

埴輪研究における三次元計測の可能性と課題

廣瀬 覚（奈良文化財研究所）

3D Measurements in Haniwa Research: Potential and Challenges

Hirose Satoru (Nara National Research Institute for Cultural Properties)

・ 埴輪／Haniwa ・ 三次元計測／3D measurements ・ 実測図／Measured drawing
・ ハケメパターン／Tree-ring-mark pattern

1. はじめに

近年、SfM - MVS法の普及を受け、埴輪研究においても三次元計測を用いた研究事例が散見されるようになってきた。筆者もその可能性に大いに期待を寄せる一人であり、いくつかの場面で三次元計測を用いて報告や論文を公表してきた（阪口編2019、廣瀬2021）。ここでは、その過程で実感した埴輪研究における三次元計測の可能性や課題について論じてみたい。

とは言え、筆者自身はいたってアナログ人間であり、三次元計測の方法や原理の部分に関しては、確たる知識を持ち得ていない。小論は、あくまでも三次元計測の埴輪研究への応用と実践に関する筆者の経験談であることを予め断っておく。

2. 実測図の代替として

埴輪研究者が三次元計測に寄せる期待としてもっとも大きな事柄は、きめ細かな表現が求められ、長時間の作業が強いられる実測作業の代替として、三次元モデルの出力画像を活用することであろう。この点は埴輪研究に限ったことではないが、三次元計測の導入は他の事例と同様、実際にはさほど大きな時間短縮とはならない。Agisoft Metashapeを使用した作業でも、ハケメやナデなどの調整痕跡の凹凸をしっかりとモデル上で出力するためには、1枚1枚の撮影においてそれなりの接写が求められる。接写

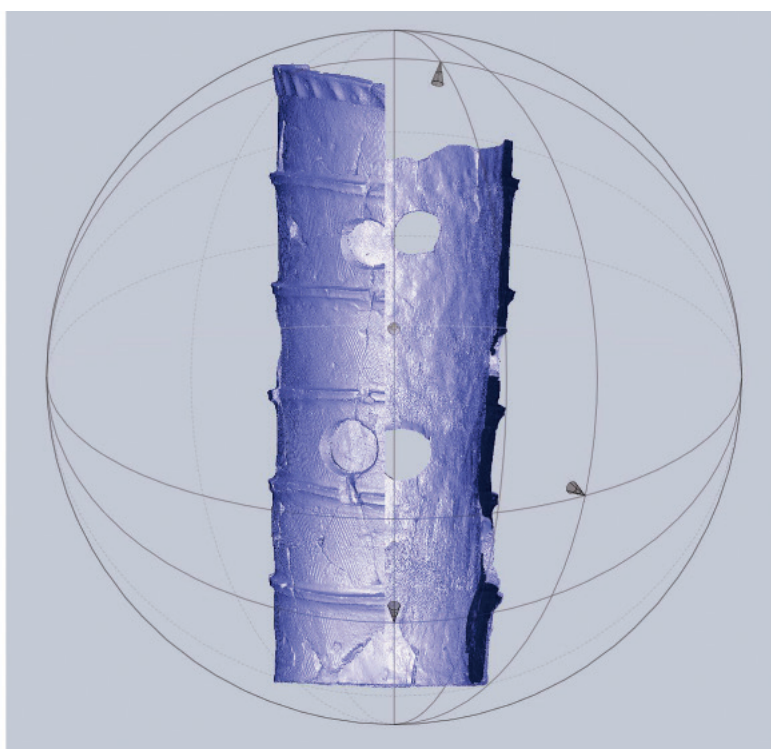
により撮影枚数が多くなればなるほど、モデル完成までに要する時間が増大する。さらに、内・外面を一体的にモデル化するフルモデルでは、内・外面を繋ぐ厚さ2cm以下の薄い断面部分をアライメントしやすいよう重複させて撮影することが求められるため、さらに撮影枚数がかさむ。

