

## 4. 京田辺市興戸2号墳出土家形埴輪の 三次元写真計測とデジタル復元

仲林 篤史・溝口 泰久・吉永 健人

### 1. 興戸2号墳出土家形埴輪の来歴と現状

京都府立大学文学部考古学研究室では京田辺市興戸2号墳で出土、または採集され、現在、京都大学総合博物館（以下、「京大博」）及び京都府立山城郷土資料館（以下、「郷土資料館」）に保管されている同一個体の家形埴輪の破片資料を整理し、3D計測した各破片のデータからデジタル空間上で全体の復元をおこなった。本稿ではその方法と成果について報告する。

#### (1) 資料の来歴

当古墳における最初の調査は、1943年（昭和18）に梅原末治によっておこなわれ、その成果は『京都府文化財調査報告』21輯に報告されている（梅原1955）。その中で、「埴輪圓筒」の小片と家形埴輪片がそれぞれ墳丘上と墳頂付近で出土したとされている。家形埴輪については、その形態的特徴について述べられるとともに坪井清足による復元図が掲載されている（図1、以下「坪井復元」）。さらに報告文の最後には〔追記〕として、その後片山長三が採集した埴輪片が京都大学考古学教室（現京都大学考古学研究室）へ寄贈された旨が記載されている。

梅原が報告した資料のほかにも、京都府綴喜郡田辺町（現京田辺市）の分布調査報告書（鷹野1982）に記載された栗野謨による寄贈資料がある。この資料については近年図化・報告されている（北山2022）。

#### (2) 資料の現状

以上述べた家形埴輪は現在、京大博が坪井復元資料及び片山寄贈資料（以下、「京大博資料」）を所蔵し、郷土資料館が栗野寄贈資料（以下、「郷土資料館資料」）を所蔵している。

今回の調査により、京大博資料のうち、坪井復元部分は石膏を用いた接合・復元がされていたが、その後破損し、破片の状態となって保管されていることを確認した（写真1・2）。また、京大博資料には坪井復元とは別に多くの破片資料があり（写真3）、これらが片山寄贈資料であると想定できる。梅原報告の〔追記〕には「機を得て接合してよりよく復元したく思ふ」（梅原1955：47）として再復元の意志が記されていたが、実現していなかったようである。なお、家形埴輪とともに報告された円筒埴輪の所在については今回確認することができなかった。

