

柄原岩陰遺跡出土資料の3D計測とデジタルアーカイブ化 —縄文時代早期深鉢形土器と骨角器を対象とした試行—

野口 淳・藤森 英二

はじめに

3D計測とその成果の利用は考古学の様々な分野に適用されつつあり、土器研究においては実測図や拓本に代わる記録・図化方法を提供するとともに高密度な表面形状記録にもとづく形態・技法・痕跡等の詳細な分析も可能になりつつある（中園2010, 2020、中園ほか2020、平原・大綱2016、金田2017、太郎良・中園2018、野口・斎藤2018、野口ほか2020a,b、魚水2020など）。

また計測・記録・図化技術の更新、あらたな分析方法のためのデータの提供だけでなく、高解像度で無劣化の複製が可能であり、コンピューター・プログラムによる解析処理に適したデジタルデータとして生成される3D計測成果は、資料の記録・記載・データ共有・公開においても極めて有効である。博物館法第2条は、博物館の目的を歴史、芸術、民俗、産業、自然科学等に関する資料の収集・保管・展示・教育利用・調査研究であるとしているが、これを果たすためには収集保管資料とそのデータ・情報を利用可能な状態に維持・保管、記載・公表する必要がある。そのための手段としても、3D計測を活用できるだろう。

このような課題設定の下、筆者らは北相木村考古博物館が収蔵する国史跡柄原岩陰遺跡出土資料について3D計測を実施することを計画し、2020年12月に予備的な計測を行なった。その成果をここに報告する。

1. 目的

柄原岩陰遺跡については2019年に報告書が刊行され（北相木村教育委員会2019）、出土資料の実測図・拓本・写真等が公表されている。今回の試みでは、報告書に記載・掲載された情報に対してどのよ

うな追加的な情報を取得し、提示することができるか、および採用する方法が土器、骨角器など材質の異なる資料に対して有効であるかを検討した。

2. 対象資料

土器：完形に接合復元された縄文時代早期の深鉢形土器（報告書第77図1）である（図1）。相木式とも呼ばれ、早期中葉の押型文系土器末期、あるいは沈線文系から条痕文系土器の移行期に位置づけられている。尚、本遺跡ではこの一箇体のみが確認されている。

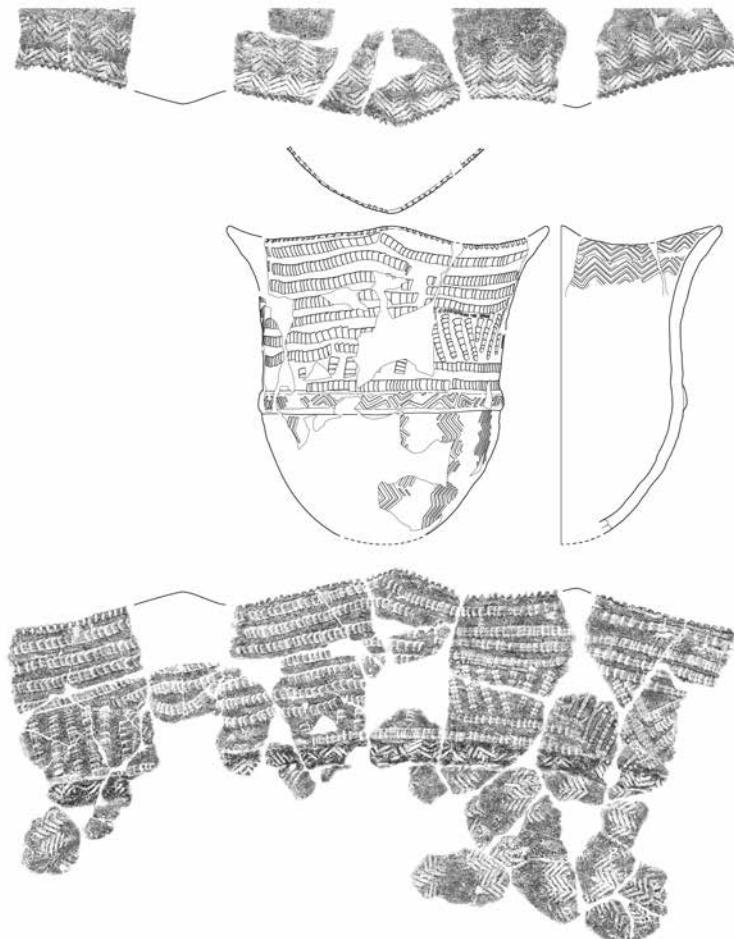


図1 縄文時代早期土器（報告書第77図-1）



図2 鹿骨製骨角器（報告書第129図-1）

骨角器：鹿骨製の刺突具状製品（報告書第190図3）である（図2）。ニホンジカの中足骨を縦に分割した素材が使われ、全体の研磨と穿孔が特徴である。早期前葉の表裏縄文系土器に伴うと思われる。



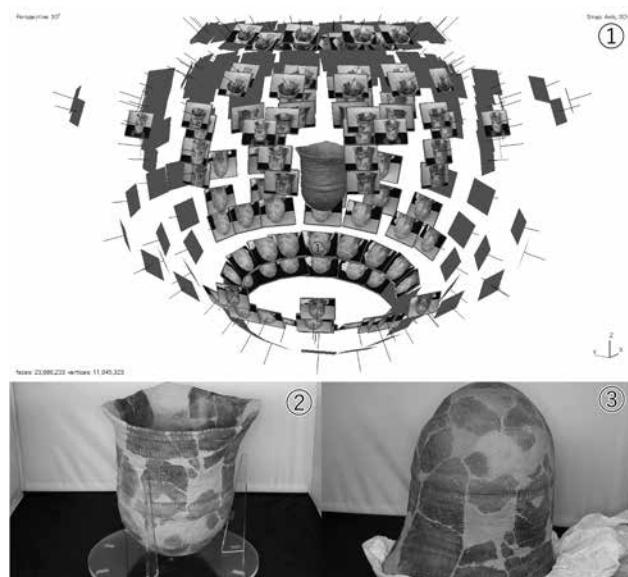
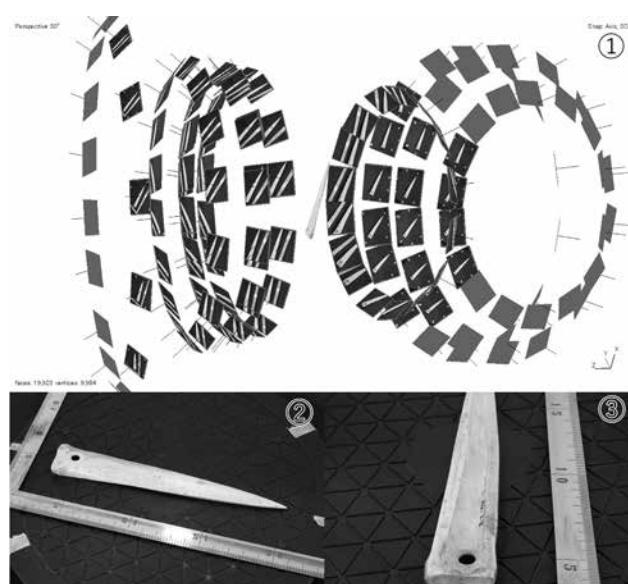
写真1 撮影風景

