

三角縁神獸鏡の材料科学的研究

—静岡市午王堂山3号墳出土鏡を巡って—

村上 隆

一、はじめに

三角縁神獸鏡は、古墳時代に出土する青銅製の鏡であり、外周を巡る縁の断面の形状が三角形であること、鏡背の文様に神像や靈獸とみられる図像が配されていることからその名で呼ばれる。神獸図像の数や配置にさまざまなパターンがあり、また同じ文様を有する、いわゆる兄弟鏡も多数存在し、すでに四百面を超える鏡の出土をみている。製作地や製作技術を巡る考察や、兄弟鏡が出土した古墳の分布などから鏡の所有者間の支配関係を論ずるなど、様々な観点からの論争が繰り返されており、日本考古学史上もっとも注目を浴びている遺物の一つといって過言でない。

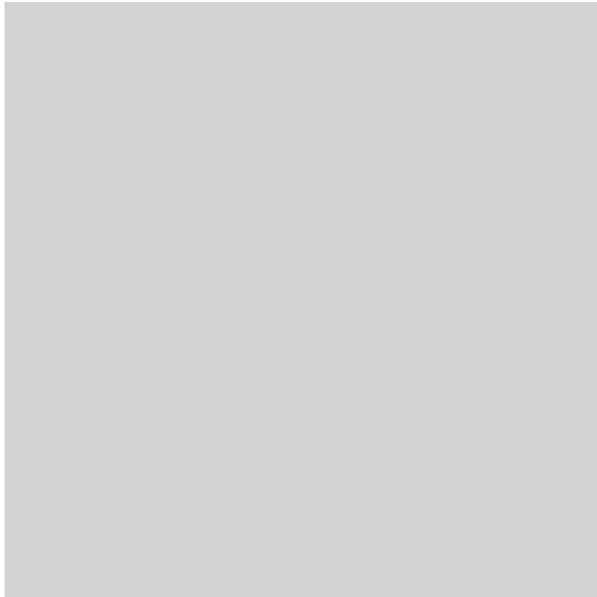
本研究は、静岡県静岡市清水区（旧清水市）の午王堂山3号墳から出土した一枚の三角縁神獸鏡の保存処理に伴い、材料科学のさまざまな分析手法を用いて解析した成果を報告し、三角縁神獸鏡の研

究に新たな指針を提示することを目的としている。

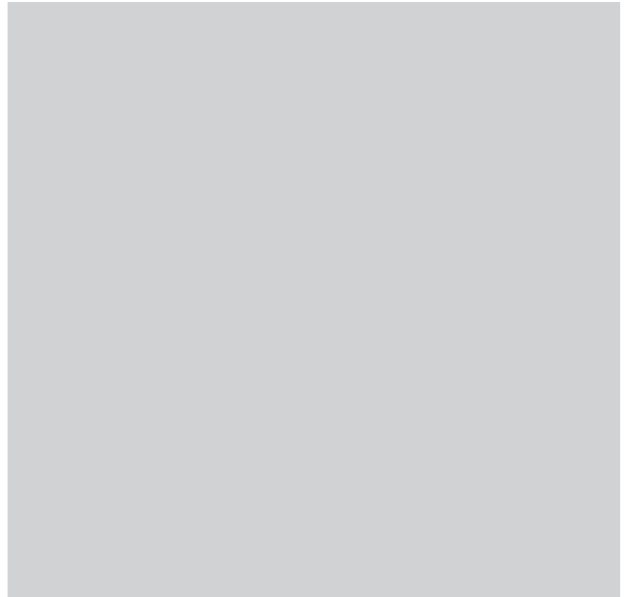
一、静岡市午王堂山3号墳から出土した

三角縁神獸鏡

旧清水市に位置する午王堂山3号墳は、墳長七八メートルを測る大型前方後方墳であり、昭和四八年（一九七三）の発掘調査によって、三角縁神獸鏡が一面出土した。¹「三角縁君宜高官獸文帯四神四獸鏡」である（挿図1）。鏡背の文様を同じくする兄弟鏡としては、伝「三重県桑名市出土鏡」（熱海市MOA美術館所蔵）が唯一の確認事例である。鏡の直径は、二二・六センチメートルである。出土時にはすでに割れて細片に分かれていたが、出土後三〇年を越える年月そのままの状態²で保管されていたため、腐食が進行し、さらなる劣化をみていた。平成一九年（二〇〇七）、（財）静岡県埋蔵文化財調査研究所において保存処理を実施するにあたり、保存処理に伴



