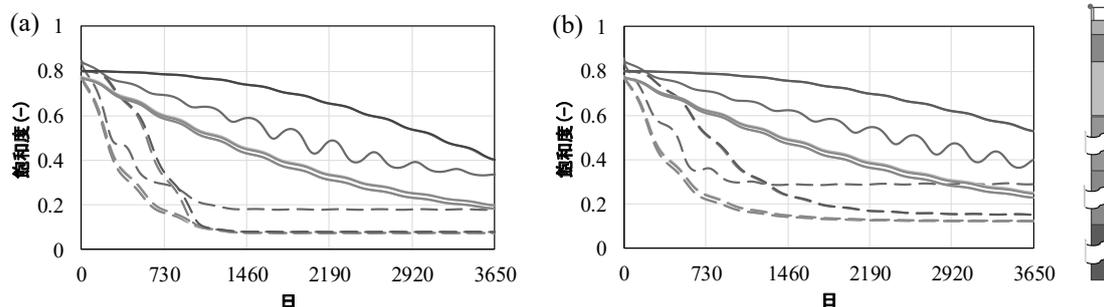


図2 飽和度の経時変化 ((a)純水, (b)塩溶液; 実線: テッセラあり, 破線: テッセラなし; 右図における点・領域の色が線の色に対応する。)

4. 結論と今後の展開

今回の検討条件では、塩溶液と純水の差は大きくは見られなかった。また、今回の条件下では塩化ナトリウムの結晶が生成されることはなかった。これは、境界条件として用いた湿度が常に高く、結晶化の条件を満たさないためである。塩の種類、あるいは初期条件・境界の温湿度条件によっては結晶化が起こる可能性がある。今後、壁体の厚み、目地幅、環境条件などの影響に応じた壁面モザイクの、塩の結晶化および変形といった塩類風化過程を解析する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費・基盤研究(B) (18H01596)、挑戦的研究(開拓) (19H05511) の助成を受けた。

参考文献 1) Manuela Farneti. 1993. Technical-historical glossary of mosaic art, Longo Editore. 2) Derluyn H. 2012. Salt transport and crystallization in porous limestone: neutron-X-ray imaging and poromechanical modeling. Diss. ETH Zurich. 3) Abuku M. and Ishii K. 2021. PMSolver: development of a generic FEM code for heat, moisture, and salt transfer and deformation in porous materials, in: Proceedings of SWBSS 2021, September 22-24, 2021, Delft, the Netherlands, pp.187-189. 4) Mizutani E., Ogura D., Ishizaki T., Abuku M., and Sasaki J. 2021. Influence of wall composition on moisture related degradation of the wall surfaces in Hagia Sophia, Istanbul. Journal of Building Physics, 45(3), 271-302. 5) Saidov T. A., Pel L. and Kopinga K. 2017. Sodium sulfate salt weathering of porous building materials studied by NMR. Materials and Structures, 50: 145. 6) M.Kummar KUMARAN 日本建築学会訳: 建築材料の熱・空気・湿気物性値,丸善,2001.9 7) Aoki T. 1998. Collapse mechanism of Hagia Sophia, Architectural Institute of Japan, Volume 63, No.508, Pages 79-85.

レンガ造煙突の脱塩方法に関する基礎的研究

その2) イオンの移流を利用した脱塩

Fundamental Study on Desalination Methods for Brick Chimneys

Part 2 Desalination by ion advection

○木村藍香 (近畿大学)、安福勝 (同左)、麓隆行 (同左)、宇野朋子 (武庫川女子大学)、
伊庭千恵美 (京都大学)

○Aika KIMURA, Masaru ABUKU, Takayuki FUMOTO (Kindai University),

Tomoko UNO (Mukogawa Women's University), Chiemi IBA (Kyoto University)

1. はじめに

近代以降に造られたレンガ造煙突の多くは劣化が進み、煙突表面に剥離やひび割れが起こっているものも存在する。塩類風化はこのような劣化の要因の一つであり、硫酸ナトリウムはレンガ造煙突の劣化に関わる代表的な塩である¹⁾。

筆者らは前報²⁾で、初期に硫酸ナトリウムを含んだレンガの試験体の一面から純水を吸水させ、その後純水中に24時間浸水させた後に、乾燥させるというサイクルを繰り返す実験を行った。サイクルの途中から吸水を省略し、浸水と乾燥の過程のみを行ったところ、脱塩量が減少した。この結果から、試験体に純水を吸水させる過程で、移流により内部の塩が試験体のもう片側の蒸発面側に移動し、脱塩を加速させたと考えられる。

本報では、硫酸ナトリウムを含んだレンガを対象に、水分移動に伴う塩イオンの移流を利用した脱塩方法の効果を検討するための実験を報告する。

2. 実験概要

試験体は一般的な焼成レンガ (寸法 $210 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ 、密度 2018 kg/m^3) から切り出した (図1 (a))。試験体の均一化を図るため、両端の焼成面は切り離した上で、寸法 $30 \times 50 \times 60 \text{ mm}^3$ の試験体を12個作成した。12個のうち、乾燥速度が著しく遅い2個を除いた8個を実験に使用した。各試験体表面のうち $30 \times 60 \text{ mm}^2$ の面を除く4面に断湿処理を施した。

試験体作成後、図1 (b)に示す実験によって脱塩効果を測定した。まず、各試験体の吸水特性を把握するため、純水による吸水実験 (Step 1a) と硫酸ナトリウム飽和溶液 (濃度 $32.1 \text{ kg/kg-solution}$) による吸水実験 (Step 1c) を行った。その後、乾燥した試験体を用いて吸水実験を行い、イオンの移流を発生させ脱塩を行った。

脱塩実験では、試験体それぞれに容器を準備し、試験体の高さの $1/6 \sim 1/3$ まで純水を注ぎ、試験体の下面より吸水させた (Step 2a)。時間が経つと上面 (蒸発面) に塩が析出するため、別の純水が入った容器を準備し、上面を純水に浸けて塩を溶かすことで取り除いた (Step 2b)。吸水に使用する純水は、試験体の下面より塩が溶け出するため、定期的に取り替えた (Step 2c)。温度による脱塩速度の差を調べるため、8つの試験体のうち4つを室温 (24°C) で、残りの4つを高温 (34°C) で脱塩実験を行った。 34°C としたのは、この温度付近で硫酸ナトリウムの溶解度が最も

高くなるためである。

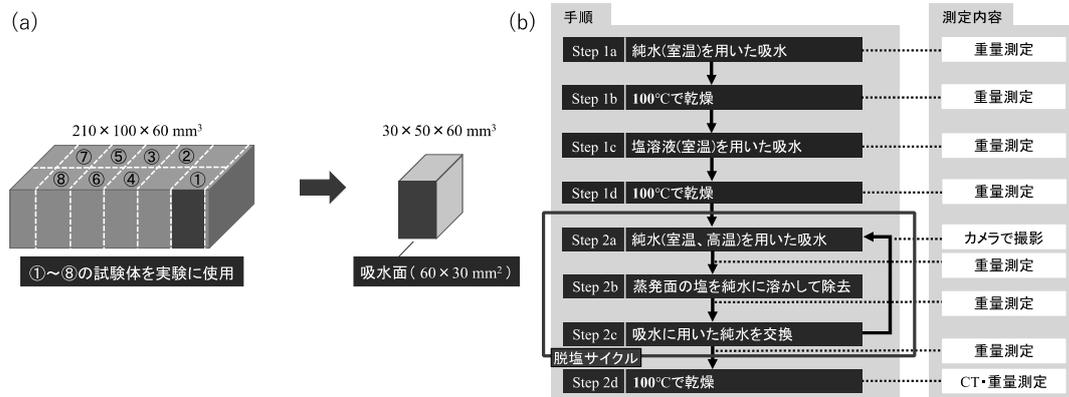


図1 (a) 試験体作成過程の概要、(b) 実験手順

3. 実験結果

本実験で得られた各試験体の脱塩速度と脱塩量の温度ごとの平均値を、前報²⁾で行った脱塩実験の結果と比較して図2(a)、(b)に示す。

脱塩速度は 34°Cの方が平均して速いという結果になった。本実験の実験条件下では、脱塩実験開始から 312 時間後に 97.9%の塩を除去するという高い脱塩結果が得られた。しかし、24°Cで長時間脱塩実験を行った試験体にはヒビが入ることが確認された。これは、蒸発面付近に見られる塩の結晶化によりレンガ内部に応力が発生したためと考えられる。

120 時間以降の結果を見ると、イオンの移流を利用した脱塩に比べ、拡散のみを利用した脱塩の速度が明確に小さい事が分かる。これよりイオンの移流を利用した脱塩がより有効であることが確認できる。

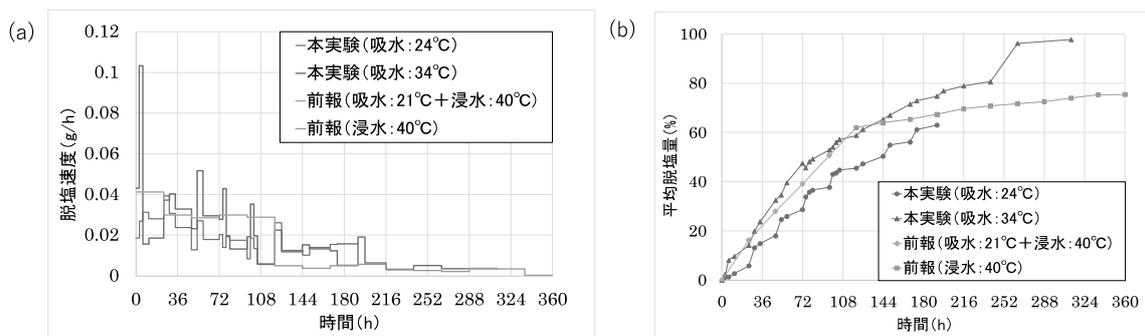


図2 (a) 脱塩速度の経時変化、(b) 脱塩量の経時変化

4. まとめ

イオンの移流を利用した脱塩手法を検討し、前報で示したイオンの拡散を利用した脱塩手法と比べて高い脱塩量と脱塩速度を示せた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費・基盤研究(B) (18H01596)、挑戦的研究(開拓) (19H05511)、および基盤研究(C) (20K04821) の助成を受けた。

参考文献

- 1) T. Uno, M. Abuku, C. Iba. 2021. Environmental factors for salt weathering of modern Japanese brick chimney. Proceedings of SWBSS 2021, September 22-24, 2021, Delft, the Netherland, pp.41-48.
- 2) 木村藍香, 安福勝, 麓隆行, 宇野朋子, 伊庭千恵美. 2021. レンガ造煙突の脱塩方法に関する基礎的研究 その 1) イオンの拡散を利用した脱塩, 日本文化財科学会第 38 回大会, 保存科学, P-067.

博物館内における遺構の展示手法と周辺環境の最適化に関する研究
— 遺構展示室内の環境調査と遺構の埋戻し方法の検討 —
Study on Optimization of Exhibition Method and Environmental
Control of the Remains in Museum
— Environmental Survey in the Remains Exhibition Room and
Examination of Reburying Method of the Remains —

○藤井佐由里¹⁾、脇谷草一郎²⁾、渡邊英明¹⁾、田中祐二¹⁾、柳田明進²⁾、川越光洋¹⁾、高妻洋成^{2,3)}
○Sayuri FUJII¹⁾, Soichiro WAKIYA²⁾, Hideaki WATANABE¹⁾, Yuji TANAKA¹⁾, Akinobu YANAGIDA²⁾, Mitsuhiro KAWAGOSHI¹⁾ and Yohsei KOHDZUMA^{2,3)}

- 1 福井県立一乗谷朝倉氏遺跡資料館 (Ichijodani Asakura Family Site Museum)
- 2 奈良文化財研究所 (Nara National Research Institute for Cultural Properties)
- 3 文化財防災センター (Cultural Heritage Disaster Risk Management Center)

はじめに 福井県立一乗谷朝倉氏遺跡博物館 (2022年10月開館予定。以下、博物館) 内の遺構展示室では約 860 m²の遺構を館内で展示する。屋内の遺構の露出展示を行なう際、乾燥による割れや塩害による遺構の破壊、蘚苔類による遺構の汚損、カビ・細菌類による来館者の健康被害などが問題となる。こうした遺構の劣化には温度や水分状態などの遺構周辺の環境条件が密接に関係している。本調査では、博物館内での遺構の保存と展示の両立を目的とし、展示室内の環境調査および最適な遺構の埋戻し方法について検討を行なった。

1. 調査地の概要 遺構は川原石から成る石敷遺構 (以下、石敷遺構) とその周辺の土から成る遺構 (以下、遺構面) で構成されている。石敷遺構は展示の中心であることから全面露出を行なった。一方、遺構面は上面に砂層と埋戻し土を掘り残すことで保護層を設けた。また、遺構展示室の壁面には換気ガラリが7か所あり (図1) 常時開放されている。通路下には、ファンの付いた空気吹出し口が5か所あり、内気循環と外気導入の2方式の運転が可能である。

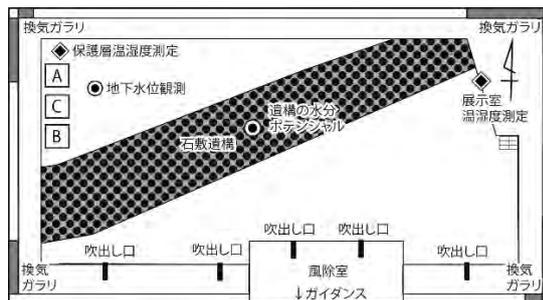


図1 遺構展示室の平面模式図と調査箇所

2. 展示室内の環境調査

2-1. 調査方法 展示室内の温湿度環境を把握するため、温湿度センサー (T&D社製, TR-72nw) を用いて室内上部・下部および保護層直上の3カ所で温湿度測定を実施した。また、遺構の水分状態や遺構への水分供給源を把握するため、地下水位センサー (応用地質株式会社製, S&DLmini) による地下水位観測と水分ポテンシャルセンサー (Decagon社製, MPS-6) による遺構の水分ポテンシャルを測定した。水分ポテンシャルセンサーは、石敷上面から約50cm下と約90cm下の土部分2か所に設置した。調査箇所を図1に示す。

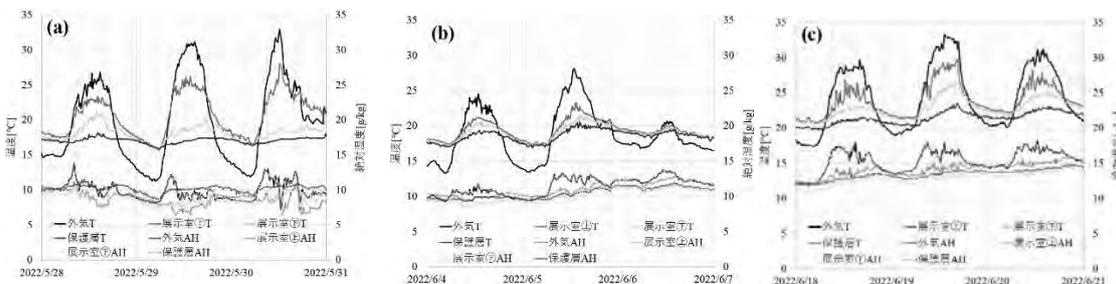


図2 遺構展示室内の温湿度 (a: ファン停止、b: 外気導入、c: 内気循環)

2-2. 結果と考察

① 展示室内の温湿度環境 空気吹出し口の使用方法毎に室内温湿度の検討を行なう(図2)。

【ファン停止(a)】室内と比べて保護層直上の湿度が高く示された。これは、高含水状態の保護土から常に水分蒸発が生じていることを示している。

【外気導入(b)】室内と比べて外気の湿度が高く示された。外気導入によって湿った外気を室内に導入しているにも関わらず、室内湿度が外気湿度と同じにならないことから、室内に流入した湿気は室内の低温部で凝縮しているものと考えられる。

【内気循環(c)】室内と比べて外気の湿度が高く示された。また、内気循環中の2022年6月21日には、室内の壁面下部や石敷の一部で結露を確認した。これは、外気の湿気が換気ガラリから室内へ流入し、室内下部の低温部(壁面下部、石敷)で結露したものと考えられる。

② 遺構の水分状態 次に、遺構の水分状態の把握と水分の供給源について検討する。

遺構の水分ポテンシャルは上部・下部ともに-30~-10kPaで推移し(図3)、石敷直下の遺構土は常に高含水状態であった。これは、遺構の土が粘質土であることに加えて、遺構面から地下水が非常に近いため、常に水分供給があると考えられる。また、遺構上部は下部と比較して、降雨と連動した水分ポテンシャルの変化が認められた。これは、降雨時に室内の絶対湿度が上昇し、室内の空気から遺構上部に湿気が供給されたものと考えられる。

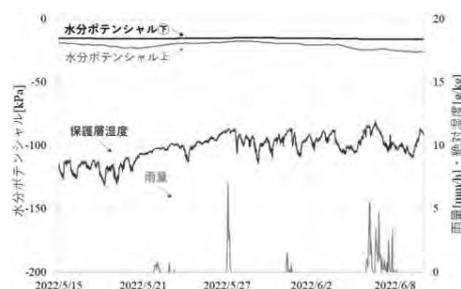


図3 遺構の水分ポテンシャルと雨量および保護層の絶対湿度

3. 遺構の埋め戻し方法の検討

3-1. 調査方法

本調査では展示室の北西隅に遺構上面の条件を変えた区画を用意し(図1、A・B・C)、各層毎の水分ポテンシャル測定を行なった(図4)。既往研究より、露出した遺構面に透水性の高い砂質土を敷設することで遺構面の乾燥を抑制できるとされており(Wakiya et al. 2014)、本調査においても遺構面の乾燥の抑制効果を検討するため、透水性の高い砂層や砂利層を遺構と保護層間に設置した(図4)。

3-2. 結果と考察

環境調査の結果から、遺構面および保護層面は常に高含水状態であり、室内の除湿を行わない場合、保護層面付近は高湿度環境となることが分かった。保護層面では高湿度環境を好むカビ、細菌類、蘚苔類の発生や塩害などが懸念されるため、遺構土壌は高含水状態に維持する一方で、保護層は低含水状態に維持する埋め戻し方法について検討が必要と言える。

各層毎の水分ポテンシャル測定の結果より(図5)、遺構面ではC、B、Aの順に含水状態が高く、保護層ではCと比較してBの含水状態が高い結果が示された。この結果から、遺構面を露出する条件Aと比べて保護層を設けた条件B・Cが遺構面の乾燥を抑制できており、遮水層としては砂層(条件B)と比べて粒径の大きい砂利層(条件C)が有効であることが示された。今後は、保護層上面に砂層を設ける埋め戻しの条件を追加実施し、展示室内の環境調査結果と合わせて季節毎の展示室の運用方法の検討を行なう。

【参考文献】 Soichiro Wakiya, Takeshi Ishizaki, Yosei Kohdzuma and Shigeo Aoki (2014) Study on Preservation Methods of Imperial Citadel of Thang Long based on heat and moisture movement in the remains, Proceedings of the International Conference on Conservation of Stone and Earthen Architectural Heritage, pp.97-104

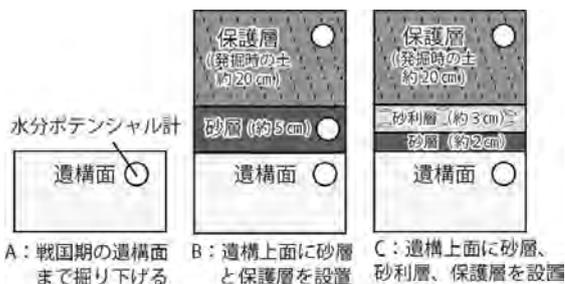


図4 条件A・B・Cの断面模式図

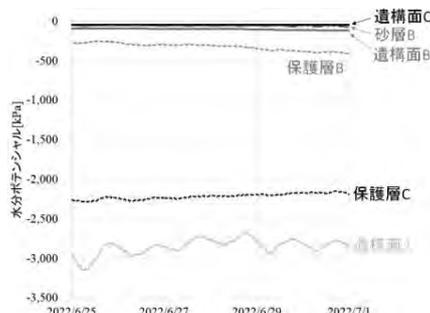


図5 各層毎の水分ポテンシャル

“Black Spots”の正体は何か？
-還元性硫黄化合物が展示時の銅製遺物の劣化に及ぼす影響
What kind of corrosion products are “Black Spots” ?
-Effects of reduced sulfur compounds in an exhibition case
on corrosion of copper artifacts

○柳田明進¹、脇谷草一郎¹、木川りか²、佐藤嘉則³、志賀智史²、
小泉恵英²、内野義⁴、安木由美⁴、高妻洋成^{1,5}

○Akinobu YANAGIDA¹, Soichiro WAKIYA¹, Rika KIGAWA², Yoshinori SATO³, Satoshi SHIGA²,
Yoshihide KOIZUMI², Tadashi UCHINO⁴, Yumi YASUKI⁴, Yohsei KOHDZUMA^{1,5}

- 1 奈良文化財研究所 (Nara National Research Institute for Cultural Properties)
- 2 九州国立博物館 (Kyushu National Museum)
- 3 東京文化財研究所 (Tokyo National Research Institute for Cultural Properties)
- 4 松浦市教育委員会 (Matsuura city board of education)
- 5 文化財防災センター (Cultural Heritage Disaster Risk Management Center)

1. はじめに

ガス状の還元性硫黄化合物の影響により、展示中の銅および銅合金製文化財の表面に腐食生成物が生じ、体積変化を伴う過程で表層の剥離などの劣化が生じる現象が報告されている¹⁾。国内ではこれまで認知されていないものの、海外ではこの腐食生成物は“Black Spots”として知られている(図1)。Black Spotsを硫化銅とする報告がある一方、硫酸銅、非晶質物質を含むといった報告も散見される²⁾。また、劣化を引き起こす原因として還元性硫黄化合物のH₂S、硫化カルボニル(COS)や硫黄分子が挙げられているもの²⁾、Black Spotsと呼ばれる化合物の発生機構やその条件については必ずしも統一的な見解は得られていない。Black Spotsの生成を抑制する条件を把握するためには、その化合物の特定、および還元性硫黄化合物の影響の検討を進め、発生機構を理解することが不可欠である。本発表では、Black Spotsによる銅製遺物の劣化機構とその対策を検討するため、Black Spotsが発生した銅製遺物とその破片の微細構造解析、およびH₂S、COSの発生源を調査した。

2. 調査方法

2.1 調査資料 調査資料は沿岸域に位置する遺跡から出土した銅製遺物である。他の海揚り品とともにエアタイトケースで展示されていた際にBlack Spotsが発生した。蛍光X線分析(XRF)より、資料の金属組成はCuを主成分とし、Zn、Sn、Pbを含むことを確認している。資料の状態調査と資料から剥離したBlack Spotsを伴う破片試料(約1 mm²)の微細構造解析を実施した。

2.2 資料の状態調査 資料表面の状態をデジタルマイクロスコープ(KEYENCE社製VHX-7000)にて観察した後、XRF装置(Bruker社製M4 TORNADO PLUS)により元素分布を取得し、微小部X線回折分析装置(RIGAKU社製SmartLab)により腐食生成物を同定した。

2.3 破片試料の微細構造解析 試料の表面と断面を走査電子顕微鏡(SEM、日本電子社製JSM-7001F)にて、断面の約10×20 μm²の領域を透過電子顕微鏡(TEM、日本電子製JEM-F200)にて観察した。SEM観察の断面、TEM用剥片試料はクライオFIBにて作成した。SEM、TEMともにエネルギー分散型X線分光での元素分析、さらにTEMでは電子線回折分析による極微小部の腐食生成物の同定を試みた。

2.4 H₂S・COSの発生源の検討 Black spotsの生成に対しては展示環境中のガスの影響が懸念された。同じ展示ケース内で展示されていた遺物から放散されるガスの有無とその種類を検討するため、その中の球状土製品(砲弾)をデドラーバックに封入し、約2ヵ月経過後の空気試料を採取した。採取した試料を蛍光光度型検出器付属ガスクロマトグラフにより分析した。

3. 結果および考察

3.1 資料の状態およびBlack spotsを構成する化合物 資料の腐食層は3層構造(以下、表面からI層、II層、III層)を有し、暗緑色のI層からCuS、Cu₂S、Cu_{4.98}Fe_{0.2}S₄、黒色のII層からCuS、Cu₂S、PbSが検出された。緑色のIII層からはCu、Sが検出されるものの、腐食相の同定には至らなかった。破片試料のSEM、TEM、電子線回折分析より、I層では表面からO、S、Cuが検出される微細粒子とアクリル樹脂が混合した層(以下、I_a層)、その下部のCuS、Cu₂S、CuFeS₂などの主に硫化銅から構成される層(以下、I_b層)に細分された。I_a、I_b層の境界部の粗な領域でBlack Spotsが観察されたことから、I層中の腐食生成物に変質しBlack Spots生じていると推測される。樹枝状に成長したBlack Spotsでは、O、S、Cuが検出される微細な粒子が集合した領域(以下、領域A)とCuのみが検出される均質な状態の領域(以下、領域B)が認められた(図2)。電子線回折により領域AではCuSO₄、Cu₂S、領域Bでは金属銅(以下、Cu_M)が同定された。領域A

の O、S、Cu の定量値はそれぞれ、24.7atm%、24.3atm%、49.6atm%を示した。これらが Cu_2S 、 CuSO_4 が混合した組成に近いことも考慮すると、領域 A は Cu_2S 、 CuSO_4 の両者を含むと考えられる。すなわち、Black Spots は Cu_2S と CuSO_4 の混合物と Cu_M で構成されていると考えられる。

3.2 H_2S ・COS の発生源の検討 球状土製品から放散されるガスを測定した結果、 H_2S 、COS がそれぞれ 2.67 ppb、18.26 ppb の濃度で検出された。大気中の H_2S 、COS 濃度はそれぞれ 0.02 ppb³⁾、0.5 ppb⁴⁾ と報告されており、球状土製品から放散される H_2S 、COS はそれに比べて顕著に高かった。展示ケースの空気中の H_2S 、COS 濃度も同程度であったと考えられ、得られた濃度条件で Black Spots による劣化が進行すると推測される。沿岸域に位置する遺跡の埋蔵環境は一般に還元環境であり、大量の硫黄が H_2S や FeS_2 として存在する⁵⁾。球状土製品から放散された H_2S 、COS は埋蔵時に遺物に取り込まれた硫黄化合物や火薬に含まれた硫黄由来する可能性が高いと考えられる。

3.3 Black Spots の発生メカニズムの検討 検討結果に基づく資料断面の模式図を図 3 に示す。Cu-S- H_2O 系の電位-pH 図 (図 4) の Line A は半反応式 (以下、 R_a) : $\text{Cu}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} = 2\text{Cu} + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6e^-$ で表され、熱力学的には Cu_2S (Chalcocite) は O_2 などの酸化剤に加えて H_2O が存在した場合、自発的に Cu_M に変化することを示している。また、図 4 の Line B の半反応式 (以下、 R_b) : $2\text{Cu} + \text{H}_2\text{S} = \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e^-$ より、 Cu_M は H_2S が存在する場合、 O_2 もしくは H_2O によって酸化され、 Cu_2S (Chalcocite) に変化する。今回、Black Spots から検出された Cu_M は R_a の生成物、 R_b の反応物になりえることがわかる。したがって、Black Spots は R_a により Cu_M が生成し、さらに Cu_M が R_b により Cu_2S となる化学反応が生じることで、成長した可能性がある。また、Black Spots から検出された CuSO_4 は O_2 により Cu_2S が酸化されて生成した可能性が考えられる。

3.4 Black Spots による劣化の抑制 Black Spots による劣化を抑制するには、還元性硫黄化合物を放散する物質と銅製遺物を同一の空間に置かないことが重要である。特に海揚り品からは還元性硫黄化合物が放散されることが認められており、注意が必要である。また、Black Spots に含まれる硫酸銅は潮解性があるため、高湿度環境下では硫酸銅が潮解して水膜が生じることで、銅製遺物のさらなる劣化が生じる可能性がある。RP-A タイプのような除湿・脱酸素剤とともにガスバリアフィルム内で銅製遺物を保管することは、Black Spots を伴う遺物の劣化の抑制に有効と考えられる。RP-A タイプは H_2S などの硫黄ガスを吸収除去する点でも有効と考えられる。

4. まとめ

海揚りの銅製遺物に発生した Black Spots の材質分析、展示ケース内に共存した遺物から発生する H_2S 、COS を測定した。その結果、1) Black Spots は Cu_2S に加えて CuSO_4 、 Cu_M から構成され、2) 展示ケース内の海揚り品から発生した H_2S 、COS などによって Black Spots が発生したことが示唆された。Black Spots の発生、進行の抑制の観点では、3) 海揚り品のように還元性硫黄化合物を放散する物質と銅製遺物を同一の展示ケースに設置することを避けること、4) 低湿度、低酸素環境で銅製遺物を維持することが有効であると考えられた。

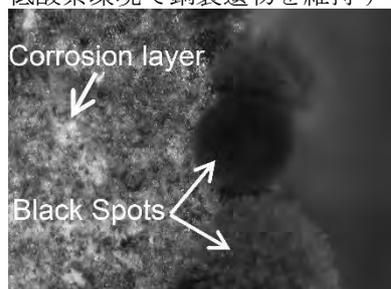


図 1 Black Spots の状態

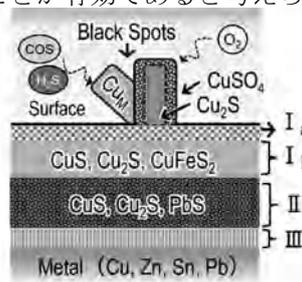


図 3 資料の断面の模式図

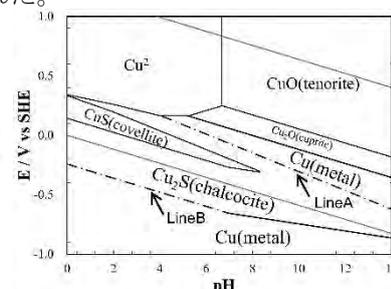


図 4 Cu-S- H_2O 系の電位-pH 図

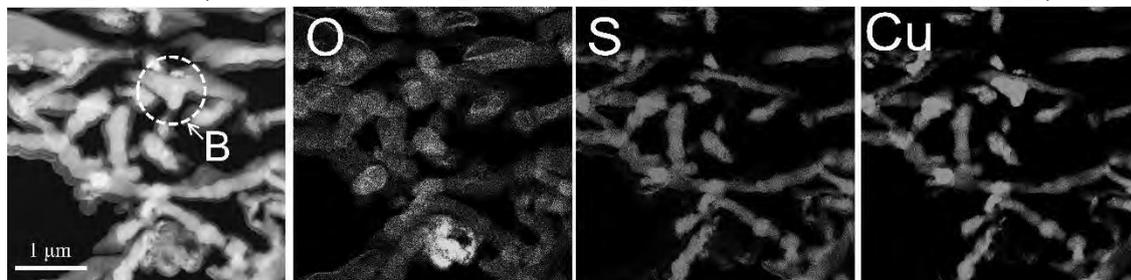


図 2 Black Spots の TEM 像 (環状暗視野) と O、S、Cu の分布 (図中 B は本文中の領域 B に対応)

【謝辞】本研究をおこなうにあたり、東北芸術工科大学伊藤幸司教授よりご助言と写真の提供をいただいた。SEM、TEM 観察では株式会社日鉄テクノロジー、空気試料の採取では九州国立博物館和泉田純子氏、渡辺祐基氏、富松志帆氏、松尾実香氏、今井涼子氏、その分析では東京文化財研究所岡部由子氏の多大なるご協力をいただいた。本研究の一部は科学研究補助金 (21H00624 研究代表: 木川りか) の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

【引用文献】1) Weichert, M. *et al.* 2004 ICOM-CC Metal 04 proceedings, 149-159 2) Eggert, G. *et al.*, 2004 ICOM-CC Metal 04 proceedings, 142-148 3) World Health Organization, 1981, Environmental Health Criteria, 19 4) 片山葉子 2010 第 33 回酸性雨問題研究会シンポジウム 5) Pearson, C.(eds.) 1987 Conservation of Marine Archaeological Objects, 1-20

千葉県内縄文時代遺跡の土壌について

A Paleosol of Jomon Periods Sites in Chiba Prefecture

○近藤 敏(関東第四紀研究会)

○Satoshi Kondo, (KANTO QUATERNARY RESEARCH)

1.はじめに

縄文時代後晩期遺跡は環状集落を呈し、凹地形に立地していることがある。その地形の成因については、人為や自然要因等の論議がされてきた。集落凹地内外土壌の植物珪酸体分析(表1)から、古環境を反映した土層を特定する。遺跡土層分析調査は、植物珪酸体の環境指標であるタケ亜科の比率(表2・3の右端)から、時期ごとの植生を復元し、当時の遺跡周辺土地利用を推測することができる。

2.分析試料と結果

(財)千葉県文化財センターでは、県内の基本土層区分にIIb層を設定している(近藤1993)。その明褐色系土層は、縄文時代土壌である(上杉・松田2005)。ソフトロームより上位の完新世土壌において、ネザサ節の比率が多くなることから温暖化を示し、縄文時代以降の気候環境を反映している(表2)。祇園原貝塚遺跡5次調査(近藤1992)土層の明褐色土(表3)は、千葉県基本土層のIIb層相当と推測され、環状集落形成以前に凹地を埋積する土壌となっている。祇園原貝塚遺跡の中央凹地は、同心円外縁部土壌を残して掘削され、後期中葉以降に環状集落を形成したと推定され、環状集落は縄文晩期前半まで存続される(忍澤ほか1999)。明褐色土層系IIb層の堆積当時は、ネザサ節を主体としてスキ属やチガヤ属なども生育する草原的環境と推定される。

近隣の大山台遺跡ではクスノキ科やブナ属の樹木起源珪酸体も少量検出され、褐色土層(IIb層相当の縄文時代後期)では、樹木植生が関与している可能性が示唆されている(大村ほか2004)。

