

リバースエンジニアリングと復元製作品の解析にもとづく 古墳出土環頭大刀の鑄造技術の解明

研究代表者：島根大学法文学部 岩本 崇

研究分担者：慶應義塾中等部 赤岩 千遙 松江市立皆美が丘女子高等学校 大谷 晃二

Elucidation of Casting Techniques for Ring-headed Swords excavated from Ancient Burial Tombs based on Reverse Engineering and Analysis of Restored Products

Takashi Iwamoto¹, Chiharu Akaiwa², Koji Otani³,

¹Faculty of Law & Literature, Shimane University, Matsue 690-0826

²Keio Chutobu Junior High School, Tokyo 108-0073

³ Matsue Municipal Girl's High School, Matsue 690-0835

Keywords: reverse engineering, kofun period, ring-headed swords, casting techniques

This study focuses on ring-pommel swords from the late Kofun period, which are rare in the Japanese archipelago and include early bronze-iron bimetallic artifacts. It aims to understand their manufacturing techniques and characteristics as metallic materials. Specifically, based on reverse engineering from an interdisciplinary perspective combining archaeology and fine arts/crafts—grounded in physical observation of excavated materials and X-ray CT analysis—we will conduct various chemical analyses using reconstructed replicas. This approach will restore the casting techniques and clarify the characteristics of bronze artifacts as metallic materials.

1. 緒言 (Introduction.)

人類史において冶金技術導入の嚆矢となった青銅器は、その普及段階にユーラシア大陸各地の上位層によって保有され、それぞれの社会のなかで稀少財として重要視された。そうした青銅器はおもに鑄造によって製作されるが、その製作プロセスや駆使されたさまざまな技術はもとより、鑄造メカニズム、さらには合金としての特性など金属材料としての基本的な性格はなお不明な点が多い。

また、青銅器には鉄と組み合わせて製作されるバイメタル製品が一定数存在することがユーラシア大陸規模で確認されている。バイメタル製品は、青銅と鉄それぞれの加工適応性など金属材料としての性質を熟知した製作者の手によるものと思われ、ゆえに青銅がどのような特性をもつ金属材料であるかを考えるうえで有効な材料となりうると考える。異なる金属を複合させるがゆえに、金属器の製作技術を検討するうえでは格好の研究対象といえるのである。

上記の点を念頭に、本研究では、日本列島では稀有でかつ初期の青銅と鉄のバイメタル製品を含む古墳時代後期の環頭大刀に注目し、その製作技術および金属材料としての特性を把握することをめざす。とくに、出土資料の実物観察やX線CT解析をふまえた考古学と美術工芸の学際的視点によるリバースエンジニアリングを基礎に、復元製作品を利用しつつ各種の化学分析を実施することで、鑄造技術を復元するとともに金属材料としての青銅器の特性を明らかにする。

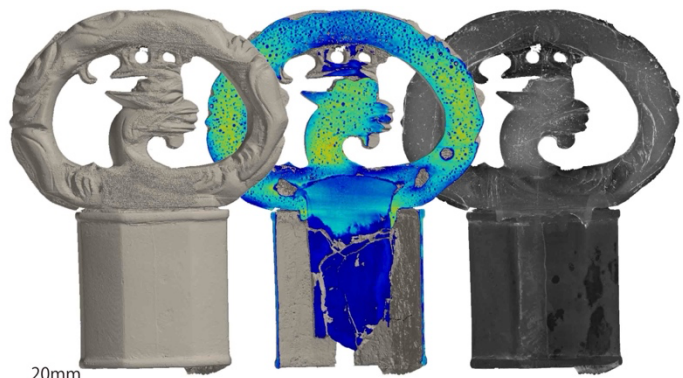
2. 研究方法 (Research procedure)

東北大学考古学研究室が所蔵する島根県鷲の湯病院跡横穴墓から出土した単鳳環頭大刀を対象として、その鑄造技術を復元する。リバースエンジニアリングの追究にあたっては、出土品の詳細な観察、すでに実施済みのX線CT解析ならびに化学組成分析の成果を参照する。そのうえで、出土品の復元品製作の経験が豊富な美術工芸の技術者と連携して、出土品の製作技術・化学組成に忠実な復元製作品を用意し、これの復元精度を詳細な観察ならびにX線CT解析、化学組成分析によって検証する。そのうえで、復元製作品を切断し、金属組織の状態を材料工学の観点から把握する。以上の一連の分析フローについて総括をおこない、金属器製作技術の解明を目的とした新たな研究モデルを構築する。