3. 方 法

3-1: 3D写真計測（フォトグラメトリー）

3D計測にはレーザースキャナーをはじめ様々な機器、手法が用いられるが（金田ほか2010）、今回はSfM（Structure from Motion）- MVS（Multi-View Stereo）法による3D写真計測を採用した。レーザースキャナーのような専用機材を必要とせず、市販のデジタルカメラとコンピューターの組み合わせで比較的容易に実施できる手法である。

SfMは、「動画や静止画からカメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する」技術である（内山ほか2014：

図3 土器の写真撮影位置
(①)と設置状態 (②正位, ③逆位)図4 骨角器の写真撮影位置
(①)と設置状態 (②表面, ③裏面)

38)。現在普及しているSfM-MVSアプリケーション・ソフトウェアでは、画像上の特徴点の照合に基づき撮影位置を推定、ステレオ・マッチングのペアを抽出、深度情報を計算して高密度点群データを生成し、さらにメッシュモデル、テクスチャーモデルを生成する機能も持つ。特殊なステレオカメラ、位置合わせ用の対標は必要ない。撮影技術と環境、および解析処理環境が整えば高解像度の三次元モデルを作成することも可能である（山口2017）。

3-2. 使用機材・ソフトと手順

撮影機材はAPS-Cサイズのデジタル一眼レフカメラ（RICOH-PENTAX K-S2: 2012万画素）に50mmマクロレンズとLEDリングライトをセットしたものを使用した。対象資料は手動回転台上に置かれ、カメラは三脚に設置、絞り優先モードf=16で撮影、画像はRAW(.dng)とJPEG形式で保存した。また補助光源としてLEDライト2灯を利用した（写真1）。

土器は完形に復元されているが丸底で自立しないため、まずアクリル製の架台上に設置して正位（立位）で口縁から底部付近まで161枚を撮影した後、波状口縁部を保護しながら逆位に伏せて置いた状態で底部側を86枚、計247枚を撮影した（図3）。骨角器は、表面80枚、裏面64枚、計144枚を撮影した（図4）。

解析は、Agisoft社のMetashape Professional (1.7.2)¹⁾を使用した。口縁～胴部と底部のそれぞれについて異なるチャンクでアライメント（写真の位置合わせと点群生成）後、まず解像度中で高密度クラウド（点群）構築、メッシュ構築を行なった後、チャンクのアライメントと統合を行ない、得られた3Dモデルによりマスクを作成した。次いで口縁～底部すべての画像を利用しマスクを適用した状態で、解像度最高で高密度クラウド構築を行ない、不要な点群と信頼度の低い点群を削除後、メッシュ構築により3Dモデルを生成、最後にテクスチャ構築を行なった。スケールは、撮影時に移し込んだ矩尺により付与した。

解析処理の負荷・必要時間は、解析に使用するコンピューターの性能、および作成するモデルの解像度に

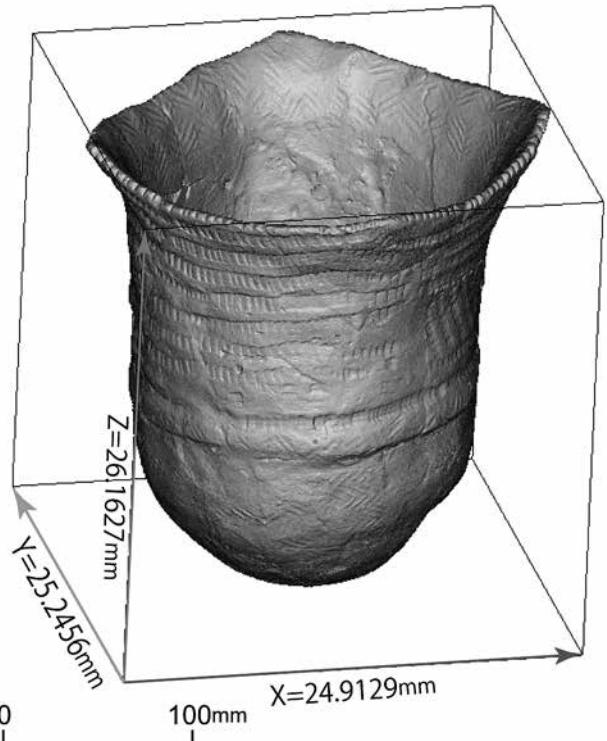


図5 土器の座標系と大きさ

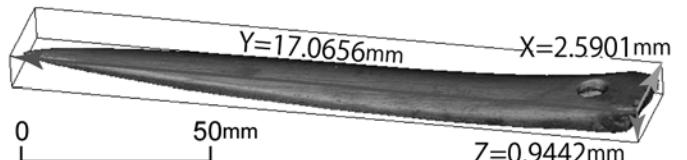


図6 骨角器の座標系と大きさ

依拠するが、今回はメモリ64GB、CPU:i7-6700HQ×8+GPU:GeForceGTX2070を搭載したWindowsPC（OS:Windows10 Pro 64ビット）を使用した。3Dモデルの諸元は表1に示した。

3-3. 可視化・図化

作成された3DモデルはMetashape上で表示、閲覧することができるほか、各種の3Dデータ閲覧・編集ソフトでも扱うことができる。今回はオープンソースの3D点群・メッシュデータ編集ソフトであるCloudCompare²⁾を使用して正射投影図と断面図、段彩図、等高線図を作成、正射投影図・段彩図・等高線図については.png形式

表1 3Dモデル諸元

報告書番号	器種	画像	タイポイント	高密度クラウド	メッシュ	品質	.obj	備考
第77図-1	縄文土器 深鉢	247	276,220	118,441,170	23,688,233	最高-最高-最高	2.90GB	内面底部一部欠
第190図-3	鹿骨製骨角器	144	111,338	11,068,518	2,213,702	最高-最高-最高	256MB	