表1 千葉県内遺跡における植物珪酸体分析結果

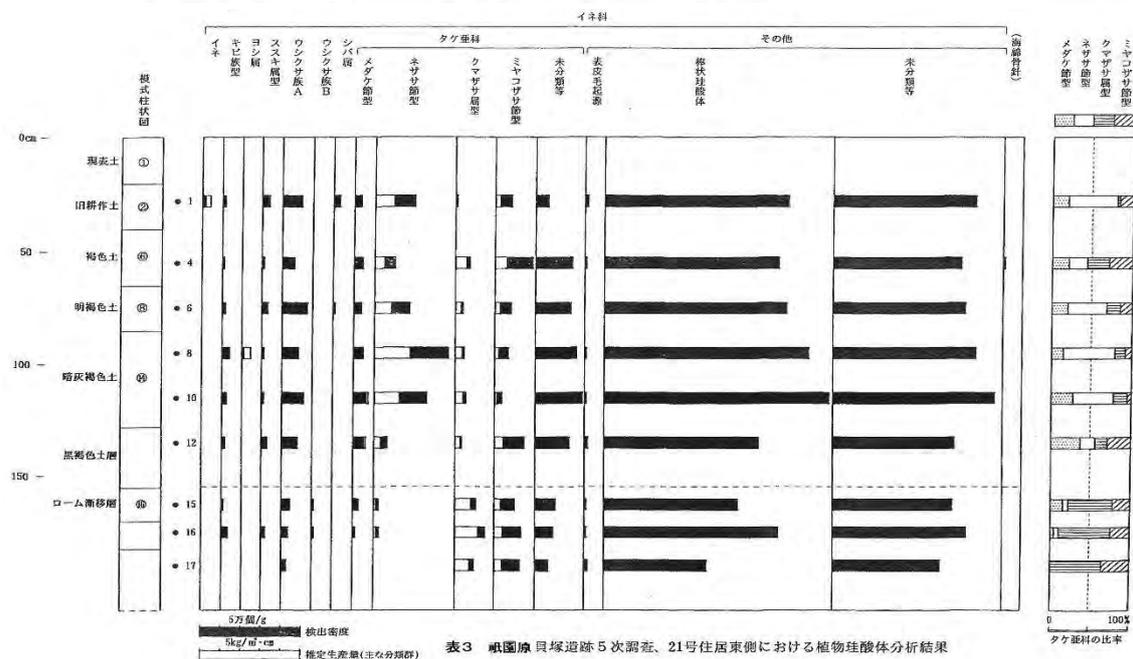
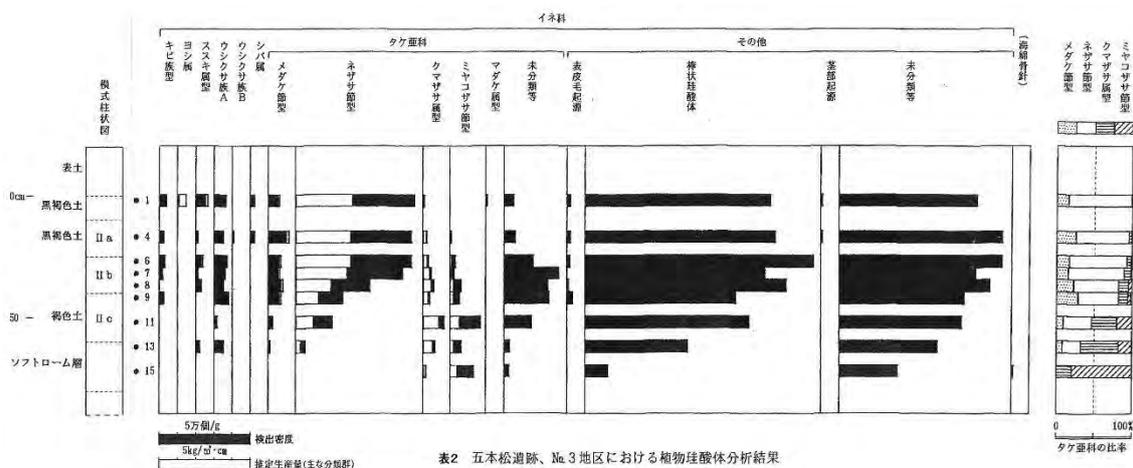
分類群	学名	地点・試料	五本松遺跡、No.3地区										祇園原貝塚遺跡5次調査、21号住居東側									
			1	4	6	7	8	9	11	13	15	1	4	6	8	10	12	15	16	17		
イネ科	Gramineae (Grasses)																					
イネ	<i>Oryza sativa</i> (domestic rice)																					
キビ族型	Panicaceae type		37	22	29	15			22					13								
ヨシ属	<i>Phragmites</i> (reed)													13	7	14	36	20	13	7	29	
ススキ属型	<i>Miscanthus</i> type		52	7	29	7	22						15									
ウシクサ族A	Andropogoneae A type		67	52	72	60	51		80	13	51			27	7	21	7	7	19		14	
ウシクサ族B	Andropogoneae B type													94	56	121	78	105	75	39	29	21
シバ属	<i>Zoysia</i>																				7	7
タケ亜科	Bambusoideae (Bamboo)													27		7						
メダケ節型	<i>Pleioblastus</i> sect. <i>Modake</i>		52	97	58	52	65	58	20	7				27	35	28	36	59	50	20	7	
ネザサ節型	<i>Pleioblastus</i> sect. <i>Nezasa</i>		651	635	635	588	407	261	202	51				194	98	170	363	256	63	20	22	
クマザサ属型	<i>Sasa</i> (except <i>Miyakozasa</i>)		7	22	29	45	58	36	115	66	14			7	70	35	43	52	31	104	152	93
ミヤコザサ節型	<i>Sasa</i> sect. <i>Miyakozasa</i>													80	183	78	64	33	144	98	130	122
マダケ属型	<i>Phyllostachys</i>		7																			
未分類等	Others		52	60	169	298	240	246	148	29	27			60	183	177	207	236	169	98	87	64
その他のイネ科	Others																					
稗毛起源	Hawk hair origin		15	15	14			7	29					13	7			7	7	13	7	14
棒状珪酸体	Rod-shaped		1020	1046	1256	990	1106	832	803	562	122			924	878	915	1025	1127	776	671	824	515
茎節起源	Stem origin		7	7																		
未分類等	Others		761	897	895	752	830	687	674	540	318			710	639	659	712	806	607	599	665	536
(海綿骨針)	Sponge																					
植物珪酸体総数	Total		2757	2900	3205	2829	2845	2301	2244	1379	609			2190	2164	2227	2585	2706	1959	1668	1974	1365

おもな分類群の推定生産量 (単位: kg/m²・cm)

イネ	<i>Oryza sativa</i> (domestic rice)													0.39								
ヨシ属	<i>Phragmites</i> (reed)		0.47													0.45						
ススキ属型	<i>Miscanthus</i> type		0.64	0.09	0.36	0.09	0.27				0.18			0.33	0.09	0.26	0.09	0.08	0.23	0.18		
メダケ節型	<i>Pleioblastus</i> sect. <i>Modake</i>		0.60	1.13	0.67	0.60	0.76	0.67	0.23	0.08				0.31	0.41	0.33	0.41	0.68	0.58	0.23	0.08	
ネザサ節型	<i>Pleioblastus</i> sect. <i>Nezasa</i>		3.12	3.05	3.05	2.82	1.96	1.25	0.97	0.25				0.93	0.47	0.82	1.74	1.23	0.30	0.09	0.10	
クマザサ属型	<i>Sasa</i> (except <i>Miyakozasa</i>)		0.06	0.17	0.22	0.34	0.44	0.27	0.86	0.49	0.10			0.05	0.53	0.27	0.32	0.39	0.23	0.78	1.14	0.70
ミヤコザサ節型	<i>Sasa</i> sect. <i>Miyakozasa</i>				0.02	0.09	0.07	0.17	0.15	0.51	0.18	0.39		0.24	0.65	0.23	0.19	0.10	0.43	0.29	0.39	0.36

タケ亜科の比率 (%)

メダケ節型	<i>Pleioblastus</i> sect. <i>Modake</i>		16	26	17	16	23	29	9	8				20	21	20	15	28	38	16	5	
ネザサ節型	<i>Pleioblastus</i> sect. <i>Nezasa</i>		83	70	76	74	59	53	38	25				61	24	50	65	51	19	7	6	
クマザサ属型	<i>Sasa</i> (except <i>Miyakozasa</i>)		1	4	5	9	13	12	33	49	21			3	27	16	12	16	15	56	66	66
ミヤコザサ節型	<i>Sasa</i> sect. <i>Miyakozasa</i>				1	2	2	5	6	20	18	79		16	28	14	7	4	28	21	23	34



謝辞:掲載の植物珪酸体分析結果は、(株)古環境研究センター杉山真二氏に分析を依頼した成果である。

引用参考文献

近藤敏 1992「2. 根田祇園原貝塚遺跡(5次調査)」『第7回市原市文化財センター遺跡発表会要旨』平成3年度

近藤敏 1993「房総半島の新时期火山灰の降下について」『市原市文化財センター研究紀要』II

忍澤成視ほか 1999「祇園原貝塚-上総国分寺台遺跡調査報告V-」市原市教育委員会

大村直ほか 2004「市原市山田橋大山台遺跡」(財)市原市文化財センター調査報告書第88号(p256~269)

上杉陽・松田隆夫 2005「付章」『新鎌ヶ谷地区埋蔵文化財調査報告書II 鎌ヶ谷市五本松№3遺跡2』(財)千葉県文化財センター調査報告第525集

松田光太郎 2021「縄文時代の竪穴住居址における明褐色系土壌と新时期テフラ-千葉県の事例を中心として

(上)-」『神奈川考古』第57号 神奈川考古同人会

能城修一 2022「千葉県道免き谷津遺跡・雷下遺跡の出土木材からみた縄文時代早期および後・晩期の森林植生と森林資源の管理と利用」『植生史研究』第30巻第1号 日本植生史学会

新型検出器を搭載した可搬型蛍光 X 線分析装置の開発と 古代ガラス製品の非破壊オンサイト分析への応用

Development of a portable X-ray fluorescence spectrometer equipped with new-type detector and application to nondestructive and on-site analysis of ancient glassware

○阿部 善也(東京電機大学), 村串 まどか(同左),
椎野 博, 永井 宏樹, 中嶋 佳秀(アワーズテック株式会社)
○Yoshinari ABE, Madoka MURAKUSHI (Tokyo Denki University),
Hiroshi SHIINO, Hiroki NAGAI, Yoshihide NAKAJIMA (Ourstex Co., Ltd)

1. 序

可搬型蛍光 X 線分析装置(portable X-ray fluorescence spectrometer, 以下 p-XRF)は, 測定対象を移動させることなくその場(オンサイト)で非破壊の化学組成分析が可能であるため, 文化財分野で普及している。p-XRF 用の X 線検出器には専らシリコンドリフト検出器(silicon drift detector, 以下 SDD)が利用されており, 素子表面には保護を目的とした X 線入射窓が備えられている。入射窓の材質として X 線透過性の高い金属ベリリウム(Be)が用いられる場合が多いが, エネルギーの低いナトリウム(Na, $K\alpha$: 1.0 keV)やマグネシウム(Mg, $K\alpha$: 1.2 keV)の蛍光 X 線は Be に吸収され, 感度が大幅に低下するという問題があった。一方, 金属 Be より X 線透過性に優れた窓材として, 特殊な高分子膜(例: AP3.3)を利用する場合もある。実際に AP3.3 製の入射窓を備えた SDD を p-XRF に取り付け, さらに装置先端に真空チャンバを接続して測定対象を減圧下に置いた状態で分析することで, Na や Mg などの軽元素の検出が可能となる[1]。近年発表者らはこの軽元素対応型 p-XRF を改良して, 測定対象を大気圧下に置いたままで Na および Mg の検出に成功し[2], 真空チャンバ内に収まらないような大型の文化財や, 減圧に伴う損傷のリスクが懸念される資料でも, 軽元素を含めた化学組成を非破壊かつオンサイトで分析できることを示した。しかしながら, AP3.3 製窓には遮光性が低いという欠点があり, 少しでも可視光が検出素子に入射すると X 線の検出が著しく妨害されるため, 測定中は SDD に可視光が一切入らない環境(照明の消灯や暗室の利用)を整備しなくてはならない。これは, 軽元素対応型 p-XRF を文化財のオンサイト分析に応用する場合に大きな制約であった。そこで本研究では, AP3.3 に匹敵する軽元素の検出感度と, 可視光に対する優れた遮光性の双方を兼ね備えたグラフェン製の X 線入射窓を搭載した新型 SDD を p-XRF に初めて導入し, Na や Mg などの軽元素が組成的特性化の上で特に重要となる古代ガラス製品に着目して, 非破壊オンサイト分析を志向した性能を評価した。

2. 実験方法

本研究で用いた p-XRF は, アワーズテック株式会社製の 100FA である。同装置に標準で付属する検出器は金属 Be 製窓の SDD であるが, 上述した AP3.3 製窓の軽元素分析用 SDD も利用できる。

本研究では、この p-XRF にグラフェン製入射窓の新型 SDD (KETEK GmbH 製 H30) を導入した。装置写真を図 1 に示した。なお、従来機の SDD (金属 Be 製窓または AP3.3 製窓) の有効表面積が 7 mm²であったのに対し、H30 は 30 mm²と大面積であり、X 線の検出効率が大幅に向上している。ガラス製標準物質を分析し、開発した装置の性能評価を行った。また、文化財資料への実応用として古代ガラス製品の分析を行った。

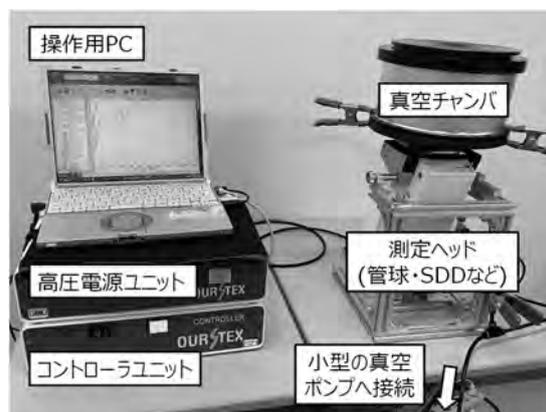


図 1 開発した装置の全体写真

3. 結果と考察

開発した p-XRF について、まず真空チャンバを用いた減圧下での測定性能を評価した。標準物質を分析した結果、Na および Mg に対する検出感度は軽元素分析型の従来機 (AP3.3 製窓 SDD 使用) と同程度であった。ただし、検出素子面積の大型化に伴い蛍光 X 線の検出効率が大幅に向上しており、この結果は従来の測定条件よりも X 線管電流を 1/3 以下に減らして得られたものである。すなわち、分析に伴う文化財への X 線照射を低減することが可能となる。続いて、測定対象を大気圧下に置いたままで測定する場合についても、同様にして評価した。その結果、歴史的なガラス製品の化学組成を評価する上で十分な感度を有していることが明らかとなった。また、新型 SDD を搭載した p-XRF では可視光が検出素子に入射する状況でも蛍光 X 線の検出に影響は生じなかった。

文化財応用を志向したさらなる検証として、装置先端と測定対象を離れた「非接触」状態でガラス製の標準物質を分析し、軽元素の感度について評価した。その結果、新型 SDD 搭載の p-XRF であれば、2.0 mm 離れた状態でも Na と Mg を検出できることがわかった。実際の文化財に対する応用例として、ここではサーサーン朝のガラス製容器 (伝イラン北部由来) を分析した結果を報告する。サーサーン朝は 3~7 世紀に西アジアに繁栄した国家であり、サーサーン朝内の工房で一次生産されたガラス製品 (サーサーン・ガラス) が古代日本にも伝来していた[2]。サーサーン・ガラスは 10 wt% 以上のソーダ (Na₂O) を含むソーダ石灰ガラスの一種である。さらに融剤として植物を燃やした灰を用いていたため、植物由来の Mg が製品中に混入し、その含有量は酸化物 (MgO) で数 wt% に及ぶ。そこでこのガラス製容器について、開発した p-XRF を用いて非破壊・大気圧下・非接触状態での分析を実施したところ、Na と Mg の明瞭な K 線が検出された。さらに、この条件で得られたスペクトルを解析して化学組成を定量した結果、従来機を用いて減圧下・接触状態で分析した場合の定量結果とよく一致した。

以上のように、グラフェン製の入射窓を備えた新型 SDD を p-XRF へと導入することで、分析性能が大幅に向上することが実証された。今後はガラス以外にも、様々な文化財へと応用していく。

謝辞 本研究は科学研究費補助金 (基盤 B: 20H1372) の支援により行われた。

[1] K. Tantrakarn *et al.*: *X-Ray Spectrometry* **38**, 121-127 (2009).

[2] Y. Abe *et al.*: *Journal of Archaeological Science: Reports* **40(A)**, 103195 (2021).

“日本最古の文字”の科学的分析

—田和山遺跡出土石製品のラマン分光分析を中心に—

Scientific analysis of “Japan’s oldest characters”

○岡見知紀（橿原考古学研究所）、清水洋（奈良先端科学技術大学院大学）、岡島康雄（同左）、山垣美恵子（同左）

○Tomoki OKAMI(Kashihara Archaeological Institute), Yo SIMIZU (Nara Institute of Science and Technology), Yasuo OKAJIMA, Mieko YAMAGAKI

1. はじめに

田和山遺跡は、弥生時代の環濠集落で、平成9年から平成12年にかけて市立病院建設に伴い3ヶ年の調査が行われた。注目すべき遺物としては、環壕より出土した砂岩製石製品があり、楽浪郡出土の長方形板石硯石と形態が類似していることから硯の可能性が指摘されている。

今回分析対象となる資料は、1-c環壕8区黒色土から出土した石製品で、発掘当初の報告では砥石とされてきたが、近年の調査で硯の可能性が指摘された⁽¹⁾。その際に石製品裏面に文字とみられる黒色付着物が確認され、“日本最古の文字”ではないかと話題をよんだ資料である。一方で、整理作業の際に用いられるバインダー液が付着した痕跡が確認できることなどから、弥生時代当初に書かれた文字であるかどうか慎重な調査が必要となっている。本研究では、この黒色付着物が墨であるか、バインダー液などコンタミの影響があるのか、科学的な分析手法を用いて検討した。

2. 分析の方法と結果

分析には、ラマン分光分析のほか、赤外線カメラ・スキャナーによる撮影、走査型電子顕微鏡（SEM）による観察およびエネルギー分散型X線分光（EDS）による成分分析、負ミュオン非破壊分析等の方法で実施した。赤外線による撮影は、松江市および橿原考古学研究所によりそれぞれ実施したが、いずれも文字とされる黒色付着物は確認できなかった。また、SEM観察では、墨に特徴的なナノレベルの粒子構造は確認できなかった。一方で、EDSでの成分分析では、黒色付着物の部分で炭素が顕著に検出された。さらに、負ミュオン分析では深さ10μmまで炭素が染みこんでいるが確認できた⁽²⁾。以上の結果、EDSおよび負ミュオン非破壊分析で炭素の付着が確認できたが、赤外線撮影で確認できないことやSEMで粒子が確認できないことから墨でない可能性がある。そこで、ラマン分光分析を用いて詳細な分析を実施した。

ラマン分光法による調査は、島根県産業技術センター所有の機材（日本電子社製 JRS-SYS2000）を使用し田和山遺跡石製品の分析を実施した。その結果、黒色付着物の部分（測定箇所①～③）^(図1)で特徴的なスペクトルが得られた^(図2)。この段階では、このスペクトルが何の

物質に由来するか判断できなかった。そこで由来の明らかな基準試料のラマンスペクトルを取得し、それらを比較することによって黒色付着物の同定を試みた。基準試料のラマンスペクトルは奈良先端科学技術大学院大学所有のレーザーラマン分光光度計（NRS-4100-30）で取得した。基準試料としては、現代の墨や植物灰、骨灰、鉱物系黒色顔料のほか、コンタミの原因となり得るバインダー液、油性マーカーなどを対象とした。このうち油性マーカー（ゼブラ社製マッキー極細黒 MO-120-MC-BK）のスペクトルが、黒色付着物のスペクトルと一致することを確認した（図2）。現代墨を含む他の基準試料のスペクトルはすべて黒色付着物と一致しなかった。

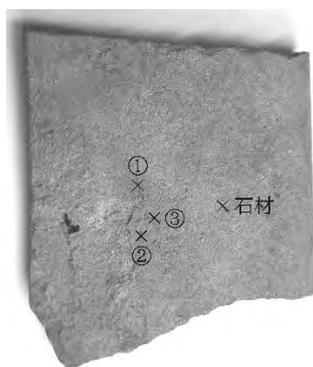


図1 測定箇所

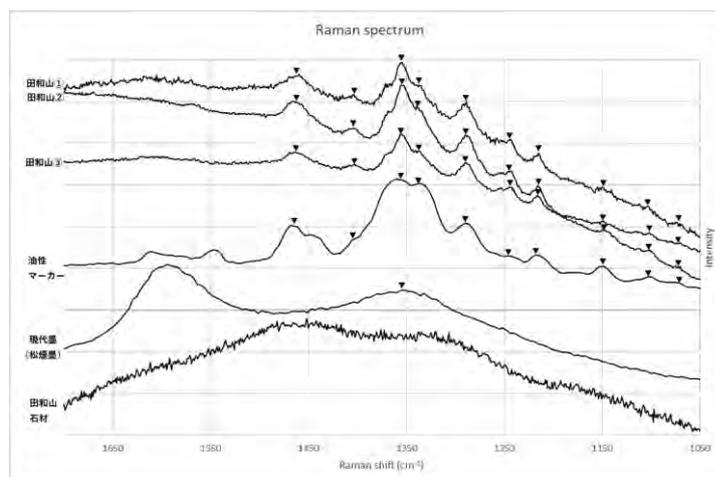


図2 ラマンスペクトル (▼: スペクトルピークが一致する箇所)

6. 考察

今回のラマン分光分析の結果、田和山遺跡出土石製品の文字とされる黒色付着物は油性マーカーの可能性が高いといえる。油性インクのスペクトルは、特徴的なスペクトルを示すことが分かっており⁽³⁾、今回得られたスペクトルが考古学の整理作業等で一般的に使用されているゼブラ社製マッキー極細黒と一致することから、発掘調査後の整理作業の際に誤って付着した油性マーカーの痕であると考えられる。また、石材に油性マーカーで書いた模擬試料を用いて、赤外線撮影および走査型電子顕微鏡による分析を実施したが、矛盾しない結果を得られた。

今後、考古遺物を扱う上でコンタミの原因となるような要因を排除することはもちろん、コンタミの可能性のある資料については慎重に調査をすすめる、性急な判断をしないことが必要であることを付け加えたい。

引用・参考文献

- (1) 久住猛雄「松江市田和山遺跡出土「文字」板石硯の発見と提起する諸問題」『古代文化』第72巻第1号, 古代学協会, 2020
- (2) 南健太郎, 反保元伸「ミュオン非破壊分析による弥生時代墨書文字の検討」『第5回 文理融合シンポジウム』2021
- (3) Matias Calcerrada, Carmen García-Ruiz「Analysis of questioned documents: a review」『Analytica Chimica Acta』853, 2015

本研究は、科学研究費補助金 若手研究（課題番号：19K13423）の助成を受け実施した。分析にあたっては、松江市埋蔵文化財調査課からの調査依頼および調査協力を受け実施した。

富岡市・オオツノシカの化石骨出土記念碑について The memorial to the excavation of fossil bones of *Sinomegaceros yebei* in Tomioka City.

○朽津信明・白石明香（東京文化財研究所）

○Nobuaki KUCHITSU and Sayaka SHIRAISHI

(Tokyo National Research Institute for Cultural Properties)

1. はじめに

石碑の凹凸情報を三次元計測することによって、拓本を作成することなく碑文を解析することが可能となってきたが¹⁾、本研究では、日本最古の化石発掘の様子を伝えるとされる、富岡市のオオツノシカの化石骨出土記念碑の銘文について検討を試みたので、その結果を報告する。



図1. オオツノシカの化石骨出土記念碑
(2021年撮影)

2. オオツノシカの化石骨と関連文化財

群馬県指定天然記念物・オオツノシカの化石骨は、今から1万数千年前に絶滅したと考えられている大型の角を持つ鹿（オオツノジカ）の化石が、1797年に現在の富岡市内で発掘され、1975年に富岡市の、そして2001年に群馬県の天然記念物に指定されたものである。この化石骨に関連した古文書として、幕府の老中・松平定信の侍医であった丹波元簡による『鑑定書』と、七日市藩の大里頼雄による『出土記録書』も伝えられており、それぞれ「鑑定書」及び「発掘記録」として群馬県指定天然記念物オオツノシカの化石骨の附指定を受けている。この他に関連資料としてもう一点、「出土記念碑」とされる石碑が附指定を受けている。これは富岡市上黒岩の化石骨発見地の近くとされる丘陵中腹に、銘文を伴った祠状石造物（石殿）が寛政10（1798）年に建てられたもので、オリジナルと見られる石造物が現地に現存している。本研究では、この出土記念碑の銘文について取り上げる。



図2. 1962年の出土記念碑
(鹿間・長谷川²⁾による)

3. 出土記念碑とこれまでの経緯

オオツノシカの化石骨出土記念碑は、富岡市上黒岩の丘陵中腹に東面して立つ牛伏砂岩製の石殿で、現高約100cm、横幅約70cm、奥行き約94cmで、基礎、塔身、笠石、そして二本の正面の石柱から成り立っている（図1）。塔身側壁に、南面（第一面）から西面（第二面）、北面（第三面）の順番に正面を除く三面を使って陰刻で銘が刻まれており、この銘文については鹿間・長谷川²⁾によって大部分が解読されて紹介されている。ただし、その段階では読み出せない文字が2文字あったようで、1962年の論文で銘文は以下のように報告されている。「寛政九年丁巳六月二十四日於此山下之小流獲異枯骨矣 同七月七日又掘鑿而獲兩角及枯骨数枚挙謂竜之骨角也 納是於官府矣 枯骨一枚并書〇記而納遍照寺然〇造立石宮永七月七日祭祀竜神以祈風雨和順五穀



図3. 北面に見られる傷
(2021年撮影)

豊饒者也 寛政十戊午年十一月吉日 (○がこの時点で解読不能だった文字で、西面に存在する。)」その後、中束³⁾によって不明だった文字のうちの後者については而である可能性が言及されたものの確定には至っておらず、前者の文字と合わせて全文は解読されていない状態にあった。また北面の文字は過去に読み出されていたが、2021年時点では後天的についたと思われる無数の傷が表面に認められ、陰刻文字が読みにくい状態の部分も存在した(図3)。

4. 計測方法と結果

4.1. 方法

コンパクトデジタルカメラ Nikon 1 J2 及び Panasonic Lumix Dc-TZ95 により対象を多方向から 314 枚撮影し、(株)オークの Agisoft Metashape を用いて多視点ステレオ技術に基づき三次元形状モデルを構築した。その後、画像処理ソフトを用いて過去の写真等と重ね合わせ比較検討を行った。

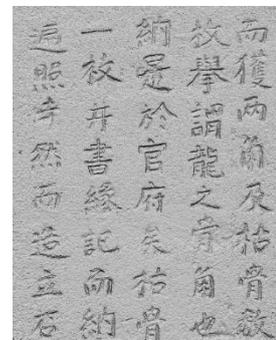


図4. 西面銘文点群データ

4.2. 結果

過去の文献^{1,2)}で未解読の文字が存在した西面(第二面)の点群画像を図4に示す。読み出されていなかった文字のうち、前者は「縁」(縁の異体字)、後者は中束論文で推測されていた通り「而」であることが確定された。また、北面全体の点群画像を図5に示す。傷(図3)の影響はほぼ排除され、銘文は良好に確認することができ、また屋根下の妻部分には陽刻の装飾が存在して中央部に円形(菊か?)、その直下に懸魚、さらに懸魚の左右には半円状に菊かと見られる文様がそれぞれ陽刻で表現されていることが確認された。ただし、1980年代に撮影されていた写真(図6)では既に欠損していた部分が、2021年の時点では明瞭に陰刻された文字として存在している箇所も認められた(図4)。このことは、1980年代以降に、指定文化財の石碑に、新たに刻銘が陰刻され直す修復が行われた可能性が示唆される。



図5. 北面点群データ
(銘文と屋根下の装飾が明瞭)



図6. 1980年代に撮影された西面(中束耕志氏提供)

5. 考察

今回の方法により、拓本作成を行わずに対象に非接触で、当該碑の陰刻銘を全文読み出すことができたことになる。これは着生生物に覆われて肉眼で文字を読み出すことが困難な状態でも、着生生物の厚みが陰刻よりも浅ければ文字を確認できる場合があり、また後天的な傷も当初の陰刻よりも浅ければ問題なく点群情報から銘文を認識できることを示している。こうした方法は、拓本作成を経ず、対象に非接触で銘文を解読する有効な手法と期待される。ただし、当該碑の碑文に関しては、過去の写真との対比から80年代以降に刻み直された部分があると考えられ、今回初めて確定された文字は、近年新たに刻まれた文字である可能性があるため、その評価には十分慎重な姿勢が必要と考えられる。

文献1) 朽津信明他(2021)日本文化財科学会第38回大会研究発表要旨集, 70-71、2) 鹿間時夫・長谷川善和(1962)地学雑誌, 71, 247-253、3) 中束耕志(1982)群馬県立歴史博物館紀要, 3, 141-162

謝辞 過去の写真をご提供いただいた、中束耕志氏に感謝します。

北限の稲作地帯における土器残存脂質分析

Lipid residue analysis in pottery excavated from
Tsugaru Plain

○宮田佳樹（東京大学総合研究博物館）、宮内信雄（東京大学総合研究博物館）、
堀内晶子（国際基督教大学）、上條信彦（弘前大学）

○Yoshiki MIYATA (The University Museum, The University of Tokyo), Nobuo MIYAUCHI
(The University Museum, The University of Tokyo), Akiko HORIUCHI (International
Christian University), Nobuhiko KAMIJO (Hiroasaki University)

はじめに

弥生時代の前半期、北東北の津軽平野にある遺跡から水田の跡や炭化米などが検出されているにも関わらず、同時代の北海道島の遺跡からは水田跡が検出されていないことから、当地域は、日本列島における初期水稻農耕の北限の地域と考えられている。しかしながら、当時の土器によって煮炊きされた米を含む食材選択をはじめ、煮炊きの形態などの古食性に関しては、未だに不明な点が多い。そこで本研究では、土器胎土に吸着した脂質のバイオマーカー分析、分子レベル炭素同位体組成を測定し、北限の稲作地帯での古食性を考えることを目的とする。

1. 土器試料と実験方法

弥生時代前期から中期にかけて、清水森西、垂柳、下台、湯の沢、大光寺、井沢、駒泊などの各遺跡から出土した土器を試料として持ちいた。まず、二次的な汚染の影響を取り除くために、デンタルドリルで土器胎土の表面を削った後に、土器胎土を採取した。次に、メタノールと硫酸を用いる酸触媒直接メチル化法 (Correa-Ascencio & Evershed (2014); Papakosta et al. (2015)) で、土器に残存する脂質を抽出した。BSTFA によって誘導体化 (TMS 化) し、ガスクロマトグラフ (GC-FID) によって、濃度を定量した後に、ガスクロマトグラフ質量分析装置によって、脂質組成を分析し、バイオマーカー解析を行った。さらに、抽出した脂質の 70-80%程度を占めるパルミチン酸・ステアリン酸の分子レベル炭素同位体組成を燃焼炉付ガス



図1. 津軽平野における試料採取遺跡

クロマトグラフ質量分析装置によって分析し、現生物から推定される各生物グループと比較して、残存有機物の起源推定を行った (Horiuchi et al. 2015)。

実験操作は、全て東京大学総合研究博物館タンデム加速器分析室 (MALT) で行った。

2. 結果と考察

弥生時代前半期の立地の異なる北東北の遺跡から出土した土器の分子レベル炭素同位体組成を、現生日本産生物群と比較して、プロットしたのが図2である。秋田県八郎潟町下台遺跡 (縄文晩期末) から出土した大洞 A2~A' 式土器 (BC750-380 年) は、水棲動物のマーカであるプリスタン酸、フィタン酸、TMTD などのイソプレノイド類を含み、分子レベル炭素同位体組成は、ほぼ海棲動物の領域に分布しているため、

(サケマスなどを含む) 魚や海獣類を示唆する。また、炭化米が出土した最北地である清水森西遺跡 (弥生中期) から出土した五所式土器

(BC350-320 年) は、海棲、非反芻、反芻動物に囲まれた領域とおそらく、シカなどの反芻動物影響を受けた可能性のある、二つの領域に分かれる。それに続く、津軽平野で初めて大規模な水田跡が見つかった田舎館村の垂柳遺跡 (弥生中期) から出土した田舎館式土器 (BC320-200 年) は、陸獣の領域にプロットされた。アルカン類、超長鎖脂肪酸など植物質のマーカを含むが、水棲動物マーカを含まないため、陸獣を主体として植物質を含むような煮炊きが考えられる。

発表では、他の遺跡も含めて、弥生時代前半期の北限の稲作地帯における調理内容物やその変遷について具体的に考えてみたい。

謝辞 本研究は、文科省科研費基盤 (B) 「稲作北限域における農耕化プロセスの研究」 (研究代表者 上條 信彦; 19H01334)、及び、学術変革 (A) 「土器の年代と使用法の化学的解明」 (研究代表者 国木田大; 20H05813) と、2021 年度 公益財団法人アサヒグループ学術振興財団 食・生活部門学術研究助成 (研究代表者; 宮田佳樹) の成果の一部である。

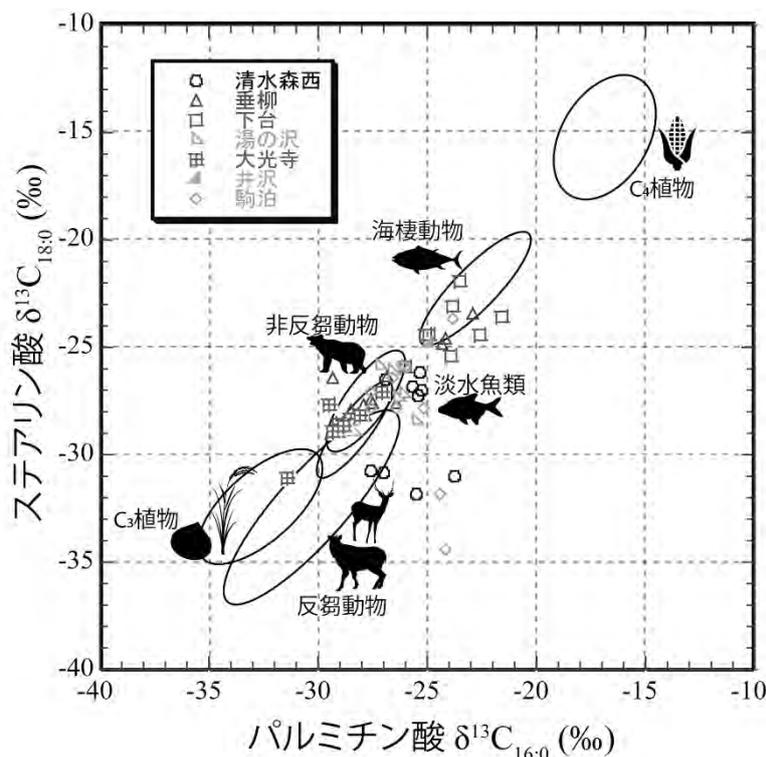


図2. パルミチン酸、ステアリン酸の分子レベル炭素同位体組成を、現生日本産生物データと比較。現生物から推定される各端成分の領域を楕円で示した。

石神遺跡出土土器の残存有機物に対する試験的分析

A Preliminary Result of Lipid Residue Analysis of Charred Deposits on Pottery from the Ishigami Site, Nara.