フルモデルではなく、破片資料などを内・外面個別に撮影するのであれば、比較的短時間でモデル作成が可能である。ただし、あくまでも従来の実測図仕様での提示にこだわるのであれば、断面を別途、手作業で実測しておく必要がある。破片資料の内・外面を個別にモデル化する場合でも、モデルのオルソ出力に際して、双方の形状を完全に対応させて表示する作業は至難の業となる（フルモデルでは回転機能で6面を機械的に対応させて出力することが可能）。そもそも手実測ではトレーシングペーパーなどを使用して作図時に内・外面の外形に対応させて図化するが、三次元計測ではその作業が後回しとなるのである。

以上の点を考慮するならば、むしろ破片資料こそ、フルモデルで作成しておいた方が、断面の表示や反転作業も、機械的に実施できるので、急がば回れとなるかもしれない。とはいえ、フルモデル用の撮影は、破片を文鎮等で挟んで樹立させ、内外面360度を撮影する必要がある、かつ破片を最初の向きとは天地を逆転させて2回目の撮影を行い、双方のモデルをトリミングの上、チャック機能を用いて統合



ライティングなし（いわゆる眠たい画像）



ライティングの調整作業（ライトの位置を移動させて可視化しやすいポイント探る）

図1 ライティング機能を使用した埴輪三次元モデルの陰影強調

する必要がある。手実測に慣れた方なら、従来通りの実測の方が早いと即断されることだろう。

ちなみに、私自身は三次元モデル上でDelete機能などを使用して切り出された断面は、従来の実測図の断面と比べて滑らかさに欠けると、そのままでは色調的にも視認しづらいので、断面ラインについてはデジタルトレースを重ねるようにしている。断面中の接合痕（破線）や回転体としての実測図中軸線なども、当然、三次元モデルでは出力されないため、トレース時に書き込む必要がある（図4・5）。ただしそれらの点は、どこまで従来型の実測図としての提示にこだわるかどうかの問題であり、二次元の図面として提示する必要がなくなれば、自ずと不要の作業となるであろう。

もう1点、筆者のこだわりとしては、三次元モデルの出力画像を実測図の代替として使用する場合には、手の込んだ画像処理はおこなわないということを徹底している。三次元計測データの活用方法として、調整痕跡のような微細な凹凸を強調して出力する様々な手法が実践されているが、こうした画像処

理を経た解析画像と実測図としての三次元モデル画像は一線を画しておいた方が良いというのが筆者の考えである。画像処理の技術により目視では確認できない、あるいはしづらい情報の明示が可能になることが大いに期待されるが、それを実測図の代替として使用してしまうと、実際の資料でもあたかも肉眼でそのように視認できるかのような誤解を与えかねない。

一方で、Agisoft Metashapeで作成したテクスチャーモデルをそのままペーストした図面がしばしば散見されるが、陰影のコントラストが弱いテクスチャーモデルのままでは、ハケメ等の微細痕跡は十分に伝わらないのも事実である。私自身はソリッドモデル（ポリゴンデータ）をライティング機能のある3Dソフトを用いて、斜光で陰影を強調する方法をとっている。これであれば、実物でも目視可能なレベルでの視覚的表示となり、実測図として実物と照合した時の違和感もほとんどない（図1）。陰影を強調して撮影する遺物写真と線画で認識を書き込む実測図との中間的、融合的なデータといえよう。ラ



図2 円筒埴輪の三次元モデルと実測図化の問題点

イテイングは、一灯よりも複数灯の方が、広範囲をムラなく照射できるが、残念ながら文化財向きの3Dソフトで複数灯でのライティング機能を備えたものは、例えばGeomagicなどを除くとあまり存在しないのが現状のようである。