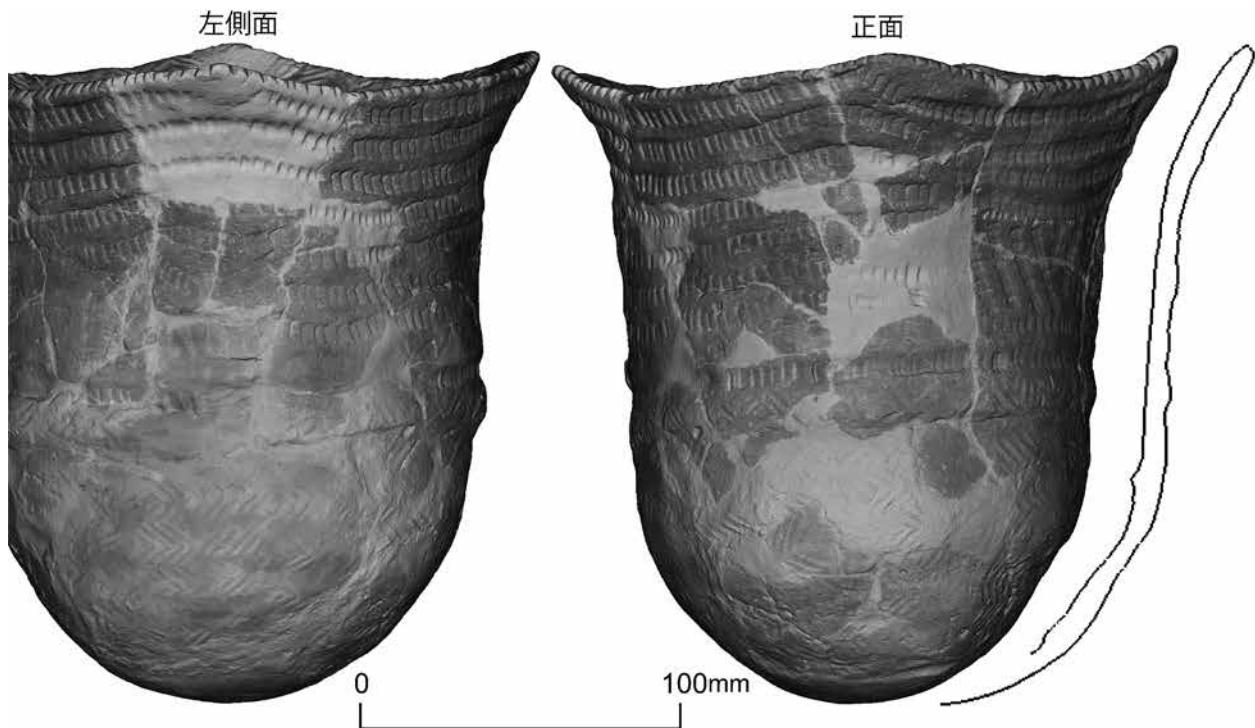


図7 土器正射投影図・断面図（カラー・テクスチャ図像）

のラスター画像データ、断面図については.dxf形式のポリライン（ベクター）データとして出力した。画像の出力解像度はS=1/1として土器140ppi、骨角器111.5ppiである。

3-4. 取得作成データの保存

作成された3Dモデルのオリジナルデータは、Agisoft Metashapeのプロジェクト形式（.psxおよび関連ファイル群）で保存しているほか、異なるソフトウェア・アプリケーション間で利用可能な標準互換形式として.obj (ASCII)で保存した。

4. 可視化と数値属性の取得

4-1. 座標系の設定と基本計測値

Metashapeで作成したモデルは、撮影時に移し込んだ矩尺によりスケールを付与した時点で、矩尺の位置・向きを基準とした座標系に変換される。これは考古学的に通常取り扱われる資料の向き・角度と必ずしも一致しない。そこでCloudCompare上で、報告書掲載図と一致する向き・角度に修正した上で、正面図の左下手前を原点として、土器は右手系（正系）の座標系（図5）、骨角器は左手系の座標系（図6）とした。

従来の計測記載法との対応では、土器はX=幅・Y=奥行き・Z=器高、骨角器はX=幅・Y=長さ・Z=厚さとなる。

図5・6には、各座標の最大値を示したが、これは外接直方体（バウンディングボックス）のサイズと一致する。なお土器は通常、幅・奥行きという計測・記載は行なわず、回転体と指定して直径（口径・胴部径・底部径など）を計測・記載するが、後述のとおりこれは精度と再現性の観点で問題がある（4-3参照）。

4-2. 正射投影図像・展開図

図7に、従来の土器実測図に対応する正面観の正射投影図像と右側縦断面を示した。正射投影図はカラー・テクスチャーモデルによるもので、左側面も一部追加している。断面図の作成方法は後述のとおり。図8には、カラー・テクスチャーを除いた陰影モデルによる展開図を示した。なお90°単位の正射投影図像（正面・裏面・左右側面・上下面）に加えて、器形・文様の連続的变化を把握するために、側面については45°単位の正射投影図像も加えている。テクスチャーモデルでは器面の色、質感の把握に優れ、また石膏復元部分も一目瞭然である。一方、陰影モデルでは文様、地文の起伏凹凸を把握しやすい。

図9、10に、テクスチャーモデルおよび陰影モデルによる、骨角器の90°単位の正射投影図像による展開図を示した。土器と同じくテクスチャーモデルは色、質感の把握に優れ、一方、陰影モデルでは表面の微細形状の再現性に優れている。後者は製作、使用時の痕跡の把握