挿図2 X線ラジオグラフィー



挿図1 出土直後の「三角縁君宣高官獣文帯四神四獣鏡」(静岡市午王堂山3号墳)
(鏡背に棺材の一部が貼りついた状態)

う基本的な調査であるX線透過撮影、顕微鏡観察などに加えて、鏡本体に対して詳細な材料科学的調査・研究を実施した。さらに、非接触三次元デジタルによる高精度な形状測定も行うなど、三角縁神獣鏡に対する総合調査とすることができた。今回の調査は、三角縁神獣鏡の本質に迫るために、材料科学的な総合調査・研究の重要性を再確認する機会と位置付けることができよう。

三、保存処理

今回実施した保存処理の基本は、一般的な青銅製遺物に対する処理法に準じた。なお、保存処理は、(財)静岡県埋蔵文化財調査研究所において行われた。

関係者による綿密な打ち合わせに基づいて計画された処理作業の流れは、以下の通りである。

- ① 事前調査 (X線透過撮影など)
- ② 処理前記録
- ③ クリーニング
- ④ 安定化処理
- ⑤ 強化処理
- ⑥ 接合・修復
- ⑦ 処理後記録

処理前のX線透過撮影の結果を挿図2に示す。たいへん多くの細片に分かれ、また健全に見える部分にも細かいクラックが入ってい

ることが確認できる。保存処理に際しては、顕微鏡下で注意深く観察し、細かい破片もできるだけ原位置に戻すように努めた(図版3)。

③クリーニングでは、アクリル樹脂B-72の5%キシレン溶液を全面塗布(表面に付着する赤色顔料の保護)し、硬化後にアセトンで少しずつ溶解させながら竹串や医療用メス、綿棒で泥などの汚れを除去した。④安定化処理として、ベンゾトリアゾールの2%エタノール溶液を減圧含浸した。⑤強化処理は、B-72の10%キシレン溶液を減圧含浸。⑥接合・修復は、亀裂部および欠損部にエポキシ樹脂とフェノールマイクロバルーンの混合ペーストを充填し、整形後にアクリル絵の具で補彩した。また、保管用の載台をシリコン樹脂とエポキシ樹脂で作成した。

なお、上にも触れたが、表面に付着していた赤色顔料は、埋葬時に蒔かれた、施朱されたものと判断し、その状況を改変しないように原位置に留めるように処理をした。

四、材料科学的調査・研究

(1) 赤色顔料について

鏡背の文様部分に赤色顔料が付着していた。処理段階で採取した赤色顔料粒子に対して走査型電子顕微鏡(SEM)観察するとともに、付帯するX線分析装置で分析した。その結果、赤色顔料は、硫化水銀(HgS)、いわゆる朱であることがわかった。粒子の大きさは、五〇〇マイクロメートル程度である。

(2) 鏡断面の分析と材質について

発掘調査によって出土した金属製遺物は、土中の環境下で腐食が進み、一般にはサビで覆われている場合がほとんどである。しかし、実際に表面に生成されたサビを取り除いて遺物の内部を直接分析することが許される場合は極めて希である。従って、蛍光X線分析によって表面からの分析が行われるにとどまることが多い。しかし、ここで注意しなければならぬのは、厚くサビに覆われた表面からの分析、いわゆる非破壊的手法による分析では内部の材質の正確な組成情報を得ることはできない^{③④}、ということである。

