

首里城正殿板壁に使用されていた「桐油黄塗」再現のための塗膜片試料分析

研究代表者：琉大理 小林 理気

研究分担者：JASRI 櫻井 吉晴 KEK 反保 元伸 雨宮 健太

JAEA 大澤 崇人 東北大金研 藤田 全基

Analysis of Paint Film Samples for Reproducing the "Tung Oil Yellow Coating" Used on the Wooden Board Walls of Shuri Castle's Main Hall

Riki Kobayashi¹, Yoshiharu Sakurai², Motonobu Tampo³, Kenta Amemiya³, Takahito Osawa⁴, Masaki Fujita⁵

¹Department of Physics, Faculty of Science, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa 903-0213

²Center for Synchrotron Radiation Research, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Sayo, Hyogo 679-5198

³Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801

⁴Materials Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Ibaraki 319-1195

⁵Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577

Keywords: Shuri Castle, lacquer paint film, tung oil yellow coating, synchrotron radiation, prompt gamma-ray analysis

This study investigates the traditional Ryukyuan lacquer technique known as "Kinuri," which is central to the ongoing Reiwa-era reconstruction of Shuri Castle. During the previous Heisei restoration, Kinuri was interpreted literally as a yellow finish using either tung oil or lacquer. However, recent historical research suggests that it may instead be a brownish finish utilizing Kume red clay (Kume-akatsuchi). To provide a scientific basis for its authentic reproduction, we conducted a physicochemical analysis of extant Kinuri lacquer film fragments obtained from ritual utensils used at Izena Tamaudun. Two samples, "AL" and "AS," characterized by a distinct two-layer structure, were analyzed using advanced non-destructive methods. Prompt Gamma-ray Analysis (PGA) at the JRR-3 research reactor revealed that iron (Fe) accounts for approximately 35% of the total mass of sample AL, quantitatively confirming the heavy use of iron-rich red clay as a colorant. Furthermore, synchrotron radiation X-ray fluorescence (XRF) mapping at the Photon Factory (KEK) demonstrated that Fe is concentrated in the outer first layer, which exhibits a stronger red hue. X-ray Absorption Fine Structure (XAFS) analysis indicated that iron exists in a mixed-valence state of Fe^{2+} and Fe^{3+} . Notably, the first layer showed a chemical state similar to magnetite (Fe_3O_4), while the second layer appeared more reduced. These findings strongly suggest that red clay, rather than persimmon tannin (shibu), is the primary coloring agent. The variation in iron's chemical states across layers likely reflects specific traditional processing or kneading techniques, offering crucial indicators for the accurate restoration of Shuri Castle's architectural heritage.

1. 緒言 (Introduction)

沖縄県の世界遺産・首里城は、2019年の火災により正殿をはじめとする多くの建造物が焼失し、現在は令和の再建工事が精力的に進められている。首里城は琉球王国の歴史と文化を象徴する重要な遺産であり、平成の復元以降に新たに判明した知見を活かすことが、再興において大きな課題となっている。その一例として、正殿の御差床（玉座）背後の御床や、火之神を祀る「おせんみこちや」の板壁に施される「黄塗（きぬり）」が挙げられる。

平成の再建工事では史料にある「桐油黄塗（とうゆきぬり）」を文字どおり黄色として解釈し復元していたが、近年の研究で、黄塗は久米赤土を使った茶系色の仕上げである可能性が高いことが明らかになった[1]。黄塗の技法としては、久米赤土もしくは渋（しぶ）を下塗りし、その上から透漆を塗る簡易的な方法であると推測されている。また最近になり、伊是名玉御殿（いぜなたまうどうん）の清明祭で使用される「御道具」が実際に黄塗を施されていることが明らかになり、我々のグループはこの御道具の漆塗膜片を入手することができた。

本研究では、この漆塗膜片を理化学的に調査し、黄塗に用いられた材料（久米赤土、その他の赤土、渋など）や、赤土を顔料として使用していた場合におけるその化合物相や混合状態を明確化することを目的とする。これにより、令和の再建において伝統技術に基づいた、より正確な黄塗の再現が可能となるための科学的根拠を提供したいと考えている。

2. 研究方法 (Research procedure)