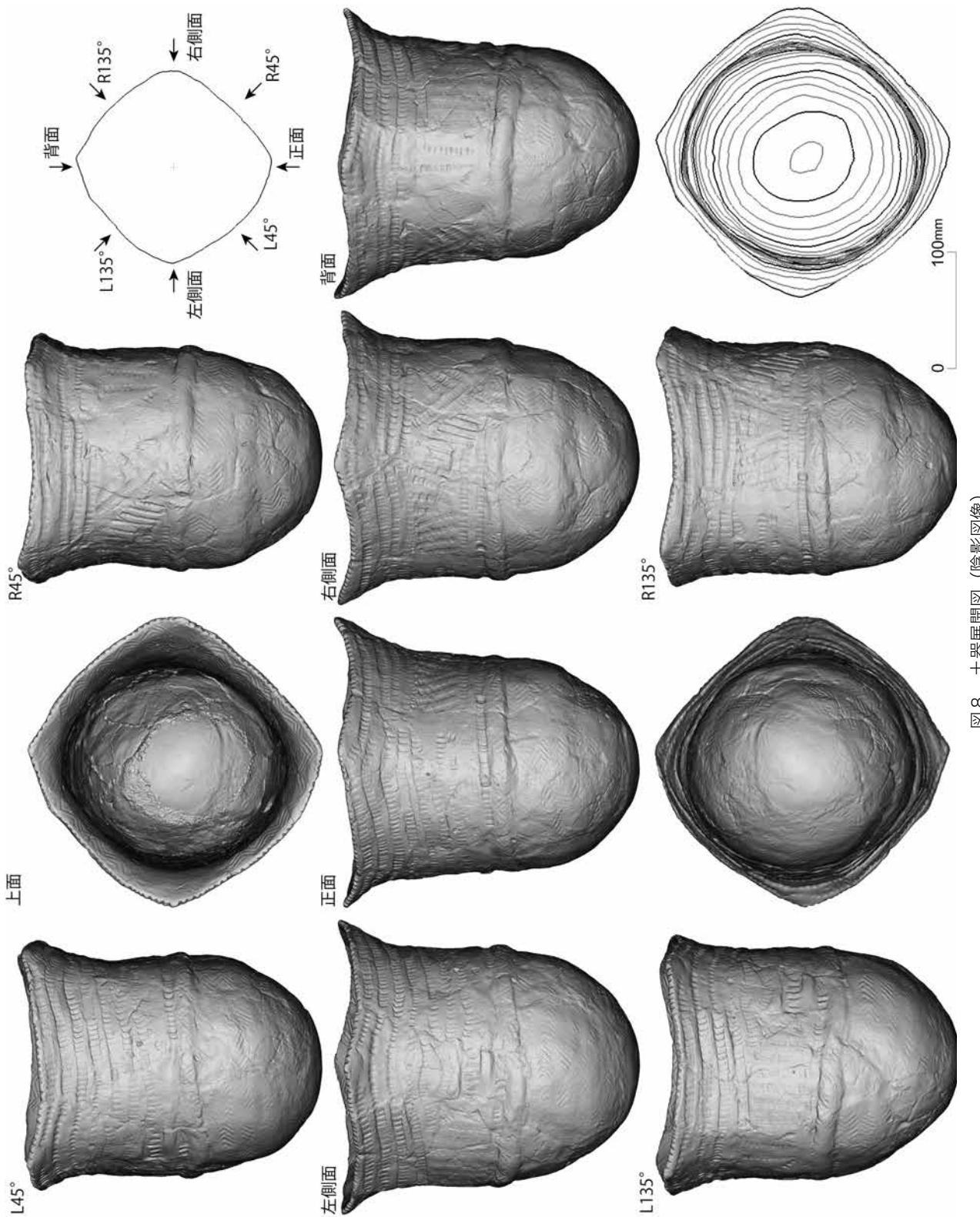


図8 土器展開図(陰影図像)

にも有効である。

4-3. 土器の連続横断面図、外径と中心軸偏差

図11には、土器のZ軸（高さ）に沿った10mm間隔の横断面を図示した。上段は断面図示位置、中段は40mm間隔、下段は10mm間隔の断面を追加したものである。なお断面はCloudCompareのCross-section機能を利用していているため、外面の輪郭だけが抽出されている。

一見して分かる通り、外面の輪郭形状は真円に近似しておらず、とくに底部側（底面より高さ50mm付近）では上面観左上～右下に約45°傾いた橢円形を呈している一方、胴部（高さ100mm～400mm付近）では上面観

右上～左下に約15°傾いた橢円形を呈している。また各横断面における中心点（X, Y各軸長の中間点）も一致しておらず断面位置による偏差が大きい。

各断面位置におけるX-Y軸長と差分、中心点の偏差（全体外形のX-Y軸長中間点からの差分）は表2に示した。X-Y軸長の差分、すなわち扁平度は1.3～23.8mmの範囲、平均値11.25mmでY軸方向が大きい。特に胴部中央～下半部にかけて、底部から110～150mmの範囲で扁平度が大きく、口縁および底部に向かうにつれ10mm未満となり扁平度が低くなる。中心点の偏差は底部側で大きく、底部～60mmの範囲で最大3～5mmのずれを示す。なおずれの方向は一定せず、とくに底部側では断

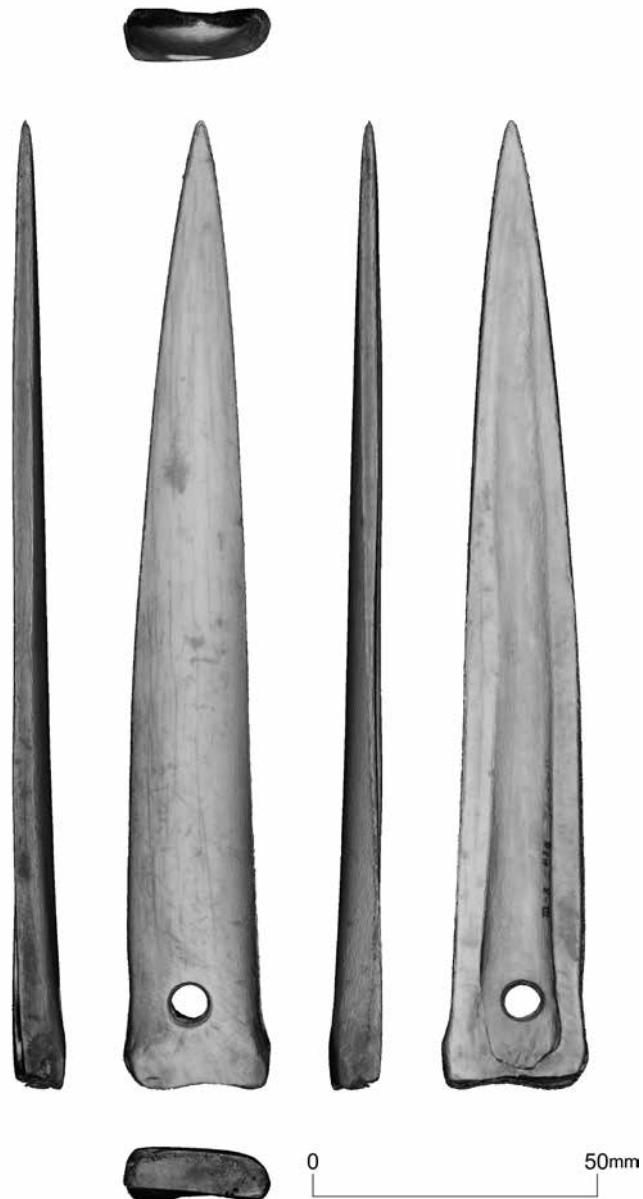


図9 骨角器展開図（カラー・テクスチャ図像）

面位置ごとの変位が大きい。展開図とあわせて観察すると、正面図右下部分に段差ともいえる大きな変形が認められる。なお、これらの特徴が接合復元時の誤差によるものか、埋没時の土圧変形によるものか、製作・焼成時の本来の器形をどの程度反映しているかについては、石膏復元によらない破片の残存範囲ごとに曲率を検討するなどさらなる精査が必要である。

