

● 論文

遠賀川式土器を例とした三次元モデルと二次元実測図データの比較*

野下浩司¹ 中川朋美² 金田明大³ 田村光平⁴ 中尾 央⁵

本稿は、近年考古学においてさまざまな注目を集めている三次元データを、二次元実測図データと比較して両者の有用性を考察する。具体的には、比較的形状が一様かつシンプルな弥生時代前期の遠賀川式土器を用い、遠賀川式土器の三次元データ（取得・構築方法としてはレーザースキャナーを用いた）を球面調和関数で、二次元実測図データを楕円フーリエ解析で数理的に解析し、その結果を比較した。結果として、両者の結果はある程度一致するものの、三次元データを用いた解析結果の方が、地域差・時期差をより詳細に捉えられていると考えられるだろう。とはいえ、三次元データの短所（正確なデータ取得に時間と手間がかかる、データのサイズが非常に大きい、など）と本稿の解析結果を踏まえて考えると、従来の二次元実測図データにもまだ十分に活用できるだけの利点が残されている可能性があり、今後もさまざまな角度からその可能性を検証していくべきだと考えられる。

キーワード：三次元データ、実測図、楕円フーリエ解析、球面調和関数、遠賀川式土器

1 導入

近年、考古学において三次元データはさまざまな注目を集めるようになってきている（e.g. 金田ほか 2010; Kaneda et al. submitted; 中園 2017; Forte 2014）。遺構や古墳の石室の記録などに SfM/MVS（Structure from Motion/Multi-view Stereo）を用いることも珍しくなくなっているし（e.g. 河村ほか 2019; 金田 2014; 城倉・平原・渡邊 2016; Howland et al. 2014; Kaneda et al. 2015; López et al. 2016; Smith et al. 2014）、遺物をレーザースキャナーなどで計測することもかなり増えてきている（e.g. 中園 2011; 城倉 2017; 平川他 2012a, 2012b; Morales et al. 2015; Roosevelt et al. 2015）。また、筆者たちが計測を行った様々な埋蔵文化財センターや博物館などでも、三次元データ・計測への需要を耳にすることが多い。実測図の作成にかかる手間、そして削減される予算と人手を考えれば、今後もこうした需要はより一層高まっていくことが考えられる。

こうした三次元計測・データが、これまでの考古学研究法にとってさまざまな利点をもたらすことはもはや説明の必要もないだろう。SfM によって構築された遺構の

三次元モデル、あるいはレーザースキャナーで計測された遺物のデータは、発掘報告書などでも使用できるだろうし（そして報告書作成の手間が軽減されるだろうし）、甕棺のように巨大でスペースを取るがゆえに、そのままの保存が容易でない遺物の完形状態をデータとして残しておくこともできる。取り壊されたり埋め戻されたりする遺構の記録としても、三次元計測は非常に有効であろう。また、データが公開されていれば、直接遺物を観察しに行かなくとも、かなりの程度その遺物の情報を取得することができる。もちろん、一般的な考古学的観察・検討に耐えるだけの精度をもった三次元データを取得・公開することはそう簡単ではないが、こうした短所を補って余りある魅力と可能性を持っているのが、三次元データである。

本稿の目的は、この三次元データと、これまで紙の報告書で表現されてきた二次元での情報を比較考察することである。具体的には、弥生時代前期（特に初頭～半ばにかけて）の遠賀川式（系）土器を対象にし、その三次元データと二次元データ（今回は実測図）を用い、両者を定量的に解析した結果を比較する。もちろん両者を比較するといっても色々な比較の仕方がありうるだろうし、比較の仕方によって結果は異なりうる（e.g. 川宿田ほか 2010; 館内 2021）。ある目的のもとで、三次元データと二次元データから得られる結果が異なっていれば、おそらくはより多くの情報が削減されている二次元データよりも、三次元データにもとづく結果を採用すべきだろう。しかし、その結果がほぼ同じであれば、わざわざ三次元データを使わなくとも、二次元データである程度の見通しをつければ良いかもしれない。そして余裕があれば、三次元データを取得・使用して、より詳細な検討

* A Comparative Analysis of Two- and Three-dimensional Data Using Ongagawa Pottery as an Example

1 Koji NOSHITA 九州大学大学院理学研究院
2 Tomomi NAKAGAWA 南山大学人類学研究所
3 Akihiro KANEDA 奈良文化財研究所
4 Kohei TAMURA 東北大学学際科学フロンティア研究所／東北アジアセンター
5 Hisashi NAKAO 南山大学人文学部人類文化学科／人類学研究所