本研究では、伊是名玉御殿の御道具から採取された漆塗膜片試料として、図1(左・中央)で示す質量 2.63 mg の「AL」および 1.5 mg の「AS」の2種を用いた。これらの塗膜片試料は赤色が強く薄い第一層と黒色が強く厚い第二層で構成された二層構造になっている。図1(右)では代表例として AS 試料の断面写真とその模式図を示している。各試料の特性や分析目的に応じ、以下の通り異なる手法を用いて非破壊での元素分析および状態分析を実施した。

試料 AL については、塗膜全体の平均的な元素組成を把握することを目的とし、日本原子力研究開発機構

(JAEA) の研究用原子炉 JRR-3 に設置された装置を用いて即発ガンマ線分析 (PGA) を行った。この測定は中性子照射によって放出される即発ガンマ線を計測することで、試料内の各種元素の絶対量 (質量) を決定することができる。実験はすべて室温環境下で実施された。

一方で試料 AS に対しては、微小領域における元素分布や化学状態を詳細に調査するため、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のフォトンファクトリー (PF) において放射光 X 線を用いた分析を試みた。具体的には、蛍光 X 線分析 (XRF) によるマッピング測定および X 線吸収微細構造 (XAFS) のピンポイント測定による化学状態の同定を行い、試料の広域的なスキャンとピンポイント測定を使い分けて実施した。これらの放射光実験についても、一連の行程を室温にて実施している。

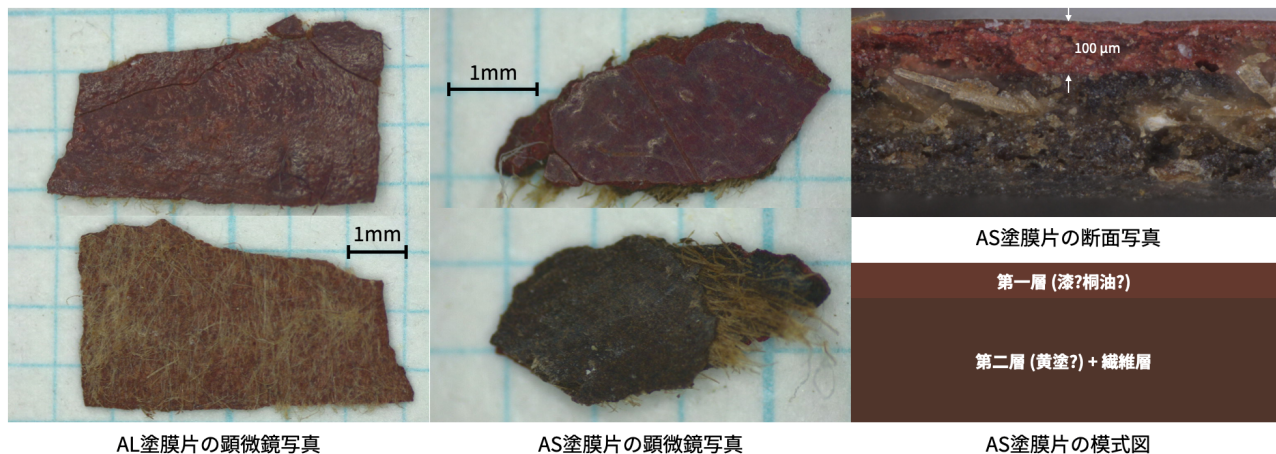


図 1 : AL と AS 試料の顕微鏡写真 (左・中央) と AS 試料の断面顕微鏡写真及びその模式図 (右)

3. 結果および考察 (Results and discussion)

試料 AL に対して実施した PGA の結果を図 2 に示す。本分析により得られた元素組成比は、Fe が 34.66% と最も多く、次いで Si (15.29%), H (4.17%), K (1.42%), Cl (0.18%), B (0.01%) であった。なお、残りの 44.27% は未同定元素 (主に漆の主成分である炭素や酸素などの軽元素と推測される) である。特筆すべき点として、赤土の主成分である鉄 (Fe) が全体の約 35% という高い割合で検出されたことが挙げられる。この結果は、調査対象とした塗膜の着色剤として、鉄分を豊富に含む赤土が多量に使用されていることを定量的に裏付けるものである。