4-4. 土器の回転縦断面図

図12には、土器のX, Y各軸長の中間点を基準に15°単位で取得位置を回転させた縦断面図を示した。横断面図と同様、CloudCompareのCross-section機能を利用し

ている。すべての断面を重ねると煩雑なため、45°毎に4区間に分けて図示している。前項で見たX-Y軸長の差分と中心点の偏差の傾向のとおり、胴部下半で大きな変位が認められる。同時に4単位の波状口縁も対称ではないことが確認できる。

4-5. 骨角器の連続縦横断面図

図13には、骨角器のY軸長（長さ）に沿った5mm間隔の連続横断面図とX軸長（幅）に沿った2mm間隔の連続縦断面図を示した。土器断面図と同様Cloud CompareのCross-section機能を利用している。穿孔部および素材となる中足骨の断面形状がよく表れている。

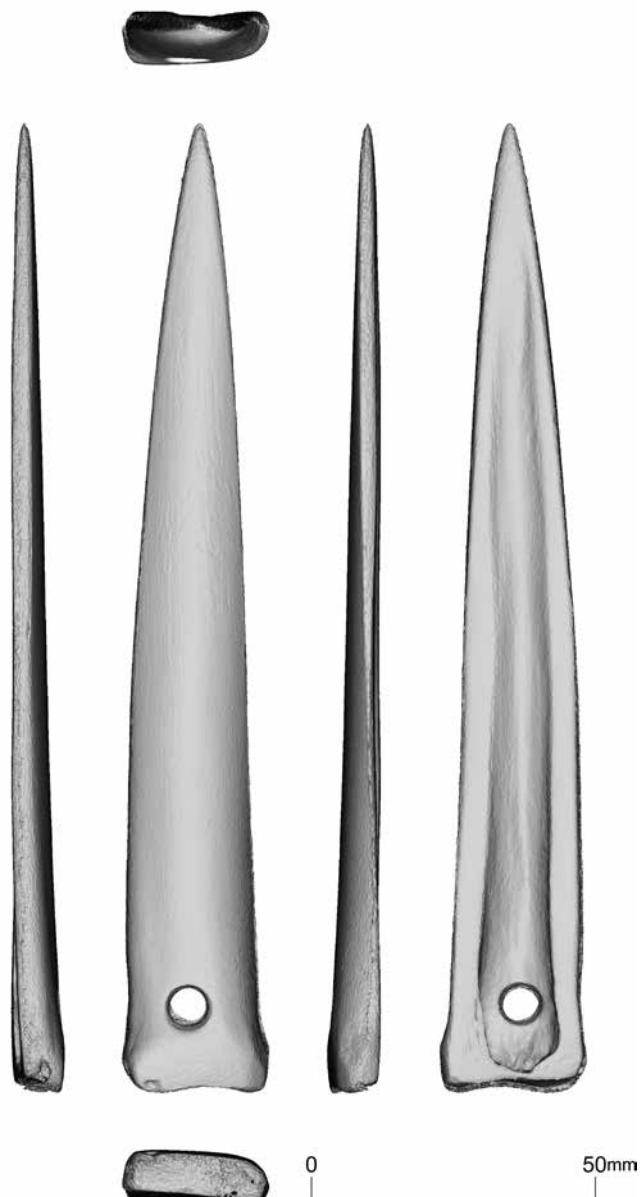


図10 骨角器展開図（陰影図像）

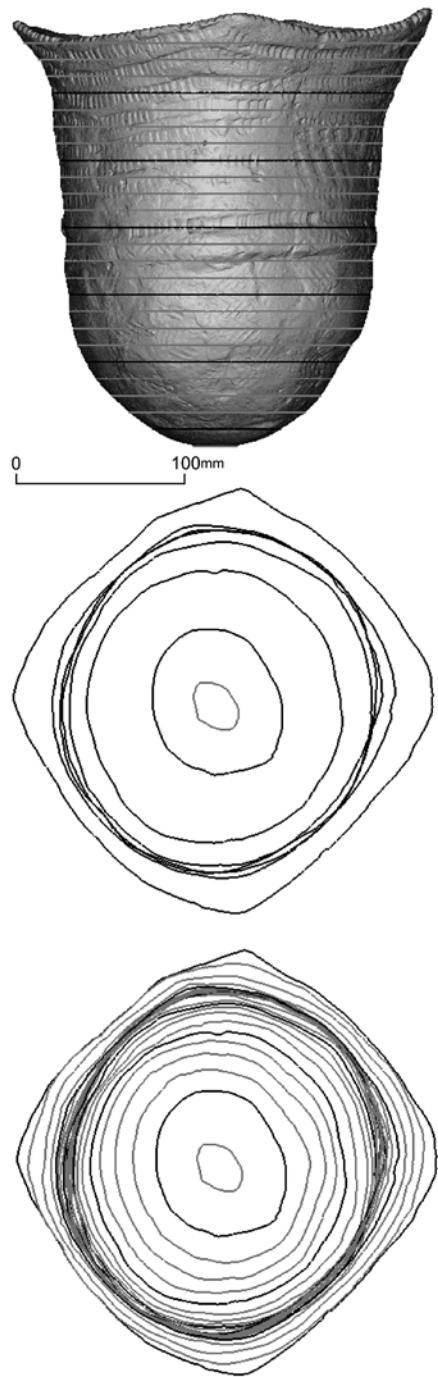


図11 土器連続横断面図

連続横断面では、基部側から先端部側に向かって器体が反時計回りにややねじれている状況も把握される。

4-6. 骨角器の段彩図・等高線図

図14には、CloudCompareのRasterize機能を利用して作成した骨角器の表裏両面の段彩図と等高線図を示した。従来、使用されてこなかった図化・可視化手法であるが、たとえば等高線図は石器の器面の凹凸や全体形状を視覚的に把握するために有効である（野口ほか