表1 使用したデータの一覧

データ No.	遺物 No.	遺跡名	遺跡位置		出土地点	取得日	文献
shiraishi_9	9	白石遺跡	34.794585	137.42542	SD-1 下層	2020/03/09	豊橋市教育委員会 1993
shiraishi_11	11	白石遺跡	34.794585	137.42542	SD-1 下層	2020/03/09	豊橋市教育委員会 1993
tsukinawate_1990_18	18	月縄手遺跡	35.228437	136.89892	SX01 (B 地区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1990_19	19	月縄手遺跡	35.228437	136.89892	SX01 (B 地区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1990_21	21	月縄手遺跡	35.228437	136.89892	SX01 (B 地区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1990_23	23	月縄手遺跡	35.228437	136.89892	SX01 (B 地区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1990_24	24	月縄手遺跡	35.228437	136.89892	SX01 (B 地区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1990_44	44	月縄手遺跡	35.228437	136.89894	SK18	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1990_134	134	月縄手遺跡	35.228437	136.89894	SK18	2020/05/26	愛知県教育委員会 1990
tsukinawate_1994_39	39	月縄手遺跡	35.228361	136.89894	SK116 (Ca 区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1994
tsukinawate_1994_43	43	月縄手遺跡	35.228361	136.89894	SK116 (Ca 区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1994
tsukinawate_1994_63	63	月縄手遺跡	35.22836	136.89903	SK134 (Cb 区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1994
tsukinawate_1994_88	88	月縄手遺跡	35.22836	136.89903	SK152 (Cb 区)	2020/05/26	愛知県教育委員会 1994
yokoro_59	59	横路遺跡	34.762756	132.50066	SX44	2020/06/24	横路遺跡調査団 1982
yokoro_71	71	横路遺跡	34.762756	132.50066	SK57	2020/06/24	横路遺跡調査団 1982
tainaka_9_29	29	田井中遺跡	34.601364	135.60066	土坑 102	2020/07/27	大阪府教育委員会 2000
tainaka_17_156	156	田井中遺跡	34.601364	135.60066	溝 405 - 2	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_23_211	211	田井中遺跡	34.601364	135.60066	溝 405 - 1	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_24_240	240	田井中遺跡	34.601364	135.60066	溝 405 - 1	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_25_249	249	田井中遺跡	34.601364	135.60066	溝 405 - 1	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_25_253	253	田井中遺跡	34.601364	135.60066	溝 405 - 1	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_26_254	254	田井中遺跡	34.601364	135.60066	溝 405 - 1	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_30_314	314	田井中遺跡	34.600962	135.60132	溝 411	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_31_317	317	田井中遺跡	34.600962	135.60132	溝 411	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
tainaka_33_359	359	田井中遺跡	34.600962	135.60132	溝 411	2020/07/27	大阪府教育委員会 1996
kumonomiya_418	418	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX60 第1層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
kumonomiya_426	426	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX60 第1層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
kumonomiya_506	506	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX60 第2層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
kumonomiya_174	174	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX76 第2層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
kumonomiya_180	180	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX76 第2層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
kumonomiya_187	187	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX76 第2層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
kumonomiya_337	337	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	SX76 第3層	2020/06/08	京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997
Kumanomiya_nagaokakyo_29	29	雲宮遺跡	34.922686	135.70947	不明	2020/06/08	長岡京市教育委員会 1985
imagawa_38	38	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝下層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981
imagawa_50	50	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝中層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981
imagawa_51	51	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝中層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981
imagawa_65	65	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝中層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981
imagawa_66	66	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝中層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981
imagawa_71	71	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝中層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981
imagawa_73	73	今川遺跡	33.774002	130.47395	V字溝中層	2020/08/17	津屋崎町教育委員会 1981

をすれば良い、ということになるだろう。

本稿では、後述するように、輪郭形状を定量的に検討する際、二次元データと三次元データでどのような差が出てくるのかという点に注目する。結果を簡単に先取りすれば、以下ようになる。二次元の実測図を楕円フーリエ解析 (e.g. 小森ほか 2012; 田村 2020; 田村ほか 2017) を用いて解析した結果と、三次元データを球面調和関数 (e.g. Kelemen et al. 1999; Brechbühler et al. 1995) を用いて解析した結果を比較したところ、後者のほうがより正確に、時期差や地域差を反映するような結果が得られた。とはいえ、実際の土器の断面図そのものではない二次元実測図の解析結果でも、三次元データを用いたときの結果を大まかには確認できていることも確かである。現状で、三次元データの取得やデータの整理・保存などにそれなりに手間がかかるという短所、また実測図の場合はすでに出版された報告書があれば簡単に利用できるという長所があることを併せて考えれば、二次元の実測図にも一定の利用価値が考えられる(あるいは残されている)と結論できるだろう。

2 資料と方法

2.1 資料

今回の考察で用いたデータは、遠賀川式土器と呼ばれるもののうち、すべて弥生時代前期の完形の甕である(鉢との区別が難しいものについては、報告書の記載に従った)。また、厳密な完形品だけでなく、石膏などで復元を行っているものも含んでいる。データを取得した遺跡は東から白石遺跡(愛知県豊橋市)、月縄手遺跡(愛知県名古屋市)、雲宮遺跡(京都府長岡京市)、田井中遺跡(大阪府八尾市)、横路遺跡(広島県大朝町)、今川遺跡(福岡県福津市)である(図1)。また、実測図では完形復元されていても、実際の遺物が(石膏による復元などがなされず)完形でないものは、検討の対象から外した。資料一覧は表1を参照されたい。