いずれにしても、三次元で取得したデータを二次元の実測図仕様に転換する作業は、相当の手間暇を要し、しかも情報量を半減どころか、大部分を捨象してしまうことにもなる。例えば、完形の円筒埴輪を内・外面フルモデルで三次元計測できたとしても、実測図仕様で出力してしまうと、内・外面それぞれ360度の90度分の画像しか表示できなくなる。くわえてオルソでの出力となるため、見通しにより歪みが生じる左・右端の部分は、湾曲の雰囲気伝える効果はあっても、製作技法等の情報はほぼ失われたかたちとなる。

また、残存率が部位によって不均等な埴輪や後期の歪みの大きい円筒埴輪などは、実測図仕様で出力する際、どの部位をどう切り出すかで印象が大きく

異なってくる（図2）。無論、この点は手実測の場合も同様であるが、我々は実測の際、できるだけ多くの情報が図化できるよう、あるいは元の形が復元的に伝わるよう、かなりの操作を行っていることにあらためて気づかされる。アナログ作業で自然のながれで行っているそうした操作は、機械的なデジタル作業では再現が極めて困難なのである。鋭意努力して実現しようとすればするほど、三次元のそのままの形で見せた方が良いのではとの思いが強くなるのは皮肉なことである。

実測図仕様にこだわる背景としては、やはりこれまで蓄積されてきた図面やそれを用いた分厚い研究史との調和を果たしたいという願望がある。私自身はアナログ人間であるので、できればすべて線画に起こしたいという気持ちもある。しかしながら、三次元モデルの出力画像を内・外面の調整まで線画で起こすとなると、さらなる労力を費やすことになり、実現性は乏しい。

実測図自体が認識の表現媒体としての性格を多分

に帯びていることを踏まえれば、三次元モデルによる実測図の作成に過度な原理主義を持ち込む必要もないように思う。内・外面シルエットの些細な相違や断面の見えづらさなども、ご愛敬程度で向き合う方がよいのかもしれない。三次元計測がどれだけ深化しても、実物の観察が不要になることはない。むしろ受け取り手の方が三次元データであるからといって、まったく問題のない完全データであるかのように錯覚する弊害の方を危惧すべきであろう。

以上のように、埴輪実測作業の効率化としては、必ずしも大きな期待を寄せることができない三次元計測であるが、三次元計測の価値は、単に記録の効率化だけではなく、一度、モデル化しておけば、将来的にはあらゆる場面での活用が期待できる点にある。この点も埴輪に限らず、すべての資料に対していえることである。webサイト等での公開やデータベース化、ひるがえって完全デジタル3D 報告書等が実現可能になれば、もはや二次元での実測図化に執着する必要はなくなろう。誰でも自由に三次元データにアクセスでき、必要なデータを取得できるようになることが理想である。

3. 同工品分析への可能性

実測図をめぐる将来的な課題はおくとしても、埴輪研究が三次元計測に期待する事柄はほかにもある。その最たるものが、いわゆる同工品分析での活用であろう。個々の埴輪工人の作り癖や使用工具の異同を吟味して、出土埴輪1点1点を製作工人ごとの製品として識別し全体を再構成することで、生産組織の構造的把握を目指すのが同工品分析である。

こうした同工品分析に対して、従来型の実測図はほとんど意味をなさないといってよい。前述のように、実測図は観察者の認識を時に強調して書き込むのが是とされる。実測図は、完全なありのままの客観的な図ではなく、誇張や抽象化を含む主観的作品といふべきものである。通常、同工品識別の結果までを念頭において実測図が作成されることはなく、作図の際の「認識」において重視されるのは、せいぜい

年代や地域性、系統上の特徴や属性に過ぎない。むしろ実測図は、埴輪工人の作り癖よりも、作図者の描き癖の方が際立つのが常であり、当然、同工品識別の結果を伝達する手段とはなりえないのである。

これにたいして、三次元モデルは計測者の癖が反映されることはなく、個体ごとの特徴がありのまま出力されるため、同工品識別の結果の提示や検証において極めて有効となる。また、同工品識別において重視されるハケメパターンの抽出も、モデルが共有されていれば、いつでもだれでもどの部位からも自由に抽出が可能となる。異なる古墳（遺跡）間、資料所蔵機関間での同工品やハケメパターンの異同判定にも、三次元モデルとその公開が将来、有効に機能するものと期待される。