郷土資料館での調査では、円筒埴輪片を含む4片が確認できた。このうち京大博資料の家形埴輪と同一の破片は1個のみであることがわかった。

なお、両館の資料いずれにも、梅原によって報告された家形埴輪とは別の個体と考えられる資料がいくつか含まれるほか、円筒埴輪や形象埴輪の小片が存在する。

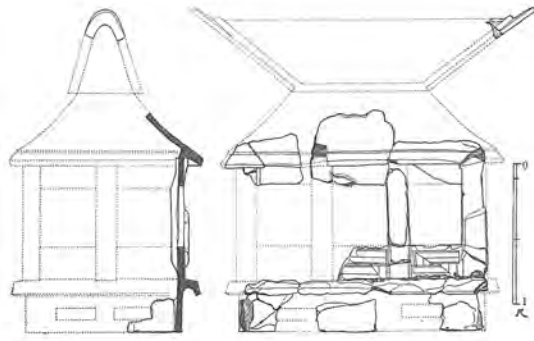


図1 坪井清足による復元図（梅原 1955）



写真1 京大博資料の現状（1）

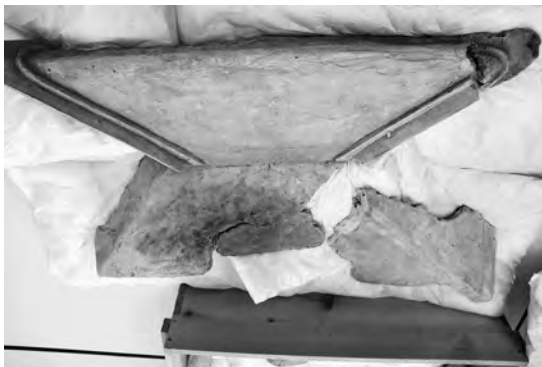


写真2 京大博資料の現状（2）



写真3 京大博資料の現状（3）

## 2. 調査の目的

今回、本研究室では京大博資料（坪井復元資料、片山寄贈資料）、及び郷土資料館資料すべてを俎上に載せて全体の復元を目指した。

しかし復元作業をおこなう上で、2つの課題があった。1つは資料が別々の場所で保管されており、また資料へのアクセスが常時可能ではないという「空間的制約」である。もう1つは、今回の検討により坪井復元資料の石膏補填部には、片山寄贈資料や郷土資料館資料が接合する可能性が明らかになったものの、既存の石膏部分は除去しない方針をとったため、実物を用いた一般的な復元が不可能となったことによる、いわば「物理的制約」である。

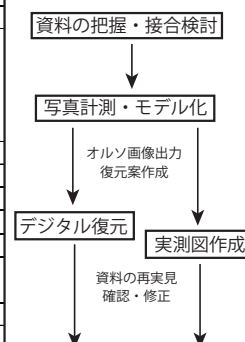
これらの2つの課題を解決し、全体復元を実現するための方法として、3D計測技術及び3Dデータを用いたデジタル復元手法を採用した。すなわち、家形埴輪の破片ごとの3D計測をおこない、取得した全ての破片の3Dデータをデジタル空間上で接合し、資料全体を復元することで、報告用の図として提示するものである。

この手法により、「空間的制約」と「物理的制約」という2つ課題がクリアされ、資料全体の復元が可能になる。また資料への負担をなくすことや、修復にかかるコスト抑制といったメリットもある。

近年、発掘調査報告書等で3D技術の利用が進んでいるが、40点以上にも及ぶ資料を全て3D計測し、デジタル上で復元する先行事例は管見の限りないため、作業経過を含めて以下に報告する（表1）。（吉永健人）

表1 調査の流れ

日程	京大博	山城	府立大ほか
2022年2月	(9日) 資料状況を確認。接合検討。		
	(10日) 有識者を交えての検討会。 参加者：青柳泰介氏、東影悠氏（榎原考古学研究所）、泉真奈氏（藤井寺市教育委員会）、上野あさひ氏（京田辺市教育委員会）		
	(16日) 写真計測。		解析、3Dモデルの作成。
	(24日) 写真計測。		
2022年3月			
2022年8月			(11日) VRでの復元作業。
2022年10月		(22日) 写真計測及び解析。	オルソ画像作成、実測図作成。
2022年11月	(10日) 実測図確認作業。 資料を実見しながら図面を修正。		オルソ画像作成、実測図作成。
2022年12月	(13日) 実測図確認作業。		(10日) VRでの復元作業。
	(20日) 実測図確認作業。		



### 3. 3D 計測作業と実施方法

調査では SfM/MVS (Structure from Motion/Multi-View Stereo) で全ての家形埴輪破片資料の 3D 計測を実施した。京大博での作業日程と作業参加者は以下の通りである。なお、SfM/MVS とは対象物を全方位から撮影した写真を専用のソフトウェアで解析し、その 3D 構造を復元する技術である。

日程：2022 年 2 月 16・24 日

場所：京都大学総合博物館

参加者：菱田哲郎、諫早直人（以上、教員）、仲林篤史（京都府立大学共同研究員）、大平理紗（京都府立大学大学院博士後期課程）、池田野々花、小林楓、溝口泰久、吉永健人（以上、京都府立大学大学院博士前期課程）