○村上 夏希 (奈良文化財研究所)、森川 実 (同左)、庄田 慎矢 (同左)

○Natsuki MURAKAMI, Minoru MORIKAWA, Shinya SHODA

(Nara National Research Institute for Cultural Properties)

1. はじめに

本研究では、奈良県高市郡明日香村石神遺跡から出土した7世紀代の土器に付着した炭化物を対象に残存脂質分析をおこなった。同井戸の性格については現在も検討を進めているが、付着物の由来に関する興味深い知見が新たに得られたのでここに報告する。

2. 分析試料および分析方法

分析対象とした試料は、井戸 SE800 の井戸枠内から出土した土師器甕 9 点 (ISG001-009) 内面に付着した炭化物である。井戸枠内埋土の層序は上位から灰褐色粘質土 (1 層)、バラス層 (2 層)、礫混じり砂 (3 層)、含砂礫茶褐有機土および砂混じり灰褐粘質土 (4 層) と続き、井戸底には灰褐砂が堆積している。試料 9 点のうち、ISG003 が 4 層出土であるほかは、すべて 3 層からの出土である。3 層は井戸廃絶後に投入された埋立土の下部にあたるので、出土した土師器甕は井戸が機能していた時期のものではない。採取した炭化物は対象土器の試料番号に「FI (内面からサンプリングした炭化物の意)」を組み合わせ ISG001FI - ISG009FI とした。試料からの抽出法について、試料が 40 mg 以上得られた場合には酸抽出および溶媒抽出法を用い、40 mg 未満の場合は酸抽出のみをおこなった。誘導體化した後、ガスクロマトグラフ質量分析計を用いて残存脂質濃度の評価と化合物の検出および同定をおこなった。

3. 分析結果および考察

各測定法および抽出法により同定された化合物は表 1 の通りである。ピークの全体的な特徴としてパルミチン酸 ($C_{16:0}$) がステアリン酸 ($C_{18:0}$) と比較して高い傾向にあった。パルミチン酸 / ステアリン酸比 (P/S 比) が 4 以上の値を示す場合、植物である可能性が高いと報告されている (Dunne et al. 2016)。ピーク面積から P/S 比を算出したところ、ISG004FI、ISG006FI は 4 以上の値が得られた。溶媒抽出は 9 点中 3 点のみ実施したが、 β -シトステロール、カンペステロール、スティグマステロールなど植物に含まれる特徴的な化合物が検出された。また全試料に共通して炭素数 18 の APAA (APAA-C18) が検出された。APAA-C18 の異性体については $n=4$ と $n=1$ の比率 (E/H 比) が動物、植物の葉、植物の種実・茎で有意に異なることが報告されている (Bondetti et al. 2020、庄田ほか 2021)。E/H 比が算出できた試料 8 点について現

生標本と比較した結果、2点は植物（種実・茎）の中央50%に、3点は植物（種実・茎）の中央50%と陸生動物の上位25%に、3点は植物（種実・茎）の中央50%と陸生・水生動物の上位25%に対応した（図1）。

以上、石神遺跡井戸SE800より出土した土師器甕の付着炭化物について残存脂質分析を行ったところ植物質資源の強い寄与が確認された。これまで日本の残存脂質分析は縄文時代など先史時代を中心にデータが蓄積されており、かつ先史時代の土器利用は海産物などの水産資源に偏っている。石神遺跡井戸SE800出土土器はこれまで分析されてきた土器とは異なる新たな使用パターンや食性を示す可能性がある。

表1 付着炭化物の残存脂質分析の結果

試料ID	AE秤量 (mg)	TLE秤量 (mg)	濃度 ($\mu\text{g g}^{-1}$)	酸抽出による主な検出化合物	溶媒抽出による他の検出化合物	E/H比	P/S比
ISG001FI	16.0	n/a	1255	FA(C _{9:0-32:0} , C _{18:1} , C _{17:0br}), DC(C ₈₋₁₁), APAA(C ₁₈), AL(C ₂₇₋₃₅)	n/a	5.9	3.9
ISG002FI	19.7	19.9	1497	FA(C _{9:0-34:0} , C _{18:1} , C _{15:0br-17:0br}), DC(C ₄₋₁₁), APAA(C ₁₈), AL(C ₂₉₋₃₅)	β -Sit, Stig, Cam, Chol	6.9	3.0
ISG003FI	20.0	n/a	1450	FA(C _{8:0-34:0} , C _{18:1} , C _{15:0br-17:0br}), DC(C ₈₋₁₀), APAA(C ₁₈), AL(C ₂₇₋₃₅)	n/a	5.0	3.1
ISG004FI	20.3	n/a	1226	FA(C _{9:0-32:0} , C _{18:1}), DC(C ₄₋₁₀), APAA(C ₁₈), AL(C ₂₇₋₃₅)	n/a	5.5	4.9
ISG005FI	20.1	20.1	1898	FA(C _{9:0-34:0} , C _{18:1} , C _{15:0br}), DC(C ₄₋₁₁), APAA(C ₁₈), AL(C ₂₇₋₃₅)	β -Sit, Stig, Cam, Chol	5.3	3.6
ISG006FI	19.7	n/a	979	FA(C _{9:0-32:0} , C _{18:1}), DC(C ₈₋₁₁), APAA(C ₁₈), AL(C ₂₅₋₃₅)	n/a	4.9	4.0
ISG007FI	20.3	n/a	740	FA(C _{8:0-34:0} , C _{18:1} , C _{15:0br-17:0br}), DC(C ₄₋₁₁), APAA(C ₁₈), Phy, AL(C ₂₇₋₃₅)	n/a	5.7	2.5
ISG008FI	20.2	15.4	406	FA(C _{9:0-34:0} , C _{18:1} , C _{15:0br-17:0br}), DC(C ₇₋₁₃), APAA(C ₁₈), Phy, AL(C ₂₅₋₃₅)	β -Sit, Chol	-	3.0
ISG009FI	15.2	n/a	311	FA(C _{12:0-32:0} , C _{18:1} , C _{15:0br-17:0br}), DC(C ₄₋₁₀), APAA(C ₁₈), Phy, AL(C ₂₅₋₃₅)	n/a	4.8	2.4

FA：脂肪酸。Cx:yは、炭素数x、二重結合の数yを示す。br：分枝脂肪酸、DC：ジカルボン酸、APAA： ω -アルキルフェニルアルカン酸、Phy：フィタン酸、AL：アルカン、 β -Sit： β -シトステロール、Sti：ステイグマステロール、Cam：カンペステロール、Chol：コレステロール

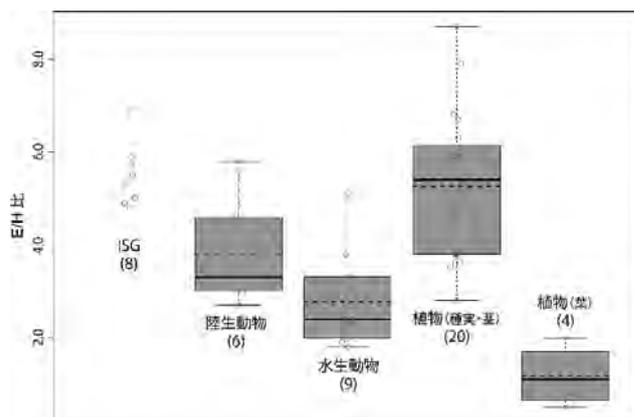


図1 箱ひげ図による炭素数18の ω -アルキルフェニルアルカン (APAA) E/H比の現生標本との比較（参照データは Bondetti et al. 2020、庄田 ほか 2021）横線実線は中央値、横線点線は平均値をあらわす

本研究は科研費補助金（22K13241：代表 村上夏希）、21H04370：代表 庄田慎矢、20H00033：代表 三舟隆之）の成果の一部である。

引用文献

庄田慎矢・新里貴之・鈴木美穂・高宮広土・タルボット=ヘレン・クレイグ=オリヴァー2021「土器残存脂質による貝塚文化北限地域における動植物資源利用の復元」『文化財科学』83、55-76

Bondetti, M., Scott, E., Courel, B., Lucquin, A., Shoda, S., Lundy, J., Labra-Odde, C., Drieu, L., & Craig, O. E. 2021. Investigating the formation and diagnostic value of ω -(*o*-alkylphenyl)alkanoic acids in ancient pottery. *Archaeometry*, 63(3), 594-608.

Dunne, J., Mercuri, A. M., Evershed, R. P., Bruni, S., & di Lernia, S. 2016. Earliest direct evidence of plant processing in prehistoric Saharan pottery. *Nature Plants*, 3, 16194.

北海道函館市中野 B 遺跡出土土器の残存脂質分析

Lipid residue analysis in pottery excavated from Nakano B site at Hakodate-city, Hokkaido

- 福井淳一（(公財)北海道埋蔵文化財センター）、村本周三（北海道教育庁）、堀内晶子（前国際基督教大学）、宮内信雄（東京大学総合研究博物館）、宮田佳樹（同左）
- Junichi FUKUI(Hokkaido Archaeological Operations Center), Shuzo MURAMOTO (Hokkaido Office of Education), Akiko HORIUCHI (Former International Christian University), Nobuo MIYAUCHI, Yoshiaki MIYATA (The University Museum, The University of Tokyo)

1. はじめに

北海道南部・津軽海峡沿岸に位置する中野 B 遺跡出土の縄文時代早期中葉土器（住吉町式・根崎式（8000yrBP、紀元前 7100–6650 年））を脂質分析し、煮炊き内容の復元を試みた。また、北海道島の縄文時代早期土器脂質分析結果（図 1）と比較し、食材選択状況を検討した。

2. 分析方法

粉末状にした土器胎土から、メタノールと硫酸を用いる酸触媒直接メチル化法で脂質を抽出し、ガスクロマトグラフ質量分析計によって、脂質組成を分析し、バイオマーカー解析を行った。さらに、パルミチン酸・ステアリン酸の分子レベル炭素同位体組成を燃焼炉付ガスクロマトグラフ質量分析装置により分析し、残存有機物の起源推定を行った。実験操作は、全て東京大学総合研究博物館タンデム加速器分析室（MALT）で行った。

3. 結果と議論

- ・中野 B 遺跡分析土器全てから水棲動物の指標である 3 種類のイソプレノイド類が検出された。また、12/13 試料で不飽和脂肪酸が 270°C ないし 300°C 以上加熱で生成する APAA-C₁₆~C₂₂ が検出された。特に、炭素数 20 以上の APAAs は、海産物の煮炊きを示す指標に利用される。脂質の分子レベル炭素同位体組成からも、海棲動物が煮炊きの主体と推定できる。
- ・北海道における縄文時代早期土器の既存の残存脂質分析結果（函館市川汲遺跡、名寄市日進



図 1. 残存脂質分析のなされた北海道縄文時代早期土器出土遺跡の位置

33 遺跡、根室市トーサムポロ遺跡：Lucquin et al. (2018)、千歳市イカベツ 2 遺跡：パレオ・ラボ (2018)) と比較した結果、地域性が認められた (図 2)。沿岸の中野 B 遺跡やトーサムポロ遺跡の海棲生物主体煮炊きに対し、内陸のイカベツ 2 遺跡は陸棲生物、中でも反芻動物：エゾシカ主体の煮炊きと推定される。ただし、渡島半島東部沿岸の川汲遺跡は海棲生物主体煮炊きに加え、陸棲反芻動物主体の煮炊きもなされたとみられる。

4. おわりに

同時期の北海道南部津軽海峡沿岸と渡島半島東部沿岸の煮炊き内容は、類似した環境にも関わらず差が認められた。渡島半島東部沿岸遺跡の前期～後期の分析結果 (福井ほか 2022) 含め、両地域の通時的な比較、検討する事が今後の課題である。本研究は科研費学術変革領域研究(A) (20H05813) の成果の一部である。また、函館市教育委員会、(一財)道南歴史文化振興財団の協力を得た。記して感謝いたします。

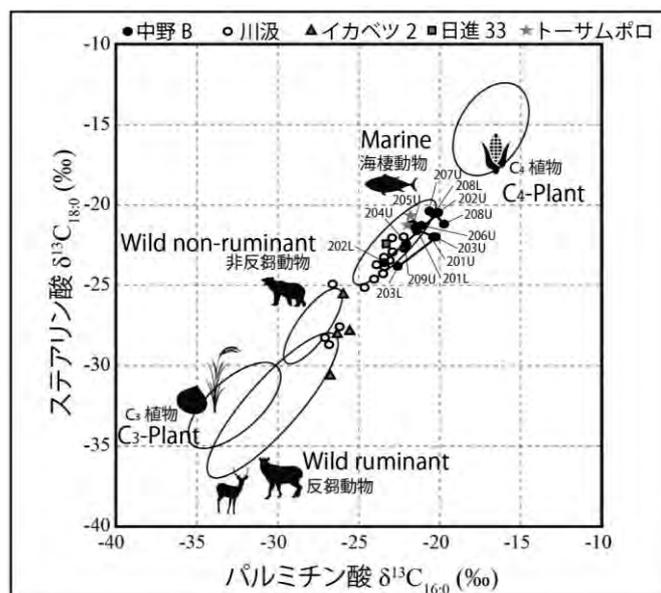


図 2. 北海道縄文時代早期遺跡出土土器の脂質の分子レベル炭素同位体組成

引用文献

- (株)パレオ・ラボ 2018 「イカベツ 2 遺跡出土土器の残存有機物分析」『千歳市トプシナイ 2 遺跡・イカベツ 2 遺跡』(公財)北海道埋蔵文化財センター pp. 384-388
- 福井淳一・村本周三・時田太一郎・福田裕二・宮内信雄・堀内晶子・國木田大・小畑弘己・宮田佳樹 2022 「北海道南部における縄文時代前半期の古食性変遷」『日本考古学協会第 88 回総会研究発表要旨』 pp87
- (公財)北海道埋蔵文化財センター1998 『函館市中野 B 遺跡Ⅲ』
- (公財)北海道埋蔵文化財センター1999 『函館市中野 B 遺跡Ⅳ』
- A Lucquin, H K Robson, Y Eley, S Shoda, D Veltcheva, K Gibbs, C P Heron, S Isaksson, Y Nishida, Y Taniguchi, S Nakajima, K Kobayashi, P Jordan, S Kaner, O E Craig(2018) The impact of environmental change on the use of early pottery by East Asian hunter-gatherers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*115-31:7931-7936, National Academy of Sciences
- H K Robson, A Lucquin, K Gibbs, H Saul, T Tomoda, Y Hirasawa, T Yamahara, H Kato, S Isaksson, O E Craig, P D Jordan(2020)Walnuts, salmon and sika deer: Exploring the evolution and diversification of Jōmon “culinary” traditions in prehistoric Hokkaidō, *Journal of Anthropological Archaeology*. Vol60:101225, Academic Press

大湯環状列石では何を調理していたのだろうか

What were they cooking in the Oyu stone circles?

○宮内信雄（東京大学総合研究博物館）、堀内晶子（前 国際基督教大学）、
赤坂朋美（大湯ストーンサークル館）、木ノ内瞭（同左）、
宮田佳樹（東京大学総合研究博物館）

○Nobuo MIYAUCHI (The University Museum, The University of Tokyo),
Akiko HORIUCHI (ex-International Christian University),
Tomomi AKASKA, Ryo KINOUCHI (Oyu Stone Circle Museum),
Yoshiki MIYATA (The University Museum, The University of Tokyo)

1. はじめに

秋田県鹿角市大湯環状列石は縄文時代後期の遺跡であり、特別史跡として、ユネスコ世界遺産『北海道・北東北の縄文遺跡群』の構成資産として著名な遺跡である。本遺跡の特徴は2基の環状列石を中心として、配石遺構などが環状に構成される祭祀儀礼的な空間であり、物理的に作用する実用品とは考えにくい、祭祀儀礼に纏わるだろう道具類も数多く出土している。

一方で、煮炊きを行った痕跡を持つ土器も多く出土しており、生活の場としての性格も持っている。しかしながら、今のところ食生活に関する研究はあまり進められていない。本発表では、大湯環状列石から出土した、縄文時代後期前半の土器の残存有機物分析を行うことで、大湯環状列石とその周辺を生活の場とした人々の調理内容物について推定した。

2. 分析試料と方法

残存有機物分析の方法は、炭素・窒素安定同位体分析と脂質（残留有機物）分析を用いた。

27点の母資料となる土器から土器内面付着炭化物を15点、土器胎土を25点、それぞれ1ヶ所ずつ採取した。炭素・窒素安定同位体分析では、炭化物15点を測定した。脂質（残留有機物）分析では炭化物7点、土器胎土25点の計32点を測定した。

炭素・窒素安定同位体分析のためのEA-IRMS、抽出した有機物の同定のためのGC-MS、個別脂肪酸（パルミチン酸(C_{16:0})、ステアリン酸(C_{18:0}))の分子レベル炭素同位体比の測定のためのGC-C-IRMSは、東京大学総合研究博物館タンデム加速器分析室設置の機器を用いた。残留有機物の抽出には、酸メタノール法を用いた。

3. 分析結果

炭化物の炭素・窒素安定同位体分析の結果は、多くがC₃植物とC₃植物を摂取した草食動物の混合物が主体になっていると推定される。

炭化物、胎土の脂質（残留有機物）分析では、反芻動物と海棲動物・水産物の寄与があった可能性を持つ試料がそれぞれ過半数を超えていた。

4. 考察

炭素・窒素安定同位体分析で海産物が主体と推定された炭化物は、脂質（残留有機物）分析でも同様に海棲動物・水産物が主体と推定された。しかし、脂質（残留有機物）分析において、炭素・窒素安定同位体分析よりも海棲動物・水産物の寄与が見られた炭化物試料数が顕著に多いのは、明確な齟齬である。そのような齟齬がある炭化物は、脂肪酸濃度が少なかった。全体の脂質量が少なければ、脂質量の多い海棲動物・水産物が混合すればその存在が相対的に大きくなるものと考えられる。海棲動物・水産物は多くの炭化物に含まれていたかもしれないが、食材重量としての分量は、やはり主体的になる場合は多くなかったと推定される。炭素・窒素安定同位体分析では、米代川下流、中流の同時期の遺跡である能代市柏子所2遺跡、北秋田市伊勢堂岱遺跡に比べて、大湯環状列石の海産物の寄与があったと推定される炭化物は、その比率が少なかった。

反芻動物を含む可能性が、少なくない試料で見られた点も注目される。ニホンジカやカモシカは生態学的習性から、鹿角地域で食を支えられるほどの頭数が生息していたとは考えにくい。メジャーフードになり得るか疑問が残る環境で、反芻動物の寄与が相当程度推定される状況は、大湯環状列石の特徴であるのか、周辺遺跡との比較が必要となる。

【謝辞】 東京大学総合研究博物館 吉田邦夫特招研究員からは、貴重なご助言を賜った。

本研究は令和3年度 Living History（生きた歴史体感プログラム）促進事業「豊かなココロを生み出す縄文暮らし体感プログラム」の成果の一部である。

（紙幅の都合により引用文献の掲載は割愛した。）

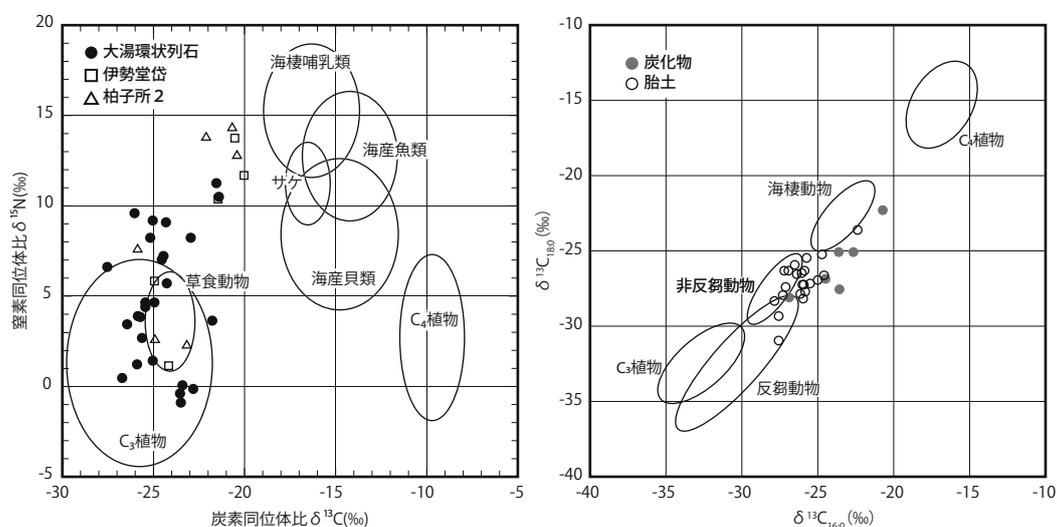


図1 土器内面付着炭化物の炭素・窒素安定同位体分析の結果 図2 個別脂肪酸の分子レベル炭素安定同位体比の分析結果

埋葬人骨周辺土壌からのヒト DNA 解析

Ancient human DNA analysis from sediment surrounding human
bones

○澤藤りかい（総合研究大学院大学）、澤浦亮平（沖縄県立博物館・美術館）、横尾昌樹（うるま市教育委員会）

○Rikai SAWAFUJI (SOKENDAI) , Ryohei SAWAURA (Okinawa Prefectural Museum and Art Museum) , Masaki YOKOO (Board of Education, Uruma City)

1. 背景

日本では酸性土壌や温暖な気候の影響のため、人骨が分解されやすく、幅広い年代・地域のヒトの遺伝情報を得ることは困難を伴う。近年では遺跡の土壌からヒトやネアンデルタールの DNA が復元できることが示されている (Vernot et al. 2021) が、得られた DNA が何に由来するかなど、基礎的な研究は乏しい。本研究では、勝連城跡から出土した、11 世紀半ば～13 世紀初頭の幼少児の埋葬人骨 2 個体において、人骨とその周囲の土壌それぞれから DNA を抽出し、埋葬人骨の DNA との比較を試みた。

2. 方法

勝連城跡から出土した Pit178 と Pit138 の人骨において、その周囲の土壌を収集した。Pit178 からは 4 箇所、Pit138 からは 1 箇所の土壌を数グラム程度採取した。また比較のため、人骨の肋骨も同様に採取した。各サンプルから Danbey 法 (Dabney et al. 2013) を用いて、古代 DNA 専用の実験室で DNA 抽出を行った。現代 DNA 混入の有無を確認するため、ネガティブコントロール (NC) も実験に加えた。DNA 濃度は Qubit (ThermoFisher) で測定した。得られた DNA について、NEBNext Ultra II DNA Library Prep Kit (NEB) を用いて illumina シーケンサーのライブラリ作成を行った。ライブラリ作成後、Mybaits を用いてヒトミトコンドリア DNA (mtDNA) の濃縮を行った。濃縮後、illumina シーケンサー (iSeq) にて DNA 配列の解読を行った。得られた DNA 配列は AdapterRemoval (Schubert et al. 2016)、bwa (Li 2013)、samtools (Li et al. 2009)、picard、MitoSuite (Ishiya and Ueda 2017)、DamageProfiler (Neukamm et al. 2021) を用いて解析を行った。

3. 結果

得られた結果を表 1 にまとめた。各サンプルにおいて DNA 抽出に用いたのは 100mg 程度であり、全てのサンプルにおいて DNA が得られ、ライブラリ作成・DNA 濃縮・DNA 配列解読を行うこ

とができた。NCはQubitにおいて濃度が測定できなかったが、同様の工程を最後まで行った。得られたヒト mtDNA のリード数の割合は、Pit138 の人骨 (KRJ138_B) で最も高く、次いで Pit178 の人骨の肋骨周辺の土壌 (KRJ002)、Pit178 の人骨 (KRJ178_B) で高かった。得られた mtDNA のハプログループを調べると、Pit178 の人骨とその周辺の土壌 (KRJ002) からはハプログループ D4a、Pit138 の人骨とその周辺の土壌 (KRJ005) からはハプログループ M7 と決定された。またこれらのサンプルにおいては、古代 DNA の特徴であるデアミネーションも確認された (図 1)。KRJ002 と KRJ005 以外の土壌においては、ハプログループを決定することができなかった。

表 1. 各サンプルから得られた DNA 量とリード数 (DNA 濃縮後)

サンプル ID	Type	Note	試料重量 (mg)	DNA (ng)	mtDNA リード数	全リード数	mtDNA 割合 (%)
KRJ178_B	bone	Pit178 肋骨	81	78.8	637	80628	0.790
KRJ001	sediment	Pit178 寛骨周りの土	88	27.6	66	75625	0.087
KRJ002	sediment	Pit 178 肋骨周りの土	57	118.4	1587	70349	2.256
KRJ003	sediment	Pit 178 頭の中の土	129	161.6	18	68440	0.026
KRJ004	sediment	Pit 178 土坑外の土	53	31.2	159	61681	0.258
KRJ138_B	bone	Pit 138 肋骨	68	59.2	5885	136320	4.317
KRJ005	sediment	Pit 138 頭の中の土	65	116	105	57772	0.182

4. 考察

土壌から得られたヒトのミトコンドリアのハプログループは、人骨から得られたミトコンドリアのハプログループとほぼ一致することが分かった。また、人骨周辺の土壌においては、採取した場所によってヒト mtDNA の含有量が異なっていた。特に Pit 178 においては、分析に用いた肋骨よりも、肋骨周辺の土壌の方が mtDNA の割合は高くなっていた。肋骨においては内在性のヒト DNA が歯や側頭骨に比べて少ないことが知られている。肋骨周辺の土壌でヒト mtDNA の割合が高かった要因として、埋葬時に肉体や臓器が存在していた場所の土壌を採取したからだと考えられるが、まだ事例数が少なく、今後更なる研究が必要である。

本研究の結果は、人骨が残存していない埋葬遺跡においても、墓域等の土壌から DNA を抽出することで、過去のヒトの遺伝情報が引き出せる可能性を示唆する。また人骨の周辺の土壌からヒト DNA を解析できれば、出土した人骨を破壊することなくヒトの遺伝情報が解析できるようになり、文化財の保全をより促進できると考えられる。今後は元素分析などと組み合わせることで、人骨周辺土壌からのより効率的なヒト DNA の解析を目指す。

大山寺宮殿(厨子)の部材の樹種に関する考察 Consideration of materials of OHYAMAJI-Temple's KU-DEN(ZU-SHI)

○上妻みのり (東京藝術大学)

○Minori KOZUMA (Tokyo University of the Arts)

1. はじめに 大山寺は千葉県鴨川市平塚に所在する真言宗寺院である。享和2年(1802)建築の不動堂は桁行5間梁間5間の規模で、内部は内陣・外陣・両脇陣で構成されている¹⁾。内陣中央の後方には、正面3間(約4.1m)、側面2間(約2.4m)で正面1間吹き放し、背面中央1間を張り出した大規模な宮殿を構える(図1)。上野・小柏氏によると、宮殿内部に立つ2本の太い円柱は礎石から須弥壇を貫通して上部の屋根を支えているが、宮殿床下の部材が不動堂の床組と連結しておらず、宮殿と不動堂は分離した構造体であることが判明している²⁾。宮殿の建築年代は内部の墨書から元禄12年(1699)と推定され、宮殿の約100後に不動堂が建てられている³⁾。その上で、2本の円柱からなる軸組は天正14年(1586)建築の前身仏堂の一部としている。このように、宮殿が異なる年代の部材で構成されていることから、本研究では、大山寺宮殿の部材の樹種を明らかにして建築時期と比較した。



図1 宮殿全景(北東より)

2. 宮殿の床組と部材の樹種 大山寺宮殿は太さ約400mmの2本の円柱からなる骨格部、その円柱を囲むようにしてつくられた外殻部、下部を取り巻く須弥壇の3つの構造体⁴⁾となっている。図2は内陣を含む宮殿平面図、図3は宮殿床組図である。図3に示した1~4が図4の顕微鏡写真に該当する。樹種同定の結果⁵⁾、天正14年の前身仏堂の部材は、2本の円柱、北側大引、足固貫がスギ、南側大引がクリであった。元禄12年の宮殿の部材は、土台がケヤキ、床束と貫はケヤキとスギが混用されている。図3ではa列とb列の柱がケヤキ、c列とd列の柱がカヤであった。宮殿の平面に現れる柱のうち、b列の2本は須弥壇から台輪まで、その他6本は土台から台輪まで到達する通し柱である。この通し柱は、床下から須弥壇天板までが八角形断面(a列を除く)で、宮殿内部は円形断面となっており、見えない部分の仕上げを省略する近世的な特徴を示している。

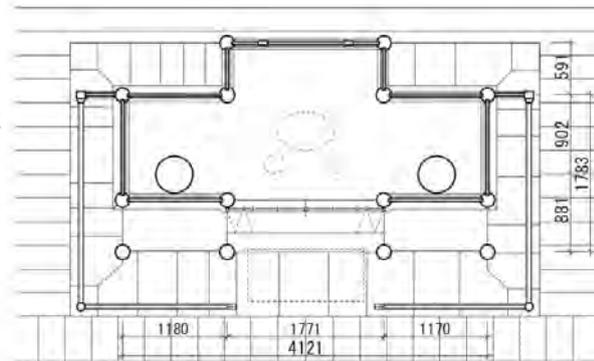


図2 宮殿床上平面図(注2論文掲載の図面に加筆)

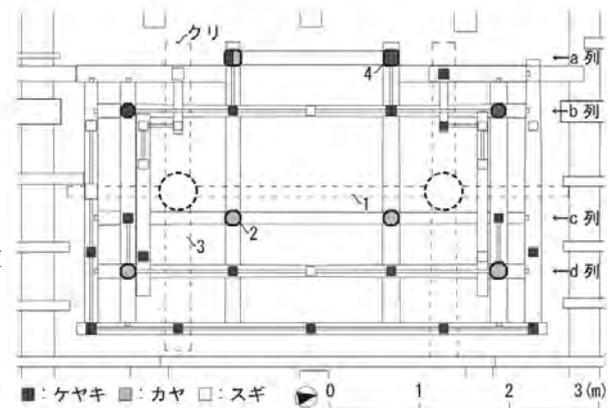


図3 宮殿床組図(太線:上方に延びる柱 / 点線:天正14年材)

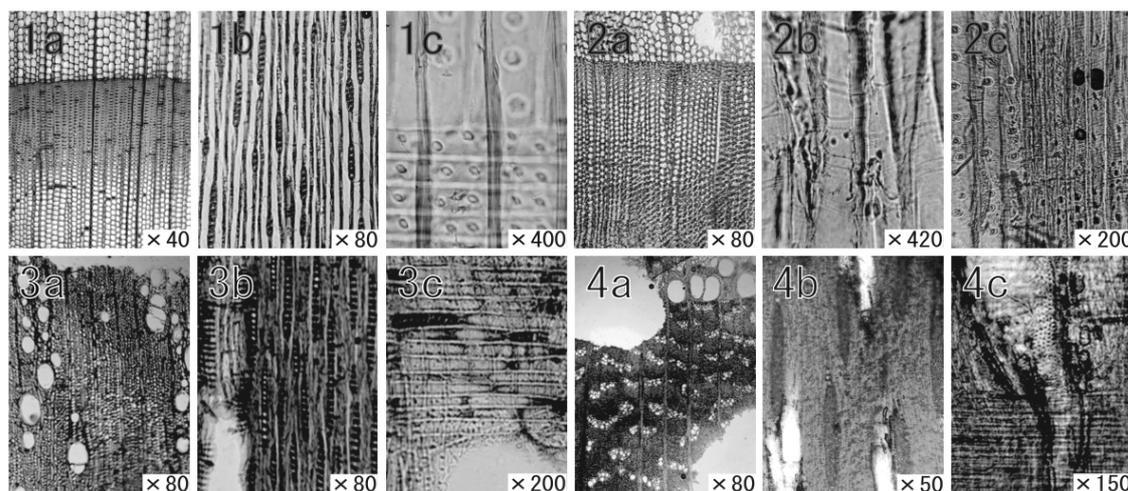


図4 大山寺宮殿の部材断片顕微鏡写真 (a: 横断面、b: 接線断面、c: 放射断面)

1a~1c: スギ *Cryptomeria japonica* (L.fil.) D. Don スギ科 (宮殿足固貫) …早材は大型で薄壁の仮道管からなり、早材から晩材への移行はやや急。晩材は量が多く明瞭。樹脂細胞が早材の終わりから晩材にかけて散在。分野壁孔はスギ型で1分野に2個存在。

2a~2c: カヤ *Torreya uncinifera* (L.) Sieb. et Zucc. イチイ科 (図3中c列の通し柱) …早材から晩材への移行は緩やか。早材部仮道管の有縁壁孔は楕円形。仮道管内側に2本ずつ対になるらせん肥厚がある。分野壁孔はヒノキ型で、1分野に大体4個存在。

3a~3c: クリ *Castanea crenata* Sieb. et Zucc. ブナ科 (宮殿南側大引) …年輪のはじめに大道管が並び、晩材では小型で薄壁の道管が放射状に配置。道管の穿孔は単一。放射組織は単列。

4a~4c: ケヤキ *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino ニレ科 (図3中a列の通し柱) …年輪のはじめに円形の大径管が一列に並び、晩材では小さな道管が集合して接線方向に不規則に並ぶ。放射組織は1~10細胞幅でしばしば上下端に大型の結晶を持つ。

3. 使用樹種に関する考察

大山寺宮殿の部材にみられる広葉樹は、天正14年の南側大引がクリ、元禄12年の土台、柱、床束、貫の一部がケヤキであった。宮殿の柱はケヤキとカヤが混用され、カヤは宮殿の正面側に配置されている。カヤの柱は宮殿外部に現れる通し柱であるが、彩色が施されているため、木目への配慮による樹種選択というより、ケヤキに比べて素直なカヤの材質が考慮されたと推測される。ケヤキは宮殿の床組や不動堂の円柱に用いられることから、元禄12年から享和2年にかけて豊富に入手できた可能性が高い。スギは軸組を構成する天正14年の太い円柱、足固貫、大引といった大径材に用いられていたが、宮殿では、根太、床束、貫などの小径材としての使用であった。

大山寺宮殿は、天正14年の前身仏堂の軸組を骨格として、元禄12年に外殻部と須弥壇が建築されたとされている。今回、床組の樹種を調査した結果、各年代で樹種の使用が異なり、特にケヤキとスギで違いがみられた。宮殿ではカヤの使用が特徴的であるが、前身仏堂の大引にクリとスギを使い分けたのは珍しい。今回は彩色がされていない床下部材に限定して、使用樹種の年代的な違いを指摘できたが、全体像の解明には上部軸組や組物等の調査が必要である。また、周辺域の宮殿と比較し、房総半島における使用樹種の歴史的な変化を明らかにしたい。

注 1) 大山寺不動堂は平成7年3月14日付で千葉県有形文化財(建造物)に指定されている。2) 上野勝久、小柏典華「大山寺宮殿(厨子)の建築的特色 その1 構造形式」日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)2021年9月 3) 小柏典華、上野勝久「大山寺宮殿(厨子)の建築的特色 その2 装飾部材と建築年代」日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)2021年9月 4) 前掲1)による。5) 調査にはNPO法人かもがわ大山寺保存会の皆様にご同行いただき、部材の腐食等で欠損しかかっている箇所から僅かな木片を採取した。樹種同定は、木材の組織を顕微鏡で観察して行なった。採取した木材切片をガムクロラルで封入して同定用プレパラートとした。プレパラートはHA01~HA17と標本番号をつけて東京藝術大学保存修復(建造物)研究室に保管されている。同定した部材は図3中に図4と対応する番号を記した。

謝辞 現地調査では大山寺のご住職並びに保存会の皆様にご協力をいただいた。顕微鏡による樹種同定には鈴木伸哉氏(東京都埋蔵文化財センター)のご助力を得た。記して深謝いたします。

Minecraft を利用した遺跡体験システムの試行

Cultural Property and Minecraft

- 山口欧志（奈良文化財研究所）、上相英之（同左）、村田泰輔（同左）、金田明大（同左）
- YAMAGUCHI Hiroshi, UESUGI Hideyuki, MURATA Taisuke, KANEDA Akihiro (NABUNKEN)

1. 研究目的

本研究は、文化財デジタルデータをデジタル文化資源ととらえ、文化財の新たな可能性の開拓に挑戦する。その試行として、文化財デジタルデータを活用してサイバー空間上に遺跡体験の仕組みを構築し、世代や地域を超えて多様な人々が文化財を楽しむ場の創出を図る。

2. 研究方法

本研究はゲーミフィケーションという手法を導入する。この手法は、ゲームの考え方やデザインなどの要素をゲーム以外の対象に応用することにより、対象への興味・関心の喚起や理解を促進させる。特に文化財分野でビデオゲームをプラットフォームとする取組は Archaeogaming などの先行研究（Andrew2018）が代表的だが、国内では少ない（山口 2021）。

ゲーミフィケーションのためのプラットフォームは、Mojang 社の Minecraft を使用する。Minecraft は、立方体のブロックで構成された三次元のサイバー空間で、プレイヤーがブロックを自由に設置・破棄して世界を創造・改変・破壊・冒険する。2020年5月の時点で全世界の月間アクティブユーザー数約1.2億人を数えるビデオゲームである。Minecraft は地理学や教育学の分野では、小学生から高校生を対象とした地理教育やプログラミング教育などに利用されているほか、社会学の分野では多様な社会層が参画するまちづくりワークショップへの導入例もある（岩橋ほか 2021）。さらには環境保護や脱炭素社会に向けた取組（Minecraft2022）にも利用されるなど、多くの事例を挙げることができる。

本研究は、遺跡や遺構を計測した三次元データを Minecraft の世界に反映させる点で獨創性がある。実データから構築した世界をユーザーが自由に歩き回り、発掘・建築・地層の観察・破壊などの体験を通して、遺跡を楽しみながら地域や歴史、そして文化財科学を知ることにつながる。

3. 試行結果と今後の課題

発掘調査が明らかにした平城宮の遺構や復元遺構などの三次元データを Minecraft に反映させた（図1・図2）。ユーザーは、Minecraft 上でこれらの空間を自由に探検できる。今後はユーザーが Minecraft 上で発掘や見学体験、地域の地形の成り立ちの学習や歴史公園の計画体験などができる仮想空間上の遺跡体験型コンテンツを構築し世界のユーザーに発信したい。また本コンテンツを利用したイベントを現地開催して文化財体験の新しいかたちを共創したい。

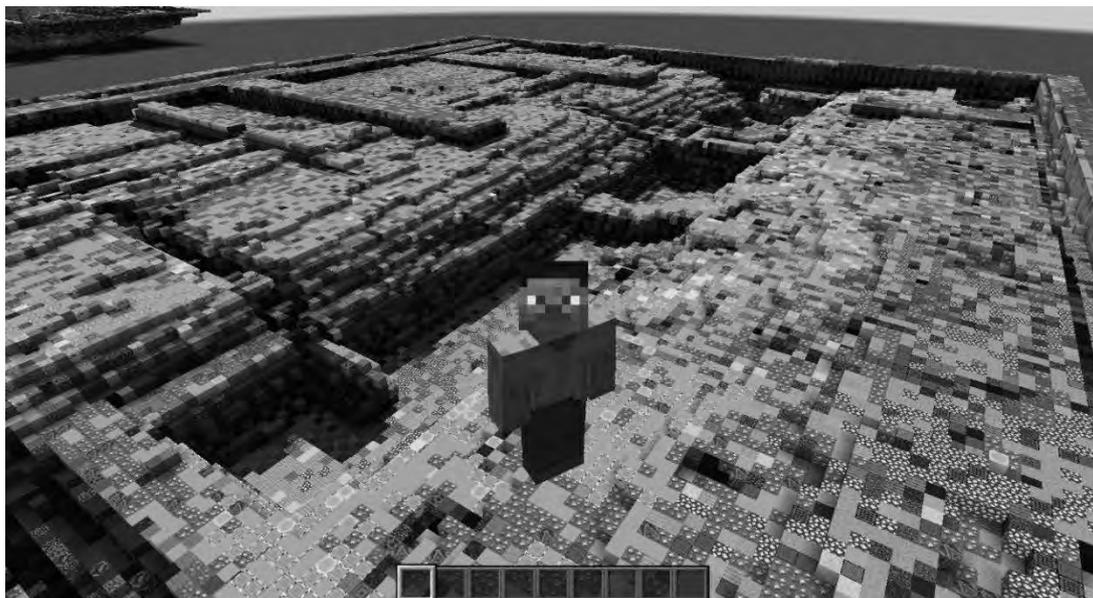


図1 Minecraft上で発掘調査が明らかにした平城宮の遺構を探索する



図2 Minecraft上で平城宮内裏の井戸（復元遺構）を訪れる

参考文献

岩橋純子・白石喬久 2021 「ゲーミフィケーションを用いた地理・地学の学習支援に関する研究（第3年次）」『国土地理院令和2年度調査研究年報』 pp.210-213.