遠賀川式土器の成立には諸説あるものの、現状では概ね、以下のような経緯が想定されていると言って良いだ

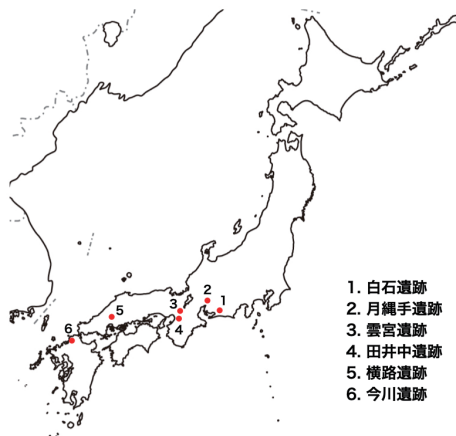


図1 遺跡の所在地

ろう。まず、韓半島からの影響を受けつつ、北部九州の板付遺跡などで最初期の遠賀川式土器が成立し、それらがさまざまな経緯で(おそらくは在地の縄文土器などの影響を受けつつ、複数の経路を経て)東の方に拡散していった(e.g. 柴田 2014; 田畑 2018; 藤尾 1999; 豆谷 2009)。遠賀川式土器は西日本各地の非常にさまざまな場所で出土するが、弥生時代前期において、出土する土器の大半を遠賀川式土器が占めるのは、北部九州～中国・四国・畿内(和歌山を除く)までである。九州中部・南部や和歌山でも遠賀川式土器は出土するが(櫛遺跡や高橋貝塚、徳蔵地区遺跡など)、在地系の土器が一定数を占め、決して遠賀川式土器が大半を占めるという状況ではない(むしろ、在地系の土器の方が多く出土する場合もある)。三重や愛知などの東海地方でも同じく、いわゆる条痕文土器(愛知考古学談話会 1985, 1988; 永井 2007)が併存し、現状での太平洋側の東限は愛知付近であるようだ。日本海側では、京都(竹野遺跡や途中ヶ丘遺跡)や福井(丸山河床遺跡など)以東での遠賀川式土器の出土は、ほとんど見られなくなる。

上記のような遠賀川式土器を選んだ理由は、地域や時期によらず、比較的形状が類似する一方、それでも微妙な地域差・時期差が確認できること(あまりに形状が違いすぎれば、そもそも地域・時期を超えた比較ができなくなる)、さらに比較的形状がシンプルであるがゆえに、輪郭形状の検討に適しているからである。また、上記の遺跡を選んだ理由は、ある程度西から東まで、広い地域の遺跡であること、またある程度残りの良い土器が出土している遺跡、というものである。とはいえ、考古学的な重要性という点はそこまで重視していないため、あくまでも試行的研究という位置づけになるだろう。他の重要遺跡、たとえば板付遺跡や綾羅木郷遺跡、田村遺跡、矢野遺跡などのデータも現在解析を進めており、いずれはその結果を発表できればと考えている(野下他 準備中)。

2.2 データの取得・整理方法

三次元データの取得に関しては、今回のものはすべてCreaformのCreaform HandySCAN BLACK™ | Elite(使用機材および使用ソフトウェア一覧は論文末尾も参照)を用いた。名前の通りハンディタイプのレーザースキャナーであり、公称精度・解像度は0.025mmである。図2のように、ターゲットシールを遺物の周りもしくは遺物自体に貼り付け、そのシールからの反射によって対象となる遺物の形状を計測していく。

今回の解析に用いた三次元データはすべて、図2のようにターゲットシールを貼り付けたアクリル板に遺物を置いて計測した。また内部についても、高さ30cm以内程度のものであれば、このまま計測が可能である。それ以上の高さであれば、内部に数枚のターゲットシールを貼り付け、また周囲にターゲットシールを貼り付けたブ



図2 HandySCAN BLACK™ | Elite での撮影風景。下に配置したターゲットシールからの反射を利用し、レーザーの光が遮られた位置を三角法で計算することにより、土器形状を計測する。計測しているのは kumomiya_187。撮影風景の動画は以下の URL も参照：<https://researchmap.jp/read0143838/misc/35889195>

ロックを積み上げたりして計測した。口縁部を上側にして内側、次に遺物を上下ひっくり返して外部を計測し、最後に内部と外部のデータを合成すれば、最終的な三次元モデルが得られる。計測時間は土器一つあたり（上下合わせて）10～15分程度であり、データ処理時間もおおよそ15分程度で終了する。この計測・処理時間は計測対象の大きさに依存する。