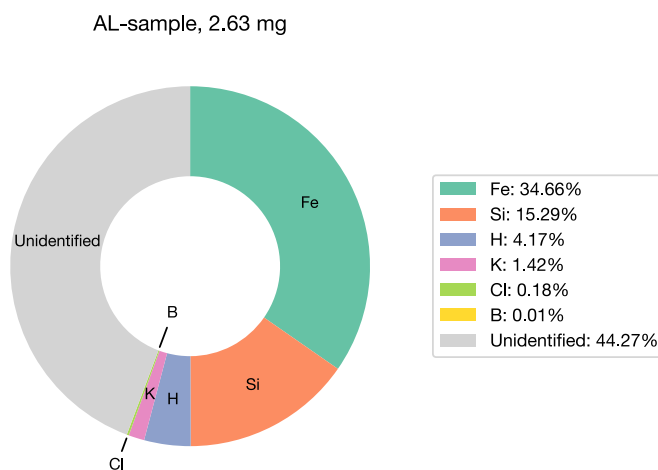


図 2 : 試料 AL の即発ガンマ線分析の結果

次に、試料 AS の断面方向における元素分布を調査するため、放射光 XRF マッピング分析を行った (図 3)。Ti や Ca といった元素が局所的なスポット状の分布を示すのに対し、Fe は塗膜全体にわたって広く存在している様子が確認された。また、塗膜の層構造に着目すると、第一層と第二層では Fe の含有量に明確な差が見られた。特に、目視で赤色の発色が強い第一層において Fe の濃度が高くなっており、層ごとの調合や塗り重ねの技法の違いが元素分布に反映されていると考えられる。

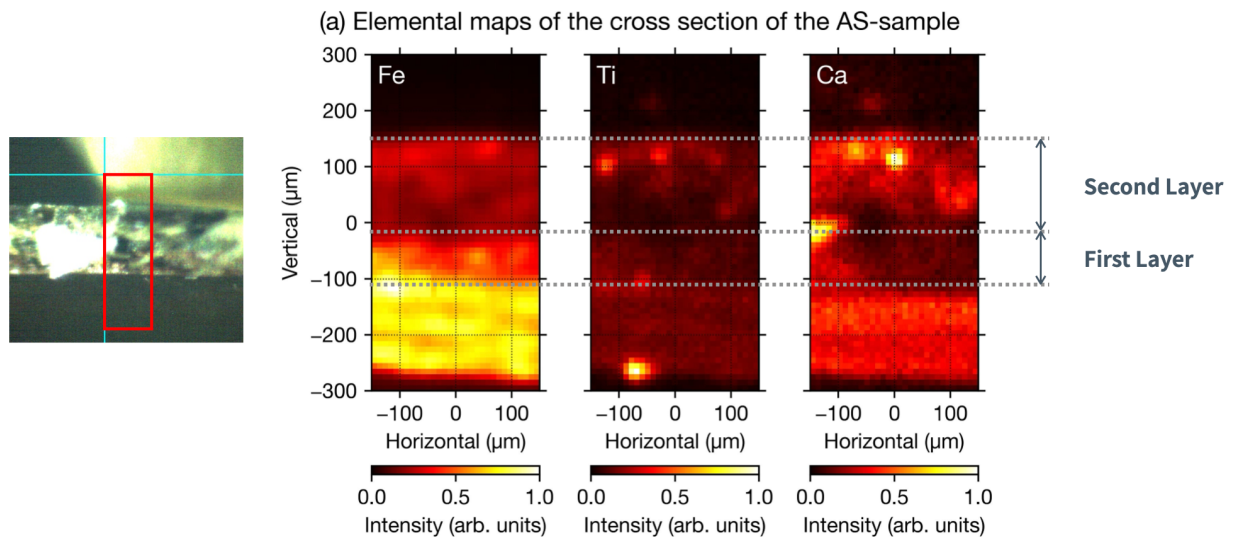


図3：試料 AS の断面方向における放射光 XRF マッピング分析の結果

さらに、鉄の化学状態をより詳細に把握するため、試料 AS の異なる 3 地点（第二層の地点 A、および第一層の地点 B, C）において XAFS ピンポイント分析を実施した（図4）。吸収端近傍の解析から、いずれの地点においても鉄は二価（ Fe^{2+} ）と三価（ Fe^{3+} ）が混在した状態にあることが判明した。地点 B および C における鉄の平均価数は二価と三価の混合価数状態を取る磁鉄鉱（ Fe_3O_4 ）の価数に近い挙動を示した一方で、第二層に位置する地点 A の鉄は、第一層（地点 B, C）と比較してより還元的な状態にあることが示唆された。これらの化学状態の差は、使用された赤土の焼成条件や、漆との混練プロセスにおける化学反応の違いを反映している可能性があり、伝統的な「黄塗」の再現における重要な指標になると考えられる。