Minecraft, 2022, 「マインクラフトマングローブの木: より良い世界を築こうプログラム」, Minecraft, (<https://www.minecraft.net/ja-jp/mangrove-trees-build-a-better-world>) 2022年7月15日確認

山口欧志, 2021 「遺跡と Minecraft」, なぶんけんブログ: コラム作寶樓,

(<https://www.nabunken.go.jp/nabunkenblog/2021/08/20210802.html>) 2022年7月15日確認

Andrew, Reinhard, 2018, *Archaeogaming: An Introduction to Archaeology in and of Video Games*, Berghahn Books.

多孔質材料中の硫酸ナトリウムの塩析出の定量評価と飽和透水係数

の推定における CT の利用可能性

Potential of Use of CT Imaging in Quantifying the Salt

Precipitation of Sodium Sulfate and Estimating Saturated

Hydraulic Conductivity in Porous Materials

○水谷悦子 (文化財防災センター/東京文化財研究所)、小椋大輔 (京都大学大学院)、安福勝 (近畿大学)

○ Etsuko MIZUTANI (National Institute for Cultural Properties), Daisuke OGURA (Kyoto University), Masaru ABUKU (Kindai University)

1. はじめに

塩類風化の問題を抱える文化財の適切な維持管理手法を構築、提案するうえで、劣化メカニズムや対策の効果を定量的に検討可能な手法として、イオンや水の移動、塩析出を計算可能な予測モデルの活用が期待される。一方、多孔質材料中におけるイオンの輸送性状、塩の析出性状については明らかでないことが非常に多い。例えば、多孔質材料中での塩の析出が飽和透水係数などの水分移動物性に与える影響の解明は課題の一つであるが、そもそも煉瓦や石材といった多孔質材料中における塩の析出性状や空隙構造の変化を定量的に把握することが困難であることが、課題解決の障害になっている。また、本報で対象とする硫酸ナトリウム塩の場合は、複数の安定相を有するため、相同定も含めた検証が必要である。本報では放射光線 CT を利用し、硫酸ナトリウム塩溶液を含ませた煉瓦における塩析出過程を CT 撮影し、乾燥過程で析出する塩の定量化を試みた。また析出塩が空隙構造、透水係数に及ぼす影響を画像解析により検討する。

2. 測定概要

2.1 実験方法 実験には焼成レンガ (4 mm×4 mm× 8 mm) を用いる。側面をエポキシ樹脂で断湿し、試験体の上面を大気に開放、下面は飽和塩溶液で調湿し蒸発が生じないように相対湿度を制御した。試験体の上面より飽和の Na₂SO₄ 塩溶液をレンガに飽和状態に至るまで吸水させ、試験体を乾燥させた。重量測定と放射光 X 線 CT (SPring-8, BL20B2, 2.74 μm/pixel) の 2 種類方法で実験を実施した。実験時の環境は温度 25-26°C、相対湿度 33-36% である。

2.2 画像解析による塩の結晶の同定 CT 画像の輝度値は、存在する成分の密度と原子番号を反映する。物質の輝度値の違いから、レンガに含まれる塩の結晶の量を求める。画像に含まれる 4 相 (実質部、空気、溶液、塩の結晶) の内、実質部と塩の結晶の輝度値の重なりが大きい (図 1)、乾燥状態の画像から空隙と実質部からなる二値化画像を作成し、ある

2 日目
9月11日

第1会場

第2会場

時間の画像から実質部を減算することで材料の空隙部のみを分析対象として解析を行った。

2.3 画像解析による飽和透水係数の推定 空隙部の3次元の細分化処理(3DMA)¹⁾を行い、細孔構造に関するパラメータを算定する。細線分化処理はX線CT解析用の3DMAパッケージ(日本ビジュアルサイエンス社)を用いた。塩の結晶が存在するvoxelでは溶液の移動が生じないため、実質部と同等とみなして、解析を行った。得られた空隙構造に関するパラメータを用い、Kozeny-Carman式から飽和透水係数を求める。

3. 結果

3.1 画像解析による塩の析出分布の定量化の妥当性の検証 既往研究²⁾を参考に、Thenardite (Na_2SO_4) と Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) のどちらも析出する

可能性があることを前提に、画像解析で得られた塩の析出量の妥当性の評価を行った。塩の密度とモル体積をもとに、水分蒸発量からそれぞれ塩が析出した場合の塩の容積を求め、画像解析から同定した塩の結晶と比較する。図2より、画像解析で得られた塩の析出量は Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) が析出していると想定

した場合と一致がよく、主に水和塩である Mirabilite 析出していたと推定される。なおCTの輝度値は原子番号と密度を反映するが、図1に示す硫酸ナトリウム塩の結晶の輝度値は、塩化ナトリウム塩の結晶(密度: 2.16 g/cm^3)の輝度値より小さく、この条件を満たすのは Mirabilite (密度: 1.47 g/cm^3) であることから、上記の結果と矛盾しない。

3.2 塩の析出による飽和透水係数の変化 画像解析を元に推定した飽和透水係数は、ガンマ線含水率計を用いた吸水実験から求めた飽和透水係数とオーダーレベルで一致が見られた。また、飽和透水係数は空隙の容積に対する塩の結晶の占有率の増加に伴い、概ね線形的に低下することが確認された。

4. まとめ

CT画像の画像解析により、焼成レンガにおいて乾燥に伴い析出する硫酸ナトリウム塩の析出量と飽和透水係数の関係を定量的に示した。またCTの利用は、多孔質材料中における硫酸ナトリウム塩の結晶相の同定にも有効である可能性が示された。CT画像から飽和透水係数を推定する手法は、一般的な物性測定を実施するのに適したサンプルの入手が困難な文化財において、微小な剥落片から水分物性を大略的に把握する方法として有効である。

謝辞 科学研究費補助金(課題番号: 18H01596, 20K14892)の助成を受けた。本研究の実験は高輝度光科学研究センターの承認のもと、Spring-8のBL20B2にて実施した(課題番号2018A1714, 018B1756, 2018B1757)。ここに記して謝意を表す。

参考文献 1) Lindquist W. B. et al. 1996. Medial axis analysis of void structure in three dimensional tomographic images of porous media, Journal of Geophysical Research, 101, 8297-8310, 2) Rosa M. Espinosa-Marzal, George W. Scherer, Impact of in-pore salt crystallization on transport properties, Environ Earth Sci, 2012, DOI 10.1007/s12665-012-2087-z

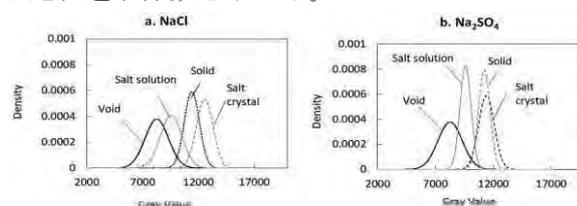


図1 各相の輝度値の正規分布 (a. NaCl, b. Na_2SO_4)

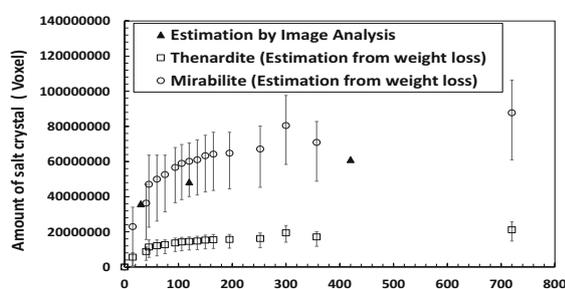


図2 画像解析から求めた硫酸ナトリウム塩の析出量と水分蒸発量から求めた析出量の比較

同一石材で造られた石棺の劣化状態および保存環境の比較による乾湿繰り返しによる石材劣化メカニズムの検討

Basic study on deterioration mechanism of wetting-drying cycles by comparing deterioration state and preservation environment of stone cultural properties

○脇谷草一郎¹、杜之岩²

○Soichiro WAKIYA¹ and Du ZhiYan²

1 奈良文化財研究所 (Nara National Research Institute for Cultural Properties, Nara, Japan)

2 復旦大学 (Department of Cultural Heritage and Museology, Fudan University, Shanghai, China)

2 日目

9月11日

第1会場

第2会場

1. はじめに

本研究では比較的軟質な安山岩から造られた3つの石棺を対象として、劣化状態調査および周辺の微視的な環境調査を実施・比較することで、石造文化財の乾湿繰り返しによる劣化メカニズムの解明を試みた。

2. 石棺の概要

本研究で対象とした3つの石棺は、いずれも香川県の鷲ノ山から産出する角閃石輝石安山岩で造られている¹⁾。1つ目は石船塚古墳石棺で、人頭大の石を積み上げて造られた墳丘頂部に極めて開空率が高い状態で置かれている(図1)。石棺表面は剥離が数か所認められるものの、比較的良好な状態を示す。2つ目は三谷石舟古墳石棺である。これも墳丘頂部に存置されているが、墳丘は樹木に覆われている(図2)。石棺は枕の彫刻や凸線が明瞭に残り、保存状態は極めて良好である。3つ目は石船石棺である。長く石舟池の湖畔にあったものが1909年に引き揚げられ、現在の石船天満宮境内において地盤に直接接する状態で祀られていた。その後、2005年以前のいずれかの時期に現在の覆屋が設置された。石棺は石材の上に据えられて地盤とは縁が切れた状態で保存されている(図3)。石棺の保存状態は3つの中で最も悪く、南側下半の表面は約1mm厚の層状剥離が多数認められる(図4)。

3. 調査方法

石船石棺を除く2つの石棺を対象にエコーチップ試験を行い、石棺石材の反発強度を比較した。各石棺が置かれた局所的な環境条件の実測調査では、全ての石棺近傍で外気温湿度(Onset社製、HOBO Pro v2 U23-001A)を実測するとともに、三谷石舟古墳では墳丘疎林内部にて日射量(Apogee社製、SE-SP-110)と雨量(Onset社製、RGB-M002)を、石船石棺では日射量(同上)のみを実測した。測定期間は2018年12月から約2年間である。開空率は石棺近傍で撮影した全天空写真から解析プログラムCanopOn2を用いて算出した。また、調査時には赤外線水分計(Kett社製、KJT-100)を用いて、石棺とは非接触で石棺表面の水分量を測定した(2019年6月、9月実施、石船石棺のみ2020年10月も実施)。

4. 結果および考察

石船塚古墳と三谷石舟古墳の石棺に対してエコーチップ試験を実施した結果、反発強度において有意な差異は認められなかった。したがって、前者で認められた層状剥離については石材の強度の低下に伴うものとは考えられない。各石棺近傍の外気温湿度を測定した結果、気温、絶対湿度においても有意な差異は認められなかった。一方、開空率と降水量および日射量は大きく異なる結果を得た。それぞれの石棺の開空率(図5から図7)と三谷石舟古墳の降水量(図8)、三谷石舟古墳と石船石棺の日射量(図9)を示す。また、全天の降水量と日射量については気象庁が公表するデー



図1 石船塚古墳の石棺 (南東から)



図2 三谷石舟古墳の石棺 (南東から)



図3 石船石棺 (南から)



図4 石船石棺表面の層状剥離

タを援用した²⁾。石船塚古墳の開空率は71%と高く、日射量、雨量ともに全天のものと概ね同条件と考えられる。したがって、石船塚古墳石棺三谷石舟古墳と石船石棺の開空率はそれぞれ26%、23%と低い値を示した。図8の結果から、三谷石舟古墳では概ね全天と同量の降水量が観測される一方で、日射量は大幅に低減する様子が認められた。とりわけ太陽高度が低くなる冬期では大きく低減しており、これらの結果から、三谷石船古墳では降雨によって水が供給される一方で、日射による石棺表面からの水分蒸発が抑制される環境にあり、石棺は常に高い含水状態を安定に維持していると推察される。石船石棺も覆屋によって開空率は低い値を示したが、日射の影響は季節によって大きく異なる。図7中には春分、夏至、秋分、冬至の太陽の軌跡を示した。この結果から、石船石棺では秋分以降、翌年の春分までの太陽高度が低下する期間は、直達日射が照射すると考えられ、実際、図9に示すように、夏期以外の季節では全天日射量と同等の日射量が観測されており、この期間、石棺の南側では水分蒸発が促進されることが示唆された。赤外線水分計による含水率測定については、石材含水率と赤外線吸光度の相関が得られていないが、一般に含水率は吸光度に対して線形性を示すためここでは吸光度の値を示す。降雨から3日後に各石棺表面の多点を測定した平均値から、石棺全体の平均含水率を算出すると、石船塚古墳石棺は 0.053 ± 0.028 、三谷石船石棺は 0.081 ± 0.025 、石船石棺は 0.11 ± 0.024 となった。石船塚古墳石棺は直達日射が照射することから石棺全体が大略常に低い含水状態にあると推察される。一方、三谷石舟古墳石棺先述の通り、疎林内部で日射が遮蔽されているため常に高い含水状態にあると考えられ調和的な結果を得た。石船石棺については覆屋によって降雨が当たりにくい状況にあるにも拘らず、高い含水率を示した。そこで、石船石棺については2020年10月の降雨時に2日間にわたり、おおよそ1時間毎に含水率を測定した。吸光度で示した含水率の変動を図10に示す。測定の結果、吸光度は約0.15から0.4付近の範囲で推移した。同じ鷲ノ山産の安山岩試料について水分飽和状態の吸光度を測定したところ、約0.22であったことから、石船石棺は降雨時に極めて高い含水率にあると考えられる。先述の通り、夏期以外の時期は石船石棺南側に直達日射が照射することから、石棺の含水率は容易に低下すると推察される。このような状態で降雨時に石棺表面の含水率が急激に増加すると、表面のみ膨張することになる。しかし、同時に石棺の内部によって変形が拘束されているため、結果的に石棺表面では形状に沿って圧縮応力が作用すると考えられる。そして石棺表面が既に浮きが生じていると、その箇所において表面形状に垂直方向、すなわち表層の剥離を引き起こす方向に応力(Compression-induced tensile stress)が生じることで表層剥離が生じると考えられる³⁾。

5. まとめ

異なる立地条件にある同質石材の石棺を対象に、劣化状態調査および周辺の環境調査をおこない、これらの比較から石船石棺で見られる表面剥離のメカニズムを検討した。その結果、極めて保存状態が良い三谷石舟古墳石棺は、常に高い含水状態を維持している一方で、石船石棺は乾湿繰り返しが生じていること、そして石棺表面が湿潤状態となるときに、表面の圧縮応力に起因する引張応力が表面に対して垂直方向に生じると考えられ、表層剥離に至ると考えられた。

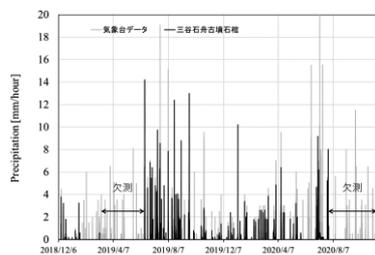


図8 三谷石船石棺の降水量

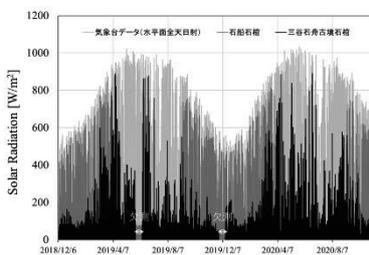


図9 三谷石船石棺、石船石棺の日射量

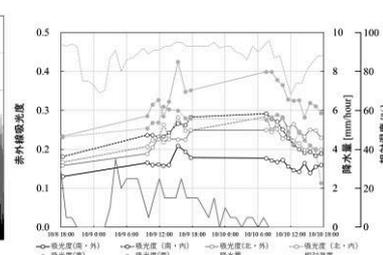


図10 石船石棺の表面含水率

【謝辞】本研究をおこなうにあたり、高松市教育委員会からは多大なる協力を賜った。また、本研究は科学研究費補助金 挑戦的研究(開拓)(課題番号:20K20436、研究代表者:安福勝)の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

【引用文献】1) 香川大学 HP <https://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~hasegawa/geositePDF/17.pdf> (2022年1月7日アクセス)、2)気象庁 HP <https://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2022年1月7日アクセス)、3)Xu, X. et al., 2018, Int. J. Geomech., 18(10), 04018136-1 - 04018136-20

新町遺跡の地中レーダ探査

Ground penetrating radar survey at Shinmachi ruin

○水永秀樹（九州大学）、田中俊昭（同左）、井上忠一（同左）

○Hideki MIZUNAGA, Toshiaki TANAKA, Chuichi INOUE (Kyushu University)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

糸島市の新町遺跡は、糸島半島(福岡県)の中央部に位置する可也山の西側、引津湾に面した海岸砂丘上に位置している。昭和 61 年の第一次調査では、57 基にも及ぶ弥生時代早・前期の支石墓を主体とする墓域が明らかになった。また、当時、全国でも類を見ない弥生時代開始期の埋葬人骨が出土したことから、新町支石墓群は大きな注目を集めた。これらの発掘調査で発見された遺構の一部は復元され、敷地内に建設された新町遺跡展示館で公開されている。

新町遺跡での発掘調査は主に西側を中心に行われていた。そこで平成 23 年度(平成 24 年 2 月)に、新町遺跡の発掘調査が殆ど行われていない東側を中心に、地中レーダを用いた遺跡探査を実施した。令和 2 年度(令和 3 年 2 月)の調査では、平成 23 年度の遺跡探査で実施されなかった領域を中心とした新町遺跡全域での遺跡探査を実施した。

2. 地中レーダ探査の調査地域の概要

令和 2 年度の調査地域は広大なため、地域を 6 つに分割して探査を実施した(図 1)。まず、Area_1 から Area_4 までの調査を令和 3 年 2 月 5 日に実施し、Area_5 と Area_6 の調査を令和 3 年 2 月 24 日に実施した。なお、Area_2 と Area_6 については、調査領域が一部重複している。さらに、Area_4 については、平成 23 年度の前回調査の A 区域と一部が重複している。

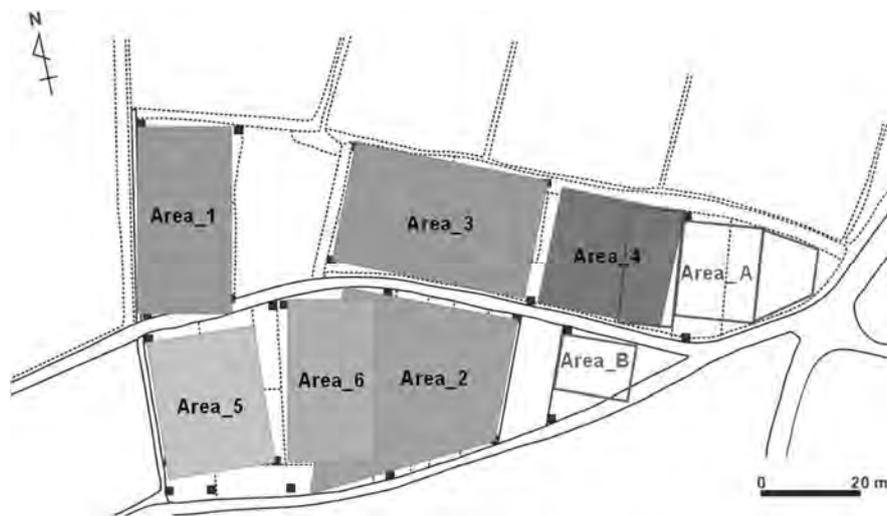


図 1. 令和 2 年度の新町遺跡の地中レーダ探査の調査領域 (Area_1~Area_6)

3. 地中レーダ探査の結果

ここでは、興味深い結果が得られた、Area_2 と Area_6 の探査結果を示す。Area_2 と Area_6 では、どちらも矩形の広い異常域が検出された。これらの2の調査領域での異常域の位置関係を把握するため、調査領域が一部重複している Area_2 と Area_6 の深度スライスを重ね合わせた(図2)。この図を見ると、測線の進行方向が異なる(Area_2 は南北方向、Area_6 は東西方向)にも拘らず、両調査領域での異常域がきれいに一致する。この二つの深度スライスを重ねた結果から、矩形の異常域はほぼ正方形をしていることがわかった。その異常域の大きさは、外側の矩形領域が約 20 m、内側の矩形領域が約 10 m であることがわかった。

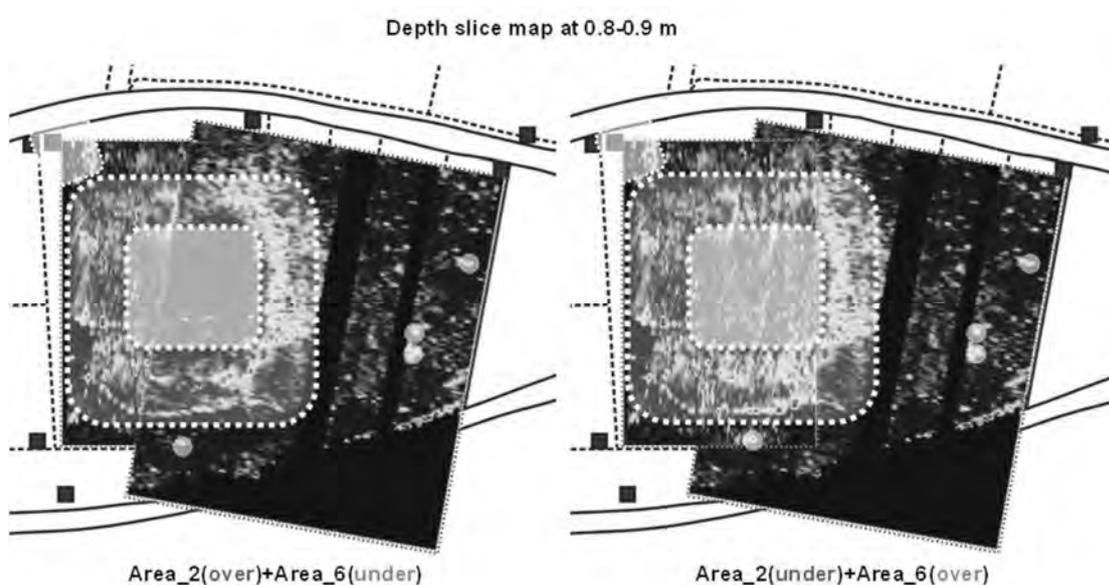


図2. Area_2 と Area_6 で検出された方形周溝墓らしき反射応答

4. まとめ

糸島市の重要遺跡である新町支石墓群において、支石墓や土器、甕棺などの発見を目的とした地中レーダ探査を実施した。その結果、新町遺跡展示館の南東に位置する Area_2 とその西に隣接した Area_6 で、興味深い結果が得られた。Area_2 と Area_6 の深度スライスを重ね合わせた結果、溝のような構造は、周囲を取り囲む片仮名の口の字型の分布をしていることがわかった。このような構造と極めて類似した埋葬施設に、方形周溝墓と呼ばれるものがある。方形周溝墓は、周囲を四角く溝で囲み、低く土を盛り上げた墓で、近年では方形低墳丘墓とも呼ばれている。これまでの説では、方形周溝墓は弥生前期前半に近畿地方に出現し、弥生中期には中国地方、東海地方、関東地方でも築造されるようになったと考えられている。この説明からもわかるように、方形周溝墓は弥生時代早期には北部九州には分布していないと考えられてきた。しかしながら、もし口の字型の構造が方形周溝墓であり、さらにその築造年代が弥生時代早期のものなら、これまでの学説を覆す大発見になる可能性がある。

奈良県島の山古墳周濠内部の探査

Prospection of the moat of the Shimanoyama tumulus in Nara prefecture

2 日目

9 月 11 日

○高橋克壽

○Katsuhisa TAKAHASHI (Hanazono University)

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

前方後円墳に代表される日本の古墳は、巨大なものほど墳丘の周囲に濠をめぐらしており、多くが周囲の土地への灌漑用ため池として使われている。限られた過去の発掘調査事例によれば、こうした周濠の底には、本来の墳丘や周堤の裾だけでなく、島状・出島状施設・渡り土手や堰などの古墳造営や祭祀に関わる重要な遺構が見つかる可能性がある。本研究は湛水状況の周濠水面下の情報を発掘せずに取得する方法を確立することを目標としたものである。

発表者はこの目標のために 2019 年度より、奈良県ウワナベ古墳、大阪府ニサンザイ古墳と順に探査の実績を積み上げてきた。そして、2021 年度に島の山古墳の周濠の探査に臨んだ。

国指定史跡島の山古墳は、全長 200m で後円部直径 113m、前方部幅 104m の規模を誇る大和盆地中央部の大型前方後円墳である。先の 2 古墳が 5 世紀前半～中ごろの築造であるのに対して、島の山古墳は古墳時代中期初頭、4 世紀末ごろの築造である。平成 20 年度までに 13 次に及ぶトレンチ発掘調査が実施されており、くびれ部両側に未発達な造り出しがみついている（川西町教育委員会 2019『島の山古墳第 3～13 次発掘調査報告書』）。

2. 探査方法

過去 2 回の経験に学び、島の山古墳ではマルチビームのスワス音響機器による深淺測量は省略し、底質調査のみに限定した。かつ、できるだけ測線を多くとって、底質（地山）を補える点を増やすことを目指した。測線の数是一日目 78、二日目 88 である。これにより後円部より南側では 5m メッシュほどの充足率に達している。使用した機器はサブボトムプロファイラー SB—216S で、周波数は 15kHz で行った。船位決定には D—GNSSSV102 を用いた。そうして得られた情報は等高線図や地形図として表示した。

なお、現状での周濠内の堆積層は、墳丘や周堤付近よりそのあいだのほうが低くなっているものの、過去のトレンチ調査では 1m ほどの厚みがあることがわかっている。周濠部分は近代以後かなり廃土行為がなされているが、トレンチでは墳丘裾付近には古墳にともなう籠や木製品が多数出土しており、堆積層下部は乱されていないと判断される。

3. 調査の結果

前方部前端がやや乱れているが、それ以外では墳丘西半では標高 40.0m、そして東半ではそ

れより 0.1~0.2m低いところが墳丘裾と判断された。図1は発掘調査報告書で提示された復元図と探査の三次元図を合わせたもので、探査成果がよく合致していることがわかる。また、図2は等高線表現の成果図面である。墳丘西側に比べると東側では濠底の凹凸が激しい傾向が読み取れるが、そのなかで、前方部東側の周濠内に、南北約20m、東西約15mの大きさで、周囲との比高0.3m以上、標高40.1mあまりの最高所をもつ高まりが存在していることが注目される(図3)。

これは、いわゆる島状施設というものに該当する遺構の可能性が高く、等高線に基づけばその北半に墳丘あるいは堤につながる渡り土手が取りつくことも考えられる。

時期的にも地理的にも近い奈良県山古墳で出土した出島状施設に相当する周濠内施設が島の山古墳にも同様に存在していたことを強く示唆する結果が得られた。

本研究は科学研究費基盤研究 (B) 補助金を受けて実施したものである (JSPS19H01360)。

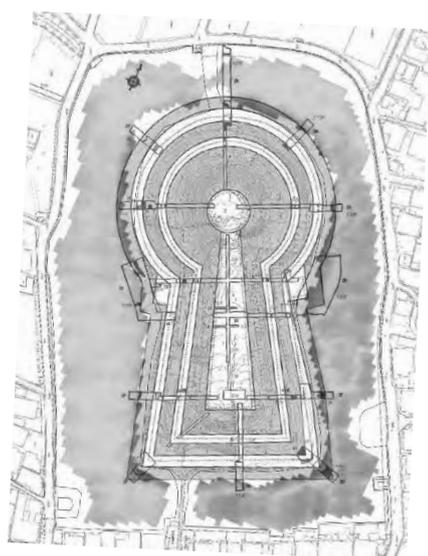


図1 三次元図と墳丘復元図

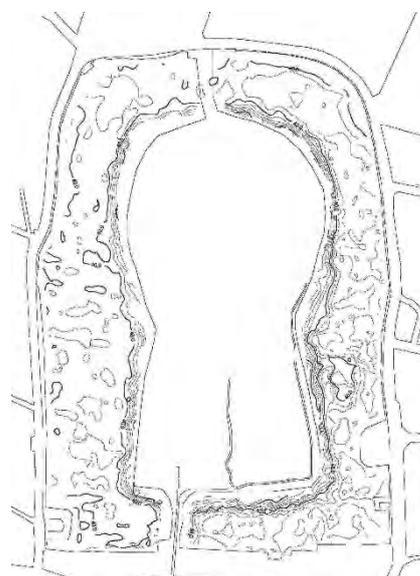


図2 等高線図

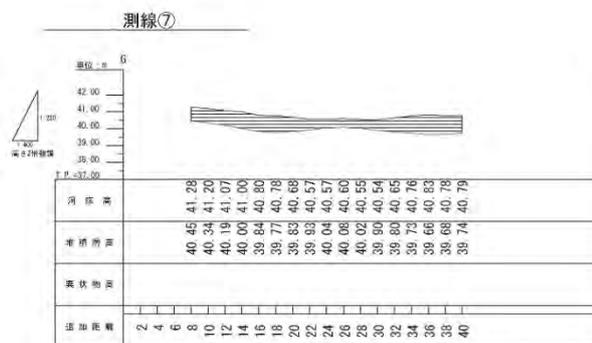
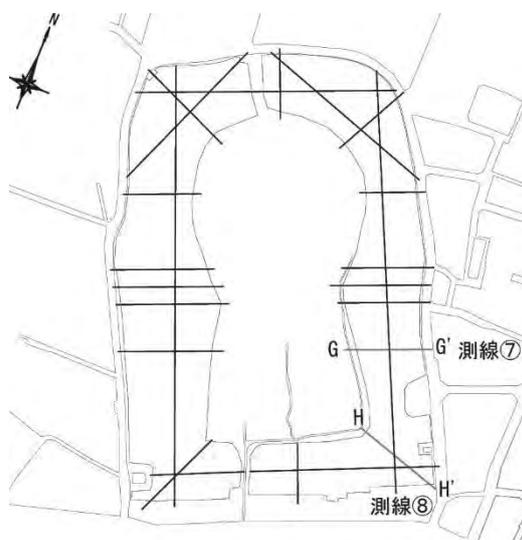


図3 測線⑦と島状遺構断面図

熱可塑性樹脂を用いた石材表面形状の印象精度の検証

Geometric Accuracy of Stone Surface Obtained using Thermoplastic Resin Impression

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

○澤田茉伊（東京工業大学）、三村衛（京都大学）

○Mai SAWADA (Tokyo Tech), Mamoru MIMURA (Kyoto University)

1. はじめに

石積構造物の耐震性を支配する要因のひとつは、石材間のせん断強度である。既往研究¹⁾では、地震時の古墳墳丘の被害の程度は石室石材のせん断強度によって大きく変化することを確認した。耐震性を正確に予測し、適切な対策を講じるためには、石材間のせん断強度の評価が重要である。しかし、一般的な強度試験は、石材の採取・破壊を伴うため、歴史的構造物には適用できない。石材間のせん断強度は、石材自体の強度と表面粗度が寄与しており、特に表面粗度は代替試料での評価が難しい構造物固有のものである。本研究は、石材表面の形状を非破壊で測定する手法を提案し、せん断強度の支配要因のひとつである表面粗度を適切に考慮した耐震性評価に役立てることとする。せん断強度に寄与する表面粗度は、一般に 0.25~1mm 間隔の測定を要し、現場で用いられる非接触の手法の多くは分解能が十分でない。そこで、熱可塑性樹脂を用いて、石材表面形状を写し取り、高分解能の形状測定が容易な卓上機器で印象の表面座標を取得する。本稿では、実物と印象の表面座標を比較し、本手法の精度を検証する。

2. 石材表面形状の印象方法と本手法の特徴

70°C 以上で軟化する熱可塑性樹脂（Muto Trading Inc.）を用いた。図 1 に現場での印象手順を示す。樹脂は、石材表面で 10 秒程度保持すると固化し、スムーズに剥がすことができる。20g の樹脂で捕捉できる領域は、直径 70mm 程度である。また、ゲル状で固化の時間が短いため、壁面や天井等も含めて、複数個所の印象が容易にできる。従来から岩盤工学分野では、シリコンや石膏が印象材として使われているが、流動性が高く、型枠を必要とし、固化に数時間かかる上、除去時に石材が剥離する点で文化財には適さない。

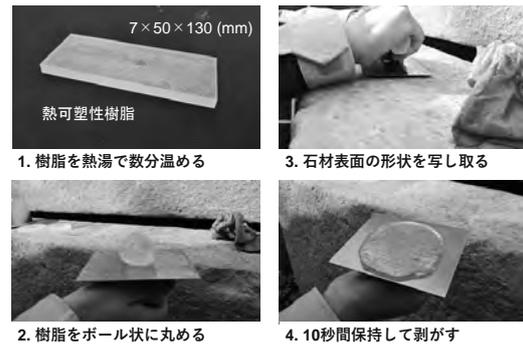


図 1 熱可塑性樹脂を用いた印象方法

3. 印象精度の検証

熱可塑性樹脂を用いて、石膏性の岩石のレプリカを直径 50mm の円筒状に成形した 3 体の供試体（以降、実物とする）の表面形状を印象し、精度を検証した。三次元形状測定器（VR-3200,

Keyence, 水平精度 $\pm 5\mu\text{m}$, 鉛直精度 $\pm 3\mu\text{m}$)を用いて、実物と印象の表面座標を取得した。コンター図の代表を図2に示す。実物と印象はX軸に対して対称で、凹凸は反転している。座標は $250\mu\text{m}$ 間隔で取得したが、本研究では既往研究でせん断強度との関係性が確認されている範囲に基づき、測点が 0.25mm 間隔になるようデータ処理をしている。実物と印象のそれぞれについて、XおよびY方向に設けた120本の側線に沿って、標高差の絶対値を求め、平均値(MAE)と標準偏差(SD)を求めた(表1)。既往研究^{2),3)}では、シリコンを用いて岩石表面を印象し、これを型枠にしたグラウト製のレプリカの表面形状の

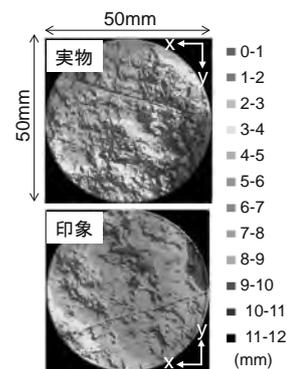


図2 コンター図

精度について、これらの指標で調査されている。MAEが 0.18mm 、SDが 0.1mm 程度のときに高精度と判断されていることを鑑みると、熱可塑性樹脂による印象はいずれの指標でも十分に精度が高いと言える。また、既往研究に合わせ、モルタル製のレプリカと実物の比較も行った。モルタル内にキャッピングされた気泡によって、表面に微細な孔ができるため、全供試体のMAEは 0.095mm 、SDは 0.135mm となり、表1よりも実物との標高差がやや大きい。既存の印象材を用いた既往研究と遜色ない精度である。