今回の調査では、細かく割れた破片の一部分を樹脂に包埋して樹脂埋め試料を作成し、その断面を磨き出すことによって、鏡本体の実際の姿を正確に把握することをめざした。

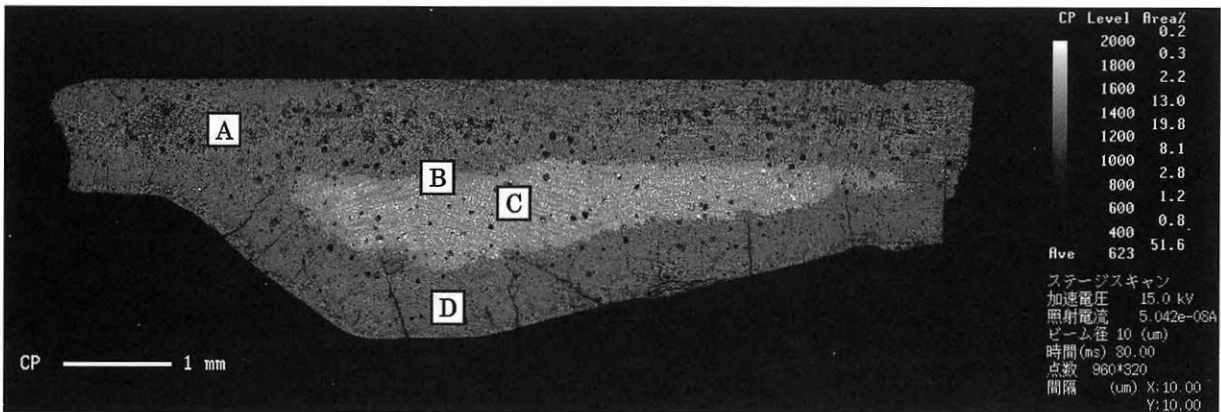
図版4に、午王堂山古墳出土の三角縁神獣鏡の鋸歯文部分の断面の光学顕微鏡観察を示す。まずここで注目すべきは、最も薄い部分の厚さが1ミリメートル程度しかないことである。このような薄さは、鑄造後に青銅鏡の鏡面を磨くことによって達成されたという推定もできるが、いずれにしろ青銅鏡製作の技術水準を知る上でもたいへん重要である。このような平滑な鏡面の仕上げがどのような技術によってもたらされたかという点からも興味がつきない。さらに、この断面観察からもわかるように、表面からの腐食の進行が激しく、表裏両面それぞれ三〇〇〜五〇〇マイクロメートルの厚さの腐食層が形成されており、中央に残るオリジナルな組成を持つと期待できる健全な部分がほとんど遺存していないことがわかる。厚みが最も薄い部分では、表裏双方から進行した腐食のため、健全な部分はまったく存在していない。この観察からわかるように、出土した青

銅鏡は一見しっかりしているように見えていても、実際には表面から相当深部まで腐食層として変質している場合があるということがわかる。この事実は、古代の青銅器を取り扱う上で大変重要な知見としてよく認識しておく必要があるだろう。

挿図3は、同じ部分の電子顕微鏡観察（反射電子線像）である。中心部分の白色部分は、金属質が残る健全なところ、周辺のグレー部分は腐食が進んだところである。球状に黒く抜けて見える部分は鑄込時に生じた空隙、いわゆる鬆である。観察視野では、鏡面側に鬆が集中している様子が窺える。

さて、この鏡断面の構成成分を電子線プローブマイクロアナリシス（EPMA）によって分析した。なお、EPMAなどの測定は、(株)コベルコ科研にて行った。

電子線の照射によって励起される特性X線を計測することによって、その部分の元素組成と配分を知ることができる。測定領域は、次の4ヶ所である。(A) 鏡面側腐食層、(B) 腐食層と中央健全全部との境界、(C) 中央コア健全全部、(D) 文様面側腐食層、である。測定結果を、表1に示す。鏡の表裏それぞれに生じた腐食層(A)、(D)を比較すると、双方とも銅とスズの組成比が、青銅本来の配分とほぼ逆転する現象が生じている。そして、酸素が二五・三七％、三七・〇六％といずれもたいへん高い値を示し、この層の酸化が進んでいることがわかる。逆に(C)は、かなりスズ濃度が高い青銅の組成を示すとともに、酸素も〇・九一％と極めて低く、この部分が製作当初のオリジナルな組成を遺存していると判断できることがわかる。また、腐食層とコア健全全部との境界に位置する(B)は、中間的な値を示した。ちなみに、中央の健全なコア部分で大きさ