表2 各断面位置における径と中心軸偏差

断面位置	X軸長	Y軸長	軸長差分	中心△X	中心△Y
0.3136	26.9197	28.2289	-1.3092	3.989	3.04842
10.3136	77.1284	86.7358	-9.6074	3.154	0.49855
20.3136	105.344	115.045	-9.701	3.072	2.19862
30.3136	125.194	134.667	-9.473	3.604	2.2612
40.3136	140.612	150.182	-9.57	4.96	2.44217
50.3136	152.42	162.109	-9.689	5.02	3.25777
60.3136	163.235	174.579	-11.344	4.387	3.13751
70.3136	172.709	183.636	-10.927	2.418	2.48261
80.3135	177.664	189.163	-11.499	1.906	1.95946
90.3135	179.754	192.477	-12.723	1.232	1.68379
100.3135	182.395	196.032	-13.637	1.65	1.39935
110.3136	183.109	202.93	-19.821	2.138	1.4826
120.3136	184.394	208.222	-23.828	0.408	1.08645
130.3136	186.566	203.944	-17.378	2.184	0.34265
140.3136	185.622	206.268	-20.646	1.056	-0.02661
150.3136	187.712	205.097	-17.385	1.278	-0.21623
160.3136	189.849	204.443	-14.594	1.108	0.18792
170.3136	191.475	204.067	-12.592	1.108	0.18792
180.3136	194.164	204.317	-10.153	1.586	0.81658
190.3136	195.898	204.988	-9.09	2.224	1.00377
200.3136	198.667	207.438	-8.771	0.941	0.38298
210.3136	203.703	209.918	-6.215	-0.498	0.40566
220.3136	210.995	214.737	-3.742	-1.212	1.04221
230.3136	220.333	224.844	-4.511	-0.823	1.34834
240.3136	235.385	238.428	-3.043	0.169	0.65145
最外郭	249.129	252.456	-3.327	0	0
平均			-11.2499	1.8824	1.3226
中央値			-10.1530	1.6500	1.0865
標準偏差			5.4222	1.6487	1.0179

2017)。骨角器についても、曲面で構成される器面の形状を視覚的に把握するために有効であることが確認できた。

5.まとめ

土器、とくに復元個体の実測図は、これまで一断面を計測した上で、回転体と見なして中心軸を基準に線対称に反転する方法が取られてきた（野口2021）。縄文土器など左右対称性が高くないものについては正面観両側面の器形を計測する場合もあるが、しかし扁平度や中心点（軸）の偏差を可視化することはできていなかった。弥生土器の3D計測結果の分析では、中心点（軸）偏差が製作技法の解明に有効であることが指摘されている（野口・斎藤2018、野口ほか2020a）。

また45°単位の正射投影図像（図7・8）からは、胴部文様帶下端の隆帶が水平ではなく正面～左側面に向

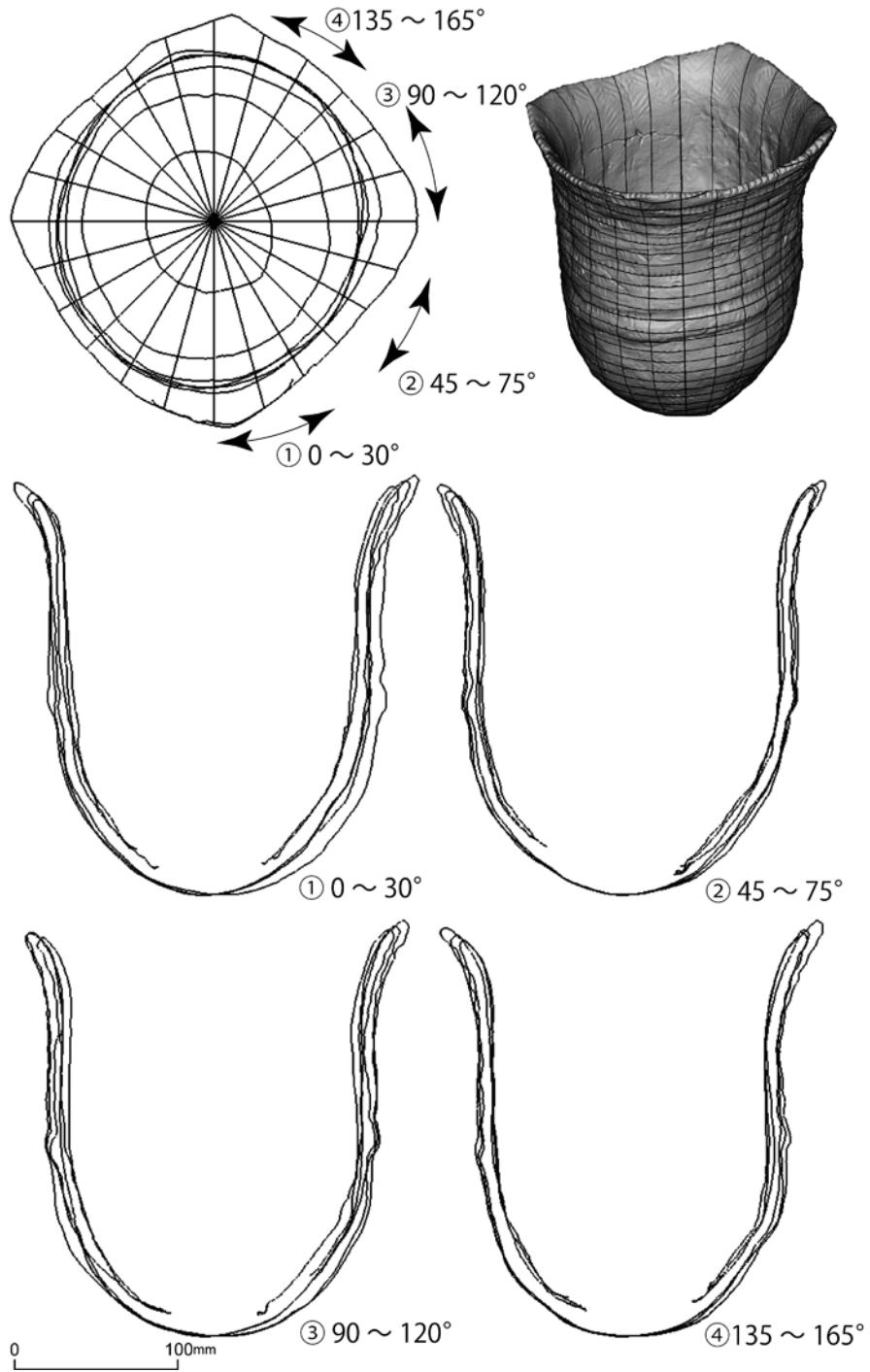


図12 土器回転縦断面図

かって著しく傾いていることも、展開図によって確認できる。これは1面だけを計測図化する従来の方法では可視化できなかった特徴である。今回は図示していないが、円筒展開・扇形展開も作成できる。単一の計測結果から複数の異なる図化・可視化が可能な点が3D計測の利点である。