すべての破片資料が同一個体の家形埴輪に帰属するため、本来は全資料を統一した機材で撮影・解析することが望ましいが、調査日数に限りがあるため、3 グループに分かれ同時並行でそれぞれ異なる機材を使用して計測作業を実施した（表2）。なお、郷土資料館における作業は吉永が別日におこなった。また、同一破片は、同一機材で撮影した。統一的な撮影環境を確保し、効率的に計測（撮影）作業をおこなうため、補助機材として ORANGEMONKIE 社の Foldio3（折りたたみ式フォトスタジオ）及び Foldio smart turntable（Bluetooth 対応回転台）を使用して計測作業をおこなった（写真4・5）。

表2 使用機材

デジタルカメラ機種名	レンズ（35mm換算焦点距離）
Panasonic LUMIX GX7MK3	LUMIX G MACRO 30mm F2.8 ASPH. MEGA O.I.S. (45mm)
OLYMPUS OM-D E-M1 Mark III	M.ZUIKO DIGITAL ED 30mm F3.5 Macro (45mm)
SONY ILCE-7M3	SIGMA 70mm F2.8 DG MACRO (70mm)



写真4 調査風景（1）



写真5 調査風景（2）

撮影手順は以下の通りである。

- ①スケール挿入用のターゲット（写真6）を写し込んで24枚/360°×カメラの角度を変えて計3方向から撮影（約70枚撮影）
- ②遺物を逆位に据え直し、24枚/360°×計3方向から撮影（約70枚撮影）
- ③遺物を横位などにもう一度据え直し、24枚/360°×計3方向から撮影（約70枚撮影）
- ④ハケメなどの調整痕がみられる部分を接写

以上の手順から、1破片につき平均200～250枚程度の写真を撮影した。（溝口泰久）

#### 4. データの解析及び軽量化処理

##### （1）基礎解析

前述の設定・手順で撮影した写真を現像し、SfM-MVSソフトで解析することで3Dデータを取得した。現像には、写真編集ソフトのAdobe社Lightroom Classicを用い、RAWデータからTIFF形式の画像を書き出した。

SfM-MVSソフトにはAgisoft社Metashape professionalを用いた。

Metashapeでの解析作業は表3のように設定し、オリジナルデータ（高品質モデル）を作成した。

##### （2）データの軽量化処理

今回の作業の目的は、3Dデータ化した破片資料のコンピュータ上での接合である。しかしながら、オリジナルデータである高品質かつ高密度な点群から生成した3Dデータは、そのデータサイズが膨大となるため、全ての破片資料を読み込み、コンピュータ上で操作することは困難である。そこで、オリジナルデータと見かけ上は変わらないがデータサイズが削減されたローポリゴンモデル（以下「ローポリモデル」とする）を作成することとした。

ここでいうローポリモデルとは、ポリゴン（メッシュ・面）数を大幅に削減したもので、



写真6 スケール挿入用ターゲット



表3 解析設定

工程	設定
写真のアラインメント	精度「最高」 キーポイント制限40,000/タイポイント4,000
高密度クラウド構築	品質「最高」
メッシュ構築	品質「最高」
テクスチャ構築	8192px × 3枚
スケール	誤差0.5mm以内