表1 印象精度の検証結果

Specimen	MAE (mm)	SD (mm)
No.1_x	0.056	0.079
No.1_y	0.073	0.099
No.2_x	0.053	0.075
No.2_y	0.047	0.071
No.3_x	0.040	0.054
No.3_y	0.043	0.058
Mean	0.052	0.073

石材表面の粗度は、測点間の正接の二乗平均平方根で定義される指標が広く用いられている。実物と印象の120本の側線上の粗度を比較したものを図3に示す。印象のほうがわずかに小さい傾向にある。これは、樹脂の流動性が低いため、石材表面の微細な凹部に充填されていないことが原因である。すなわち、印象から得られた粗度を用いてせん断強度を推定した場合、強度および耐震性を低めに見積もられるが、安全側の評価になる点で有用である。実物と印象の粗度の差がせん断強度と耐震性の評価に与える影響については、より定量的な研究を進める予定である。

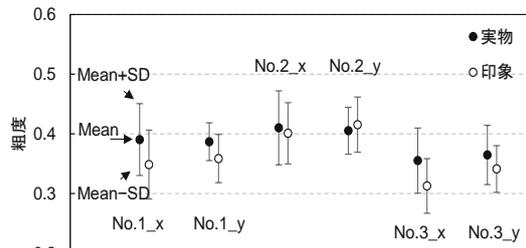


図3 実物と印象の粗度の比較

4. まとめ

採取・破壊が不可能な石積構造物の石材間のせん断強度および耐震性の正確な評価を目的に、石材へのダメージが少なく、壁・天井を含む幅広い箇所への適用が可能な、熱可塑性樹脂を用いた印象方法を提案した。実物と印象の三次元計測結果の比較に基づき、提案法は既存の印象材と遜色ない高い精度で、表面形状を印象できることが明らかになった。

参考文献 1) 澤田ら(2021). 切土斜面に築造された古墳墳丘の地震時挙動と耐震性補強方法に関する研究. 文化財科学, 83, 1-15. 2) Larsson, et al. (2020). Geometrical quality assurance of rock joint replicas in shear tests—introductory analysis. EUROCK 2020. 3) Yang, et al. (2010). Effect of asperity order on the shear response of three-dimensional joints by focusing on damage area. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47(6), 1012-1026. **謝辞** 本研究は松井角平記念財団の助成を受けたものです。

アンコールバイヨン寺院主塔の温暖化気候変動に対する保全対策

Counter Measures for Safeguarding Main Tower of Bayon Temple against Warming due to Climate Change

2 日目

9 月 11 日

○岩崎好規（地域地盤研）、福田光治（大成ジオテック）、石塚充雅（JASA）、中川武（早大）

○Yoshi IWASAKI(GRI), Mitsuharu FUKUDA(Taisei Geotech),

Mitsumasa ISHIZUKA(JASA), Takeshi NAKAGAWA

第 1 会場

第 2 会場

1. Angkor Thom Bayon 寺院の主塔基礎構造

日本国政府アンコール救済チーム（JSA; Japanese Government Team for Safeguarding Angkor）は、1994 年に結成され、アンコール遺構の研究・保全を実施してきた。アンコールトム遺構の中心寺院であるバイヨンは、13 世紀末前後に建設されており、高さ約 30m の石積構造の主塔は約 14m の砂質土の盛土の上に浅い直接基礎で設置されていることが 2008 年の考古学調査で判明した。

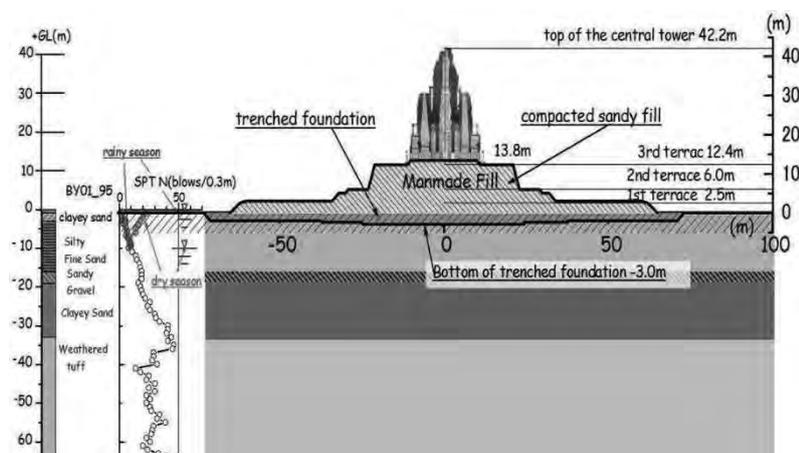


図 1

バイヨン寺院

基壇および地盤構造

基礎は、掘り込み基礎の上に、良く締め固められた砂盛土で 3 段のテラスで構成され、各テラスの表面はラテライトブロックおよび砂岩の敷石で覆われている。

2 シルト質細砂盛土（乾燥状態では軟岩 浸水状態では崩壊）

盛土基壇のボーリング結果によると、標準貫入試験は $N > 100-250$ という非常に高い貫入抵抗値を示すが、ボーリングによって得られた試料は、軟岩のようだが、浸水状態としてみると、図 2 に示したように、10 分以内に崩壊することが判明している。

3 モンスーン気候帯の降雨と基壇の豪雨時挙動

降雨時の盛土水分量変化の観測結果（図 3）から、モンスーン地帯の降雨形態であるスコールでは、激しい降雨ではあるが、数時間後には、晴天となるので、部分的浸透、乾燥を繰り返して

おり、深部に浸透することはなかった。このために、建設後の700年間、崩壊を免れてきたものであると推定されている。

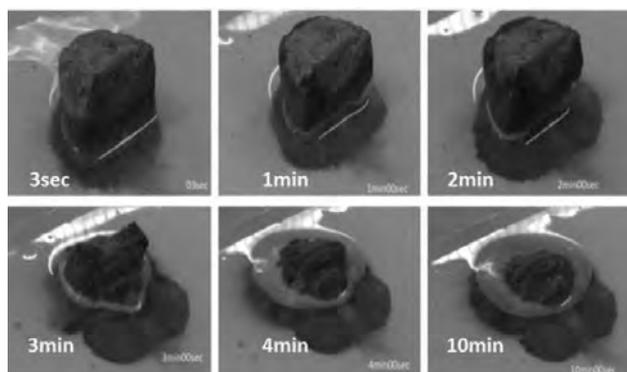


図2 中央塔基壇下砂盛土

ボーリング採取試料浸水反応

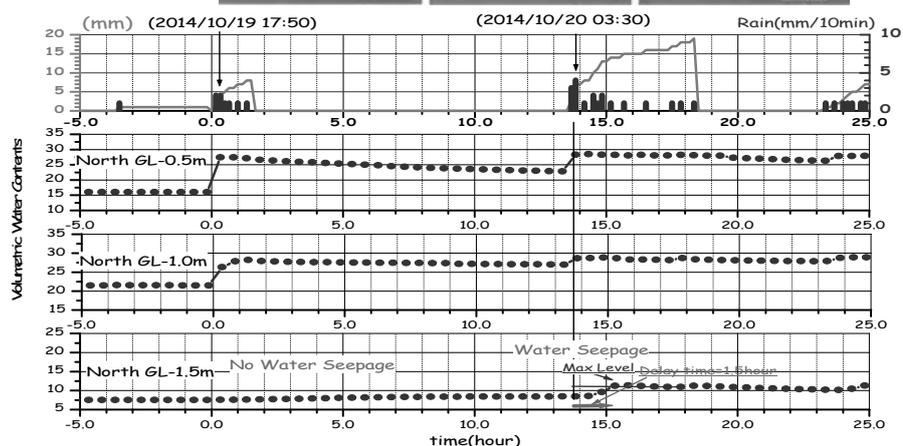


図3 降雨時の盛土内

水分変化

4 温暖化に伴う基壇の保全対策

温暖化に伴い、スコール型から、連続的長期降雨の降雨形態に移行するものと想定されている。JSAは、このような事態に対処できるような対応策を実施予定であるが、文化財保存の3原則、最小限の対策、段階的施工、取替え可能材の使用に基づき、つぎのような対策を検討している。

- ① 主塔、副塔先端部の開口部の閉鎖
- ② 塔基壇周縁階段部位表面の遮水対策
- ③ 最上段テラス砂岩敷石表面の遮水対策

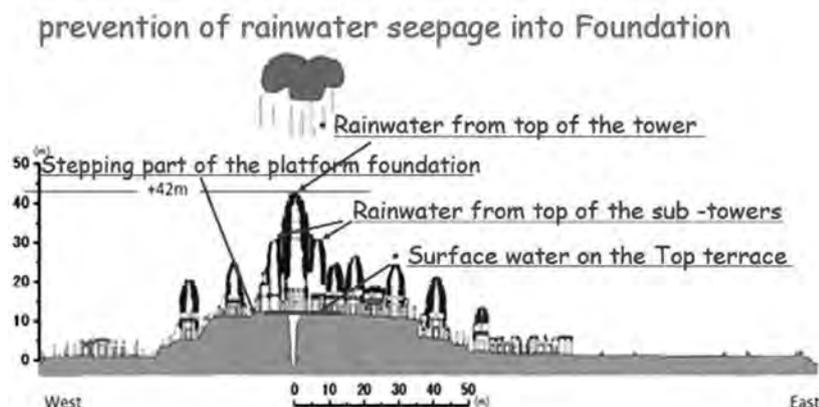


図4 バイヨン主塔の温暖化保全対策

文化財防災センター発足後の取り組み

Initiatives after the establishment of the Cultural Heritage Disaster Risk Management Center, Japan

○小谷竜介（文化財防災センター）、高妻洋成（同左）、建石徹（同左）

○Ryusuke KODANI, Yohsei KOHDZUMA, Toru TATEISHI (Cultural Heritage Disaster Risk Management Center, Japan)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. 文化財防災センターのミッション

国立文化財機構文化財防災センターは 2020 年 10 月 1 日、国立文化財機構本部に設置された。文化財防災センターのミッションは以下の 3 点である。

- 1 被害を出さない（=事前の備えをしっかりとしておく）
- 2 被害が出てその度合いを最小限にとどめる（=正確な情報の収集、的確な判断、そして迅速な行動）
- 3 重篤な被害が出た場合の救援・支援を効果的に実現する（=体制の準備と機能）

2. 文化財防災センターの組織体制

文化財防災センターは奈良文化財研究所内に本部をおき、国立文化財機構の 6 施設に職員を配置している。同時に、6 施設の職員に併任発令をし、センター職員とともに文化財防災プロジェクトチームを構成している。この総勢 53 名により、文化財防災に取り組んでいる。

一方、センター設立に先立ち、補助金事業で実施してきた文化遺産防災ネットワーク推進会議を通じた、文化財に関する団体との緩やかなネットワークとの連携も引き続き活動の柱の一つに位置づけている。同時に、当センターは都道府県文化財主管課を中心に域内の市町村や大学、博物館等との連携体制の構築、さらには、地域ブロックにおける広域連携体制の構築を目差し、支援をしている。この行政を中心としたネットワークと、文化遺産防災ネットワーク推進会議とおしたネットワークを柱に、災害時の活動と平時の防災を進めていく。文化財防災センターは、こうした文化財に関わる人、組織のハブとして活動していこうとするものである。



3. 文化財防災センターの事業

文化財防災センターでは①地域防災体制の構築、②災害時ガイドライン等の整備、③レスキューおよび収

蔵展示における技術開発、④普及啓発、⑤文化財防災に関する情報の収集と活用、という5つの事業を柱に据えて活動を行っている。各事業の詳細については紙幅の都合上割愛するが、これらの事業をとおして、文化財保護法にある全文化財類型を対象に、文化財の被害対応から復興、そして平時の減災・防災までの防災サイクル全体に対処していくものである。

4. リスク研究

前述の地域防災体制が、災害発生時、そして日常の防災の枠組となるが、その取り組みを進める上でのバックボーンとして、文化財の被害要因となる様々なリスクを検証する必要がある。そこで、当センターでは前記各事業を推進していく上でも基礎となる、文化財のリスクに関する研究を進めている。

リスク研究は二つの柱で進めている。一つ目は、文化財に係るリスク情報の収集である。文化財のリスクがどのような時と場合に顕在化するのか、この点に関する情報を収集しようとするものである。ある程度収集されたのちには、災害種別ごとに、文化財がどのような状態にあるときに、どのような被害を受ける可能性が高いのか、ということを整理し課題を見出すことを目標とする。二つ目はこのリスク情報の収集を得て見出した課題を解決するための調査研究である。現在は、「収蔵環境」を共通テーマに取り組んでいる。

このリスク研究で得た知見は、ガイドラインなどの形で公表していくものである。

5. よりよい復興を後押しする文化財防災の確立へ

文化財防災センターでは、文化財の防災を実現することにより、災害発生後の地域社会の復興に資すると考えている。すなわち、文化財は、なくても生活に困らないものと考えられがちであるが、地域社会の中にあり、地域社会の人たちによって支えられている地域の文化財は、地域に「欠かせないもの」ということができ、いわば、社会的インフラと理解することができるということである。そして、それゆえに文化財を地域の人たちが認識し、護っていることを共有してもらえそうな手助けを、文化財の防災活動を通して浸透させていこうと考えている。こうした活動は、SDGsが目指す持続可能な社会の達成を鑑みたとき、「目標 11 都市や人間の居住地をだれも排除せず安全かつレジリエントで持続可能にする」に資する活動となる。さらに、文化の多様性の尊重というSDGsの前提も含めて考えれば、文化財の保護は、17の目標全ての実現に必要なものと理解することができる。文化財防災センターはこの観点から、国内各地で文化財の防災を深める体制づくりを進めている。

【参考文献】

蟹江憲史『SDGs（持続可能な開発目標）』中公新書（2020）

高妻洋成「文化財を災害からまもる-文化財防災スパイラルによる文化財の継承-」『ベース設計資料』190、建設工業調査会（2022）

京都国立博物館編『トラりんと学ぶSDGsと博物館』京都新聞出版センター（2022）

滋賀・浄土寺所蔵天部形立像の転倒防止に関する研究
—シミュレーション解析を利用して—
Study on the fall prevention of Standing statue (Owned by
Jodoji Temple, Shiga) —Using Simulation Analysis—

○中屋菜緒（国立文化財機構文化財防災センター）、小林茂宜（浄土寺）
伊藤旭人（奈良国立博物館）、降幡順子（京都国立博物館）

○Nao NAKAYA (Cultural Heritage Disaster Risk Management Center, Japan)
Shigenobu KOBAYASHI (Jodoji Temple), Akihito ITO (Nara National Museum)
Junko FURIHATA (Kyoto National Museum)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

社寺等で公開・保管されている仏像のほとんどは、仏像自体が信仰の対象であることや社寺という空間自体が特殊なことなどから、適切な転倒防止対策の実施が難しい場合が多い。そこで報告者らはこれまで、社寺等においても実施可能な立体作品の転倒防止対策を検討する一手法として、シミュレーション解析を用いた方法の調査研究を行ってきた。本研究では、実際に寺院において保管されている立像の転倒シミュレーション解析をおこない、転倒防止対策の検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 調査資料

本研究では、浄土寺（滋賀県大津市大鳥居）所蔵の天部形立像（伝聖観音）を調査対象とした（図 1）。浄土寺像は像高 106.5 cm、一面二臂の立像で、頭体幹部は木心を有する堅木一材より彫出する。両杳先も本体と共木とし、内刳りは施さない。像底に差込まれた丸柄 1 本（後補、径 3.8 cm、長 5.0 cm）により蓮華座上に立つ。一木造特有の量感のある体軀を示すが、着衣の皺を左右対称に刻むには形式化が認められる。制作は、平安時代中期（10～11 世紀）であると考えられる。

現在は、浄土寺本堂内、高さ約 60 cm の木造脇壇上に安置されており、像の周囲には脇侍・仏具が置かれている。本体の保存状態は大きな干割れ等も認められず良好である。

3. 解析手法

まず、調査対象となる立像の三次元形状情報を SfM 多視点ステレオ写真測量(SfM/MVS)によって取得した。使用した解析ソフトは Agisoft 社製 Metashape professional である。三次元データ処理は、3D SYSTMS 社製 Geomagic Design X を使用した。今回取得した三次元データはデータ量が大きく解析にむかないことから、三次元データをもとにした凸包形状に一様に質量が分布していると仮定し、静止摩擦係数 0.33、動摩擦係数 0.30、重心の高さ 59.5 cm としてシミュレーションを作成した。重心位置は三次元データの点群座標情報から簡易的に求めた。



図 1 浄土寺天部形立像
(画像提供：京都国立博物館)

4. 結果と考察

今回のシミュレーションでは、JMA 神戸波の震度 5 強、震度 6 弱、震度 6 強の 3 波を入力方向 0 度と 90 度でそれぞれ実施した。シミュレーション結果は表 1 のとおりである。立像の挙動パターンは、転倒（転倒角が 70 度以上）、ロッキング（転倒角が 3 度以上）、滑動（転倒角

表 1 天部形立像の転倒シミュレーション結果一覧

入力地震波	入力方向	挙動タイプ	転倒時刻 (s)	最大転倒角 (度)	重心最大移動量 (cm)
JMA神戸波振幅0.25倍 (震度5強)	0度	動きなし	—	0.3	0.3
	90度	滑動	—	1.3	2.1
JMA神戸波振幅0.5倍 (震度6弱)	0度	ロッキング	—	5.1	23.8
	90度	転倒	9.5	≥90	78.4
JMA神戸波振幅1.0倍 (震度6強)	0度	転倒	10.9	≥90	55.0
	90度	転倒	10.1	≥90	36.6

が 3 度未満で、重心最大移動量が 1 cm 以上)の 3 タイプに分けられた。シミュレーション結果から、立像は震度 6 弱以上の揺れで転倒する可能性があることが明らかとなった。そこで、簡便な固定具を用いた転倒防止対策方法として表 2 に挙げた A～E 案を検討し、それぞれの対策案についてシミュレーション上で転倒防止効果の検証を行った。なお、固定具の材質は金属製と仮定し、地震発生時以外は立像に接触しない設定でシミュレーションを実施した。

検証の結果、A・B 案の背面のみ固定具を設置した場合は転倒防止効果が低く、C・D・E 案の背面に加えて側面もしくは正面に固定具を設置した場合は転倒防止効果が高いことが明らかとなった。立像は転倒シミュレーションの結果から正面方向に転倒しやすい性質があったため、側面や正面を支持することが効果的であると推測できる。

これらのシミュレーション解析結果に基づき、立像の転倒防止対策について浄土寺総代と協議を行った。転倒防止効果の得られた C・D・E 案のうち、E 案については、現在の立像の安置場所が既存の脇壇上であることから、脇壇に掘り込みを作成することは困難であると判断した。C・D 案については、固定具が立像の鑑賞を妨げる可能性があるため、固定具の設置場所の微調整を行う必要があるが、導入に検討の余地があると結論付けられた。

今後も引き続きシミュレーション解析データの蓄積、摩擦係数等の設定条件の再検討を通じて、シミュレーションの精度向上をはかり、立体文化財の転倒防止対策に役立てていきたいと考えている。

表 2 転倒防止対策の効果検証結果一覧

	対策案	転倒防止の効果
A	台座背面に固定具を 1 個設置	効果なし
B	台座背面に固定具を 2 個設置	転倒は防げるが固定具から外れる
C	Bの固定具 2 個を前に伸ばす	効果あり
D	B+台座正面に小さい固定具を 4 個設置	効果あり
E	B+台座の形状に合わせて掘り込み作成	効果あり

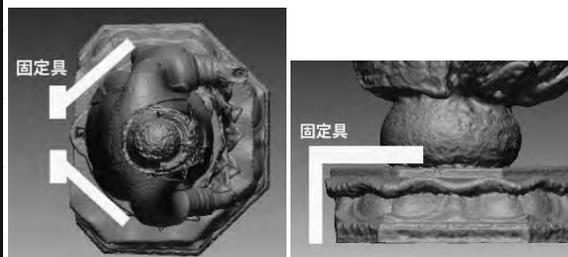


図 2 固定具の設置イメージ (B 案)

謝辞：シミュレーション作成には株式会社 構造計画研究所にご協力賜りました。厚く感謝申し上げます。

福岡県船原古墳出土馬具の鉛同位体比分析

－ガラス装飾付辻金具・雲珠を中心に－

Lead isotopic analysis of harnesses excavated from Funabaru tumulus, Fukuoka -Focus on harnesses with glass decoration-

2 日目

9月11日

第1会場

第2会場

- 村串 まどか (筑波大学・東京電機大学)、齋藤 努 (国立歴史民俗博物館)、
西 幸子 (古賀市教育委員会)、甲斐 孝司 (同左)、岩橋 由季 (同左)
加藤 和歳 (九州歴史資料館)、小林 啓 (同左)、桃崎 祐輔 (福岡大学)
○Madoka MURAKUSHI (University of Tsukuba/Tokyo Denki University),
Tsutomu SAITO (National Museum of Japanese History),
Yukiko NISHI, Kouji KAI, Yuki IWAHASHI (Koga City Board of Education),
Kazutoshi KATO, Akira KOBAYASHI (Kyushu Historical Museum),
Yusuke MOMOSAKI (Fukuoka University)

1. はじめに

福岡県古賀市・船原古墳 (6世紀末～7世紀初頭) からは多くの副葬品が出土しており、国際性や特異性などにおいて大変注目されている。中でも1号土坑より出土したガラス装飾付辻金具・雲珠 (例: 図1) は日本国内で発見例はなく、朝鮮半島との関係性が考えられている。この装飾に用いられたガラスは、九州歴史資料館の調査によって鉛ガラスであることが明らかになっている。鉛ガラスは、朝鮮半島では7世紀初頭、日本でも7世紀後半頃には一次生産が行われていたと考えられている。また、近隣の福津市・宮地嶽古墳 (7世紀前半) から出土した鉛ガラスは、鉛同位体比分析の結果から朝鮮半島産原料の利用が考えられている。このような東アジアにおける鉛ガラスの動向から、ガラス装飾付辻金具・雲珠は古墳時代後期におけるガラスや馬具の生産および系譜に関する重要な情報を持つ資料であるといえる。本研究では、船原古墳出土資料の歴史的背景を探ることを目的に、辻金具と雲珠、そして共伴した馬具を対象に、鉛同位体比分析による原料の産地推定を行った。



図1 ガラス装飾付辻金具

2. 分析対象

対象としたのは、船原古墳1号土坑から出土したガラス装飾付辻金具・雲珠と、共伴した鳳凰文心葉形杏葉および馬鈴 (大型鈴、中型鈴) である。蛍光X線分析によって組成を把握したうえで分析対象資料を選定し、表1に示した、ガラス資料5点、金属資料7点の鉛同位体比分析を行った。

表1 対象資料一覧

資料No.	資料名	材質
22	ガラス装飾付辻金具	ガラス
23	ガラス装飾付辻金具	ガラス
31	ガラス装飾付辻金具	ガラス
72・78	ガラス装飾付辻金具	ガラス
139	ガラス装飾付雲珠	ガラス
139	ガラス装飾付辻金具	金属
150	大型鈴	金属
130	大型鈴	金属
127	中型鈴A (鑄造) ①	金属
127	中型鈴A (鑄造) ②	金属
120	中型鈴A (鑄造)	金属
148	鳳凰文心葉形杏葉	金属

3. 分析結果

鉛同位体比分析の結果、ガラス資料については図2に示したように、5点がそれぞれ近い値を示し、原料採取地が共通している可能性が考えられる。また、前出の宮地嶽古墳、朝鮮半島・百済の益山王宮里遺跡や弥勒寺址から出土したガラスおよびガラス生産関連遺物の鉛同位体比と同様の領域に位置した。これらの原料採取地は朝鮮半島と考えられており、船原古墳の馬具装飾に使われたガラスも朝鮮半島産原料が用いられた可能性が考えられる。

金属資料7点については図3に示したように、ガラス装飾付辻金具と鳳凰文心葉形杏葉はA領域（華北の鉛）に、大型鈴と中型鈴はB領域（華中～華南産の鉛）の近くに位置した。ガラス装飾付辻金具と鳳凰文心葉形杏葉は華北産の原料を使用していた可能性が示されたと同時に、この2点は同一アセンブリの馬具であることから、ともに近い値を示したことは興味深い。一方、大型鈴と中型鈴のデータが位置する領域は、原料採取地の判断が難しいところであり、これについては考古学的な解釈を踏まえて考察を進めていく必要がある。今後は船原古墳の性格や当時の社会動向なども総合的に踏まえ、さらに分析結果の解釈・検討を深めていきたい。

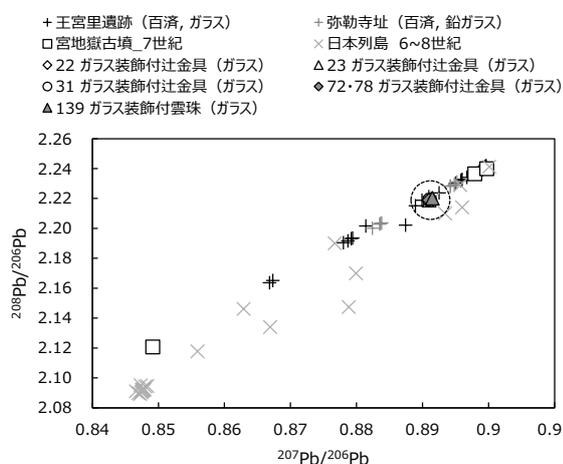


図2 ガラス資料の鉛同位体比分析結果

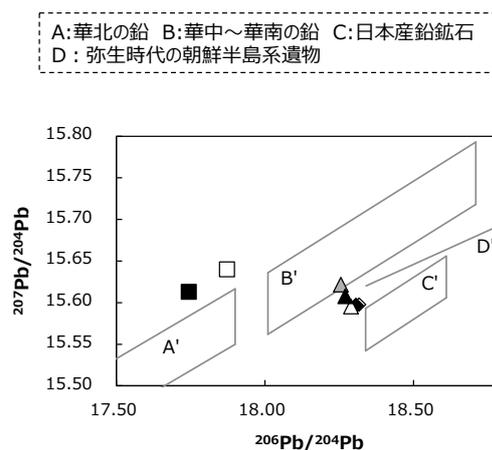
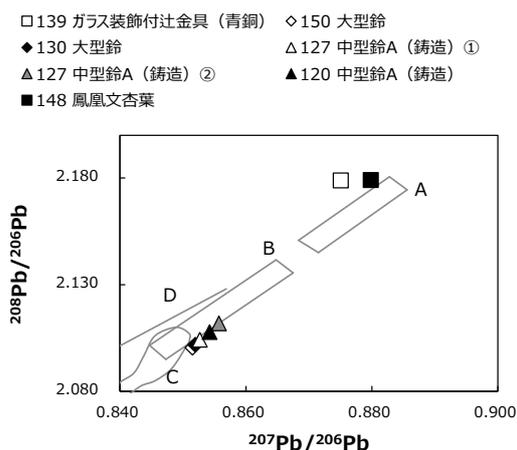


図3 金属資料の鉛同位体比分析結果（左：A式図 右：B式図）

謝辞 本研究は令和2年度、令和3年度国立歴史民俗博物館共同利用型共同研究（分析機器・設備利用型）の支援により実施されました。

壁画朱の硫黄同位体比分析のための石膏除去の試み

Experimental study to remove gypsum for the measurement of sulfur isotope ratio of mural vermilion

○神谷嘉美 (金沢大学)、飯塚義之 (同左)、高橋和也 (理研)、南 武志 (奈良医大)

○Yoshimi Kamiya, Yoshiyuki Iizuka (Kanazawa Univ.), Kazuya Takahashi (RIKEN), Takeshi Minami (Nara Med. Univ.)

2 日目

9月11日

第1会場

第2会場

1. はじめに

無機金属化合物である朱 (硫化水銀 HgS) は、その鮮やかな赤色と産地が限定されている貴重さゆえ、洋の東西を問わず古代より貴重な赤色顔料として使用されてきた。朱を構成する硫黄同位体比分析から産地の推定が可能であるが、従来法での分析には約 10 mg の朱が必要とされていたため、分析を断念することも多かった。この課題解決のため、ごくわずかな朱 (およそ 5 μg) で硫黄同位体比が分析できる超微量硫黄同位体比分析システムを開発した。

本方法は硫黄を含まない特殊仕様の粘着テープを使い、対象物に傷を与えずわずかな朱の採取を行うため土器や石器などの表面に付着している朱の分析へ応用も可能である。本報告ではローマ帝国時代のヨーロッパで壁画に広く用いられていた朱の分析例を紹介する。朱鉦山はヨーロッパにおいても限定的であるが、壁画に使用されていた朱の産地推定は進んではいない。分析の対象物は壁画の断片で壁画表面から分析試料、朱を採取する。しかしこの時、朱と共に壁土も採取してしまうことに注意しなければならない。多くの壁土には石膏 (硫酸カルシウム) が用いられており、石膏中の硫黄成分は朱の硫黄同位体分析を行う上で妨害となる。特に、超微量分析では混在する石膏の除去が大きな課題である。そこで硫黄同位体比分析を行うに際して、サンプルから石膏を完全に除去する方法について検討したのでここに報告する。

2. 方法と測定試料

基礎実験 ①石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、②焼石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)、③無水石膏 (Ⅲ型無水塩、 CaSO_4)、④硬石膏 (Ⅱ型無水塩、 CaSO_4) の石膏類 4 種を用いて、作成した溶解液による石膏除去効果の条件を見出す実験を行った。まず試薬 (カルシウムキレート剤: 後述) 0.5M-EDTA \cdot Na_2 を 1M-Tris-HCl 緩衝液に溶解し、pH 6.77、pH 8.35、pH 8.89 と調整、これらに 4 種類の石膏に加えて溶解状態を視認した。次に 0.5M-EDTA \cdot Na_2 を 1M-Tris-HCl 緩衝液に溶解して pH を 8.89 としたのちに 4 種類の石膏を加え、その後メンブランフィルターでろ過した。フィルターを乾燥させた後、蛍光 X 線エネルギー分散分光法 (ED-XRF) を用いてフィルター表面の残渣の定性分析を行い、カルシウムの検出を試みた。

分析対象 朱が用いられている壁画断片は、スペイン・カタルーニャ州 Badalona のローマ帝国時代の遺跡より採取したものである。まず壁画断片よりカッターナイフで朱を削り取り、0.5M-EDTA \cdot Na_2 /1M-Tris-HCl 緩衝液 (pH 8.89) で懸濁させ、溶液をメンブランフィルターで

ろ過した。フィルター上の残渣はED-XRFによって定性分析を行った。その後、赤色部分を粘着テープで採取し、超微量硫黄同位体分析システムを用いて硫黄同位体比を測定した。

3. 結果および考察

カルシウムキレート剤として知られる化合物には、EDTA (Ethylenediamine tetra acetic acid), EGTA (*O, O'*-Bis(2-aminoethyl)ethyleneglycol-*N, N, N', N'*-tetra acetic acid), および BAPTA (*O, O'*-Bis(2-aminophenyl)ethyleneglycol-*N, N, N', N'*-tetraacetic acid, tetra potassium salt, hydrate)が知られている。この中で単価が安く多量に使用でき、アルカリ性領域で使用できることを条件としてEDTAを選択した。ただ酸性領域では朱が溶解する可能性がある。まず0.5M-EDTA・Na₂を1M-Tris-HClに溶解、pH 6.77 (弱酸性)としてから、4種類の石膏を各20 mg/mlになるように加えた。石膏と焼石膏を加えると透明な溶液が得られたが、無水石膏と硬石膏の場合はわずかに混濁が認められた。次に0.5M-EDTA・Na₂/1M-Tris-HCl (pH 8.35)を加えたところ、石膏と硬石膏では50 mg/mlまで、焼石膏と無水石膏では40 mg/mlまで透明な液体を得ることができた。これらに基づき4種類の石膏に0.5M-EDTA・Na₂/1M-Tris-HCl (pH 8.89)を加え、0.5 mg/ml~5 mg/mlの溶液を作成し、メンブランフィルターでろ過した。これらの4種類の実験フィルターからカルシウムは検出されず、石膏の除去が確認できた。

この条件を用いて、壁画断片より採取した赤色顔料部分を0.5M-EDTA・Na₂/1M-Tris-HCl (pH 8.89)液に混和させ、ろ過した。結果、フィルターからはカルシウムが検出されず、朱の成分である水銀と硫黄が検出された。このことから、本溶解液を用いることで、壁画採取試料から朱だけの抽出が可能であると判断した。また、標準物質の朱の硫黄同位体比を測定した結果と、この標準物質に石膏を混和して溶解液処理した後の硫黄同位体比を比較したところ、両者に違いは認められなかった。この結果は、溶解液の石膏溶解の過程で、朱に含まれる硫黄の同位体分別は発生しないことを示唆する。さらに壁画の朱について、本溶解液の使用前後の硫黄同位体比を比較した。実体顕微鏡下で朱と思われる粒だけを微量採取したときの同位体比は+10.45‰だった。対して、本溶解液で処理したフィルター上の赤色残渣の同位体比は+8.65‰であった。この結果の違いは、石膏の除去の効果を明確に示している。スペインの古い朱鉱山としてAlmaden 鉱山(7.75±2.27 ‰)とRiano 鉱山(20.45±2.05 ‰)が知られている。本実験で得た結果から、Badalonaの壁画に用いられた朱はAlmaden 鉱山産の可能性が推測される。

4. まとめ

壁画に用いられた朱の硫黄同位体比を分析する場合、壁土に含まれる石膏中の硫黄が朱の硫黄同位体比の分析に妨害を与える可能性がある。本実験によって0.5M-EDTA・Na₂/1M-Tris-HCl (pH 8.89)液を用い、サンプルから石膏を除去したのちに朱を分析することで、より確からしい結果が得られることを確認した。

【謝辞】 Badalonaの壁画断片は、バルセロナ大学Evanthia Tsantini博士のご尽力により提供いただきました。また、本研究はJSPS 科研費(学術変革領域研究(A)20H05817)の助成を受けたものです。

猪ノ鼻(1)遺跡出土玉類等のXRF、ESR、XRDによる非破壊分析

Examination on the stone beads excavated from the Inohana No.1 Site by using XRF, ESR, XRD

○藁科哲男（遺物材料研究所）、田村朋美（独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所）、
木村高（青森県埋蔵文化財調査センター）

○Tetsuo WARASHINA (Institute for artifacts and materials), Tomomi TAMURA

(Nara National Research Institute for Cultural Prosperities.), Takashi KIMURA (Aomori Prefectural
Archeological Artifacts Research Center)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

青森県猪ノ鼻（1）遺跡では古墳時代前期の土壙墓から副葬品として各種の玉類が出土している。本稿では、これらの土壙墓から出土した玉類などに対して、従来から実施している蛍光 X 線分析（XRF）および ESR 分析による石材産地、遺物群同定に X 線回折分析（XRD）を加えた考察をおこなった。

2. 資料と方法

分析資料は、SK04 土坑墓から出土した管玉 9 点（T-01～08、T-11）および算盤玉（T-10）1 点、ならびに SK07 土坑墓から出土した石製品 1 点（SS-01）の計 11 点である。これらの資料を対象に蛍光 X 線分析と ESR 分析を実施し、個々の元素組成と ESR の結果を地質学的産地および原産地遺跡や各地の遺跡から出土した玉類と玉材から作成した遺物群と比較した。さらに、これらの玉類と石製品を構成する鉱物（結晶）を同定するため、X 線回折分析を実施した。測定は非破壊で実施した。

3. 結果と考察

蛍光 X 線分析で管玉 T-01 の分析部分 A は新徳村 B 遺物群（26%）に、分析部分 B は滝ヶ原-2（17%）に同定された。また、ESR 分析も両遺物群と矛盾しない。管玉 T-01 管玉は新徳村 B 遺物群、滝ヶ原-2 群のどちらと関係があるかを推測すると、分析した佐渡の遺物の中で新徳村 B 遺物群は 13.8% が使用され、また、今まで分析した遺物の中で滝ヶ原-2 群に同定される碧玉製遺物は希であることから、古代人が多用した新徳村 B 遺物群の可能性が高いと思われる。