なお今回は器面調整や文様について詳細な検討を行っていないが、3D計測データがそれらの分析にきわ

めて有効であることはすでに先行研究が示している（平原・大綱2016、田中ほか2018、魚水2020、中園2020、中園ほか2020、野口ほか2020a,b）。先に指摘した器形の3D形状にもとづく製作技法の解明とあわせて柄原岩陰遺跡出土資料に適用することにより、層位的に出土している縄文時代早期土器の製作技法や型式変遷を客観的・定量的に把握することが可能になるだろう。

連続縦横断面から把握される表裏対称性や軸のねじれ

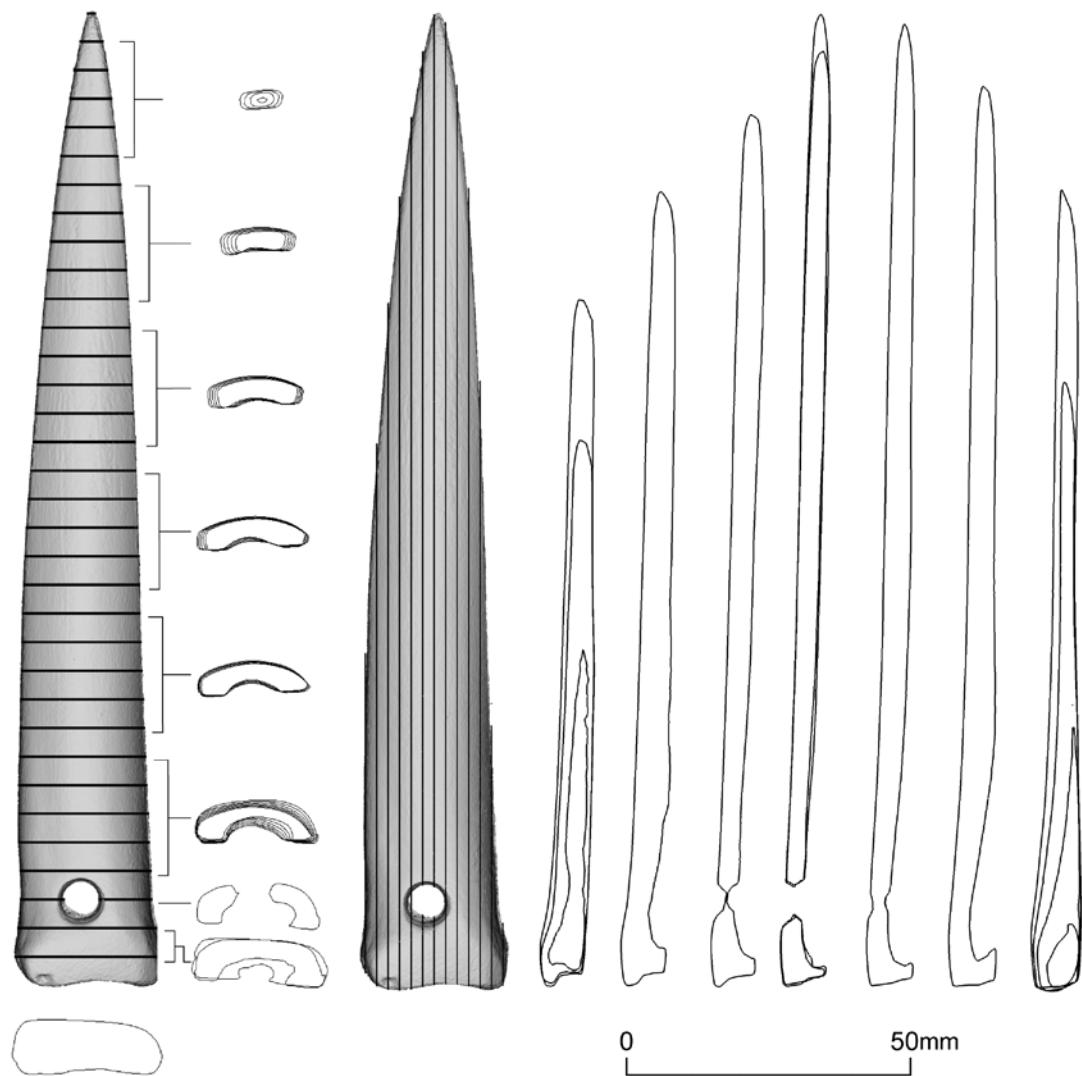


図13 骨角器連続縦横断面図

は、石器の機械的性能の評価に有効であることが指摘されている（野口ほか2015）。今回、骨角器についても同様の分析が有効である可能性が把握された。連続断面図として可視化するだけでなく、各断面位置における長さ・幅・厚さや中心点の偏差を数値として取得できるので、計測事例を蓄積することで定量分析が可能になる。たとえば、素材選択の対象となる種・骨の部位の断面形状との比較により、素材形状と道具の機械的性能の両面から骨角器の形態を解明することが期待される。

以上、柄原岩陰遺跡出土資料について3D計測を試行した結果を報告した。3D計測は、単一の計測から各種の図化・可視化が行なえるだけでなく、資料の形態に関する数値属性の取得、定量化も可能であり、考古学研究、博物館資料のデータ化・アーカイブ化の両面における有効性を示している。引き続き、資料の計測とデータおよ

び成果の公開を行ないたい。

注

1) <https://www.agisoft.com/>

2) <https://www.danielgm.net/cc/>

引用・参考文献

魚水 環 (2020)「マクロ写真とSfMを用いた土器施文具同定の試み」『金沢大学考古学紀要』41, 59-64.
<http://doi.org/10.24517/00057297>

内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014)「SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究」『防災科学技術研究所研究報告』81, 37-60. <http://doi.org/10.24732/nied.00001225>