表4 3Dモデルのデータ

モデル (objファイル)	ポリゴン数	データサイズ
ハイポリゴンモデル	10,000,000前後	500MB前後
ローポリゴンモデル	20,000	1MB程度

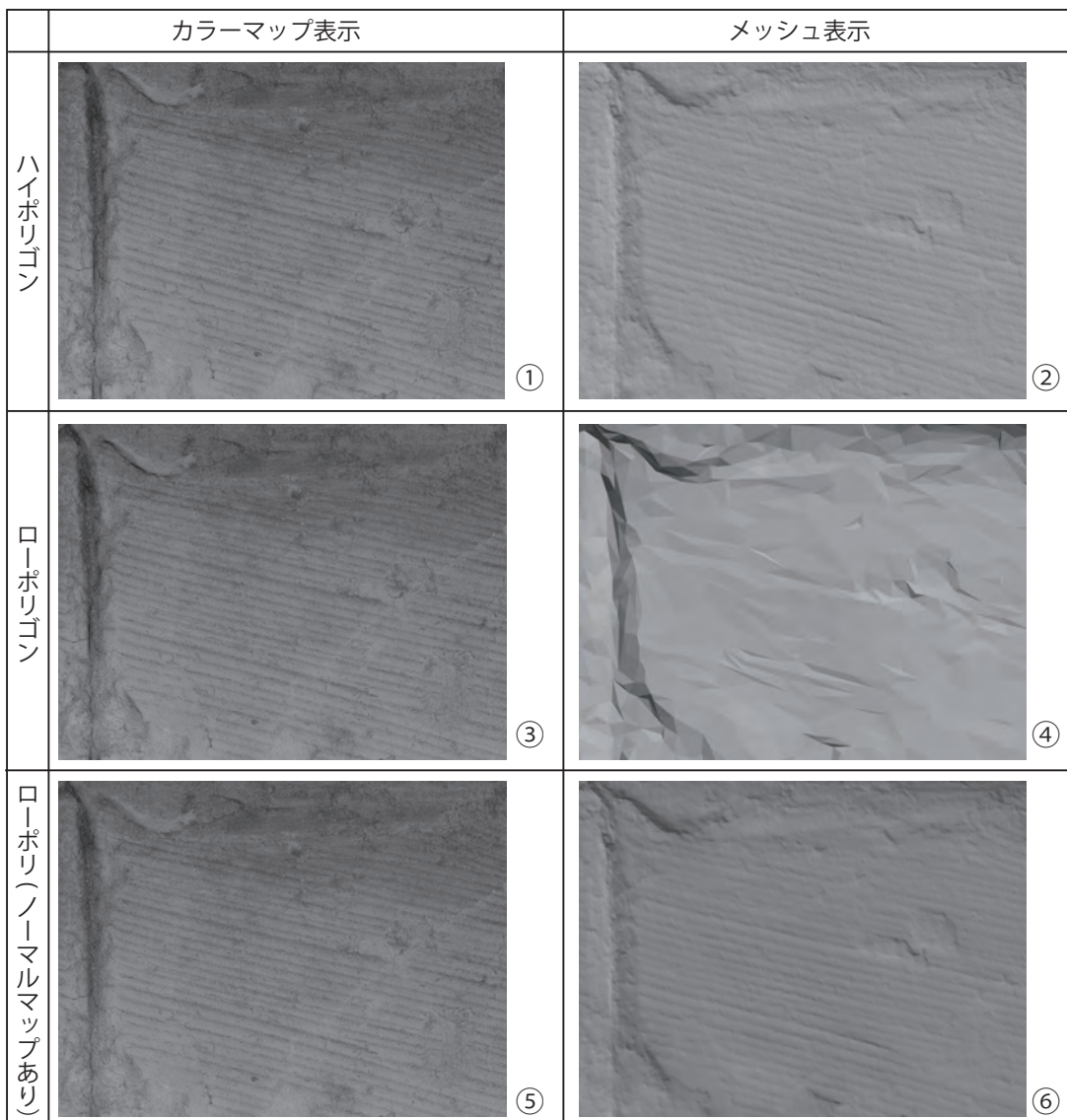


図2 各モデルの比較 (等倍)

色情報のテクスチャ画像（以下「カラーマップ」）に加え、ポリゴンのもつ法線ベクトル情報のテクスチャ画像（以下「ノーマルマップ」）を設定し、疑似的に凹凸を復元した。ノーマルマップとは、各ポリゴンの持つ法線ベクトル（面に対して垂直なベクトル）の座標値（XYZ）を色（RGB）に変換したテクスチャ画像の一種である。ノーマルマップに対応するソフトやアプリを用いれば 3D ビュー上での凹凸が再現される。

ローポリモデルの作成は以下の通りの手順でおこない、全破片資料に同じ処理を実施した。なお、ノーマルマップ作成を含めた Metashape での作業手順は、仲林（2021）に基づいておこなった。