なお、実施体制については、考古学から岩本崇（島根大学）、大谷晃二（松江市立皆美が丘女子高等学校）、美術工芸（鑄金および彫金）から谷岡靖則（東京藝術大学）、赤岩千遙（鑄金家）、依田香桃美（彫金家）が参画することを想定している。

1) 出土環頭大刀の製作技術復元

考古学的な観察、およびX線CT解析にもとづき鑄型構造を復元する。また、蛍光X線分析により化学組成を把握する。出土品については非破壊分析に限定し、非破壊でリバースエンジ



サーフェスレンダリング (左)

サーフェスレンダリング断面 (中) 青：低密度～黄：高密度 内部構造が明瞭

ボリュームレンダリング (右) 暗：低密度～明：高密度 表面装飾の溝に鍍金が残留

図1 島根県鷲の湯病院跡横穴墓出土
単鳳環頭大刀柄頭

ニアリングをどこまで追究できるかを確認することも本研究の目的の一つとする。復元案は考古学と美術工芸（鑄金および彫金）の観点からおこなう。

2) 環頭大刀の復元製作

リバースエンジニアリングにもとづき、鑄型製作、鑄造を実施する。鑄型製作は一つの案に絞りきれない可能性があるため、想定される場合は複数の案で実施する。その際、一案に対して可能な限り3個体の製作をおこなうことで、個体差に起因する製作時の現象を排除できるように努める。鑄型姿勢、鑄造順序など実験に付随する情報を記録・整理し、比較に備える。

3) 復元品の非破壊分析による鑄造技術の検討

製作した復元品について、表面の観察ならびに X 線 CT 解析を実施し、出土品との異同を確認する。この作業によって、復元品の出土品にたいする再現精度を確認する。鑄造実験の情報と記録も参照しつつ、出土品と比較することで、環頭大刀の鑄造技術の復元をおこなう。

4) 復元製作品の破壊分析による環頭大刀の材料特性

鑄造技術の明らかな復元製作品を利用することによって、青銅器の金属としての材料特性を把握し、出土品の評価に資する所見を獲得する。切断したうえで断面から金属組織を観察することも復元製作品ならば可能となり、出土品の再現精度が高い復元製作品を用意できれば、オリジナルの青銅器の材料特性にも迫りうる。現状では、復元製作品を切断したうえで、SEM-EDX 分析を実施することなどを想定している。

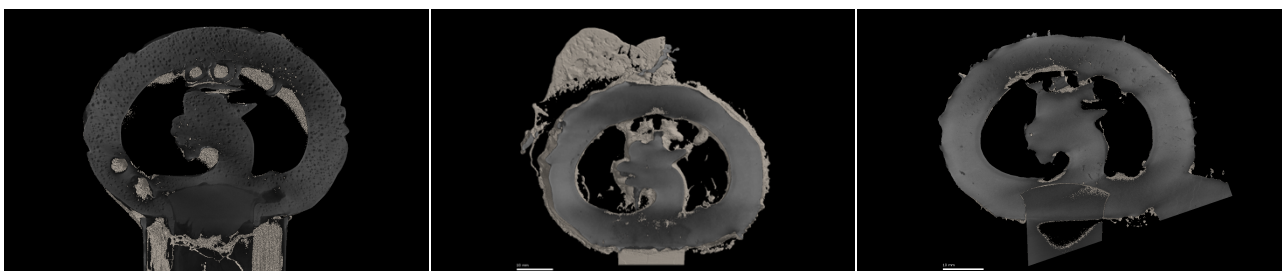
3. 結果および考察 (Results and discussion)

鷲の湯病院跡横穴墓出土単鳳環頭大刀柄頭の実物観察により、熔銅を流し込む湯口の位置を想定し、それをもとに2種類の鑄型を復元製作した。1つは「直湯口」であり、湯口からの熔銅の流れが直線的な注湯構造をもつ。直湯口鑄型によって6点の復元品を鑄造した。いま1つは「板堰」であり、湯口から熔銅が直角に折れて流れる注湯構造をもつものである。板堰鑄型では4点の復元品を鑄造した。鑄造実験は東京藝術大学にて8月を中心に実施した。地金については、実物を Rigaku ハンドヘルド蛍光 X 線分析計で測定（分析計は同社の Nilton XL5Plus、エネルギー分散型・合金モード・FP 法で測定）したデータ（Cu78.149%、Au18.578%、Pb1.328%、Sn0.581%、Ag0.413%、Fe0.193%、Zn0.178%、Sb0.165%、Cd 0.038%）をもとに、表面の鍍金を由来する Ag を除外した 81.422%を 100%に換算しなおした、Cu97.34%、Pb1.62%、Sn0.62%、Zn0.21%、Sb0.19%とした。地金の特徴としては、鉛は少量ながら意図的に添加したものと考えるが、ほかの微量元素は銅に不純物として含まれていたものと推定しておく。