管玉 T-08 は信頼限界の 5% を複数の遺物群に同定された中で、会津坂下 N 石材群の石材で作られた玉類が猪ノ鼻（1）遺跡に伝搬した可能性を推測した。

管玉 T-05 は蛍光 X 線分析で定性的に刈羽村西谷-D 遺物群に（4%）で同定され、ESR 信号（III）も崩れ猿八 A 形で一致していて、定性的に刈羽村西谷-D 遺物群の可能性が高いと思われる。比較した原石、遺物群（513 個）の何処の群にも確率 5% 以上で一致しなかった管玉 T-02、T-05、T-06、T-07 は、猪ノ鼻 02、04、05、06、07 の管玉諸群および管玉 T-03 と算盤玉 SK04 T-10 は同じ成分が証明されたので、両者から猪ノ鼻 03 管玉 09 算盤玉群をそれぞれ作成し、将来他の遺跡で同じ組成の遺物が使用されていたか、また新たに見つかった原石産地の原石に一致するか判定出来るようにした。

猪ノ鼻（1）遺跡の T-11 管玉、SS-01 円柱石製品は、昼飯大塚 C 遺物群、鬼塚 A 滑石材群と同定され、和歌山市鳩羽山周辺原石の一部に鬼塚 A 滑石材群が確認され、間接的ではあるが、T-11 管玉、SS-01 円柱石製品は鳩羽山周辺の原石の可能性を推測した。

管玉 T-01 は新徳村 B 遺物群、滝ヶ原-2 群に、T-05 は刈羽村西谷-D 遺物群に、T-08 は会津坂下 N 石材群にそれぞれ同定された。これら 3 個の管玉の蛍光 X 線分析の元素比、比重と ESR 分析の鉱物イオンの信号が同じで、同じ岩石の石材の使用の可能性を推測した。これら 3 個の管玉の X 線回折分析の結果は、石英、サニディンの鉱物組成の岩石と同定され、蛍光 X 線分析、比重、ESR 分析で岩石まで特定できなかったが、肉眼観察で碧玉玉材と呼んでいる岩石の鉱物組成が明らかになった。同じ岩石でありながら蛍光 X 線分析の結果で異なった遺物群に同定される理由は、一つの岩石に含有される微量元素の分布が不均一で、今回分析した管玉と一致した遺物群

表1 猪ノ鼻遺跡出土管玉の産地、遺物群同定結果

遺物番号	遺物器種	分析番号	ホテリングT ² 検定(確率)	ESR信号形	総合判定	比重
SK04 T-01	管玉	131201-A	新穂村B遺物群(26%),石川・菩提-1(0.6%)	崩れ猿八A形	新穂村B遺物群	2.485
		131201-B	滝ヶ原-2(17%),新穂村B遺物群(1%),新穂村A遺物群(0.2%),石川・菩提-1(0.2%)			
SK04 T-02	管玉	131202	猪ノ鼻02管玉群(75%)	遺物過大	猪ノ鼻02管玉群	1.957
SK04 T-04	管玉	131204	猪ノ鼻04管玉群(69%)	不明	猪ノ鼻04管玉群	1.959
SK04 T-05	管玉	131205	猪ノ鼻05管玉群(29%),刈羽村西谷-D遺物群(4%)	崩れ猿八A形	定性的に刈羽村西谷-D遺物群	2.561
SK04 T-06	管玉	131206	猪ノ鼻06管玉群(20%),岐阜・土岐(2%),浦項碧玉A群(2%),山形-玉作2遺物群(0.8%)	崩れ猿八A形	猪ノ鼻06管玉群	2.59
SK04 T-07	管玉	131207	猪ノ鼻07管玉群(22%),浦項碧玉A群(0.3%)	メノウに多い形	猪ノ鼻07管玉群	2.561
SK04 T-08	管玉	131208	会津坂下N石材群(36%),長塚1遺物群(21%),胎内市・城の山-A遺物群(9%)	崩れ猿八A形	会津坂下N石材群,長塚1遺物群,城の山-A遺物群	2.525

表2 猪ノ鼻遺跡出土管玉、算盤玉の産地、遺物群同定結果

遺物番号	遺物器種	分析番号	ホテリングT ² 検定(確率)	ESR信号形	比重
SK04 T-03	管玉	131203	猪ノ鼻03管玉09算盤玉群(87%),猪ノ鼻-09算盤玉群(73%),猪ノ鼻-03管玉群(57%)	崩れ猿八A形	2.736
SK04 T-10	算盤玉	131209	猪ノ鼻03管玉09算盤玉群(86%),猪ノ鼻-09算盤玉群(46%),猪ノ鼻-03管玉群(27%)	遺物過大	2.652

表3 猪ノ鼻遺跡出土滑石管玉、円柱石製品の産地、遺物群同定結果

遺物番号	遺物器種	分析番号	ホテリングのT ² 検定結果(%)	ESR信号波形	比重	総合判定	関連遺物群のESR信号波形	地質学的原産地	考古学的原産地
SK04 T-11	管玉	131210	昼飯大塚C遺物(17%),鬼塚A滑石材群(9%),韓国・進永A遺物群(0.1%)	単6形	2.683	鬼塚A滑石材群,昼飯大塚C遺物群			
SK07 SS-01	円柱(石製品)	131211	鬼塚A滑石材群(45%),昼飯大塚C遺物(6%),金井東裏127099勾玉群(3%),上丹生屋敷山原石片群(0.5%),韓国・進永A遺物群(0.1%)	単6形	2.69	鬼塚A滑石材群,昼飯大塚C遺物群	鬼塚A滑石材群は単6形	鳩羽山周辺(?)	調査中

和歌山県鳩羽山周辺地域30地点から採取した原石130個の原石を表2の鳩羽山周辺A、B滑石群以外の原石・遺物群と比較した結果は昼飯大塚A遺物群(34個)、昼飯大塚C遺物群(3個)、吉田A遺物群(5個)、鬼塚A遺物群(3個)、寺田Cab遺物群(1個)、韓国・進永0405遺物群(1個)、不明(90個)に信頼限界5%以上の確率(同時に複数群に同定された群含む)で同定された。

鳩羽山周辺(?): 鬼塚A滑石材群,昼飯大塚C遺物群は鳩羽山周辺地域の原石に一致する原石が見られるために、猪ノ鼻遺跡の管玉なども間接的に鳩羽山地域の原石の可能性を推測した。しかし、管玉などに一致する元素組成の原石が鳩羽山地域に存在することを確かめたわけではない。

は同じ岩石の同じ部分を使用して管玉が製作され、同じ玉作遺跡で作られた可能性が高いと推測した。

管玉 T-02、T-04 は比重が約 1.96 と同じで緑色凝灰岩と推測したが、元素組成は異なり、猪ノ鼻 02、04 の遺物群を作った。X線回折分析の結果は、アルミノ珪酸塩鉱物を含む同じ種類の岩石と判明した。また、T-06、T-07 は比重が約 2.6 で、K/Si 比が小さく K 元素を含む鉱物が少ない種類の岩石と思われ、X線回折分析で主成分が石英鉱物の岩石と同定された。これら 4 個の管玉は蛍光 X 線分析で、それぞれの岩石に含有する不均一微量成分の異なった部分から作られた遺物群の可能性を推測した。ESR 分析から T-06 の管玉は碧玉に近く、T-07 はメノウ系の可能性を推測した。

T-03、T-10 で作った猪ノ鼻 03 管玉 09 算盤玉群の比重は約 2.7 で碧玉より重く、X線回折分析で石英・セラドナイト岩と判明し、管玉、算盤玉は同じ岩石で、製品は異なるが同じ玉作遺跡で作られた可能性も推測できる。

猪ノ鼻遺跡の T-11、管玉、SS-01、円柱石製品は蛍光 X 線分析で昼飯大塚 C 遺物群、鬼塚 A 滑石材群と同定され、両遺物が ESR 分析で Mg 元素を置換した Mn イオンの同じ信号形で、同じ岩石を推測され X 線回折分析でクリノクロア岩と特定された。間接的に、この両遺物を鳩羽山周辺の原石と推測しているが、確定するには、X 線回折で、昼飯大塚 C 遺物群、鬼塚 A 滑石材群および原石をクリノクロア岩であることを証明する必要があると思われる。

【参考文献】田村朋美・藁科哲男・木村高 2022 「猪ノ鼻遺跡(1)遺跡出土玉類の自然科学的分析『青森県埋蔵文化財調査センター研究紀要』第 27 号、17-26 頁。

表4 XRD同定結果一覧

遺物番号	XRD同定結果	石材名*	分類	備考
SK04 T-01	石英(SiO ₂),サニディン(K(AlSi ₃ O ₈))または生長石(K(Al,Fe)Si ₂ O ₆)	碧玉	第三	T-5,T-8と類似
SK04 T-02	石英(SiO ₂),アルミノケイ酸塩(CaO・Al ₂ O ₃ ・zSiO ₂ ・xH ₂ O)	緑色凝灰岩	第四	T-4と類似
SK04 T-03	石英(SiO ₂),セラドナイト(K(Mg,Fe,Al) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀)	碧玉	第二	T-10と類似
SK04 T-04	アルミノケイ酸塩(CaO・Al ₂ O ₃ ・zSiO ₂ ・xH ₂ O)	緑色凝灰岩	第四	T-2と類似
SK04 T-05	石英(SiO ₂),サニディン(K(AlSi ₃ O ₈))または生長石(K(Al,Fe)Si ₂ O ₆)	碧玉	第三	T-1,T-8と類似
SK04 T-06	石英(SiO ₂)	碧玉	第一	T-7と類似
SK04 T-07	石英(SiO ₂)	碧玉	第一	T-6と類似
SK04 T-08	石英(SiO ₂),サニディン(K(AlSi ₃ O ₈))	碧玉	第三	T-1,T-5と類似
SK04 T-10	石英(SiO ₂),セラドナイト(K(Mg,Fe,Al) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂)	碧玉	第二	T-3と類似
SK04 T-11	クリノクロア(斜緑泥石)(Mg ₅ Al(Si ₂ Al)O ₁₀ (OH) ₂)	滑石	第五	SS-01と類似
SK07 SS-01	クリノクロア(斜緑泥石)(Mg _{11,148} Fe _{0,852} (Si _{4,99} Al _{3,01})O ₂₀ (OH) ₁₆)	滑石	第五	T-11と類似

*T-01,T-05,T-08は緑色凝灰岩の可能性もあり

ブハラオアシス出土のガラス製遺物の Sr 同位体比分析

Sr isotope analysis of glass artifacts from Bukhara Oasis

○田村朋美 (奈良文化財研究所)、新免歳靖 (東京学芸大学)、遠藤綾乃 (東京学芸大学)、
細川貴子 (独立研究者)、竹田多麻子 (横浜ユーラシア文化館)、二宮修治 (東京学芸大学)、
Rocco Rante (ルーブル美術館)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

○Tomomi TAMURA(Nara National Research Institute for Cultural Properties),
Toshiyasu SHINMEN (Tokyo Gakugei University), Ayano ENDO (Tokyo Gakugei University),
Takako HOSOKAWA (Independent Researcher), Tamako TAKEDA (Yokohama Museum of Eurasian
Cultures), Syuji NINOMIYA (Tokyo Gakugei University), Rocco RANTE (Louvre Museum)

1. 背景と目的

ブハラオアシスはウズベキスタンの南西部に位置し、アライ山脈からアムダリヤ川まで東西方向に流れるザラフシャン川の下流に広がる。この地域はトランスオキシアナとしても知られ、イスラームの侵略以前から、シルクロードの要所のひとつとして発展した。

ブハラオアシス内の遺跡に関しては、ランテ・ロッコ氏 (Rante Rocco) とミルザフメドフ・ジャマール氏 (Mirzaakhmedov Djamal) が率いる The Franco-Uzbek Archaeological Mission in the Oasis of Bukhara (MAFOUB) が、2009 年から研究プロジェクトを実施している。2014 年からは、ガラス製品に着目し、年代学、類型学、化学分析に基づいた考古学研究を行っている。中央アジアでのガラス製造と流通については、ブハラオアシスにおけるガラス製造の実態の解明が不可欠であり、考古学および分析化学的アプローチによるブハラオアシスにおけるガラス生産の可能性を検討している。

これらの研究の一環として、本研究ではブハラオアシスから出土したガラスの Sr 同位体比分析を実施し、中央アジア地域でのガラス生産に関する考察を試みた。

2. 資料と方法

本研究で対象とした資料は、ブハラオアシスのパイケンド遺跡から出土したガラス塊 (A04、A05)、二重のポンテ痕の底部をもつガラス容器片 (A16) と一般的なポンテ痕のあるガラス容器片 (A11)、そしてイラン以西から輸入されたとみられるカットガラス片 (A08) である。いずれも植物灰ガラス製である。

表 1 ブハラオアシス出土ガラスの Sr 同位体比

遺跡	番号	色	器種	部位	備考	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	StdErr
パイケンド	A04	緑色 (自然発色)	スラグ	—		0.71236	0.000008
パイケンド	A05	緑色 (自然発色)	スラグ	—		0.71047	0.000009
パイケンド	A11	緑色 (自然発色)	瓶?	底部	ポンテ痕	0.71045	0.000009
パイケンド	A16	緑色 (自然発色)	不明	底部	二重ポンテ痕	0.71165	0.000006
パイケンド	A08	無色	瓶?	底部	輸入品か	0.70855	0.000012

これら5点の資料から採取した試験片について、表面の風化層をロータリーバー(タングステンカーバイド製)で除去し、塩酸を用いて超音波洗浄した。さらに、フッ酸、硝酸、過塩素酸で分解したうえで、SrスペックレジンでSrを単離し、MC-ICP-MS(Thermo Scientific製 NEPTUNE plus)を用いて $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を測定した。測定は総合地球環境学研究所にて実施した¹⁾。

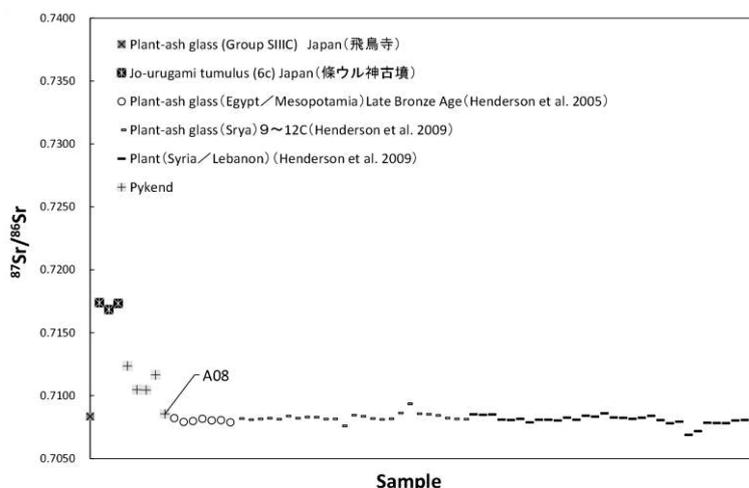


図1 ブハラオアシス(パイケンド)出土ガラスと中東地域出土の植物灰ガラスおよび原料植物のSr同位体比の比較

3. 結果と考察

Sr同位体比分析の結果を表1に示す。シリアなどの中東地域で一般的に出土する植物灰ガラスのSr同位体比は、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7090$ である²⁾³⁾。今回分析した資料のうち、A08のみ中東地域で出土する植物灰ガラスおよび原料植物と類似の同位体比を持つことがわかった(図1)。A08は、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 などの原料にとまなう不純物成分が極めて少ない高品質のガラスで、さらに高MgOで K_2O が少ないという化学組成の特徴からイラン以西からの搬入品である可能性が高いとみられる。さらに、同種の化学組成を持つカット装飾をもつガラス片が出土しており、本資料も同種のガラスである可能性が高い。

一方、A08以外は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が0.7100を超える高いSr同位体比を示した。このような高いSr同位体比は、これまでに知られている中東地域で出土する植物灰ガラスのいずれにも認められない。これらはブハラオアシス特有の二重ポンテ痕を持つガラスやガラス製造を示唆するスラグなどであり、ブハラオアシスやその周辺で生産された可能性が高い点で注目される。今回Sr同位体比分析においても、中東地域で出土する植物灰ガラスとは明らかに異なる結果が得られたことから、ブハラオアシスまたはその周辺でガラスが生産された可能性が高まったといえる。また、仔細に検討すると、これらの資料のなかでもSr同位体比にばらつきが認められる。在地産のガラスとイラン以西から輸入されたガラスとの混合の可能性も検討する必要がある。

以上、本稿は限られたデータからの限定的な考察となったが、技法や化学組成からブハラオアシスやその周辺で生産されたと考えられる資料については中東地域の植物灰ガラスとは異なる高いSr同位体比を持つことが示された。このことは、中央アジア地域でのガラス生産に関する重要な示唆を与えるものである。今後は、分析事例を増やすとともにブハラオアシス以外のトランスオキシアナ地域についても同様の調査をおこなっていくことで、中央アジアでのガラス生産の実態を明らかにしていくことが可能になると期待される。

- 1) 総合地球環境学研究所の同位体環境学共同研究事業の一環として実施した。
- 2) Henderson, J., Evans, J.A., Sloane, H.J., Leng, M.J., 2005. The use of oxygen, strontium and lead isotopes to provenance ancient glasses in the Middle East. *Journal of Archaeological Science*, 32 (5).
- 3) Henderson, J., Evans, J., Barkoudah, Y. 2009. The Roots of Provenance: Glass, Plants and Isotopes in the Islamic Middle East. *Antiquity*, 83.

ミュオン非破壊分析法による古後藤の目貫の深さ方向分析

Depth profiling of an early Goto family' s hilt ornament by muonic non-destructive analysis

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

○齋藤努 (国立歴史民俗博物館)、反保元伸 (KEK)、土居内翔伍 (同左)、
梅垣いづみ (同左)、三宅康博 (同左)

○SAITO Tsutomu (National Museum of Japanese History), TAMPO Motonobu, DOIUCHI Shogo,
UMEGAKI Izumi, MIYAKE Yasuhiro (KEK)

1. はじめに

江戸時代の小判は金銀合金で作られており、発行時期によって金の含有率が異なっていたが、色付という表面処理を施すことで、表層部のみ、銀を溶かして除き、金濃度を高めていた。これまでの研究で、小判は、金濃度が 84~87% と高い、江戸時代の初期に発行された慶長小判の段階から、色付が施されていることが報告されている。しかし、この技術がどこに由来するものであるのかは明確になっていなかった。

小判を製作していた金座の初代当主である後藤庄三郎光次は、室町時代から彫金を手がけ、江戸時代には大判の製作も請け負った後藤四郎兵衛家の五代後藤徳乗の弟子であり、才覚を認められて徳川家康に仕えた。したがって、後藤四郎兵衛家の初代~五代が手がけた金工品について深さ方向分析を行い、表層部における金の富化が確認できれば、後藤庄三郎光次は、後藤四郎兵衛家において色付の技法を習得した可能性があるということになる。

後藤四郎兵衛家は、室町幕府の時代から御用達彫金師として仕え、織田信長や豊臣秀吉の刀装具も製作した。本研究では、「古後藤」と称される、初代後藤祐乗~三代後藤乗真のいずれか (この時期は無銘なので作風から判断されるが、初代~三代は識別できない場合も多い) が作った金銀製目貫を非破壊で深さ方向分析した結果を報告する。

2. 資料と分析方法

分析した資料は古後藤の「焚木売り図目貫」(図 1; 日本美術刀剣保存協会鑑定書、No. 2003304) である。

茨城県東海村にある J-PARC の MUSE 内に設置されている D ライン D2 エリアで得られる負ミュオンビームを資料に照射し、深さ方向の成分分析を行った。負ミュオンは電

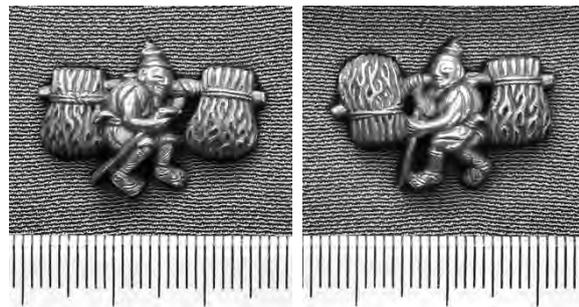


図 1 焚木売り図目貫 (古後藤)

子と同じ電荷をもつが、電子の約 207 倍の質量があるので、資料の深い箇所にある元素に捕獲されると、電子特性 X 線の約 207 倍のエネルギーをもつミュオン特性 X 線が発生し、表層部の元素組成に影響されることなく、その箇所の成分分析ができる。したがって、負ミュオンの運動量を変えていけば、任意の深さから元素特性 X 線が得られ、非破壊で深さ方向の成分分析を行うことが可能となる。分析時は、資料をできるだけ隙間なく接するように並べ、裏側に資料の形に沿って切り抜いたポリプロピレンの板をあてがい、極細のテグスで留めて、負ミュオンビームが垂直にあたるように設置した。資料から発生したミュオン特性 X 線は、6 台のゲルマニウム半導体検出器で測定し、標準試料と比較して数値を算出した上で平均値をとった。

3. 結果

図 2 に分析結果を示す。表層部で金の濃度が高くなっており、もともとの金濃度が約 70% とやや低めのものを、外観上、より金色に近づけていることから、色付が行われていたことがうかがわれる。したがって、後藤四郎兵衛家から金座の後藤庄三郎光次へと色付の技法が受け継がれたと推定してよいであろう。ただし、その層はきわめて浅く、せいぜい $1.5\mu\text{m}$ 程度である。また、データを表面方向に外挿しても、最表層の金濃度は 90% に及ばない。一方、これまでの報告例にある慶長小判の色付の場合、資料にもよるが、深さが $3.4\mu\text{m}$ に達するものもあり、また表層付近では金濃度が 95~98% になっている。これらからみると、本研究の目貫と慶長小判とは、色付そのものの技術レベルに違いがあり、小判の製造時には、より進んだ色付の方法が開発されていた可能性がある。色付技術がある時点から進歩したと推定される事例は、江戸時代の早い段階に発行された小判と遅い段階の小判との間にもみられるので、このようなことがあってもさほど不自然ではない。

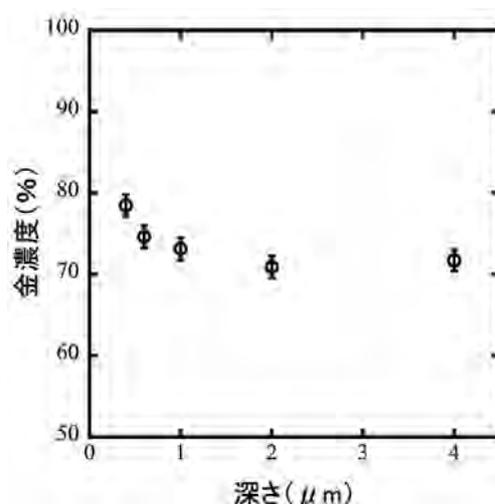


図 2 焚木売り図目貫のデプスプロファイル

4. まとめ

古後藤が製作した目貫を、ミュオン非破壊分析法によって、完全非破壊で深さ方向分析した。その結果、この段階から色付が施されており、金座で発行された小判に対する色付の技法は、後藤四郎兵衛家から引き継がれていたと推測されることがわかった。ただし、色付の深さや表層部における金濃度は、江戸初期の慶長小判に及んでいないため、金座ができた段階で、なんらかの技術的な進歩があった可能性がある。

現在、古後藤の目貫 1 点、三代後藤乗真の目貫 1 点、五代後藤徳乗の目貫 1 点をすでに入手しているので、これらの分析結果が揃えば、より詳細な議論が可能になると期待される。

(謝辞：状態のよい資料の入手にご協力いただいた 銀座 誠友堂 に感謝いたします)

首里城跡継世門北地区出土金製“厭勝銭”の 負ミュオンを用いた非破壊による深さ方向分析

Non-destructive depth profiling analysis using negative muon of Gold coin “Ensho sen” excavated from the Shuri castle site

杵名貴彦（国立科学博物館）・新垣 力（沖縄県教育委員会）

反保元伸（高エネルギー加速器研究機構）・竹下聡史（同左）・梅垣いづみ（同左）

土居内翔伍（同左）・三宅康博（同左）

KUTSUNA Takahiko (National Museum of Nature and Science)

ARAKAKI Tsutomu (Okinawa Prefectural Board of Education)

TAMPO Motonobu, TAKESHITA Soshi, UMEGAKI Izumi, DOIUCHI Shogo, MIYAKE Yasuhiro
(High Energy Accelerator Research Organization)

はじめに

近年、素粒子の一つである負ミュオンを用いて非破壊で深さ方向に対する材質調査が可能となってきた。この方法は、金属の表面処理における濃度変化、錆に覆われた資料中心部の地金成分など、非破壊を原則とする文化財に対し非常に効果的方法である事から注目されている。

今回、中世から近世にかけて琉球王国として栄えた沖縄県の首里城跡継世門北地区から出土した金製“厭勝銭”について調査を実施した。その結果について報告する。

首里城跡継世門北地区出土金製“厭勝銭”について

首里城は那覇市の東側、首里台地と称される標高 150m 前後の琉球石灰岩丘陵上に築かれた沖縄県内最大規模のグスクで、かつて存在した琉球王国の王城である（図 1）。創建年代は不明だが、1427 年建立の『安国山樹華木之記』によると、尚巴志王代（1422～1439 年）に王城としての基本的な構造が確立していた可能性が高く、そして尚真・尚清王代（1477～1555 年）には外郭の拡張や周辺の整備が進み、現在のような姿に近づいていったと推定される。

調査資料は、平成 26 年度に継世門北地区の発掘調査で 12 点出土した（図 2）。同地区検出の拝所「赤田御門の御嶽」中央にある巨石（イビと称する神域）の凹部 2 箇所からまとめて出土し、詳細年代は不明だが 15～16 世紀に位置づけられると思われる。一部が意図的に重ねら



図 1 首里城跡継世門北地区及び“厭勝銭”出土地点

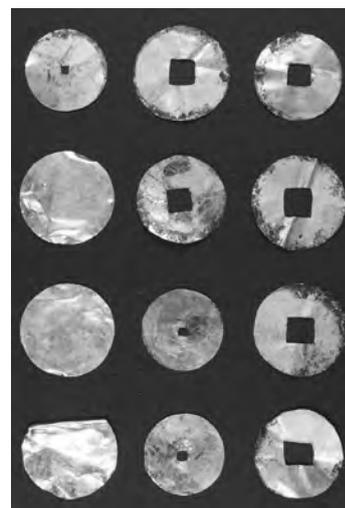


図 2 金製“厭勝銭” 12 点

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

れた状態であり、同資料の出土例が首里城跡・園比屋武御嶽・斎場御嶽といった特定の場所に限定されるため、琉球王国における国家祭祀の様相を考える上で重要な資料と考えられる。

調査方法

厭勝銭 12 点は、発掘調査時に蛍光 X 線分析による非破壊定量分析を実施している。その結果、金濃度は 70wt%程度から 90wt%以上のものまで確認した。そこで今回、70wt%、80wt%、90wt%の各金濃度における表面処理の有無に対する調査を計画した。負ミュオンによる非破壊分析を行うに当たり、各資料が約直径 2cm 程度と小さい一方、負ミュオンビームは縦長楕円状で資料に対して大きいため、複数個を用いて行うこととした。そこで、定量分析で値の近い、①90wt%以上の資料 2 点、②約 86wt%の資料 3 点、③75wt%後半の資料 3 点を、各調査グループとした。

実験は、茨城県東海村 J-PARC の MUSE 内に設置されている D ラインの D2 エリアにおいて負ミュオンのビームを照射し、深さ方向の金銀濃度分析を実施した。

結果及び考察

図 3 に分析結果を示す。①, ②, ③のいずれも表層部に従い金濃度が高くなる傾向が得られ、“色付”がされていることを確認した。金濃度は、①, ②では 4 μm 付近から一定となり、③では 2 μm 付近以降で一定となる傾向であった。最表面の深さ (0.6 μm) における各資料の金濃度は、①約 93wt%、②約 89wt%、③約 82wt%である。一方、一定

となった内部の金濃度をみると、①87wt%程度、②約 82wt%、③約 76wt%であり、いずれも最表面と内部の間で 7wt%程度の金濃度の変化がみられる。

本資料は、発掘調査時の SEM 観察では、すべての表面で表面処理の痕跡と考えられる微細孔を確認している。そのため、未調査の厭勝銭 4 点についても、表面処理の実施が推定される。

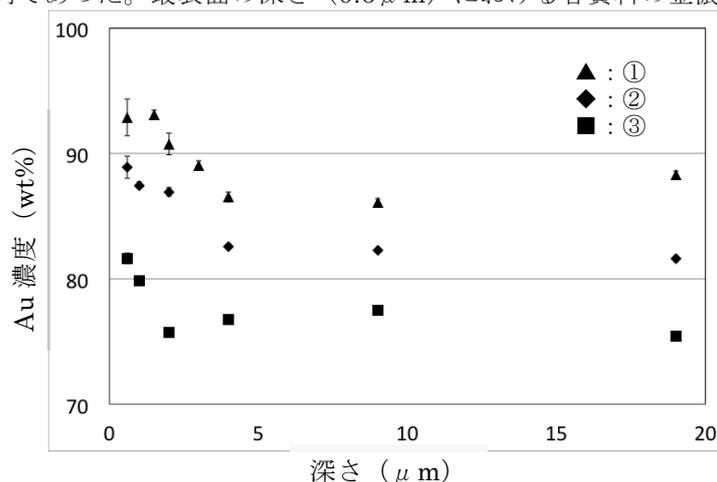


図 3. 負ミュオンによる厭勝銭の深さ方向分析結果

おわりに

J-PARC の負ミュオンを用いた完全非破壊による深さ方向分析により、琉球王国の王城である首里城で祭祀に用いられた金製“厭勝銭”に表面処理“色付”が行われたことを確認した。“色付”は、金濃度が 70wt%から 90wt%まで異なる金濃度を有する“厭勝銭”に施されていた。本資料は、形状や出土例から琉球王国内で制作された可能性が非常に高いと考えられる。

表面処理技術“色付”は、近年本土では戦国期にその実施が明らかとなってきており、日本オリジナルの金工技術とされてきた。しかし、今回本土とは異なる文化を有し、大陸との中継貿易で栄えた中世の琉球王国で“色付”が確認されたことは、琉球王国における金工技術の水準とともに本技術の伝播やその源流などを考える上で、重要な示唆が得られたといえる。

さらなる調査の実施から、“色付”の成立時期や源流を探る手がかりが得られると考える。

参考文献

沖縄県立埋蔵文化財センター (2018) 沖縄県立埋蔵文化財センター調査報告書第 97 集『首里城跡 - 継世門北地区発掘調査報告書-』

*本研究は、JSPS 科研費 JP20K01111 の助成を受けたものである。

出雲市鹿蔵山遺跡出土奈良三彩の胎土分析

Clay analysis of Three-color glazed pottery unearthed from Shikakurayama Site in Izumo city

○小倉頌子(奈良県立橿原考古学研究所)、奥山誠義(同左)、坂本豊治(出雲弥生の森博物館)、高橋照彦(大阪大学)、黒田祐介(出雲市文化財課)

○Shoko KOKURA, Masayoshi OKUYAMA (Archaeological Institute of Kashihara, Nara prefecture), Toyoharu SAKAMOTO (Izumo Yayoinomori Museum), Teruhiko TAKAHASHI (Osaka University), Yusuke KURODA (Izumo city Cultural Property Division)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

出雲市大社町に所在する鹿蔵山遺跡は、出雲大社の南方約 800m の砂丘上に立地する。遺跡の性格は明らかではないが、奈良三彩、多数の墨書土器、腰帯金具などが出土していることから、出雲大社に所縁のある官人に関する施設が周辺に存在したと推測されている。奈良三彩には多口瓶などが含まれ、遺物包含層の複数地点から破片となって出土している。本資料は、出雲地方では初の出土例となる奈良三彩であること、三彩の同器種の類例が全国的にみて多くはないことから、奈良県外の奈良三彩陶器の貴重な出土例として分析対象とした。本研究では、出土破片を可能な限り網羅的に取り上げ、材料学的側面から器種や部位ごとに差異が見出されるかに重点を置き、自然科学的手法による調査を実施した。

2. 分析試料

分析試料は本遺跡より出土した奈良三彩片全 12 点であり、全点の分析を行った。うち 11 点は多口瓶の一部、1 点はミニチュアの火舎の口縁部である。多口瓶は底部・胴部・注口部が確認でき、肉眼観察では同一個体とみなされている。いずれも白色で精良な胎土であり、釉の残存も良好で緑釉・透明釉・褐釉の 3 種類が確認できる。デジタルマイクロスコープ(キーエンス:VHX-970F)による破断面の観察では、釉層厚が底部 0.03~0.06mm、胴部 0.03~0.11mm、注口部 0.02~0.11mm であり、化粧土は確認できなかった。

3. 分析方法

エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 JSX-3100RII(日本電子)を用いた非破壊的な手法により、胎土の元素分析を行った。分析にあたっては、露胎の平滑な部分を分析面とし、表面を土が覆っている場合はこれを除去した。蛍光 X 線分析の測定条件は、管電圧:30kV、管電流:自動調整、照射径:3mm(一部試料は 1mm)、測定時間:300 秒/1ヶ所、測定雰囲気:真空である。1 点につき 2~4 ヶ所測定し、元素含有量は FP 法により定量した。

4. 結果と考察

図 1 は胎土の元素組成を比較した分布図である。凡例は報告書の品名に準拠し、複数箇所の測定値の平均値をとっている。測定条件の違いや装置による誤差を考慮し、各元素の積分強度を SiO₂ の積分強度で除した規格化値を用いた。当初に試みた分析の結果としては、多口瓶のうち 1 点は Rb₂O, SrO, ZrO₂ が特に多いという特徴が見られた。全体的に胎土組成にばらつきがあるものの、上記の結果から、既報告の 2 個体の他に別個体が存在する可能性が考えられた。一方で、火舎は ZrO₂ がやや多いものの(図 1-b)、他元素では多口瓶との差異が明瞭ではなかったことから、同一時に調整された陶土を用いていたことも十分に想定される。

胎土組成のばらつきについては、多口瓶の製法の特徴から、乾燥工程をはさんで整形されるため、器体の部位により差異が生じる可能性がある。そのため、全測定箇所を部位ごとに分け、必要に応じて追加分析を行い個別に検証した。その結果、底部の高台部分では CaO が特徴的に多く、 K_2O もやや多いことが判明した（図 2-a）。その他の元素では、胴部では Al_2O_3 がやや少ない傾向にあるものの（図 2-b）、部位の違いによる有意差は認められなかった。以上より、複数個体の存在は否定しきれないが、胎土組成にばらつきがあり、少なくとも高台部分については種類の異なる粘土を使用した可能性が考えられる。

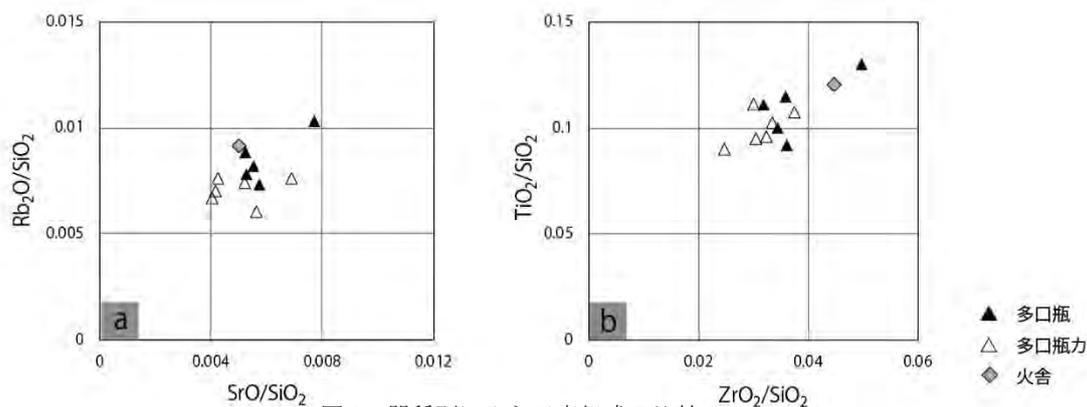


図 1. 器種別にみた元素組成の比較

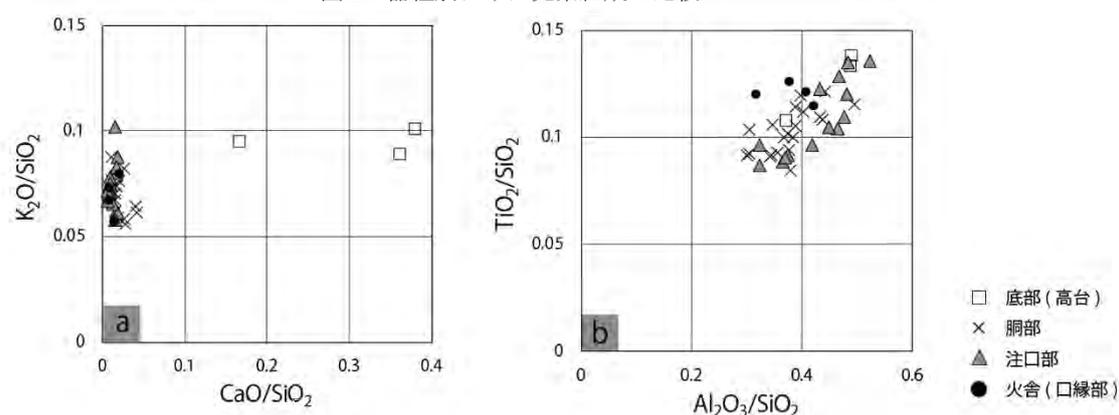


図 2. 部位別にみた元素組成の比較

5. まとめ

鹿蔵山遺跡より出土した奈良三彩の胎土分析を行ったところ、多口瓶の胎土の元素組成にばらつきが見られた。このことから、既報告では 2 個体分とされているが、他にも別個体が存在する可能性が示唆される。ただし、破片は重複部位による複数個体の確認がないこと、肉眼および顕微鏡観察において胎土の特徴に差異がなかったことから、同一個体内での胎土組成のばらつきがこの資料の特徴である可能性も考えられる。今後は、胎土の微量重元素分析、微細構造の観察などの他、他の資料を用いて同一器種内での胎土組成のばらつき程度を検証する必要がある。

謝辞 本研究は科学研究費補助金（JSPS 科研費）21H04369 の一部である。

〈参考文献〉

- ・石原聡・露梨靖子・高橋照彦・渡辺正巳・古野毅・今西寿光編著 2005 『鹿蔵山遺跡-大社町立大社小学校改築事業に伴う発掘調査報告書-』大社町教育委員会
- ・小倉頌子・奥山誠義・河崎衣美・大西貴夫・山田隆文・小栗明彦・杉山真由美 2021 「蛍光 X 線分析法を用いた奈良県内出土三彩陶器および三彩瓦の胎土分析」『文化財科学』第 83 号 日本文化財科学会

矢本横穴出土鍔帯の自然科学分析

An analysis of the waist belt excavated from the Yamoto tunnel tombs.