- ①高品質モデルからポリゴン数を 20,000 面まで削減したローポリモデルを作成。
- ②高品質モデルからカラーマップをローポリモデルに転写（解像度は 4096px × 4096px）。
- ③高品質モデルの形状を基に、ローポリ用ノーマルマップを作成。

ローポリモデルが今回の作業に耐えうるかを検討するため、高品質モデル（以下「ハイポリモデル」）との比較をおこなった。表 4・図 2 である。比較をおこなった資料は、資料番号 14 である（資料番号については本書第Ⅲ部第 3 章の表 2 を参照）。

まず①はハイポリモデルにカラーマップを表示、②はハイポリモデルのメッシュのみを表示したものである。①・②ともにハケメなどの細かな凹凸情報が再現されている。次に③～⑥は同じ個所でローポリゴンモデルを用いた表示である。

③はカラーマップのみの表示、④はテクスチャ画像を使用しないメッシュのみの表示である。⑤は、カラーマップとノーマルマップを併用した表示、⑥はノーマルマップのみを用いた表示である。②と④の比較ではポリゴンの単位がはっきりとわかるほどにメッシュの精度は粗く、②との品質の差は一目瞭然である。これに対し、②と⑥の比較では、ローポリモデルでもハイポリモデルに近い凹凸が再現されている。

次に、①と③、③と⑤を比較する。③は①と比較してもポリゴン数の差ほど見た目の差異は少ないことがわかる。これはカラーマップの画像としての解像度（4096pix × 4096pix）がポリゴンの密度（20,000 面）を上回っており、ポリゴンの粗い凹凸が認識できないためである。同様に、③と⑤のようにノーマルマップを併用した場合との比較においても、見た目の差異は少なかった。

以上より、デジタル復元にあたってはカラーマップのみのローポリモデル（③・④）を使用することとした。ローポリモデルとはいえ、実際の資料が持つ情報を十分に再現できているため、コンピュータ上でより負荷のかからない作業が可能となった。（仲林篤史・溝口）

## 5. 3D データを用いたデジタル復元成果

### (1) デジタル復元作業

家形埴輪の各破片の 3D 計測で取得した 3D データ（以下「破片 3D データ」とする）を用いた接合・復元作業をおこなった。



写真7 VRでの復元作業の様子

まず、各破片の大まかな配置をおこなうため、VR（バーチャルリアリティ）機器を用いた作業をおこなった。具体的には、全ての破片3Dデータをゲームエンジンの「Unity」で読み込み、HMDを装着した作業者がVR空間内でコントローラを使用し、破片を持ちあげたり回転させたりして、配置する作業である（写真7）。この作業の詳細については、別途報告する。

次に、上記作業で配置した破片3Dデータを3DCGソフトウェアの「Blender」を用いてより詳細に配置し（図3）、第1段階のオルソ画像として書き出す作業をおこなった。BlenderはBlender Foundationが配布するオープンソースのソフトウェアである。考古学分野での利用方法では、SfMで取得した3Dデータの読み込みや移動・回転拡大縮小をはじめ、凹凸を強調したオルソ画像の作成、断面図の取得や遺構のトレースなども可能である。この作業は、溝口・吉永・仲林でおこなった。また、この作業の過程で郷土資料館資料と接合する京大博資料を特定することができた。この成果については、後述する。

## ② 3Dデータからのオルソ画像化

第1段階のオルソ画像を基に、吉永が正背面・両側面の立面図を作成し、京大博及び郷土資料館で資料の再調査をおこない、修正点を検討した。この立面図をBlenderで読み込み、改め

作業は大きくは以下の2段階になる。

### ①復元案の決定と配置

家形埴輪の復元案は、吉永が坪井復元の図の検討や実物資料の観察に基づいて作成した。しかしながら前述のとおり家形埴輪へのアクセスが制限されていることと、所蔵館の異なる資料が存在するため、詳細な検討は3Dデータを用いておこなった。