4. 同工品分析での予備的实践

図3～5は、こうした期待から、予備的实践として、既に生産地・消費地間で製品供給の実態が確認されている事例について、双方の資料を三次元計測し、ハケメパターンの抽出もおこなって、分析の効果を検証したものである（廣瀬2021）。

対象としたのは、6世紀代の王権中枢部における埴輪生産拠点として著名な奈良市菅原東埴輪窯とその供給先の消費地資料である。菅原東窯の製品は、約10 km南の大和郡山市南部や天理市北部にまで流通していることが先行研究によりあきらかにされている。その際、ハケメパターンの同定とその結果は拓本によって提示されていた（田中2013）。

拓本は手実測による線画とは異なり、埴輪表面の痕跡を客観的に写し取るため、工人の作り癖を提示するのに適している。近年では、ハケメパターンの同定結果の提示はスケール調整を施した等倍写真によってなされる場合が一般的であるが、拓本は同時に広範囲のハケメパターンを迅速に抽出することができるため、同一個体内のハケメ工具の変化（正逆反転を含む）の可能性にも留意したデータの蓄積ともなり得る。ただし、ハケメパターン細部の凹凸や立体感を提示するには、拓本では限界があるのも事

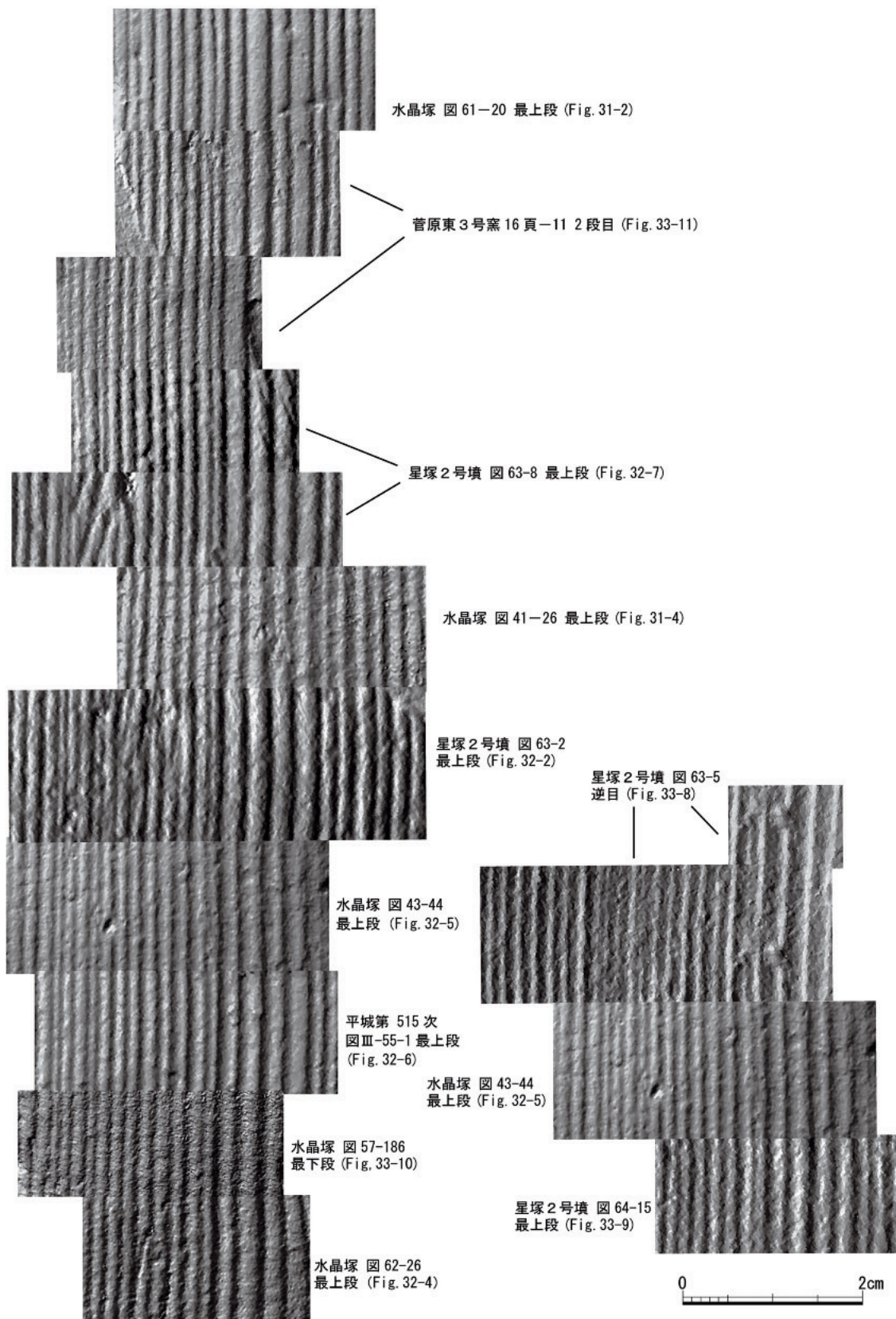


図3 菅原東窯産埴輪のハケメパターン同定（三次元画像）

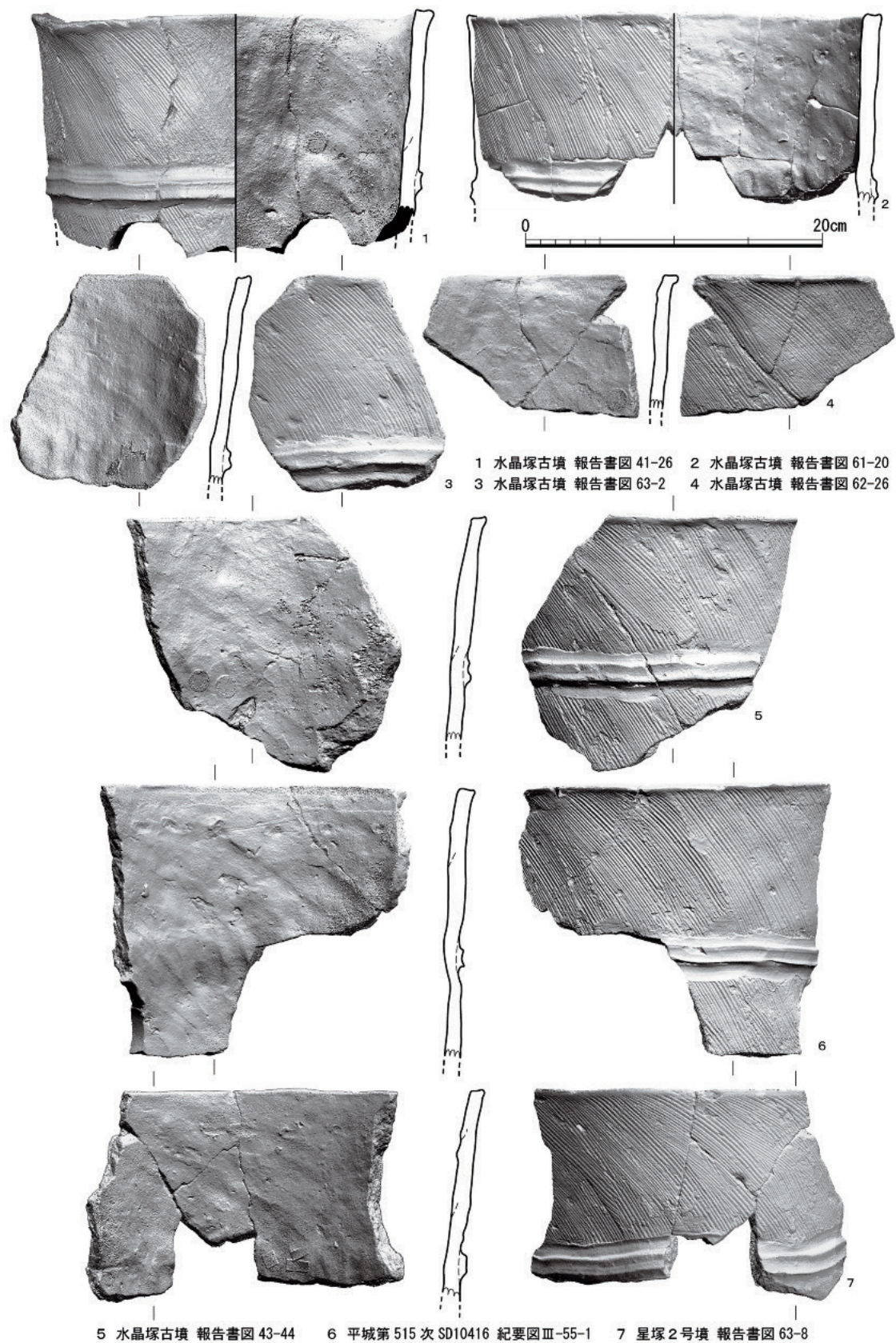
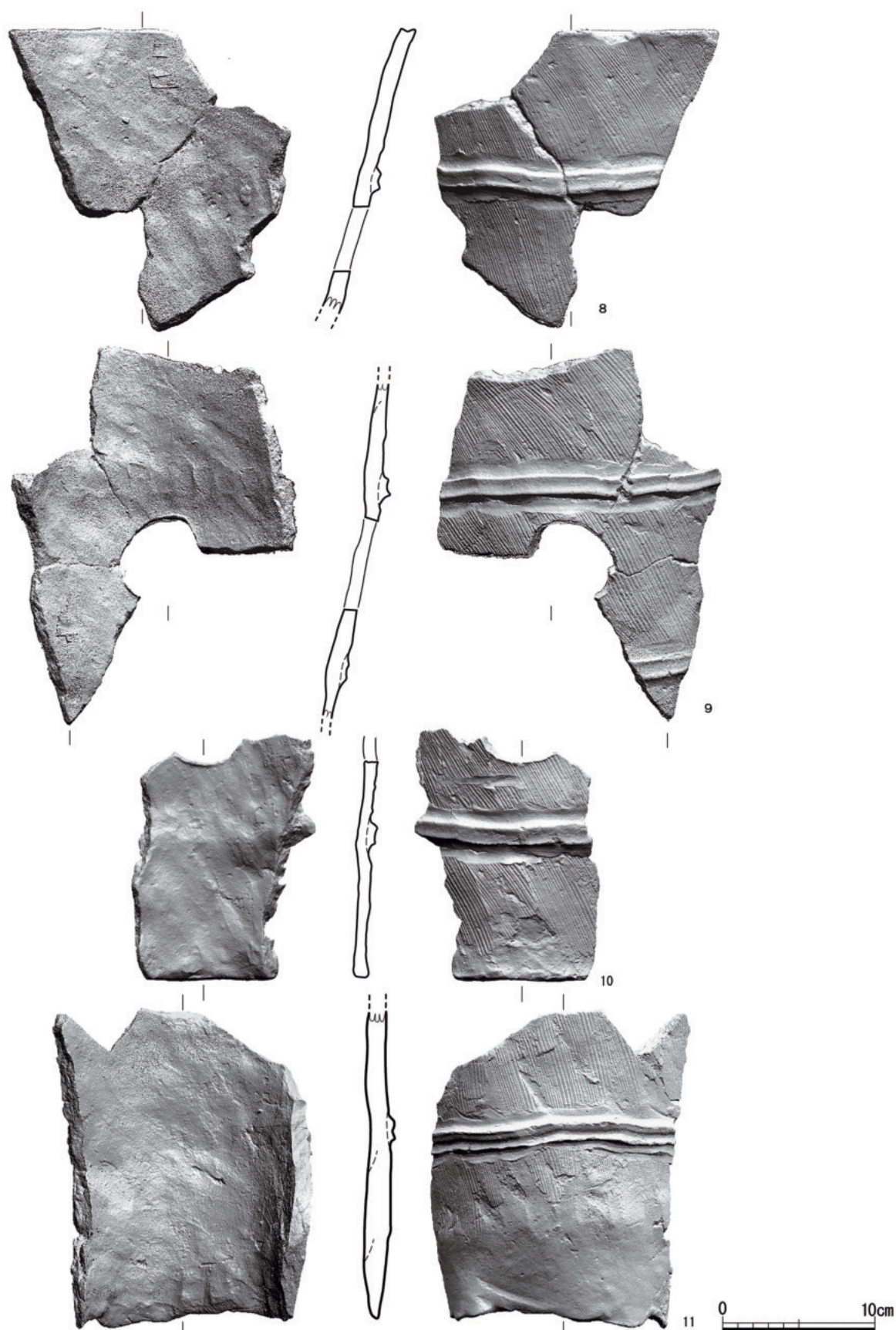