取得されたメッシュデータは、以下の手順でメッシュ数の削減や整理を行った。

- (1) スキャナーで得られたデータを 0.2mm メッシュの解像度で STL ファイルに出力した。本スキャナーは色情報が取得できないため、OBJ や PLY ファイルでの解析は行っていない。0.1mm の解像度での出力も不可能ではないが、出力に時間がかかること、また 0.1mm メッシュで十分な計測を行うにもかなりの長時間を要するため、それなりの数のデータを取得するという目的を優先し、今回は行っていない。もちろん、貴重な遺物や詳細な文様の観察などに関しては、0.1mm メッシュの解像度で計測・出力することが望ましいだろう。
- (2) Meshlab を使い、Quadric Edge Collapse Decimation によって、(1) で得られた STL ファイルのメッシュ数を元ファイルの 1/100 まで削減した。これは、メッシュ数が大きければ大きいほど、解析に時間を要するからである。結果として、おおよそその土器も数万～十数万程度のメッシュ数（ファイルサイズとしては数～十数 MB）になっている。
- (3) メッシュデータに空いてしまっている穴を埋める際には、Meshmixer を用いた。Meshmixer での穴埋め方

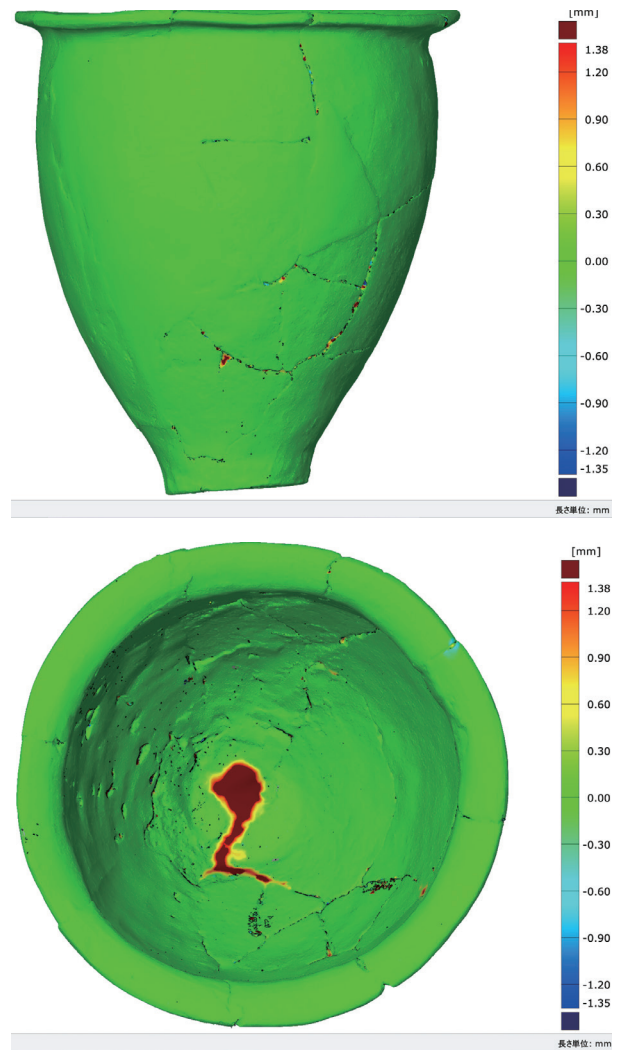


図3 GOM Inspect を用いた田井中遺跡出土土器の三次元データ比較。上述した手順(1)で得られた元の STL ファイルと(2)の手順で1%までメッシュを削減した STL ファイルの形状を比較している。下図で赤くなっており、ずれの大きい部分は底部穿孔を埋めた部分である。解析方法で述べるように、球面調和関数を用いた手法で解析するには、こうした穴を埋めておく必要がある。

法も3種類あるが（フラット、スムーズ、最小限の補填）、3種類の方法を試し、穴周囲の状況と比較して穴埋めの結果がもっとも違和感のない方法を選んだ（たとえば底部の場合はフラット、胴部の場合はスムーズな補填、など）。それでもまだ大きな穴（今回の検証で用いた弥生土器の場合、底部の穿孔や、土器破片がうまく接合できていない箇所などが穴として残される）が残されている場合、穴が残されていると解析が行えないため、Blender を用いて一旦穴周りのメッシュを削除したあと、再度 Meshmixer で穴埋めを行った。

- (4) また、上記手順に即して解析用のデータがうまく得られなかった場合（どうしても穴が残ってしまったり、うまく穴が埋まらなかった場合など）は、少し解像度を落とした 0.3～1mm メッシュの STL ファイルを出力した上で、上記と同じ手順に沿って解析用

の STL ファイルを生成した。この場合でも、生成された STL ファイルのメッシュ数は、0.2mm メッシュ解像度で出力された STL ファイルの 1% 程度になるよう調整してある。

また、この手順で得られたデータについては、メッシュ数を削減した状態と元ファイルがどれだけ形状に違いがあるか、GOM inspect を用いて検証を行ない、以降の解析で問題がないかを確認している。検証の結果として、両者の形状はほぼ変わらないものとなっている（図 3 を参照、データは tainaka_33_359 のファイルを用いた）。Meshmixer、Blender を用いて穴埋めを行うと、穴埋めの箇所が少し元ファイルとずれてしまうが、それでも底部穿孔を埋めた部分、あるいは破片の接合部分が 0.1 ~ 2mm 程度ずれるくらいである。したがって、全体の輪郭形状を解析するにあたっては、特に大きな問題がないレベルであろうと考えられる。実際、輪郭形状であれば、さらにメッシュ数を削減してもそこまで大きなズレは生じないため、今後の解析にはよりデータを軽くして行なったほうが効率的かもしれない。