3Dデータを用いた作業は、以下の通りである。



図3 Blenderでの接合作業

てオルソ画像化に際しての修正点を反映させる作業を仲林が実施した（図4）。また、柱や壁、屋根の形状などから簡易的に家形埴輪の3Dモデルを作成し、位置合わせに用いた（図5）。

（2）デジタル復元成果

①全体図

今回の作業で作成した3Dデータ及びそれをデジタル空間に配置して作成したオルソ画像が図7である。資料番号・形状等の詳細については、本書第Ⅲ部第3章を参照されたい。

②郷土資料館資料との接合

郷土資料館資料（資料番号32）の接合箇所が確認できた。位置は背面の平側の屋根（軒先部）から中央間左側の柱にかけてで、資料番号25と接合した。資料番号25は同26・27と接合する。

この4点の資料をデジタル上で接合したオルソ画像及び断面図が図6である。正面・背面とも破面の形状が酷似している。デジタル上で接合した状態の断面図からも接合関係にあることが確認できた。

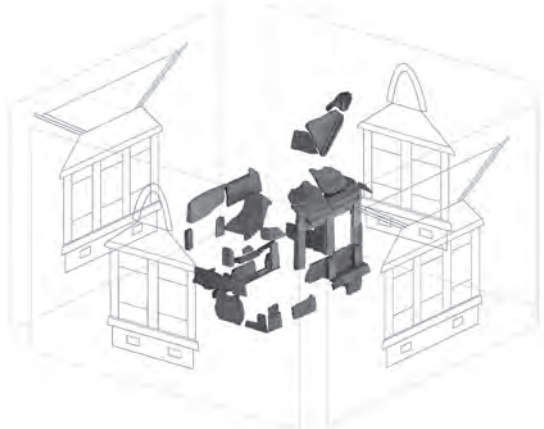


図4 立面図を用いた位置合わせ



図5 復元モデルを用いた位置合わせ

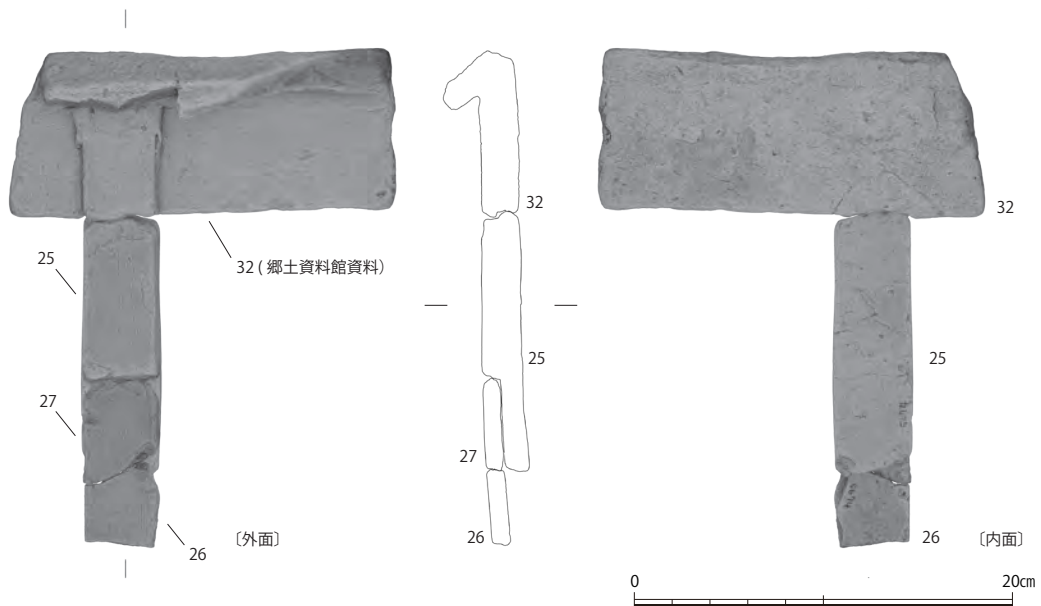


図6 京大博資料と郷土資料館資料の接合図（S=1/4）



## 6. まとめ

今回の作業を通じて、大きく二つの成果があった。

まず、現実で接合や復元ができない資料に対するデジタル復元の有用性が確認できた点である。通常の考古資料の調査報告では、資料全体の図や写真を提示する必要がある。今回の場合、破片が40点以上あり、接合復元なしに全体図の提示は不可能だが、自らの所蔵資料でないため現実での接合や復元ができなかった。このような事例はむしろまれではあるが、例えば資料の保管場所が確保できない場合や、接合によって資料のもつ情報が失われてしまう場合など、様々な場面で3Dデータを用いたデジタル復元が有用と考えられる。