挿図3 鋸歯文部分断面の反射電子線像（図版4と同じ部分）

表1 鏡断面のEDS半定量分析の結果（A～Dは、図5における分析ポイントA～Dに対応）

	Cu	Sn	Pb	As	O	Si	Al	Cl	P	(wt%) S
A	25.72	44.20	2.93	0.80	25.37	0.82	-	-	0.18	-
B	37.83	29.20	10.03	0.47	17.85	-	-	4.34	-	0.29
C	72.97	21.21	4.54	0.36	0.91	-	-	-	-	-
D	8.24	46.52	4.97	0.83	37.06	2.04	0.15	-	0.20	-

〔(三〇〇×三〇〇) 平方マイクロメートル〕の平均値は、銅七五・六%、スズ二一・二%、鉛三・二%となり、この値は青銅鏡が鍍込まれた当初の組成に近い値と見なしてよからう。この値は、これまで三角縁神獸鏡に対して同様の分析法で得た分析値とよい整合性を示している。

次に、図版5にこの鏡断面における元素分布をカラーマッピングで示す。対象とする元素は、銅(Cu)、スズ(Sn)、鉛(Pb)、ヒ素(As)、酸素(O)、塩素(Cl)、イオウ(S)、シリコン(Si)である。それぞれのカラーマッピングから、元素の分布状態が読み取れる。銅、スズ、鉛、酸素に関しては、上で詳細を述べたとおりの分布をしていることがわかる。埋蔵環境下、一八〇〇年を越える年月を経ると、鏡の構成元素がこれだけドラステックな動きをすることを改めて教えてくれる。ヒ素やイオウに関しては、表面腐食層より内部コア部分の方が若干濃度が高い傾向が認められるが、シリコンは腐食層における濃度が明らかに高いことがわかる。

ここで注目すべきは、塩素である。かねてから塩素は腐食を促進させる元素として位置づけられているが、このマッピングからもそのことがはっきりとわかる。腐食層と健全なコア層の界面に集中し、健全層をアタックしている様子が窺える。保存処理の一工程に「脱塩処理」を設けているが、ここでみるように塩素は遺物内部に集中しており、これを短期間の処理で完全に除去するのが難しいことを改めて認識するのたいへんわかりやすい事例である。

青銅は、銅とスズの合金であって、スズの含有量によって色が変化する合金である。今回得られたスズ二一・一%という値は、少し黄金色を呈した銀灰色を示す値である、現在は、緑青サビで覆われ

てしまっているが、製作当初の色を想定する手がかりになる。

これまでも出土した青銅器に対して、表面からの非破壊分析法としての蛍光X線分析と遺物内部の健全な部分への分析との比較検討を行ってきたが、非破壊的手法である蛍光X線分析は遺物表面の腐食層である領域(A)や(D)を分析しているに過ぎないことを、この断面分析によって改めて検証することになった。

五、三次元デジタルを用いた

三角縁神獸鏡の三次元形状計測

三角縁神獸鏡に対する関心は、主に鏡の背面に意匠されたさまざまな文様に注がれるのが一般的である。そして、同じ文様を持つ、いわゆる「兄弟鏡」の存在も、文様面が重要視される理由の一つでもある。従って、これまで三次元デジタルを用いた調査は文様の比較検討を中心に行われてきた。本研究は、非接触三次元デジタルを用いて、従来から行われてきた鏡背の文様だけではなく鏡面側も計測し、鏡全体を三次元的立体物として高精度に構築することを試みた初めての事例となる。

なお、計測は、コニカミノルタセンシング(株)の協力を得て行われたものであり、使用した装置は、コニカミノルタセンシング(株)製「非接触三次元デジタルレンジ」である。光源としてクラス2の波長六〇〇ナノメートルの半導体レーザーを用い、三角測量に基づくレーザ光切断方式をとり、撮影画素数は一三一万画素、四マイクロメートルの精度を持つ。

図版6は、三次元デジタルの計測により完成したデジタル画像

挿図4 鏡中央部の断面（四角枠で囲った部分が図版4（挿図3）において断面を観察した部分にあたる）

化した午王堂山3号墳出土の三角縁神獸鏡である。色は、四章の材質分析によって得たデータに基づいている。少し金色を帯びた銀灰色が想定される。この画像は、実際にはコンピュータ上で三次元的に自由に回転することが可能である。