図4 菅原東窯産埴輪の三次元画像 1



8 星塚2号墳 報告書図 63-5 9 星塚2号墳 報告書図 64-15 10 水晶塚古墳 報告書図 57-186 11 菅原東3号窯 報告書 11 頁 -11

図5 菅原東窯産埴輪の三次元画像2

実である。この点をカバーし得るのが三次元モデルと考える。

図3は、対象資料の三次元モデルから抽出したハケメパターンである。拓本によってパターンの一致が確認済の資料であるが、むかって右側に2mm前後の幅広の条痕が4本連続する点、そのすぐ左の2本がやや幅狭で2本の間の晩材部が細く鋭く器面を抉る点、さらにそこから10本左に極細の条痕がある点を特徴とする。三次元モデルから切り出したオルソ画像でも、各資料間で基本パターンはよく一致しており、同一材から取り出された木目を共有する工具の痕跡として追認できる。

しかしながら、詳細に観察すると各パターンの条痕幅や断面形状には細部で相違もあることから、これは必ずしも同一工具の同一部位の擦痕ではなく、多くは同一原材から作出された異なる工具（兄弟工具）を含んだパターンの同一性を示しているものと判断される。ハケメ工具は同一工具においても表・裏・先・元の計4面の使用が可能であり、同一木材（母材）から作成された工具であっても、完全な同一部位でなければ、年輪のわずかな間隔差に起因してハケメパターンには微細な齟齬が発生する可能性がある。また、木目の消耗度合いも工具や部位ごとに異なって然りであり、ハケメの断面形状にも微視的な相違が生じる場合が想定される。

実際に、図3-5（水晶塚古墳報告書図43-44最上段）や図3-1（星塚2号墳報告書図63-5）では、パターン右寄りの幅広の条痕が続く部分において、本来の蒲鉾形の凸部が失われ、凹部の幅が広がっている。おそらく、工具は追衺目に木取りされており、使い込みにより年輪の間隔が広い右寄り部分の早材部分がすり減った結果、晩材部の露出範囲が広がり、それが器面を広く掻き取ることで当該部分の凹部幅が広がったものと考えられる。

図4・5は、これらのハケメパターンを共有した埴輪そのものの三次元モデル画像（実測図仕様）である。口縁部資料の1~7はいずれも、外面に主軸を大きく左に傾けるナナメハケを施し、内面も同じく左

上がりのユビナデを施す点で共通するが、口縁部の端部形状にはそれぞれ微細な差があり、突帯もヨコナデから断続ナデの擦痕が明瞭にはみ出すものと、そうでないものがあり、工人ごとの作り癖が顕著である。1と6、2と5は各特徴が酷似しておりそれぞれ同工品の可能性があるが、それ以外は別工人の製品と推測される。