次に、複数の所蔵館に保管された同一資料の検討における有用性が確認できた点である。今回の調査では、京大博資料と郷土資料館資料との接合の確認だけでなく、それぞれの破片の具体的な接合位置まで特定できたことが大きな成果と言える。これまでは、写真や実測図などで酷似している資料であっても、実際に資料同士を突き合わせて検討しないことには同一資料かの確認ができなかった。しかしながら今回のように、3Dデータをデジタル上で接合させた状態での断面図など、説得力のある根拠が提示可能であることがわかった。

最後に、3D計測やデジタル復元は課題解決の手段としては有用であるが、今回得られた成果につながったのは、3D技術を活用しただけでなく、本稿を担当した吉永や溝口による実物の詳細な観察で得られた知見がベースにある点を指摘しておきたい。(仲林)

### 謝辞

今回の調査にあたって、京都大学総合博物館、京都大学文学部考古学研究室、京都府立山城郷土資料館の各機関、及び村上由美子氏、坂川幸祐氏、下垣仁志氏、吉井秀夫氏、細川康晴氏の皆さまには多大なご協力を賜った。ここに記して感謝を申し上げる。

### 参考文献

- 梅原末治 1955 「第三 田邊町興戸の古墳」『京都府文化財調査報告』第21冊 京都府教育委員会
- 鐘方正樹・高木清生・山上豊 (編) 2018 『北和城南古墳出土品の研究—裁判記録に残る皇陵盗掘事件の真相—』  
由良大和古代文化研究協会
- 京都大学文学部 1968 「綴喜郡田辺町興戸寿命寺山・興戸古墳」『京都大学文学部博物館考古学資料目録』第2部
- 鷹野一太郎 1982 「8. 興戸古墳群」『田辺町遺跡分布調査概報』田辺町教育委員会
- 仲林篤史 2021 「公開を目的とした3Dモデルのデータ量削減方法」『デジタル技術による文化財情報の記録と活用3』(奈良文化財研究所研究報告27) 独立行政法人国立文化財機構 奈良文化財研究所