2.3 データの解析方法

二次元の実測図を解析するにあたっては、幾何学的形態測定 (geometric morphometrics) の手法の一つである、楕円フーリエ解析を用いた(生形 2005; 小森ほか 2012; 田村 2020; 田村ほか 2017; 津村 2007)。楕円フーリエ解析では、土器の輪郭を周期関数とみなし、その関数をフーリエ級数に展開して三角関数 (sin, cos) の和で表現する。そして、この三角関数の係数が、それぞれの土器の輪郭の特徴量・定量的記述とみなされる。もちろん実測図の定量的解析には他の手法なども応用可能であるが、本稿では後述する球面調和関数を用いた解析結果との比較を目的とするため、全体形状を定量化できる楕円フーリエ解析を選択した。楕円フーリエ解析とは、閉じた輪郭の形状をフーリエ級数展開し、sin と cos の和として表現する手法である。この関数の次数を増やせば増やすほど、輪郭形状は実際の土器形態に近づいていくが、一定の閾値を超えると、次数を増やしても主成分分析結果に影響しないため、ここでは次数を 20 にして解析を行なっている¹。

楕円フーリエ解析で実測図を定量化する際には、実測図を図 4 のように黒く塗りつぶして作業を行う。また、上記で得られた特徴量を主成分分析によって解析し、輪郭形状のばらつきを可視化した。楕円フーリエ解析および主成分分析には R4.02 (R Core Team 2020) と R Studio RStudio 1.3.1093 (R Studio Team 2020)、形態測定学向けパッケージ Momocs (Bonhomme et al. 2014) を用いた。

次に、三次元データの解析には球面調和関数解析による定量化を行った (図 5)。球面調和関数解析では、楕円フーリエ解析における sin 関数、cos 関数の代わりに、

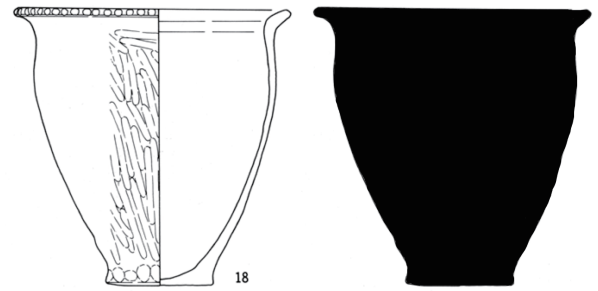


図 4 tsukinawate_1990_18 の実測図 (愛知県教育委員会 1990) と解析に用いた黒塗り図。左の実測図を右のように黒く塗りつぶして輪郭を抽出し、解析を行う。

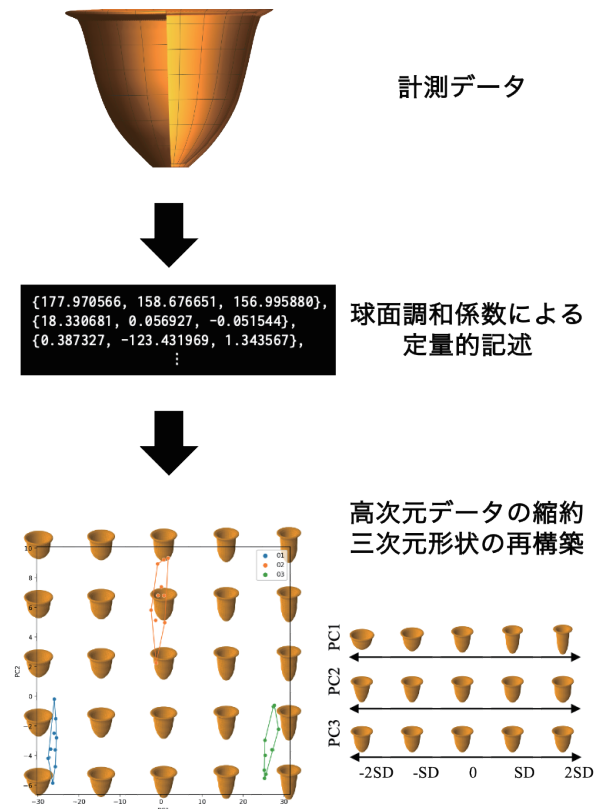


図 5 球面調和関数を用いた三次元データの解析パイプライン。計測データの輪郭を球面調和関数を用いて定量化し、最終的に主成分分析などで次元の縮約を行う。

曲面上の周期性と直交性をもつ球面調和関数 $Y_l^m(\theta, \phi)$ を用いる。3次元の輪郭は閉曲面であり、その上の一点は θ, ϕ と 2つのパラメータにより指定される。球面調和関数解析でも楕円フーリエ解析と同様に座標値 $x(\theta, \phi)$ 、 $y(\theta, \phi)$ 、 $z(\theta, \phi)$ はそれぞれが個別の関数として近似される：

$$\begin{aligned} x(\theta, \phi) &= \sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^l c_{x,l}^m Y_l^m(\theta, \phi), \\ y(\theta, \phi) &= \sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^l c_{y,l}^m Y_l^m(\theta, \phi), \\ z(\theta, \phi) &= \sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^l c_{z,l}^m Y_l^m(\theta, \phi) \end{aligned}$$