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

○山口繁生（元興寺文化財研究所）、山岡奈美恵（同左）、塚本敏夫（同左）、植田直見（同左）、中沢隆（奈良女子大学）、菅原弘樹（奥松島縄文村歴史資料館）

○Shigeo YAMAGUCHI, Namie YAMAOKA, Toshio TSUKAMOTO, Naomi UEDA (Gangoji Institute for Research of Cultural Property), Takashi NAKAZAWA (Nara Women's University), Hiroki SUGAWARA (Historical Museum of Jomon Village OkuMatsushima)

1. はじめに

矢本横穴は宮城県東松島市に位置し、飛鳥時代中頃から平安時代初めにかけて築かれた横穴墓である。北東 4.5km には牡鹿柵または牡鹿郡家に推定される赤井官衙遺跡があり、ここに出仕した官人およびその一族の墓域であったと考えられている。2014 年の調査により一部革帯の残る鍔帯金具一式が出土した(図 1)。同じ墓より出土した土器や人骨の年代測定より、7 世紀後半から 8 世紀前半頃の遺物と考えられる。これまでの出土例の中で最も原形をとどめており、鍔帯製作技法を知る上で重要な資料である。本報告では、鍔帯の材質、および構造の調査として行った顕微鏡観察、X 線 CT 撮影 (CT)、赤外分光分析 (FTIR)、蛍光 X 線分析 (XRF)、タンパク質分析で得られた成果について報告を行う。



図 1 矢本横穴出土鍔帯（保存処理後）

2. 分析方法

微小部の観察には実体顕微鏡「MZ16」「M205C」(Leica Microsystems)を用いた。CT による断面観察には CT 装置「TOSCANER-32300 FD」(東芝 IT コントロールシステム)、および CT データ解析ソフト「VGSTUDIO MAX Ver. 3.2.3」(Volume Graphics)を用いた。帯金具塗膜の分析には赤外分光分析装置「Spectrum Two」(PerkinElmer)を、帯金具本体の分析には蛍光 X 線分析装置「EA6000VX」(日立ハイテクサイエンス)を用いた。また、革帯の原料皮の動物種を同定するために行ったタンパク質分析では、採取試料をプロテアーゼ処理し「Finnigan LTQ-XL リニアイオントラップ型質量分析装置」(Thermo Fisher Scientific)を用いて質量分析を行い、質量分析結果とアミノ酸配列データベース「UniProt」のマッピングから動物種を同定した。

3. 結果および考察

帯金具の材質および構造

帯金具の表面に観察された褐色塗膜から試料を採取し FTIR 測定を行った結果、漆に特徴的なピークを持つ IR スペクトルが得られた。また、金具本体は地金露出箇所において XRF 測定を行い、主たる元素として銅、鉛が検出された。よって、帯金具は銅製で表面に漆が塗布されていたと考えられた。なお、漆は金属に対する付着性が悪いため、焼付漆の技法が用いられたと推定される。従って、製作当時の帯金具表面は黒色であった可能性が考えられる。

CT による断面観察から帯金具は鋳造品と考えられた。また、一鑄で表金具裏側から鑄出された鋌脚が革帯・裏金具を貫通し、帯の裏面でかしまられていることが確認された。

革帯の材質および構造

革帯表面の顕微鏡観察において、漆塗りの痕跡は確認されなかった。ただし、銀面が観察されていないため、表面の一層が失われている可能性は考えられる。タンパク質分析においては、採取試料から調製したペプチドのアミノ酸配列がウシ (*Bos taurus*) コラーゲンのアミノ酸配列と一致した。よって、革帯は牛皮製と考えられた。また、資料ケース内で採取した革帯の縫製に用いたと考えられる糸の断面観察を行った結果、絹糸に特徴的な丸みを帯びた三角形の繊維断面が観察された。よって、絹糸を用いて縫製されたと考えられた。

縫製構造に関して、断面観察像から 3 本の縫製糸が用いられていることが確認された(図 2 - a ~ c)。また、顕微鏡観察および断面観察において、糸が外側から見えないように縫製されていることが確認された。これらの結果より、次の縫製順序①②が推定された。①横長の革の上下真ん中より少し下で裏側へ折り返し、折り返した内側で長軸方向と平行に 2 本の糸で縫い留める(図 2, 3 - a, b)。この際、順序は a → b の順で行う。また縫製は糸が外側に出ないように行う(図 3 右下)。②上側を裏側へ折り返し、その縁と下側の縁を突合せ、突合せ面を縫い留めて袋状の帯とする(図 2, 3 - c)。

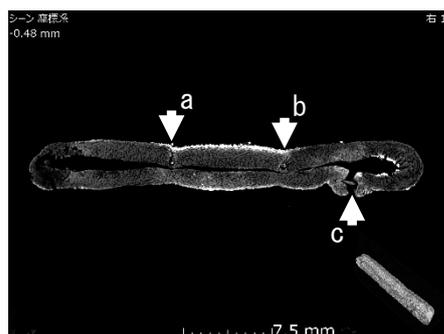


図 2 革帯断面の CT 観察像

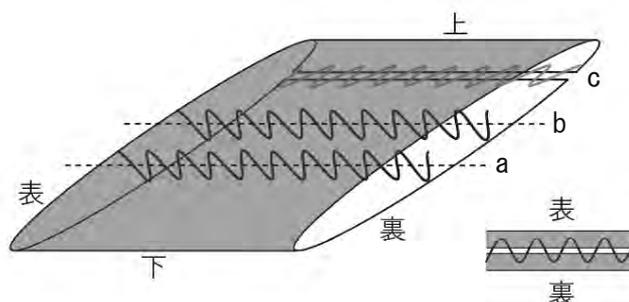


図 3 革帯の縫製構造模式図(右下:縫製 a, b の断面)

4. まとめ

出土した墓の埋葬者に 7 世紀後半から 8 世紀前半頃の地方官人が想定されるため、本資料は衣服令で規定される烏油腰帯の可能性が考えられる。革帯の色に関する情報は得られなかったが、銅製金具表面に漆膜が観察されることも整合的である。製作においては硬い牛革を用いながら、特異な方法で縫製を行うなど手の込んだ作りであることが確認された。

三味塚古墳出土金銅製馬形飾付冠の復元模造品製作

Manufacture of restored gold and copper crowns excavated from Sanmaizuka Tumulus

○塚本敏夫（元興寺文化財研究所）、小村眞理（同左）、山岡奈美恵（同左）、中川泰朗（同左）
忽那敬三（明治大学博物館）、小澤重雄（茨城県立歴史館）

○Toshio TSUKAMOTO, Mari OMURA, Namie YAMAOKA, Yasuo NAKAGAWA (Gangoji Institute for Research of Cultural Property), Keizou KUTSUNA (Meiji University Museum),
Shigeo OZAWA (Ibaraki Prefectural History Museum)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

三味塚古墳は茨城県行方市玉造町沖洲に位置し、5 世紀末から 6 世紀初に築かれた全長 85m の前方後円墳である。箱式石棺を主体部とし、その内外から豊富な副葬品が出土し、2018 年に一括して国の重要文化財に指定された。指定に伴い、2019～2021 年度に保存修理が茨城県教育委員会の委託を受けて元興寺文化財研究所で行われた。

今回、保存修理と並行して、金銅製馬形飾付冠の復元模造品製作を明治大学博物館から依頼された。本報告ではその復元製作の様子と復元過程で得られた若干の知見を報告する。

2. 金銅製馬形飾付冠の特徴と分析

冠の特徴：金銅製馬形飾付冠は型的には広帯二山式冠で、幅広の帯に上縁に二つの山を持ち、中央に 2 つの蝶形金具、上部に 11 個の立飾が付く。金銅製で展開長約 60 cm、最大高 9.4 cm を測る。特徴は倭では他に例を見ない馬形立飾と樹木状立飾が付き、帯本体を縦に三区画し、上段・中段を方形に区画して透彫や蹴彫で獣文、花文、樹木文等を、最下段には波頭文を施している。さらに、大・中・小の円形の歩揺飾を針金で全面に装飾している点である。

冠の分析：保存処理に先立ち、X 線透過試験による内部や文様の観察と蛍光 X 線分析 (XRF) による材質同定、顕微鏡による有機質の観察を行った。

材質分析の結果、二山帯、立飾、歩揺は金アマルガム法による鍍金（消鍍金）を施した金銅製であることが確認された。顕微鏡観察の結果、冠本体及び蝶形金具の裏側には縁かがりの布を糸で縫付けていることが確認された（写真 1）。表側の布は一部に斜文織がみられる平織の布（織密度が経約 40×緯約 50 本/cm²、経糸約 250 μm、緯糸 200 μm）が二枚重なり、その下に二重の荒い平織の布（織密度が経約 20 本×緯約 60 本/cm²、経糸約 70 μm、緯糸 70 μm）が確認された。この縁かがりの布を金具本体に縫付ける糸（太さ約 500 μm）も確認され、蝶形金具の裏はリボンであることも確認された。



写真 1 蝶形金具の縁かがり布と綴糸

3. 金銅製馬形飾付冠の復元模造製作

復元模造のコンセプト：復元模造は可能な限り、分析結果と観察に基づいて、現資料と同じ材質・製作技法により復元する。不明な点は類例調査から現在の知識に基づき、協議して推定復元する。復元品は被れる用に丸くせず、展開の形で仕上げて完成とする。

復元模造の問題点と対策：復元模造の最大の問題点は彫金による文様の判読が難しい点である。銅板が薄く（0.3 mm前後）、保存修理では覆われた錆の除去が難しい点と蹴彫りが浅いため、表面観察では判読不能であり、前回修理時の補修復元箇所が有り、裏面には金属製補修材で補強しており、裏面の観察ができない点である。また、現在のデジタルX線撮影では分解能が低く、曲面に対応できないため、読影が困難な箇所が多い点である。そこで、対応策として前回修理時に撮影されたX線フィルムを茨城県立歴史館から借用して文様の判読に利用した。

復元製作チームの構成：調査分析、図面作成、製作施工管理、布地の縫付は元興寺文化財研究所が行い、冠の金属部分の製作・組立は(有)小林彫金が行った。

冠部品の復元製作：冠は構成する金具は二山帯（本体）、蝶形金具（2点）馬形立飾（8点）、樹木状立飾（7点）、と取付用鉸、最小の円形歩揺と針金である。分析結果から金具類は銅を母材に金アマルガム法による鍍金（消鍍金）して製作した、尚、二山帯と鉸は片面鍍金、それ以外は全面鍍金とした。また、蝶形金具の縁かがり用布と二山帯用の裏地布には表布は絹平織を使用し、中綿は不織布を、縫糸には市販の絹製撚り糸を使用した。尚、表布の色は分析ではわからないため、他の復元品を参考に茜染した布を使用した。

復元製作工程：①原資料とX線写真を基に、部品図と組立図面の製作。②金具の整形加工（外形・透彫・孔穿孔）。③金具の消鍍金。④蝶形金具へ歩揺取付。⑤蝶形金具へ縁かがり布2 mm出して縫付。⑥帯本体に立飾と蝶形金具を鉸留。⑦二山帯と立飾へ歩揺の取付。⑧二山帯に裏地布を縁かがりとして2 mm出して縫付を完成。



写真2 金銅製馬形飾付冠の復元模造品

4. おわりに

今回、保存修理の際の観察・分析により、いままでわからなかった縁かがり用の布の構造が判明し、有機質情報を含めた復元製作がある程度の精度で行えた。復元製作を通じて、地板の薄さにみる鍛造技術、複雑な透彫や蹴彫りによる彫金技術、歩揺の取付用の針金製作技術等、当時の最先端の金工技術で作られた超一級の豪華な資料であることがわかり、その金工技術を再現することができた。しかし、今回の調査でも透彫と蹴彫りによる正確な文様の再現とその図像の解釈までは解明できなかった。また、冠とは別に垂飾付耳飾の整理を通じて、現在知られている以上に多くの装飾部品の存在が明らかになり、その一群がこの冠に付随する装飾品である可能性も考えられ（美豆良飾の一種か?）、今後の検討課題としたい。

参考文献 茨城県教育委員会編 1960『三昧塚古墳—茨城県行方郡玉造町所在—』茨城県教育委員会

テレセントリック光学系を用いた金の光沢ムラ測定

Gloss unevenness measurement of gold using telecentric optical system

○井上信一（東京工芸大学）、中村颯（千葉大学）、

五十嵐美範（中央精機株式会社）、星武幸（同左）、佐藤弘美（千葉大学）、溝上陽子（同左）

○Shinichi Inoue(Tokyo Polytechnic University), So Nakamura(Chiba University), Yoshinori Igarashi,

Takeyuki Hoshi(CHUO PRECISION INDUSTRIAL CO., LTD.), Hiromi Sato, Yoko Mizokami(Chiba University)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

文化財や美術品において、光沢が重要な特性であるものは多い。例えば仏像や屏風であり、その代表的な素材として金箔があげられる。これら文化財の見えをアーカイブとして記録するために、その物理的な特性を計測することは重要である。本研究では金の光沢に着目し、光の反射角度による違いを BRDF (双方向反射率分布関数：Bidirectional Reflectance Distribution Function) として計測し、あわせ光沢ムラを記録



図 1 サンプル。左から、金箔（高光沢）、金箔（中光沢）。右は、劣化した文化財を想定した洋金箔（真鍮）。洋金箔には強い光沢ムラがあり、位置により光沢が大きく異なる。

することを試みた。多くの文化財は劣化が進み、均一な光沢面であることを前提とすることは難しい（図 1）。著者らも BRDF の測定技術に取り組み紙の光沢特性について報告してきた¹⁾²⁾。しかし、従来の光沢計や BRDF 測定器は、測定スポットが数 mm φ の大きさを有し、1 点を測定するものである。本研究では、テレセントリック光学系を応用し、広い範囲の面の反射光を面の各位置の情報として記録する技術を用い、文化財のように光沢ムラが大きい対象でも、BRDF と光沢ムラをアーカイブする方法を検討した。

2. 方法

テレセントリック光学系は、光軸と主光線が平行とみなせるような光学系である（図 2）。このため、光軸に平行な光のみが計測される特徴がある。この特徴を角度で考えると、撮像される面の各位置の反射光の角度はすべて同じとなる。平行光を入射光とすることで、測定面の各位置の入射光角度、反射光角度はすべて同じ条件とすることができる。広い範囲の面の反射特性を面の各点の情報として記録することを可能とした。

測定装置の概略図を図 3 に、その写真を図 4 に示す。

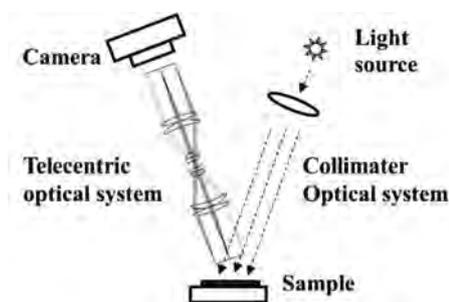


図 2 原理図。コリメータ光学系で平行光を入射し、テレセントリック光学系で反射光を測定することで、面内すべての位置で同じ反射条件で測定できる。

入射光角度を変えるために、回転ミラーが装備され、入射光角度を 0.02 度で制御可能とした。測定は 12 bit、1920 x 1200 pixel の CMOS カメラで撮像した。0.039 mm/pixel であり、サンプル中央の約 30x30 mm の面が測定可能である。測定装置は中央精機（株）で設計製作された。

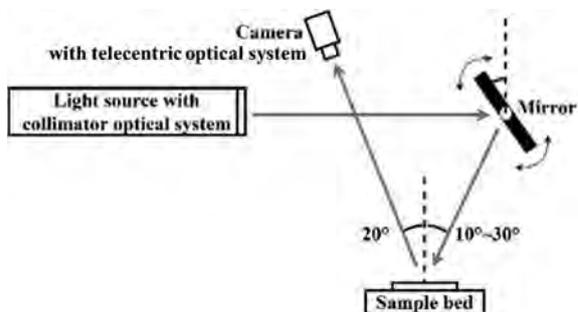


図3 測定装置の概略図。入射光（平行光）の角度を回転ミラーで制御する。

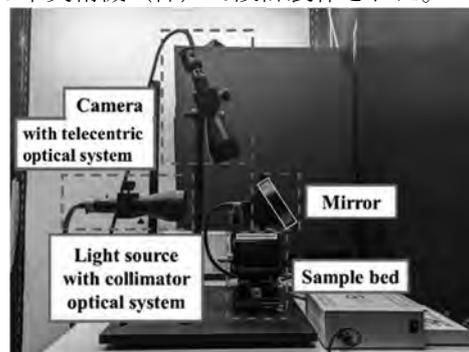


図4 測定装置の写真。

3. 結果と考察

サンプルとして、金箔および洋金箔（真鍮）、鏡、光沢紙、インクジェット用紙、等を測定した。図5に洋金箔の正反射での光沢ムラを示す。図6に洋金箔の光沢ムラ分布を示す。図7に光沢の異なる金箔2種と、洋金箔の光沢部分および非光沢部分のBRDFを示す。洋金箔の面の情報は光沢面ムラとして測定でき、所望の位置のBRDFを算出できた。

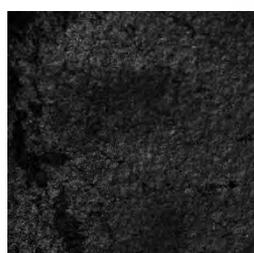


図5 洋金箔の光沢ムラ画像。

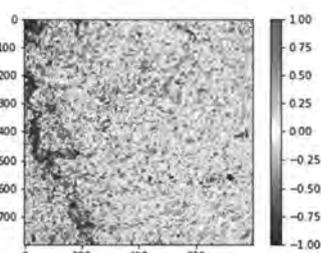


図6 洋金箔の光沢ムラ分布。

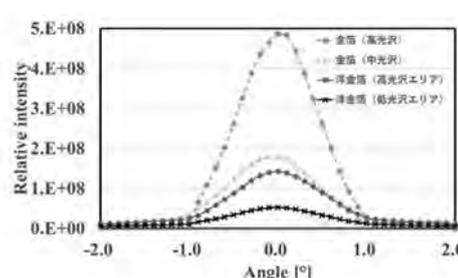


図7 サンプルのBRDFs。

物理的特性であるBRDFは、その文化財をコンピュータグラフィックスで再現する際に基礎的な情報となる。これは、文化財の展示においても開発が進むバーチャルリアリティやメタバースへの展開に寄与できるものである。

4. まとめ

提案手法は、約 30 x 30 mm の面の反射特性を面の各点の情報として記録することが可能であることを確認した。まだ金の残る光沢が強い位置の反射特性も、金が剥げて光沢の弱くなった位置の反射特性も同時に記録できる文化財光沢情報のアーカイブ技術に活用可能である。

【謝辞】本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K00368, JP19H04196, JP21K11954 の助成を受けたものです。

【参考文献】

- 1) S. Inoue, Y. Kotori, and M. Takishiro, "Paper Gloss Analysis by Specular Reflection Point Spread Function Part I," Japan Tappi J. 66 (8), 879 (2012).
- 2) S. Inoue, Y. Kotori, and M. Takishiro, "Paper Gloss Analysis by Specular Reflection Point Spread Function Part II," Japan Tappi J. 66 (12), 1416 (2012).

土器の圧痕および混入繊維の観察における X 線 CT 画像の有効性

Effectiveness of using X-ray CT images in observation of impressions and contained fibers on pottery

○山本 華（早稲田大学大学院/同志社大学）、佐々木由香（金沢大学）、
鳥越俊行（東京国立博物館）、宮田将寛（同左）、隈本健介（水子貝塚資料館）

○Hana YAMAMOTO (Waseda University / Doshisha University), Yuka SASAKI (Kanazawa University), Toshiyuki TORIGOE (Tokyo National Museum), Masahiro MIYATA (Tokyo National Museum), Kensuke KUMAMOTO (Mizuko-kaizuka Museum)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

土器に残された種実や繊維などの痕跡を観察するためには、シリコーンを用いて圧痕の空隙の型取りをするレプリカ法の手法が簡便で有用である。しかし、この手法では表面に見えている圧痕については細かい部分まで観察できる一方で、表面に現れていない、土器胎土内の圧痕についての観察、把握は不可能である。そこで近年では、中山（2010）による研究をはじめとして、小畑（2015）など、X 線 CT 機器や軟 X 線機器を用いた土器胎土内の圧痕検出作業も各地で取り入れられつつある。本研究では、土器圧痕の中でも特に、一個体の土器に複数の圧痕が認められる縄文時代前期の多量圧痕土器を対象に X 線 CT 撮影を実施し、多量圧痕土器の研究における X 線 CT 画像観察の有効性を検討した。

2. 資料と方法

資料は、埼玉県富士見市水子貝塚などから出土した縄文時代前期の土器である。これまでの土器表面を対象とした観察、圧痕調査（山本・佐々木 2021）において、複数点の種実圧痕が確認されていた個体や、その後の調査で新たに複数の種実圧痕が確認された個体を対象に X 線 CT 撮影を実施した。CT 撮影装置は、東京国立博物館所蔵のエクスロン社製微小部撮影用 CT を使用した。主な撮影条件は、電圧 200kV、電流 0.45mA、インテグレーションタイム 500ms、倍率 2~9 倍（対象資料の大きさによる）である。

3. 結果および考察

土器の X 線 CT 撮影の結果、肉眼による観察で土器表面に複数のシソ属果実やニフトコ核が確認されていた土器では、胎土内にもそれぞれ同様の大きさや形の空隙が複数確認された（図 1）。詳細は解析中であるが、これまでのところ、土器表面と胎土内で確認された点数を合わせると、多い個体で土器表面のみの場合の約 3 倍程度の点数にな

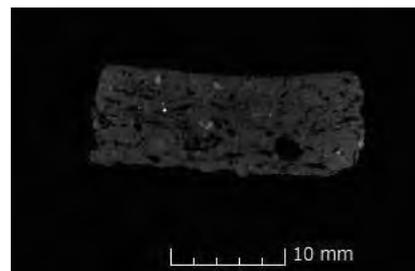


図 1 胎土内に確認された空隙

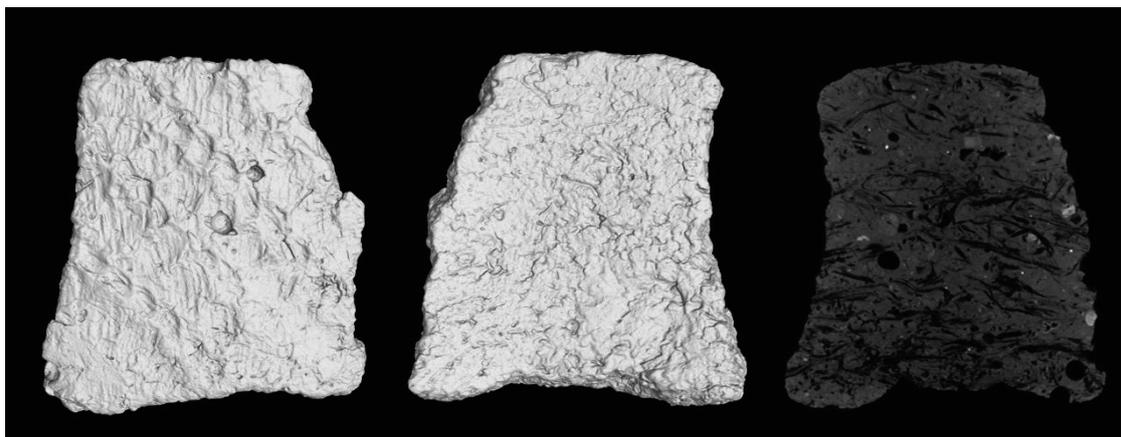


図2 土器の表面および中央付近の X 線 CT 画像

り、多量圧痕土器の観察における X 線 CT 撮影の有効性が改めて確認された。また、土器表面の凹凸などの構造をわかりやすく表現することができ、外面に施文された縄文の圧痕を細部にわたって立体的に可視化して構造を確認できる（図2左・中央）。さらに、X 線 CT 画像データの解析では、湾曲している土器片の任意の曲面を平面的に展開することや（図2右）、胎土内の空隙を抽出し表現することも可能である（図3）。この手法を用いれば、土器胎土内に含まれている種実や繊維、表面の微細な凹凸構造の位置関係を平面的に観察して、正確な分布を捉えることができる。このように X 線 CT 撮影と解析によって、種実や繊維が土器成形時のどの段階で、どのような工程を経て土器に混入したのかの手がかりが得られ、多量圧痕土器や繊維混入土器の形成過程の解明につながると考えられる。

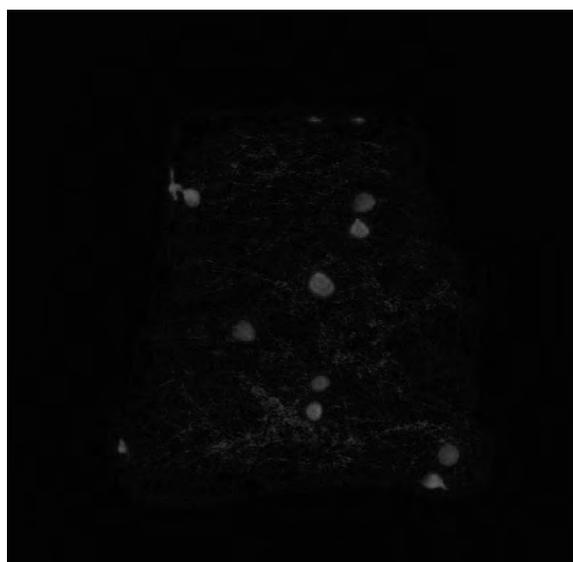


図3 圧痕の位置関係（一部）

引用文献

- 中山誠二（2010）植物考古学と日本の農耕の起源。314p，同成社。
 小畑弘己（2015）エゴマを混入した土器—軟 X 線による潜在圧痕の検出と同定—。日本考古学，40，33-52。
 山本 華・佐々木由香（2021）土器圧痕からみた縄文時代のシソ属果実。古代，147，57-89。

本研究は JSPS 科研費 JP21H05356「炭化種実塊と多量種実圧痕から探る先史時代の種実利用」（代表：山本華）、JP21H00591「土器敷物圧痕の素材植物と編組技法から見た縄文時代の技術知の解明」（代表：佐々木由香）の助成を受けた。

2 日目
9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

土器圧痕同定のための X 線 CT 画像を用いた現生種実の形態把握

Understanding the forms of present seeds and fruits using X-ray CT images for the identification of pottery impressions

○佐々木由香（金沢大学）、山本 華（同志社大学／パレオ・ラボ）、
鳥越俊行（東京国立博物館）、宮田将寛（同左）

○Yuka SASAKI (Kanazawa University), Hana YAMAMOTO (Doshisha University /Paleo Labo Co., Ltd.), Toshiyuki TORIGOE (Tokyo National Museum), Masahiro MIYATA (Tokyo National Museum)

1. はじめに

土器に圧痕として残る種子や果実は、土器表面や断面に目視で確認される表出圧痕のレプリカを作製するか（レプリカ法）、胎土内部に存在する潜在圧痕を軟X線もしくはX線 CT 画像で観察して検討する。どちらの方法でも、分類群を同定するために必要なプロセスは現生種実標本との比較である。特に圧痕は、生や炭化した種実遺体と異なって色や質感の情報がないため、形態や表面構造のより詳細な把握が必要である。また、土器圧痕として見出される種実は概ね小さく、顕微鏡などの装置がないと構造把握が難しい。これまで一般的に、同定の根拠を第三者に示すには走査電子顕微鏡（以下、SEM）やデジタルマイクロスコープが使用されてきた。平面的な種実は二次元画像でも撮影しやすく形態を理解しやすいが、立体的な種実は現生種実の構造を熟知した上で、適切な角度で撮影しないと形態が理解しにくい。

上記の諸問題を解決するには、現生種実の構造を立体視でき、かつ手元でも確認できるような汎用性の高い大型立体標本が必要である。しかし、従来の医療用や文化財用 CT 装置による CT 画像では微細な構造が把握できず、また一般的な 3D プリンターでは微細な種実は精密な立体模型が製作できなかった。そこで、微小部撮影用 CT を用いた現生種実の 3D データの作製および、3D プリンターを用いて 3D データを立体的に可視化した大型標本の作製を試みた。

2. 試料と方法

試料は、明治大学黒耀石研究センター植物考古学研究室所蔵の現生種実標本を用いた。CT 撮影装置は、東京国立博物館所蔵のエクスロン社製微小部撮影用 CT を使用した。撮影の条件としては、電圧 70kV、電流 1.2mA、インテグレーションタイム 500ms である。要旨に示した現生エゴマ果実の撮影設定は、X 線管球にできるだけ近づけることで約 16 倍に拡大し、12.5 μ m の分解能で実施した。

3. 結果および考察

要旨に示した現生エゴマ果実は、シソ科シソ属の栽培種である。シソ属果実は稜を持つ広倒

卵形であり、先端部の稜の片側に円形の大きな臍と、その中央部に突起がある（図1）。また臍から不定形な網目状隆起が全体にみられる。栽培種のシソとエゴマは植物学的にはひとつの種内の変種として扱われている（新田 2001）。両変種の果実の形態はほぼ相似形で、果実の形態のみでは現状、両者を区別できない。シソは休眠性を持ち放任栽培されるのに対し、エゴマは休眠性を持たず播種して栽培されるため、シソよりもエゴマのほうが人間による栽培行為を必要とする、すなわち縄文時代のエゴマの存在は縄文時代の栽培行為の傍証たりうると

され、シソとエゴマの区別が重要視されてきた（山本・佐々木 2021）。区別にあたっては大きさが一つの指標となりうるため、正しい位置での計測が重要になる。

微小部撮影用 CT による撮影では、SEM のような高解像度の

画像は得られなかったが、上記の同定根拠を満たすのに十分な画像が得られた（写真1）。また、さまざまな方向に回転できるため、より立体的な形態を把握できた。さらに、エゴマが多量に入った土器では果皮のみが産出することが知られているが（小畑 2015 など）、破片となった場合でも構造を比較しやすいほか、果実内部の子葉のみを取り出して形態や大きさを比較するのも、CT 画像からは容易であった。

さらにこの 3D 画像データを他者と共有したり、データを拡大して 3D プリンターで立体模型を作製したりすることで、より構造が視覚的に把握しやすくなると共に、検出された種実圧痕の構造を学ぶ講座や展示などにも活用でき、汎用性が高い教材になると期待される。

引用文献

- 新田みゆき（2001）シソとエゴマの分化と多様性。「栽培植物の自然史-野生植物と人類の共進化-」（山口裕文・島本義也編），165-175. 北海道大学図書刊行会。
 小畑弘己（2015）エゴマを混入した土器-軟 X 線による潜在圧痕の検出と同定-。日本考古学，40，33-52。
 山本 華・佐々木由香（2021）土器圧痕からみた縄文時代のシソ属果実。古代，147，57-89。

本研究は科学研究費 学術変革領域研究(A) JP20H05811「土器に残る動植物痕跡の形態学的研究」(代表:佐々木由香)の助成を受けた。

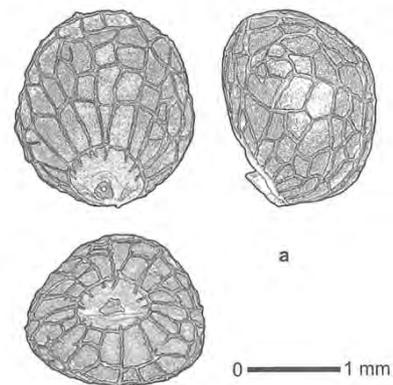


図1 現生エゴマ果実の構造（小畑 2015）

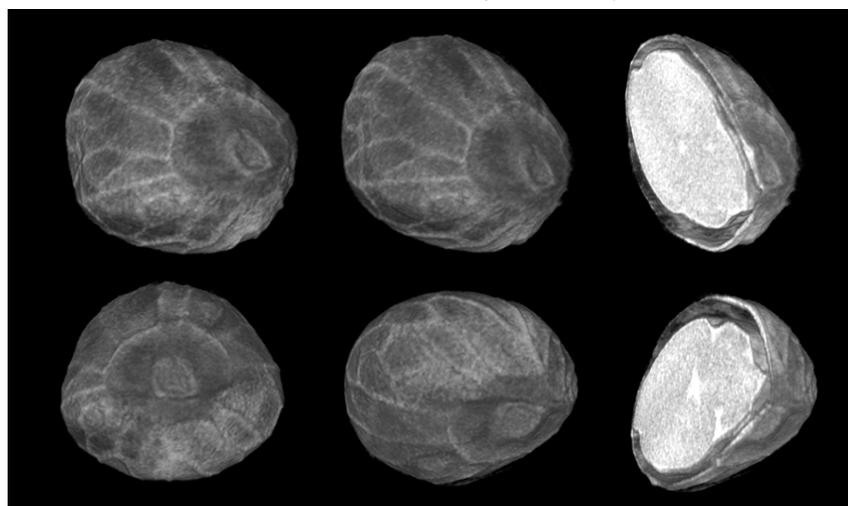


写真1 微小部撮影用 CT による現生エゴマ果実（いずれも同一個体）

加熱を用いた炭化物および土器の基礎的研究

Fundamental study on carbonized plant remains and pottery using heat treatment

2 日目

9月11日

第1会場

第2会場

○金原正明（奈良教育大学）、橋本輝彦（桜井市教育委員会）、
金原美奈子（(一社)文化財科学研究センター）、西村奏（岡山県古代吉備文化財センター）
○Masaaki KANEHARA (Nara University of Education), Teruhiko HASHIMOTO (Sakurai City
Education Committee), Minako KANEHARA (Cultural assets scientific research center), Kanade
NISHIMURA (Okayama prefectural ancient Kibi cultural properties center)