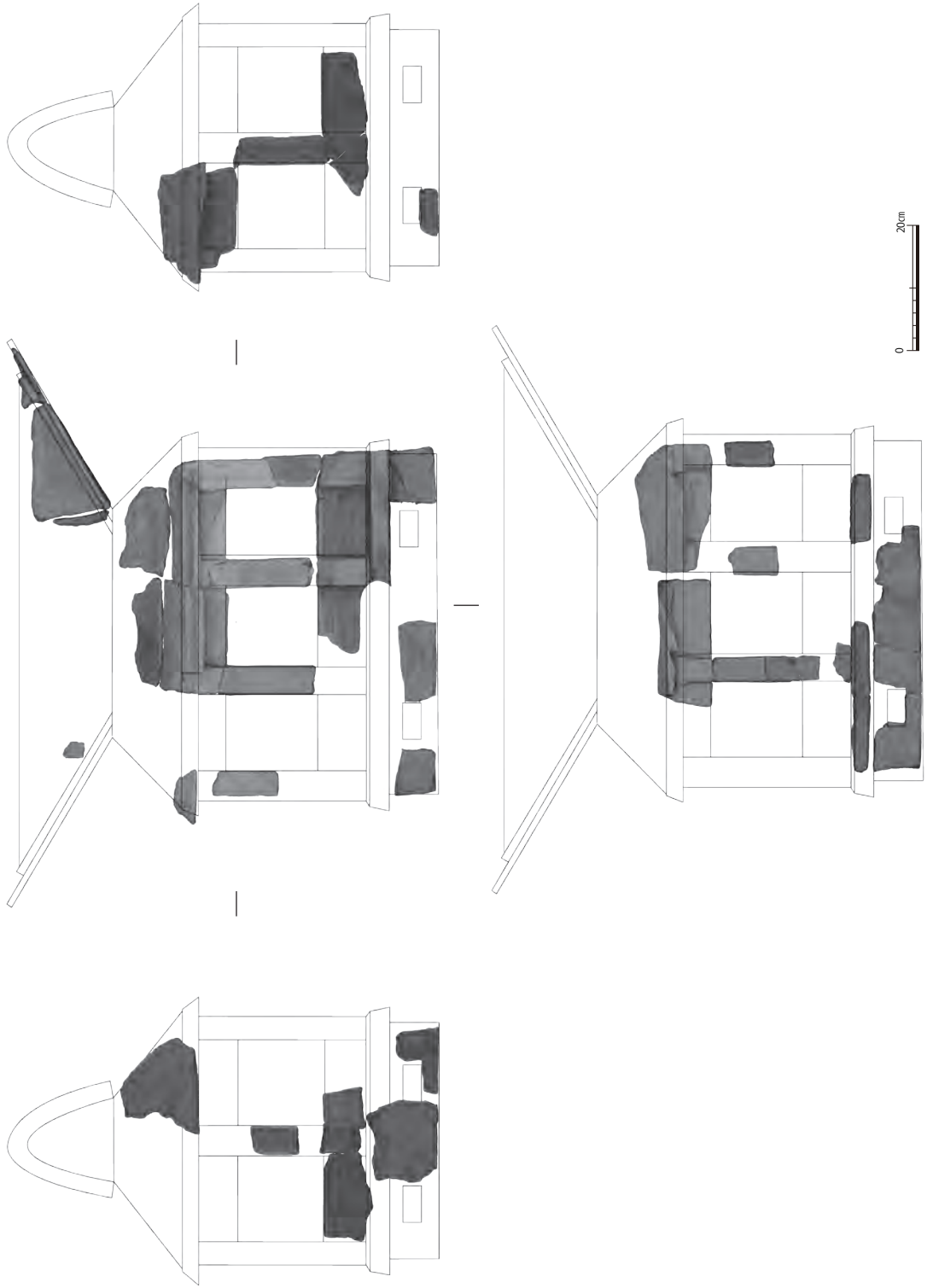


図7 家形植輪復元展開図（オルソ画像）（S=1/10）

#### 編集後記

フィールド集報は、刊行当初より Adobe 社の InDesign を利用して組版作業を手作りでおこなっている。InDesign の取り扱いは、歴史学科文化遺産学コースのうち、考古・建築・地理の実習メニューに含まれ、本書の一部については、そうした実習のなかで学生が組んだものとなっている。

今年度のフィールド調査においても、各地で多くの方からのご理解とご協力を賜った。ここに改めてお礼申し上げる。歴史や文化遺産にかかる調査は一人では決して成しえないということを、今後も常に意識するように努めたい。(う)

---

京都府立大学文学部歴史学科

## フィールド調査集報 第9号

編集・発行 京都府立大学文学部歴史学科

〒606-8522 京都市左京区下鴨半木町 1-5

発行日 2023年3月30日

印刷 株式会社 北斗プリント社

〒606-8540 京都市左京区下鴨高木町 38-2

---