ここで、 $c_{x,l}^m$ 、 $c_{y,l}^m$ 、 $c_{z,l}^m$ はそれぞれ x、y、z 座標値における各 $Y_l^m(\theta, \phi)$ に対応する球面調和係数であり、この集合で 3 次元輪郭形状を特徴づける。本研究では、SlicerSALT (Vicory et al. 2018) を用いて球面調和係数を $n=30$ まで推定した。具体的には、メッシュデータに基づき、三次元球面座標と輪郭座標との対応関係の最適化をおこない、球面座標と輪郭座標のペアに対して各球面調和関数の重みを表す係数を推定した。得られた係数を特徴量として主成分分析を行い、3 次元輪郭形状のばらつきを可視化した。

また論文作成にあたり、今回用いたデータの収集は第二、第三、および第五著者、データの整理（メッシュデータの削減など）は第二、第五著者、データの解析は第一、第四、第五著者、論文の執筆は全員で行った。

3 結果

二次元データである実測図を楕円フーリエ解析で定量化し、その特徴量を主成分分析した結果は図 6 に示してある。上から順に、各主成分が何を示しているか、各主成分の寄与率、第一主成分と第二主成分、第二主成分と第三主成分で各土器をプロットしたもの、である。三次元データを球面調和関数と主成分分析で解析した結果は図 6 であり、一番上から順に各主成分が何を示しているか、各主成分の寄与率、第一主成分と第二主成分で各土器をプロットしたもの、その図上に土器形状の変化をプロットしたもの、第二主成分と第三主成分で各土器をプロットしたものとなっている。

まずは二次元データの解析結果を見ておこう。第一主成分は土器の縦長・横長の差異、また口縁部の反り返りの程度および実測図の左右非対称性とみなしてよいだろう。寄与率は 63.9% になっており、今回取り上げたサンプルでは月縄手遺跡の土器に縦長のものが多く、雲宮遺跡、今川遺跡などで、どちらかという縦方向に比べ、口縁が開き気味の土器が多いことがわかる。第二主成分は寄与率が 22.1% となっているが、実測図の左右非対称性、胴部の丸み（底部から口縁部にかけて、側面がどれほどふくらんでいるか）を捉えているようである。横路遺跡が少し外れ値にはなるが、東の遺跡に行くほど、胴部の丸みが大きくなるようである。第三主成分は寄与率が 3.5% ほどではあるが、これも胴部の丸みと解釈できるだろう。今回のケースでは、寄与率の低さが示している通り、どの遺跡もさほど分布に大きな違いはない。以上を踏まえると、少しばらつくものの、第一、第二主成分によって西から東へ土器の形が変遷していく様子が見えてくると考えて良いかもしれない。

次に三次元データの解析結果である。こちらは図 7 に示されている通り、第一・第二主成分に関して、西の遺跡から東の遺跡へ徐々に形状が変化している様子が見えてくると考えて良いかもしれない。