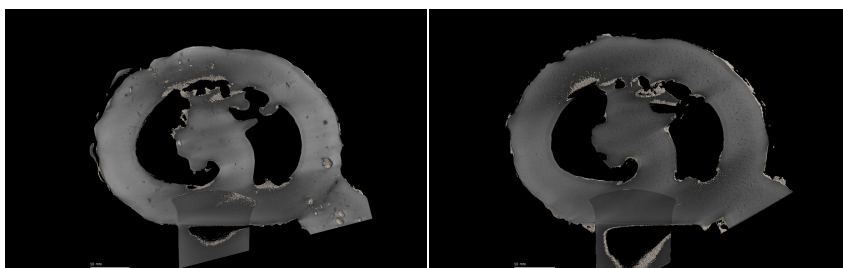
10点製作した復元品のうち、4点（直湯2点、板堰2点）を東北大学総合学術博物館にて X 線 CT 撮影・解析を実施していただき、実物と復元品の相互比較を実施した。画像をみると、実物には復元品よりも明ら



図2 復元製作品鑄造用の鑄型（左：直湯口 右：板堰）



(左：実物 中：直湯口 1-3 右：直湯口 2-1-3)



(左：板堰 2-2-1 中：板堰 4)

図3 X線CT画像

かに鑄巣が目立つが、全体に均質に分布している状況が確認される。内部の鉄製茎も銅材とのあいだにわずかに空隙があるようにみえるが、くわしく観察すると鉄部分の表面に経年による錆が生じていることがわかり、想定湯口付近の大きな空隙以外は、おおそ密着していたと推定できる。復元品は全体に鑄巣が少ないが、均質には存在しており、大きな鑄巣が湯口付近にみとめられる。こうした状況から、全体的な鑄巣の量には実物と復元品には差があるが、大まかには共通する様相とみてとれる。したがって、今後、組織観察や硬さ測定などをおこなうことによって、鉛をわずかに添加した二元系銅合金の材料としての特性を明らかにできると考える。なお、実物と復元品にみる鑄巣の量の相違は、復元品にもちいた素材が電解精錬を経たものであることに起因するのかもしれないが、明確な要因については不明である。

4. まとめ (Conclusion)

2025年度は、環頭大刀柄頭の鑄造実験をおこない、そのなかから対象資料を精選し、X線CT解析をおこない、実物の解析結果との比較から、おおそ同等の様相をもつ点を確認した。ただし、復元品の鑄巣はきわめて少ないため、相対的に鑄巣の多い個体・箇所を利用して、今後、金属材料としての特性を確認できればと考えている。

研究代表者は別のプロジェクトにおいて、Cu71%、Sn 22%、Pb5.3%の漢鏡、ならびにCu71.5%、Sn 23%、Pb5.5%の漢鏡復元品を対象に金属組織観察と硬さ測定を実施している¹⁾。また別に、Cu81.3%、Sn 9.7%、Pb 5.3%の組成をもつ古墳時代倭鏡の金属組織観察にも着手しはじめている。これらは、錫・鉛を含む三元系銅合金であり、本研究で主対象とする環頭大刀とは素材特性が異なっており、比較対象とすることができる。青銅器の主成分となる銅・錫・鉛の配合比率の差が金属材料としてどのように評価できるか、客観的データをもとに明らかにすることを2026年度の目標に据えることとする。

謝辞 (Acknowledgement)

本研究の実施にあたり、東北大学金属材料研究所・新知創造学際領域形成推進室の藤田全基先生、東北大学学術資源研究公開センター博物館の藤澤敦先生より多大なるご協力とご助言を賜りました。島根県鷺の湯病院跡横穴墓出土環頭大刀の実査ならびにX線CT解析にあたっては、東北大学大学院文学研究科考古学研究室ならびに鹿又善隆先生、鑄造実験に際しては東京藝術大学美術学部鑄金研究室の谷岡靖則先生にご高配をいただきました。また、新知創造学際ハブプロジェクトを通じてさまざまな刺激を頂戴しました。記して感謝申し上げます。

引用文献 (Reference)

- 1) 渡邊緩子, 迫田章人, 末廣正芳, 岩本崇, 坂川幸祐: 第2章 漢鏡の材質・構造調査, 考古学と材料科学による東アジア青銅器の学際的研究, 六一書房 (2026) 15-87.