1. はじめに

今回は加熱を用いた基礎的実験を行い、2系統の基礎的研究を行った。一つは大福遺跡の布留2式期の炭化物を整理する中で、炭化米（イネ種実）およびマメ類が比較的まとまり含まれているため、特に炭化米の状態に基礎的実験を加え検討を行った。もう一つは土器の色彩など胎土に対して、素材となる鉱物の同様の加熱実験による状態の検討を行った。

いずれも発表者らが、普段から出土および博物館などで見ていて気にかかることであり、また集中的視点によって検討されているが、なかなか判然としない課題であり、基礎的な研究を主に着手を行った結果の中間的な発表をここで行う。

2. 炭化物の検討

ここでは、炭化物の中で特に炭化米を取り上げ、検討を行った。炭化米は低温で炭化したとみられるものは穎が残り、高温炭化のものは変形したり亀裂が入っていたり膨らみあったりする。大福遺跡のものは、変形は著しくないないが、黒色炭化している。

加熱実験に用いイネ種実（コメ）は国産で昨年産の粳米2品種、糯米2品種の玄米を用いた。電気炉を用い、予備実験において変化の生じる150℃から300℃を25℃間隔で1時間加熱した。結果、まず色は、いずれの試料も150℃から200℃にかけて、徐々に褐色から黒褐色に変わり250℃で黒色になる。米糯aと米糯bは、200℃から膨化（ポップコーン状に膨らむ）し、黒色化より低い温度で膨化が行われることが明らかとなった。米粳aでは250℃および275℃ではやや変形するものの膨化せず、300℃で膨張と記載したが、膨らみ膨化のように爆ぜるのとは異なる状態が見られた。米粳bは250℃の黒色化とともに膨化しだし、300℃で膨張する。以上の状況は特に粳米より糯米のほうが、膨化温度が低く、黒色化する以前の温度で膨化することが明らかになった。この現象については、粳米はデンプンのうちで水溶性のアミロースが20%前後含まれ、非水溶性のアミロペクチンが約80%含まれ、糯米にはアミロペクチンが100%含

まれていることに起因して、膨化の温度が異なった、または粳米では膨化の高いか膨化しないものまでであることが示された結果とみなされる。富山・南・中村・金原（2015）では、脂肪族化合物から多環芳香族化合物への変化として分析されている。

以上の結果から、大福遺跡の炭化米を比較すると、黒色に炭化しているが膨化がみられず、粳米であったとみなされる。今まで多くの炭化米を見てきているが、少なくとも弥生時代と古墳時代は粳米であったとみなすことができるのではないかと考えられる。

3. 胎土、鉱物に関して

同様に、土器胎土に含まれる造岩鉱物および粘土について、加熱による焼成実験の検討を行った。焼成温度に関しては600℃から900℃、700℃から800℃と記載されているものが多いが、梅田（1967）の熱性分析から、用いた縄文土器や弥生土器は600℃～700℃で焼かれたことが示唆されている。以上のことを前提に鉱物および粘土に混ぜ込み焼成を行った。変化のあったものは、黒雲母が600℃以上ですでに茶褐色ないし金色化し、無色鉱物の白雲母は透明であるが白色化する現象が見られた。他に角閃石は全体ではないが褐色化がみられる。胎土に練りこむないし埋め込んで行ったが、各鉱物は確認できるが、胎土の色は、焼成温度が高くなるほど明るくなり、同条件で焼成した場合、多く練りこんだつもりであったが鉱物の影響はなく、焼成温度が高くなると特に明度が大きくなる結果が得られた。粘土鉱物も含みいずれも含水鉱物であり、含水鉱物の脱水による色の変化と考えられる。

表 イネ果実（コメ）の加熱による変化

温度	そのまま	150℃	175℃	200℃	225℃	250℃	275℃	300℃
米粳a	半透明淡褐色	やや不透明	不透明褐色	濃褐色	黒褐色	黒色	黒色	黒色
						やや変形	やや変形	ほぼ膨張
米粳b	半透明淡褐色	不透明	やや褐色	濃褐色	黒褐色	黒色	黒色	黒色
						やや膨化	膨化	膨張
米糯a	不透明淡褐白色		やや褐色褐色	濃褐色	黒褐色	黒色	黒色	黒色
				膨化	膨化	膨化	膨化膨張	膨張
米糯b	不透明淡褐白色		やや褐色	濃褐色	黒褐色	黒色	黒色	黒色
				膨化	膨化	膨化	膨化膨張	膨張



写真1 225℃、左から米粳a、米粳b、米糯a、米糯b



写真2 黒雲母、左から無加熱、600℃、700℃

若狭国鎮守神人絵系図の彩色材料調査 — 復元模写事業を踏まえて —

Analysis of the colors in *Tutelary Deities and Administrators of Wakasa*: Research in preparation for a hand-painted contemporary replica

2 日目

9 月 11 日

○降幡順子（京都国立博物館）、井並林太郎（同左）、富澤千砂子（六法美術）

○Junko FURIHATA, Rintaro INAMI(Kyoto National Museum), Chisako TOMIZAWA (Rikuhoubijutsu)

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

若狭国鎮守神人絵系図（重要文化財・鎌倉時代）は、若狭国一宮上下宮の若狭彦・若狭姫神社および神宮寺の創建縁起、社務職を世襲した笠氏の歴代肖像を描いた絵巻物である。前半は縁起絵であり、この前半部について令和 2（2020）年から復元模写事業が行なわれており、当時の描き方を原本の観察を通じて研究し再現すること、出来るだけ当初の画面を復元した模写と原本を並べて展示し活用することなどを目的としている。材料面からも忠実な模写にする方針から、非破壊による彩色材料調査を実施したので、本報告ではその詳細について報告していきたい。

2. 調査資料

若狭国鎮守神人絵系図は、前半は若狭国一宮上下宮の若狭彦・若狭姫神社とその神宮寺の創建縁起（冒頭から第 10 紙）が描かれており、後半の絵系図は、初祖から第三十一代までの肖像を描くが、鎌倉時代の作は第十二代までで（第 11 紙から第 16 紙）、第十三代以降は室町時代から江戸時代にかけて描き継がれたものである（第 17 紙から第 27 紙）。過去に水害に遭ったらしく、大部分に褐色の染みがみられる。京都国立博物館では平成 24(2012)年から平成 26(2014)年に 出光文化福祉財団の助成を受けて本作品の修理が実施され、原本の鑑賞は可能になった。その後、復元模写に先立ち、水損等による汚れによって描画の不鮮明な箇所が認められること、さらに今ではほとんどの顔料が失われてしまっているが、もともとは彩色材料が使用されていた作品と考えられていることから、非破壊・非接触による可視・赤外線撮影、蛍光 X 線分析、分光分析を実施し、復元模写に有用な情報を得た。



図 1 若狭国鎮守神人絵系図（部分）

3. 調査手法

汚損によって描画の不鮮明な箇所が認められること考慮し、まず文化財用正射投影スキャナー（凸版印刷）による可視・赤外線撮影を実施し墨線の確認等をおこなった。彩色材料調査は、

蛍光 X 線分析、および分光分析を実施した。使用した装置は可搬型蛍光 X 線分析計 VANTA-M (オリンパス)、軽元素と重元素を精度よく検出するため 2 種類の条件で測定しており、重元素用;管電圧 40kV、管電流 $100 \mu\text{A}$ 、軽元素用; 管電圧 13kV、管電流 $200 \mu\text{A}$ で、共通の測定条件は X 線照射径 3mm、測定時間 60 秒、ターゲット Rh、装置と作品間距離 5mm である。分光分析は、小型分光器 FLAME (Ocean Optics)、光源 HL-2000 を使用し、得られた可視反射スペクトルを二次微分して標準試料と比較することにより染料の推定をおこなった。

4. 測定結果

画面全体の鑑賞性を損ねている汚れ部分では、赤外線画像の墨線の観察から、皴法の表現など原本復元に必要な情報を得ることができた (図 2)。また冠の種類が書き直されていたことも確認できた。緑色顔料では、検出元素や強度比の違い (図 3) と、粒子サイズに相関が認められ、松葉などの樹木、屋根、御簾の表現など、使用箇所も意図的に使い分けされていることを確認した。青色は、第 2 紙のみ銅を主成分とする青色顔料が検出されたが、他紙では銅を検出しないことから、可視反射スペクトルを二次微分して標準試料と比較した結果、藍とよく一致することがわかった。

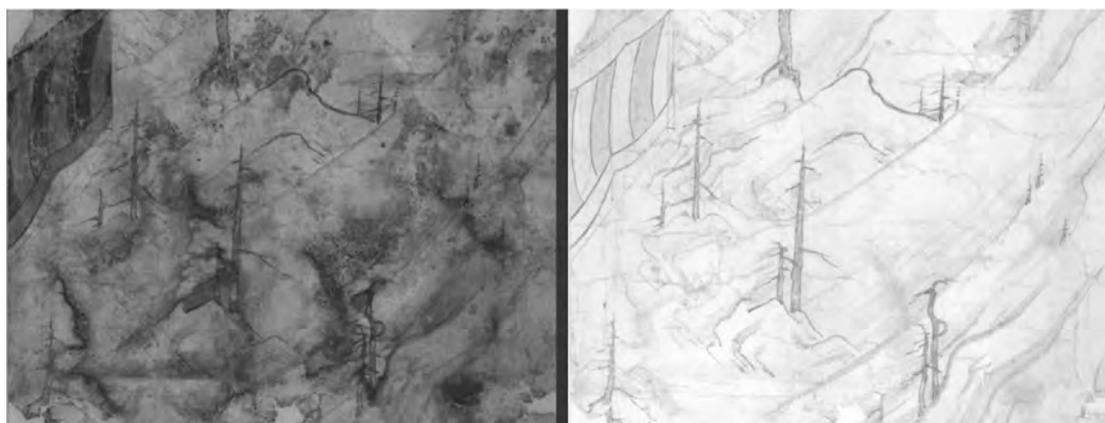


図 2 皴法の描画、可視画像 (左)・赤外線画像 (右)

さらに、復元模写に使用する複数の彩色材料の候補について、同様の分析調査を実施し、原本の結果と比較することで、できるだけ類似する材料を選定するなど、模写の作成に分析結果を活用した。

このようにして作成した復元模写は、展示活用するとともに、原本と一緒に保管することで、今後の経年変化に関する情報を得ることに活用していく予定である。

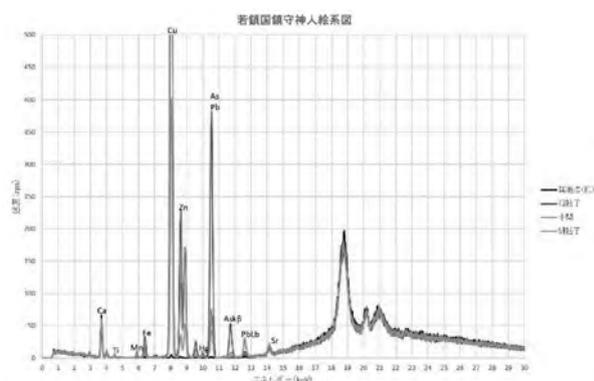


図 3 XRF スペクトル (異なる緑色顔料)

シルクロード沿線に用いられた紫鉱絵具について

—絵具の制作材料と使用形態(2)

Lac dye paints used along the Silk Road -Employed materials in their preparation and the state of the colorants (2)

2 日目

○曹智健、塚田全彦 (東京芸術大学)

9月11日

○Cao Zhijian, Masahiko TSUKADA (Tokyo University of the Arts)

第1会場

1. はじめに

これまでに、紫鉱(ラック)絵具のシルクロード沿線での使用はアジャンター遺跡、敦煌莫高窟、正倉院宝物や薬師寺所蔵の「吉祥天画像」で確認されている。原料のスティックラックはラックカイガラムシの分泌液および包含された昆虫の死体の混合物で、漢方医薬学では紫鉱、もしくは紫草茸と呼ばれている。紫鉱は主に樹脂、色素、ワックス成分で構成されており、その中から色素を何らかの方法で抽出する工程を経てはじめて絵具の制作が可能となる。しかし、絵具の制作工程に関する報告は少なく、具体的な色素の抽出方法も明確ではないのが現状である。本研究ではインド・ジャイナ教の絵画技法書(Jain Chitra Kalpadruma (927 VS*)¹)、チベットのタンカー技法書(Mi-pham-rgya-mtsho (1906)²)、中国の綿臙脂の製造法(崔氏造燕脂一首(752)³)、に記された紫鉱絵具の制作方法(以下、レシピと記す)を本邦で入手可能な材料で再現し、各地域で使用された絵具の性状を明らかにすることを目的とする。

前報⁴では各地のレシピで共通に添加する植物材料(主成分:有機アルミニウム錯体)は溶液のpH変化による紫鉱色素(ラッカイン酸)の色変化を抑え、安定かつ鮮やかな発色に寄与すると同時に水溶性で透明度の高い絵具の製造に繋がることを明らかにした。一方、紫鉱絵具の各レシピには抽出時の熱条件、およびpH調整剤として添加される鉱物由来の材料に違いがある(表1)。本発表では異なる抽出温度およびpH調整剤の添加による紫鉱絵具の発色、流動性に関する知見を得るために、①各pH調整剤の添加によるラッカイン酸の色変化、②ホウ酸ナトリウム水溶液で抽出した紫鉱染液の抽出温度による色および流動性の変化について検討した。

表1 レシピに記された抽出温度条件と抽出材料(鉱物由来)

レシピ名	地域	抽出温度(°C)	抽出時の添加材料	添加量
Jain Chitra Kalpadruma(927 VS)	インド	沸騰加熱:100	ホウ砂* ¹	記述なし
Mi-pham-rgya-mtsho (1906)	チベット	日照射:40* ²	sal ammoniac* ³ ホウ砂* ¹	記述なし
崔氏造燕脂一首(752)	中国	沸騰加熱:100	胡桐泪* ⁴	約 7.0 g* ⁵

*1: ホウ酸ナトリウム・十水和物, *2:チベットの日照時間、年間平均気温を考慮し、簡易的な集光設備を用いた場合を仮定, *3: 塩化アンモニウム, *4: 炭酸水素ナトリウムまたは炭酸ナトリウム, *5:抽出液が1.6 Lの場合

2. 実験方法

①ラッカイン酸の水溶液(1.89×10^{-5} mol/L)に無機塩水溶液(表2)を加え、紫外可視分光光度計(島津製 UV-2450)により吸収スペクトルを比較した。なお、測定試料のpHは塩溶液の濃度によって若干異なるが、リン酸バッファー(pH8以上はNaOH)を用いて当該塩の飽和溶液のpHに合わせて調製した。

表2 各添加材料の濃度、pH

試料名	濃度(mol/L)	測定時の溶液 pH
ホウ酸ナトリウム・十水和物	0.013~0.13	9.5
塩化アンモニウム	0.5~2.0	5.0
炭酸水素ナトリウム	0.1~1.0	8.5

*927 VS:ヴィクラマ(Vikrama Samvat)暦 927 年、西暦に換算すると約10世紀

②5.0 g スティックラック(チベット産, 2020年購入)を20 ml 蒸留水、0.5%または5.0%(飽和濃度)のホウ酸ナトリウム(以下ホウ砂)水溶液に加え、20, 40, 60, 80, 100℃の5段階の加熱条件で、1時間抽出した。これらの試料を濾過し、音叉式粘度計(A&D製SV-10)および紫外可視分光光度計(同上)で抽出液の粘度、吸収スペクトルの変化を検討した。

3. 結果と考察

①pH調整剤の添加によるラッカイン酸の色変化

ラッカイン酸はバッファーで溶液のpHを9.5に調製した場合、520 nm 付近に吸収極大を示し、560 nm 付近に肩が確認できる。それに対し、ホウ砂添加試料ではホウ砂の濃度が高いほど、吸光度が上昇し、吸収極大は短波長側(500 nm)へシフト、530 nm 付近に等吸収点、460 nm 付近に肩が観測できた(図1)。これは、ラッカイン酸(pH9.5)が赤紫色を呈するのに対し、ホウ砂添加試料(pH9.5)では鮮やかなオレンジ色を呈することを示している。一方、チベットレシピおよび中国レシピのpH調整剤の主成分である塩化アンモニウムや炭酸水素ナトリウムを添加した試料では、バッファーによる同pHの際のラッカイン酸の吸収スペクトルと一致し、添加による色変化は確認できなかった。

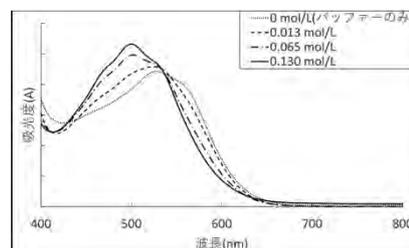


図1 濃度が異なるホウ砂水溶液を添加したラッカイン酸の吸収スペクトル(pH 9.5)

②ホウ砂水溶液で抽出した紫鉱染液の抽出温度による色・流動性の変化

全試料の吸収スペクトルを比較したところ、蒸留水、濃度が異なるホウ砂水溶液で抽出した紫鉱染液の吸収スペクトルは加熱温度が高いほど吸光度が高くなる傾向を示し、また蒸留水以外では加熱温度の違いによって波形の変化も見られた。

80℃と100℃の結果を示す図2では、ホウ砂添加試料は低濃度(0.5%)と高濃度(5%)に共通して吸収極大波長が短波長側へシフトし、濃度が高いほどシフト量が大きい点は実験①の結果と一致している。また、加熱温度が80℃以上の試料では460 nm 前後に肩が生じ、その吸光度は低濃度よりも高濃度の方が高く、80℃より100℃の方が高い結果が得られた。これは、色素をほとんど含まない紫鉱のエタノール可溶成分の吸収と類似しており、抽出過程において高温条件およびアルカリ溶液により色素以外の成分の溶解が促進され、染液の黄変に寄与していると考えられる。また、吸収スペクトルで460 nm 前後に吸収が確認できた試料では粘度が上昇する傾向も見られた(図3)。特に高濃度ホウ砂の場合では同加熱温度で抽出した蒸留水試料と比べ3倍ほどの粘度を示し、ラックレジ⁵と呼ばれる粘性を持つ絵具と類似している。

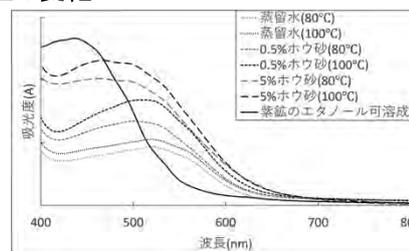


図2 抽出条件の異なる紫鉱染液の吸収スペクトル(pH 7)

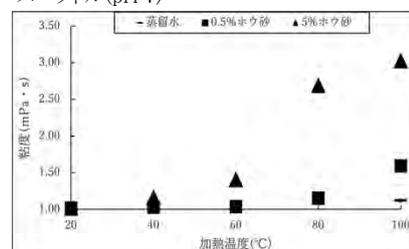


図3 抽出温度による紫鉱染液の粘度変化

4. おわりに

インド、チベット、中国の紫鉱絵具の製造法に記された加熱条件およびpH調整剤の種類をもとに試作した絵具の発色、流動性の比較を表3に示した。そのうち、ホウ砂を添加するインド、チベット製造法では絵具の色が橙色を帯び、ホウ砂の濃度によっては粘性を持つ場合も確認できた。今後はpH調整剤の種類、濃度および抽出温度の違いによる抽出される色素以外の成分について検討することを課題としたい。

表3 抽出条件の異なる紫鉱絵具の呈色・流動性

レシピ	加熱条件	塩の濃度	呈色	流動性
Jain Chitra Kalpadruma	沸騰	低	赤橙	高(染料)
		高	オレンジ	低(レジ)
Mi-pham -rgya-mtsho	日照	低	赤紫(橙)	高(染料)
		高	赤橙	
崔氏造燕脂一首	沸騰	-	赤紫	高(染料)

[謝辞]本発表は吉田学記念文化財科学研究助成基金の支援によって行われました。

参考文献:

- 1.R.P Srivastava, Punjab Painting, Abhinav Publications, pp.75(1983)
- 2.David P.J, Janice A.J, Tibetan Thangka Painting Methods and Mat, SHAMBHALA, pp.114(1984)
- 3.王 焘, 造燕脂法一首 崔氏造燕脂法, 外台秘要方(752)
- 4.曹智健, 塚田全彦, 文化財保存修復学会第44回大会研究発表要旨集, pp.198-199(2022)
- 5.島津美子, 谷口陽子, 山内和也, 文化財保存修復学会第36回大会研究発表要旨集, pp.48-49(2014)

文化財染織品に使用された染料の非破壊的分光解析と

二次微分解析の有効性

Non-invasive Spectroscopic Analysis of Dyes Used in Cultural Textiles and Its Effectiveness in Second-Order Differential Analysis

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

○佐々木良子（嵯峨美大学）、岡村知明（元離宮二条城）、佐々木健（京都工芸繊維大学）
○Yoshiko SASAKI (Kyoto Saga University of Arts), Tomoaki OKAMURA (The city of Kyoto, Office of the Nijo-jo Castle), Ken SASAKI (Kyoto Institute of Technology)

1. はじめに

文化財染織品に用いられた染料は経時変化に加えて使用や環境により変退色するため、染料の分光スペクトルによる同定を行う際に典型的な波形が得られない場合があり、より詳細な解析が必要となる。

世界遺産である京都二条城の本丸御殿は 1894(明治 27)年京都御所より明治天皇が天皇家の離宮として移築し、1914(大正 3)年大正天皇即位の饗宴が行われた建物である。今回、本丸御殿の建造物修理に伴い、建具の引き戸として用いられている小型の襖(天袋、地袋)の保存修理が行われることとなった。この襖には鳥や植物が描かれた絵が添付され、その周りに二重に細長い錦地が表装として施されている。これらの錦の裂地について、用いられた染料の分析を行った。

これまでに発表者らは文化財染織品の染料分析において非破壊分光分析をおこなってきた¹⁾。今回調査対象の表装裂地に対して染料の可視反射スペクトルを測定し、標準試料と比較した解析を行った。変退色が著しかった染料について、その分光スペクトルの二次微分を用いた解析を行う事で染料の同定が可能になった。また、蛍光性染料の解析のため、紫外線照射による蛍光反応の確認を行い、さらに蛍光スペクトルの測定も行った。

2. 実験

本資料に用いられた染料については Ocean Optics USB4000 ファイバー誘導可視スペクトロメーター (Fibre optic reflectance spectroscopy, FORS) を用い、試料表面に可視光を照射し、非破壊的に反射分光分析を行った。得られた反射スペクトルを吸光度に換算した吸収スペクトルを得た。次いで、得られたスペクトルを二次微分して詳細に解析を行った。さらに 380nm 及び 450nm の波長のランプを用いて蛍光スペクトルを測定し、蛍光性染料の解析を行った¹⁾。

3. 結果と考察

本丸御殿の天袋と地袋に用いられた表装裂地は、目視による事前調査により 6 組 12 種類に分類された。本丸御殿は移築時等に修理されているが、天袋や地袋に対しても修理があったのかどうかの確認は取れていない。もしこれらの時期に表装の仕立て直しを新しい裂地を用いて行ったのであれば、裂地に合成染料が用いたれている可能性を考慮しなくてはならない²⁾。

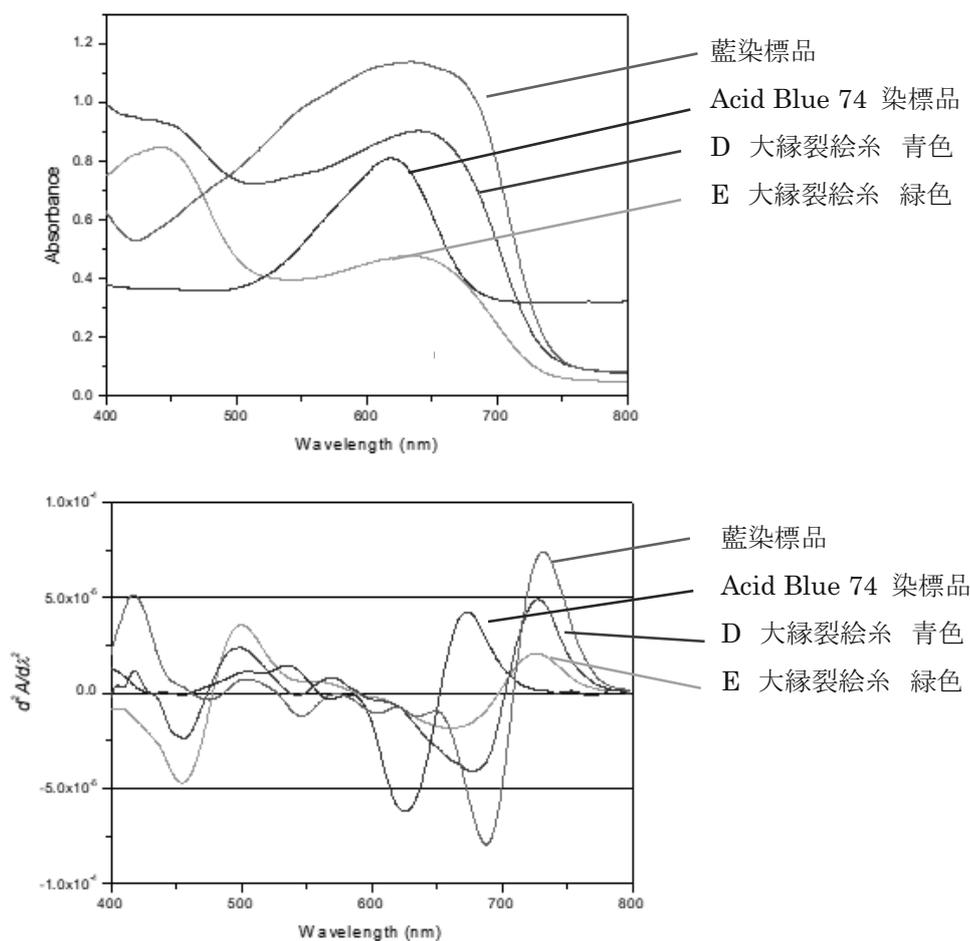


図1 青色系及び緑色系の FORS およびその二次微分スペクトル

各錦の地色と絵糸について分析を行った結果、紫色は紫根が用いられていたが、絵糸に青色染料と非蛍光性赤色染料(蘇芳)が用いられる例が見られた。緑色は青色染料と蛍光性の黄色染料(黄檗)で表現されていた。黄色は蛍光性の黄檗が用いられている場合と非蛍光性の黄色染料(不明。ただし苧安の可能性が高い)で、桃色は蛍光性の紅で、橙色は非蛍光性の赤色染料(蘇芳)と非蛍光性の黄色染料で表現されていた。青色染料のピークは二次微分を行うことで、インディゴ由来であることが確認できた(図1)。このピークは経年による劣化影響で合成染料と誤認するほどの大きな崩れが見られた。

今回の染料分析において解析が可能であった染料は全て天然染料であった。従って、以前の移築時等に表具裂の新調が行われたかどうかは、明らかにならなかった。

4. 引用文献

- 1) Y. SASAKI and K. SASAKI *Dyes in History and Archaeology*, 2021, **35/36**, 39-49
- 2) 佐々木良子, 生谷吉男, 佐々木健 *文化財科学会誌(考古学と自然科学)* 2011, **62**, 19-42

謝辞:本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C))課題番号 19K01129 の成果の一部である。

奈良・中宮寺所蔵 国宝「天寿国繡帳」の染料分析 Dye analysis of the national treasure embroidery of eternal life “*Tenjukoku shucho*” stored in the Chuguji temple

○中村力也（宮内庁正倉院事務所）、鶴真美（同左）、内藤栄（大阪市立美術館）

○Rikiya NAKAMURA, Mami TSURU (Office of the Shosoin Treasure House)
Sakae NAITO (Osaka City Museum of Fine Arts)

2 日目

9 月 11 日

第 1 会場

第 2 会場

1. はじめに

中宮寺が所蔵する国宝「天寿国繡帳」(図 1) は、我が国最古の伝世染織品であり、聖徳太子没後、妃・橘大郎女の発願によって、太子の往生した世界を図に表そうと、製作されたとされる。繡帳は鎌倉時代にはすでに傷んでおり、新繡帳が作成されたが、江戸時代には新旧の繡帳はともに断片化していた。そこで、新旧の断片を貼り交ぜて仕立て、その後、大正時代に額装に仕立て直して、今日に伝わる。天寿国繡帳に用いられた染料に関しては、これまで、機器分析による調査事例がなく、材質は不明である。本発表では、天寿国繡帳の染料の解明を目的として、中宮寺が所蔵する国宝「天寿国繡帳」(図 1)、ならびに正倉院が所蔵する繡帳断片(図 2)を調査対象として、分光法による結果を報告する。調査手法として、可視分光、蛍光分光を採用し、非破壊・非接触による分析を実施した。これらの手法は、同じ上代裂である正倉院や法隆寺の染織品を染料分析した実績のあるものである。



図 1 奈良・中宮寺所蔵 国宝「天寿国繡帳」

2. 分析対象試料および手法

2-1. 天寿国繡帳

天寿国繡帳(中宮寺所蔵)(図 1)には発色の美しい刺繡断片と茶色に退色した刺繡断片とが任意に配されているが、前者が飛鳥時代、後者が鎌倉時代の繡帳からのものである。鳳凰、人物、蓮華、月像、亀甲などの図柄を刺繡で表し、赤色、赤紫色、青色、緑色、黄色、白色といった色糸が用いられている。飛鳥時代の刺繡は紫平絹に紫羅を重ねたものを台裂とし、鎌倉時代のものは紫綾を台裂とする。繡帳の分析には、可視分光法を用いた。

正倉院所蔵の繡帳断片(図 2)は、すべて飛鳥時代のもので、亀甲、人物、銘「奈」および各断片に残る台裂を分析対象とした。断片の分析には、可視分光法と蛍光分光法とを併用した。

2-2. 分光分析

可視分光分析では、オーシャンオブティクス社製の分光器：USB4000 とタングステン・ハロゲン光源：LS-1 に、同軸の光ファイバースプロブ：R400-7-UV/Vis (コア径：150 μm) を接続した装置を用いた。試料に対する照射角度を 45°、スプロブの先端と試料との距離を 5 mm に

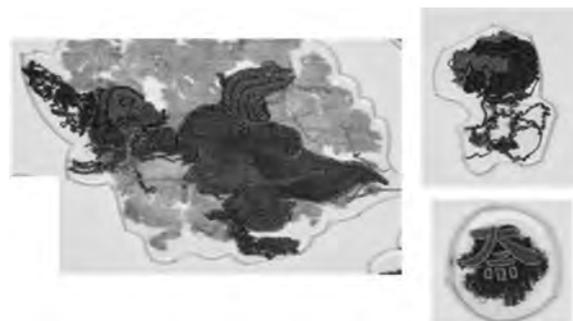


図 2 正倉院所蔵 天寿国繡帳断片(飛鳥時代)

設定し、400～800 nm のスペクトルを分解能：2.5 nm で取得した。標準板にはセラミックス製標準白色板（財）日本色彩研究所）を用いた。得られた反射分光スペクトルを二次微分し、解析した。蛍光分光分析では、堀場製作所製蛍光分光光度計 FluoroMax-3 に光ファイバースプロブを接続して測定した。350～600 nm の励起波長と各励起波長における蛍光スペクトル (λ : 300～700 nm) を取得し、解析した。

3. 結果と考察

3-1. 飛鳥時代の繡帳

図柄の赤色部分を分析したところ、可視分光の二次微分スペクトルにおいて、505, 550 nm に極大吸収 ($\lambda_{\text{abs max}}$) が見られたため、茜が用いられていることがわかった。赤紫色からも茜に特有なスペクトルが得られた。青色や緑色部分については、675～710 nm に $\lambda_{\text{abs max}}$ が見られ、用いられた染料は藍であることがわかった。緑色部分や黄色部分に用いられた黄色染料については、正倉院所蔵の断片を蛍光分光分析し、刈安（極大励起波長 ($\lambda_{\text{ex max}}$) = 375 nm、極大蛍光波長 ($\lambda_{\text{em max}}$) = 508～520 nm) や黄蘗 ($\lambda_{\text{ex max}}$ = 363, 441 nm、 $\lambda_{\text{em max}}$ = 525 nm) が用いられていることがわかった。

台裂の紫羅については紫根の吸収 ($\lambda_{\text{abs max}}$ = 550, 600 nm) が検出される箇所と茜の吸収 ($\lambda_{\text{abs max}}$ = 505, 550 nm) が検出される箇所とがあった (図3)。両者の色を比較すると、紫根が同定された羅の色はやや暗い紫色であるのに対し、茜が同定された羅の色は明るい赤みのある紫色である。台裂の紫羅に重なった状態の紫平絹については、紫根と茜が併用されていることがわかった ($\lambda_{\text{abs max}}$ = 505, 550, 600 nm)。

3-2. 鎌倉時代の繡帳

図柄の赤色部分を分析したところ、いずれも茜に特有な吸収極大が観測された ($\lambda_{\text{abs max}}$ = 500～505, 550～505 nm)。青色や緑色部分については、675～700 nm に藍の吸収極大が見られた。緑色部分に藍と併用されている可能性が高い黄色染料については、本調査からは有力な知見は得られなかった。台裂の紫綾については、紫根に特有な吸収極大 (550, 600～605 nm) が検出された。

4. おわりに

天寿国繡帳を分光法により染料分析したところ、赤色染料として茜、青色染料として藍、黄色染料として刈安と黄蘗、紫色染料として紫根が用いられていることがわかった。茜や藍、刈安、黄蘗、紫根は、奈良時代の正倉院染織品にも見られる染料であり、天寿国繡帳と正倉院染織品には共通の染料素材が用いられたことがわかる。飛鳥時代の繡帳の台裂である紫羅には紫根で染められたものと茜で染められたものがあり、別々に染められた羅がつなぎ合わされて台裂が製作されていることが明らかにされた。

謝辞

本研究では、聖徳宗中宮寺の許可を得て実施しました。また、三本周作氏（奈良国立博物館）、前野絵里氏（藤田美術館）に調査協力を賜りました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中村力也・鶴真美・内藤栄「東京国立博物館、奈良国立博物館所蔵の古代刺繍・綴織作品の染料調査」、*鹿園雑集*, **22**, 61 (2021).
- 2) 中村力也・成瀬正和「分光学的手法による正倉院に伝世する竹帙の色糸に用いられた染料の分析」、*文化財科学*, **78**, 21 (2019).

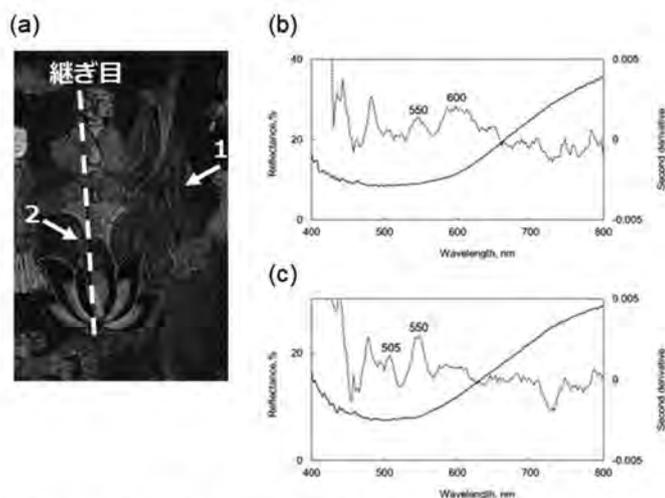


図3 中段右部分にある蓮華化生像の周囲に残る台裂（紫羅）の可視分光分析 (a) 分析箇所、(b) 継ぎ目の右側にある台裂（分析箇所1）の反射スペクトルと二次微分スペクトル、(c) 継ぎ目の左側にある台裂（分析箇所2）の反射スペクトルと二次微分スペクトル