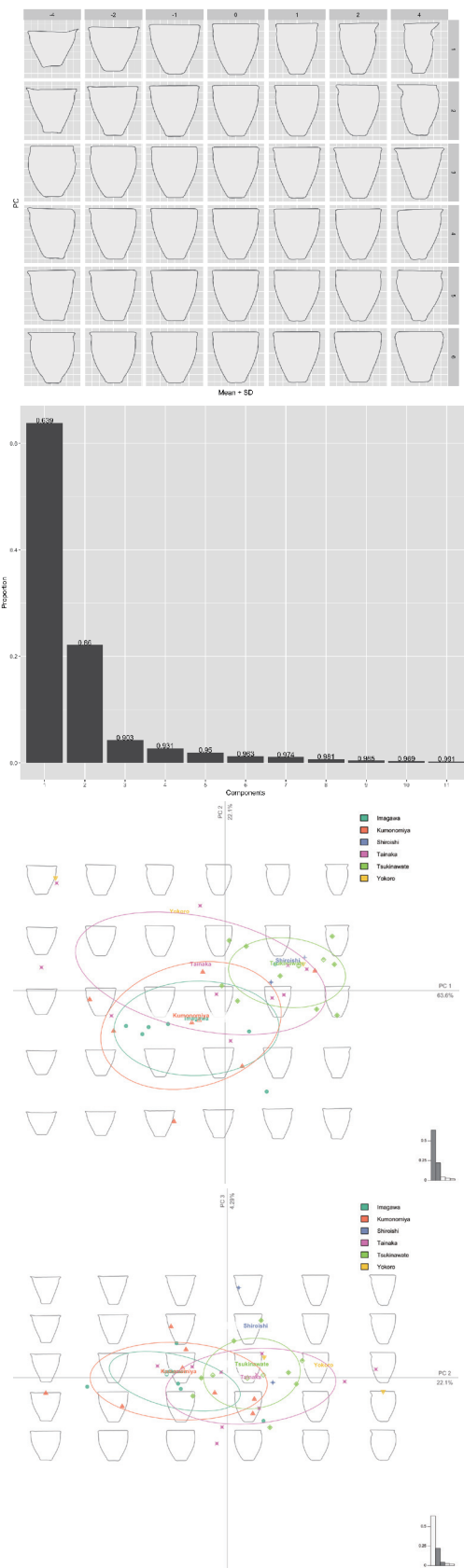


図 6 楕円フーリエ解析の結果を主成分分析したもの。一つ目が各主成分の示す変化、二つ目が各主成分の寄与率（寄与率は第二主成分まで 80% を超える）、三つ目が第一主成分と第二主成分、四つ目が第二主成分と第三主成分での各土器のばらつきを示している。各主成分の上に表記してある数値は累積寄与率を示す。

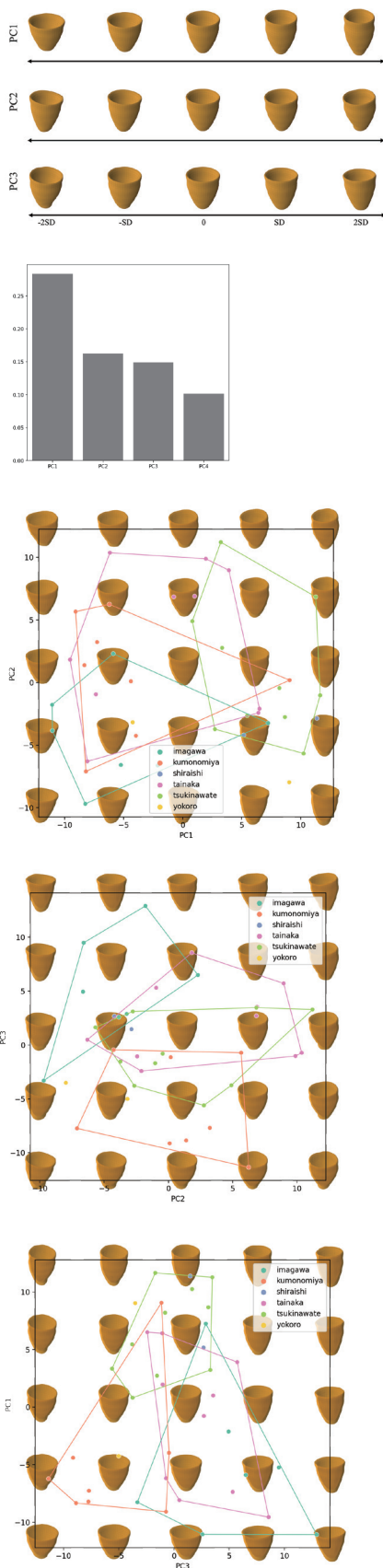


図7 球面調和関数による三次元データの解析結果を主成分分析したもの。上から順に、各主成分が何を示しているか、各主成分の寄与率、第一主成分と第二主成分、第二主成分と第三主成分、第一主成分と第三主成分で各土器と土器形状の変化をプロットしたもの。

遺跡の土器が地理的關係とはずれた場所にきてしまうが)。第一主成分は土器の縦長・横長の差異、底部と口縁部の比率、口縁部の反り返りの程度を捉えている。第二主成分は胴部の張り出し具合（口縁部と胴部の比）、またこちらでも口縁部の反り返りの程度、また左右の歪みを捉えている。第三主成分は歪みの大きさを捉えており、第三主成分スコアが低いと、歪みが大きくなる。寄与率は第一主成分が 28.35%、第二主成分が 16.26% というように、二次元データの解析ほど寄与率が偏っていない。したがって、球面調和関数を用いた三次元データの解析のほうが、多数の形状要素を定量的に表現できており、各遺跡の土器の特徴を多様な側面から捉えられていると考えられる。

4 考察

まずは、二次元データと三次元データに関して、二つの分析で各主成分が何を捉えていたのかを、再度まとめて比較しておこう。

・二次元データの解析

第一主成分：縦長・横長の差異、また口縁部の反り返りの程度、実測図の左右非対称性

第二主成分：実測図の左右非対称性、胴部の丸み（底部から口縁部にかけて、側面がどれほどふくらんでいるか）

第三主成分：胴部の丸み

・三次元データの解析

第一主成分：土器の縦長・横長の差異、底部と口縁部の比率、口縁部の反り返りの程度

第二主成分：胴部の張り出し具合（口縁部と胴部の比）、口縁部の反り返りの程度、左右の歪み

第三主成分：歪みの大きさ

両方の解析において、第一主成分で口縁部の反り返りが捉えられ、第一・第二の差異はあっても、胴部の膨らみが捉えられている。三次元データの解析では第三主成分に土器の歪みを捉えており、二次元的データからは捉えることができない（左右性の歪みとの区別）が難しい性質を捉えることができ、今川遺跡で歪みの少ない土器が比較的多く見いだせている。