また、器形が大きく傾く口縁部片の8と胴部片の9は内外面の調整や突帯の形状・製作痕跡が酷似しており、1~7とは異なる別工人の製品とみてよからう。底部片である10と11は、口縁部資料との対応は不明ながら、少なくとも10と11は突帯形状や底部調整の有無において明らかに作り癖を異にしており、別工人の製品と判断できる。

以上のように、菅原東窯を起点に確認される同一ハケメパターンの広がりや、同一木材から作出された兄弟工具を複数の工人が共有した結果であり、ハケメパターンを共有する一群の資料は、菅原東窯において近しい関係にあった特定の製作グループの製品と理解できる。こうした兄弟工具を含むハケメパターンの共有と製作グループとの対応関係については、すでに先行研究が論じているところであるが、従来型の実測図や写真ではそうした認識を客観的に開示することは困難であった。ここでは三次元モデルを活用することで、工人の異同識別の根拠をある程度鮮明に提示できたものと考えられる。

5. 今後の課題

とはいえ、三次元モデルを用いた同工品分析にも課題は多い。三次元モデル作成に要する作業量やデータ共有の将来的課題はおくとしても、対象とした6世紀代の円筒埴輪は、製作の粗雑化により器壁の歪みが大きく、上方に向かって開く器形に沿って施されるナナメハケの単位も器形の彎曲に応じて若干の歪みが生じている。これをオルソ画像で切り出した場合、器形の歪みがハケメパターンの微妙な相違に影響をおよぼすことが懸念される。

同様の問題は、Photoshop等で倍率調整しておこ

なうデジタル写真でのハケメパターンのマッチングでも生じるはずである。同一母材から作出された工具間でのパターンの同一性を議論している現在の研究水準ではさほど大きな問題となはならないが、工具自体の同一性や使用部位の特定までを射程においた厳密な議論を試みようとするれば、看過できない問題となろう。

この点は、実は拓本ではさほど問題とはならない。採拓の際、紙を器形に直接貼り付けるため、取り外し時には器形の歪みごと二次元に置き換えられるためである。アナログ人間の筆者には到底不可能であるが、おそらく拓本と同様に三次元モデルも二次元に出力する際に歪みを考慮してオルソ化することも技術的には可能なのではないかと予想する。そもそも論にはなるが、この点もつまるところ、三次元で取得したデータを無理に二次元に転換しようとすることから生じる問題であり、三次元データを三次元のまま比較する方法が確立すれば、おのずと解消するのかもしれない。

このほかにも、写真画像を基本データとする SfM - MVS 法では、テクスチャーモデルを活用することで、黒斑の付着状況や焼き色に関する客観的な提示が可能となるため、埴輪の焼成技術の研究が飛躍

的に進むことが期待される。三次元計測技術そのものではないが、三次元計測で蓄積されたデータを用いたハケメパターンの自動識別機能の開発も大いに期待される場所である。問題意識と一体でデジタル技術の利活用が促進されたとき、埴輪の生産・流通に関する研究は驚異的な進化を遂げていることだろう。

【参考文献】

- 阪口英毅編 2019『妙見山古墳 1967 年調査報告』平成 30 年度京都大学教育研究振興財団助成金研究成果報告書 京都大学大学院文学研究科
- 田中智子 2013「古墳時代後期の埴輪生産・供給体制の実像をめぐって」『立命館大学考古学論集』IV pp.333-352
- 廣瀬 覚 2021『6 世紀の埴輪生産からみら「部民制」の実証的研究』平成 28 ～令和 2 年度科学研究費助成事業（基盤研究(C)）研究成果報告書 奈良文化財研究所

【挿図出典】

図 1：筆者作成

図 2：廣瀬 2021 p.36 Fig.22 を改変

図 3：廣瀬 2021 pp.62-64 Fig.31-33 を転載