図版7に文様の細部を示した。肉眼観察では表面のサビや汚れの情報が邪魔になるが、レーザ計測で得られる画像は高精細な凹凸情報だけで構成されるため、これまでに経験の無い鮮明な文様を抽出できることがわかる。

また、デジタル化された三次元画像は任意の断面で切ることができる（図版8）ため、これまでの実測では達成できなかった高い精度で断面を提示できることが可能となった（挿図4）。挿図4において、四角枠で囲った部分が、四章で実際に断面観察した部分に対応する。三次元デジタルの結果でも厚さが一・〇六ミリメートルと精度よく測定できることがわかった。

今回の計測により、独特のソリを持つ凸面状の鏡面の具体的な形状や、鏡断面の正確な測定が可能となった。鏡の形状に関する計測データと、四章で得た材質に関する材料科学的データを合わせることにより、三角縁神獸鏡の総合的な研究が可能となった意義は大きい。今後、兄弟鏡の比較検討などにさらに精度を上げることにつながることも

のと考える。

六、まとめ

静岡市午王堂山古墳出土の三角縁神獸鏡の保存処理に伴って、材質分析、腐食状態の把握、三次元形状計測など、最新の機器を用いた材料科学的な総合調査を実施した。三角縁神獸鏡に対する総合的調査・研究として、材質や製作技術などを探る上で重要な知見を得ることができた。特に、三次元デジタルによるレーザ計測を用いて鏡全体を三次元立体物として捉える方法は、今後さらに調査事例を増やしていくことによって、鏡の製作技術の本質に迫ることも可能であると期待している。

〈謝辞〉

本研究を行うにあたって、次の方々にお世話になった。ここに記して感謝の意を表す。西尾太加二・大森信宏・細澤明子（静岡県埋蔵文化財調査研究所）、新井正樹（静岡市）、市原壽文（静岡大学）、柳沢伊佐男（NHK）、近藤英隆・有原八郎（株式会社コベルコ科研）、中尾光孝・安形公一（株式会社ニカミノルタセンシング）

〈参考文献〉

- 1 『午王堂山3号墳 発掘報告書』 清水市教育委員会（二〇〇一）
- 2 村上 隆・西尾太加二・大森信宏・細澤明子・新井正樹・市原壽文…『静岡市午王堂山古墳出土から出土した三角縁神獸鏡の材料科学的研究と保存』『文化財保存修復学会 第三十回大会発表要旨集』（二〇〇八）
- 3 村上 隆…『青銅器の科学的研究における課題と展望』『考古学ジャーナル』40（ニューサイエンス社）（二〇〇一）

- 4 村上 隆：「科学の眼」でモノを見るために―材料分析を中心に―
『金工技術』（日本の美術 No.443）至文堂（二〇〇三）
- 5 村上 隆・肥塚隆保・沢田正昭：「雪野山古墳出土の青銅鏡に対する科学的調査研究」『雪野山古墳発掘報告書』（八日市市教育委員会）（一九九六）
- 6 村上 隆：「西求女西求女塚古墳から出土した青銅鏡に関する科学的研究」『西求女古墳発掘調査報告書』（神戸市教育委員会） pp.307-320（二〇〇四）
- 7 村上 隆・山崎一雄：「椿井大塚山古墳出土三角縁神獸鏡の金属学的キャラクタータリゼーション」文化財保存修復学会第二十五回発表要旨集（二〇〇三）
- 8 村上 隆・山崎一雄・樋口隆康：「三角縁神獸鏡の金属学的研究―椿井大塚山古墳出土鏡を中心に―」日本文化財科学会第二十三大会発表要旨集（二〇〇六）
- 9 村上 隆：「脱塩とは何か」『保存科学研究集会九六資料』（奈良国立文化財研究所）（一九九六）
- 10 奈良県立橿原考古学研究所編：「二次元デジタル・アーカイブを活用した古鏡の総合的研究」（橿原考古学研究所研究成果、第八冊）（二〇〇五）
- 11 Ryu MURAKAMI, Masaki SAWADA, Paul JET, Tom CHASE: "A Scientific Study of Identical Bronze Mirrors from Japan", "Scientific Research in the Field of Asian Art" 97-102, (1100111), Archetype (London)