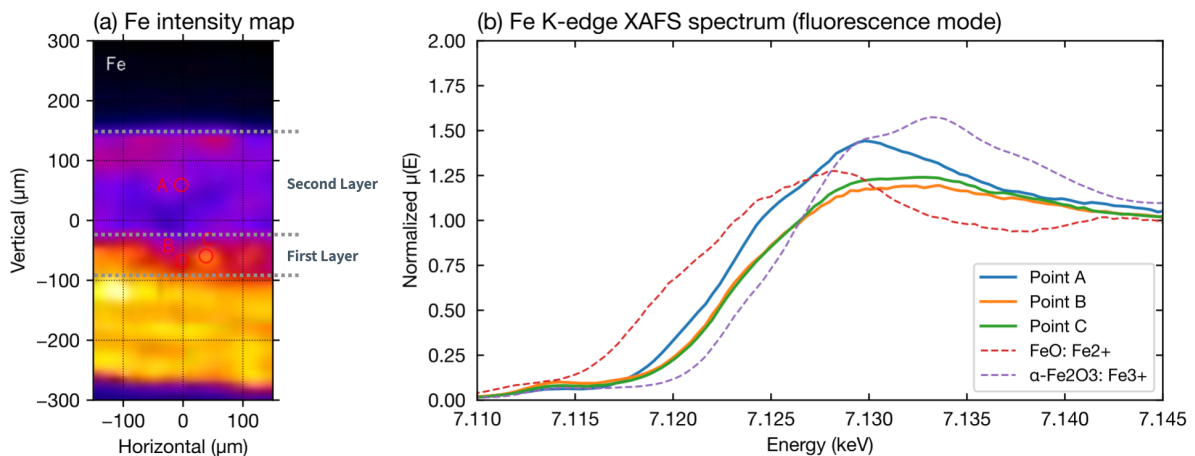


図4：試料 AS の断面方向における放射光 XAFS ピンポイント分析の結果

4. まとめ (Conclusion)

本研究における理化学的調査の結果、首里城の伝統技法である「黄塗」の着色成分には、渋（タンニン）ではなく赤土が主成分として使用されていることがほぼ確実となった。ただし、分析結果から渋との併用可能性を完全に排除するには至っておらず、今後の精査を要する。塗膜の構造解析からは、黄塗が明確な二層構造を持つことが明らかになった。赤色が強く鉄含有量の高い第一層は、混合価数を持つ磁鉄鉱（ Fe_3O_4 ）に近い状態を示した一方、第二層はより還元的な価数状態を有していた。こうした層間での化学状態の差異は、各層において複数の鉄化合物が混在している可能性を示唆している。今後は、原料となる赤土、漆、および桐油の各単体について放射光 XAFS 測定を実施し、第一層および第二層で見られた鉄の価数状態やスペクトルパターンを再現できる材料の組み合わせを特定する計画である。これらの知見を統合することで、伝統技術に基づいた、より科学的根拠の確かな黄塗の再現に寄与することを目指す。

謝辞 (Acknowledgement)

本研究は、東北大学金属材料研究所「新知創造学際ハブ (IKH)」プロジェクトにおける共同利用・共同研究拠点プログラムの支援を受けて実施された。ここに記して深く感謝の意を表す。また、貴重な分析試料の提供および本研究の遂行にあたり多大なご協力をいただいた関係各位に厚く御礼申し上げる。

引用文献 (Reference)

[1] 安里進, 板谷寿美, “黄塗と黄色塗: 首里王府関係史料と尾張徳川家関係史料の分析”, 漆工史=Bulletin of the Academy of Lacquer Research / 漆工史学会 編, **5**, 10-26 (2024).