金田明大 (2017)「三次元計測とRTIによる土器計測・観察の可能性と課題」『文化財の壺』5

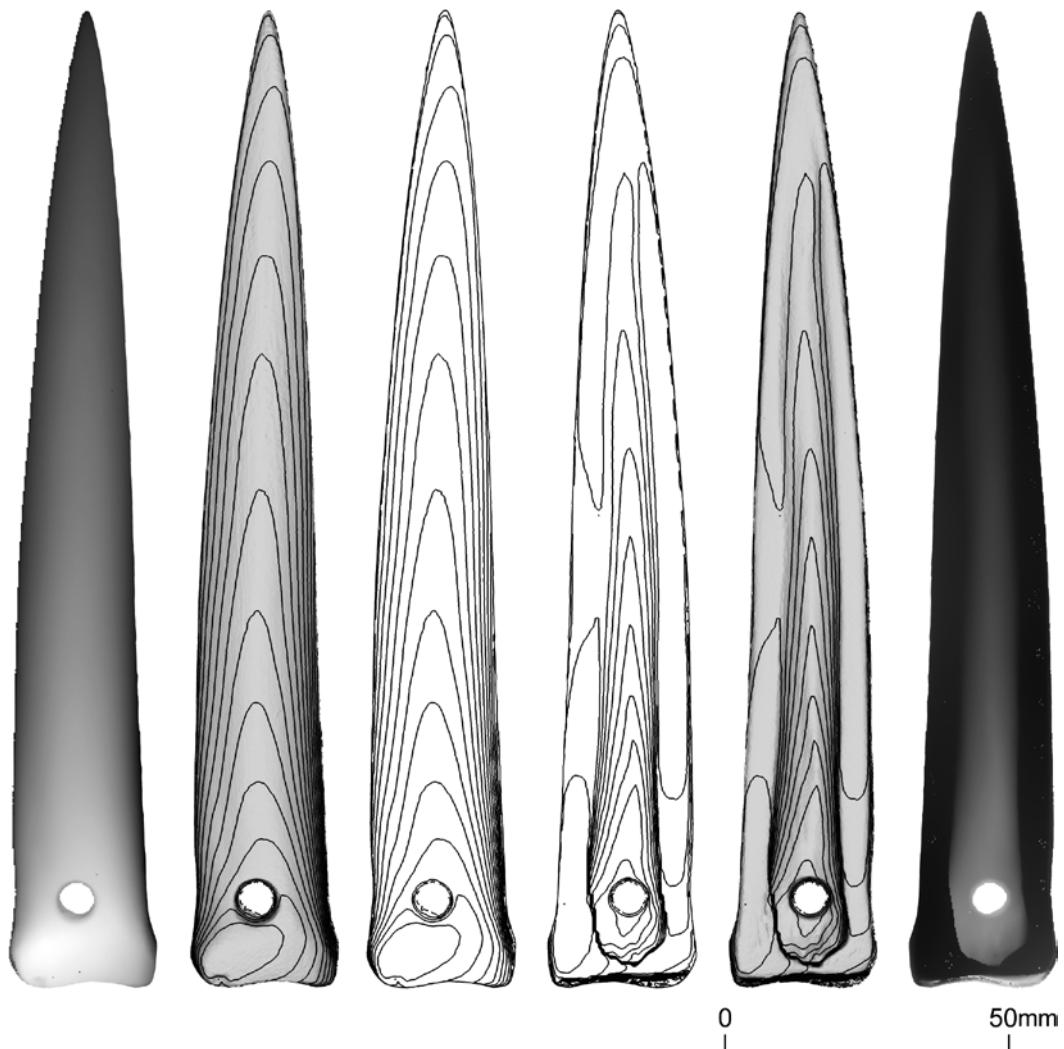


図14 骨角器表裏段彩図・等高線図

- 金田明大・木本拳周・川口武彦・佐々木淑美・三井 猛
(2010)『文化財のための三次元計測』岩田書院
- 北相木村教育委員会 (2019)『柄原岩陰遺跡発掘調査報告書 第1次～第15次調査 (1965～1978)』
- 太郎良真妃 (2019)「ありふれた土器片への3D計測・記録の適用」『日本情報考古学会講演論文集』22, 24-27
- 太郎良真妃・中園 聰 (2018)「ありふれた遺物の三次元計測・記録とその意義 (続報)」『日本情報考古学会講演論文集』21, 19-24
- 中園 聰 (2010)「三次元レーザースキャナを用いた土器表面痕跡の3Dマッチング」『鹿児島国際大学情報処理センター研究年報』16, 1-12
- 中園 聰 (2020)「高解像度で多角的に土器を見る」『季刊考古学』155

- 中園 聰・平川ひろみ・太郎良真妃田中祐紀ほか (2020)「押型文の三次元計測と詳細観察—製作者の動作の理解に向けて—」『九州縄文時代早期研究ノート』6
- 野口 淳・斎藤あや (2018)「東京都大田区久ヶ原遺跡採集弥生土器2例—3D計測による博物館収蔵標式資料の再記載—」『大田区立郷土博物館紀要』22, 72-85.
- 野口 淳・横山 真・千葉 史 (2015)「後期旧石器時代初頭石斧の3次元形態分析—東京都武藏台遺跡出土資料について—」『日本旧石器学会第13回研究発表・シンポジウム予稿集』, pp.13-16
- 野口 淳・千葉 史・横山 真・神田和彦 (2017)「秋田県における後期旧石器時代前半期の石斧(斧形石器)の再検討」『秋田考古学』61, 1-16
- 野口 淳・斎藤あや・植木雅博・轟 直行・千葉 史・

横山 真 (2020a) 「3D計測データによる土器研究のあらたな展開(1)－東京都大田区久ヶ原遺跡採集弥生土器の再検討－」『日本情報考古学会講演論文集』23,

野口 淳・中尾智行・横山 真・千葉 史 (2020b) 「3D計測データによる土器研究のあらたな展開(2)－大阪府船橋遺跡採集弥生土器（水差形土器）の整形・調整・施文技法の検討－」『日本情報考古学会講演論文集』23,

平原信崇・大網信良 (2016) 「土器施文痕跡の3Dマッチング－縄文土器のケーススタディー－」『3D考古学の挑戦－考古遺物・遺構の三次元計測における研究の現状と課題－』, pp. 47-52

山口欧志 (2017) 「遺物の微細痕跡の資料化」『文化財の壺』5, 16-19