もちろん、本稿の結果はかなり限定的なものである。まず、事例は遠賀川式土器という比較的シンプルな形態をもった土器であり、たとえば縄文土器など別時代の土器のように、多様な形態を持つ土器であれば、三次元データと二次元データで比較の結果に大きな違いが出てくる可能性も十分考えられる。また、あくまでも本稿で採用した解析手法では輪郭形状の変異を捉えることしかできず、より詳細な形態や特徴の比較についても、異なる結果が得られる可能性はあるだろう。それでも、本

稿のような解析の場合、三次元データと二次元データでそこまで大きく解析結果が変わらないというのは重要な点である。

また、地理的な関係だけでなく、並行関係などを踏まえた上で、こうした解析結果を考古学的にどう解釈すべきかについては、詳細な考察は今後、データを増やした上で再度行いたい。本稿で扱ったデータや遺跡・土器は非常に限定的なものであるため、現時点で何か確定的なことは言えないからである。とはいえ、ひとまず地域ごとの差異、また通常考えられているように、西から東（今回であれば今川遺跡から月縄手遺跡）という遠賀川式土器の伝播プロセスが、うまく結果に反映されているようにも見える。

三次元データの取得が容易になるにしたがい、従来のような二次元データ、特に実測図での報告などは、今後その存在意義がますます問われていくだろう。そもそも、現段階で実測図が何のために存在するのか、考古学内部でそこまで統一された見解があるわけでもないように思われる(e.g. 中尾2020)。三次元データと比較しつつ、二次元の実測図がどのような意義を持ちうるのかを検討し、今後も二次元データを報告し続けるべきなのか否かを考察しておくことも重要な作業になっていくと考えられる。

5 結語

本稿では、三次元データと二次元実測図データを用い、その輪郭形状を数理解析し、両者の結果を比較して違いが見られるか否かを検討した。両者の結果に違いがあるなら、本稿で用いたものと同じ手法で輪郭形状の数理解析を行うという目的のもとでは、(情報がより多く削減された二次元データより、情報量が豊富な)三次元データを使用するべきかもしれない。しかし、比較の結果はまったく異なるというわけではなく、実測者の恣意性が介入しかねない二次元実測図データの解析であっても、大まかには地域・時期差が捉えられていた。それゆえ、同じ目的のもとでは、二次元実測図データの解析も一定の意味を持つと考えられる。

もちろん、実測図が三次元データと比べてどれだけの有効性を持つのかは、目的や対象に依存する。それゆえ、今後もさまざまな目的・対象で検証を続けるべきであると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、以下の研究費の支援を受けた。文部科学省・科学研究費補助金新学術領域研究(研究領域提案型)「出ユーラシアの統合的人類史学：文明創出メカニズムの解明」C01班(JP19H05738)、2020年度南山大学パッへ研究奨励金 I-A-1、2021年度南山大学パッへ研究奨励金 I-A-2。

またデータの取得に際して、以下の埋蔵文化財センター、資料館、教育委員会のみなさまにお世話になった。併せて感謝したい。愛知県埋蔵文化財センター、大阪府文化財センター、北広島町大朝郷土資料室、京都府埋蔵文化財調査研究センター、福津市教育委員会(福津市カメラアステージ歴史資料館)、豊橋市教育委員会、長岡京市埋蔵文化財センター(五十音順)。

三次元データのチェックと実測図の処理に関しては、南山大学人類学研究所研究員の竹内愛氏にお手伝いいただいた。また、二名の査読者からは迅速かつ的確なコメントを頂いた。こちらも感謝したい。

註

1 実際はもう少し小さい回数でも結果には影響しないが、ある程度実際の土器形態に近い状態で解析を行った方が視覚的にわかりやすいだろうという点を踏まえ、ひとまず20という回数を選択している。

参考文献

愛知考古学談話会編

1985 『〈条痕文系土器〉文化をめぐる諸問題』資料編I、愛知考古学談話会

1985 『〈条痕文系土〉文化をめぐる諸問題』資料編II、愛知考古学談話会

生形貴男

2005 「現代形態測定学:化石、人骨、石器等のかたちの定量・比較ツール」『第四紀研究』44: 297-313

川宿田好見・中園 聡・黒木梨絵・平川ひろみ・泉さやか・新屋敷久美子・高原祐介・江神めぐみ・中村有希

2010 「実測図と三次元形状計測の比較—考古学的遺物の記録・表現法の検討—」『日本文化財科学会第27回大会研究発表要旨集』、pp. 206-207

川村悠太・石井友菜・呉心怡・辻角桃子・石井一樹

2019 「上宿古墳横穴式石室の三次元計測—SfM/MVSを用いた三次元データの取得—」『溯航』37: 117-127

金田明大

2014 「Structure from Motion による遺構計測の試行」『奈良文化財研究所紀要2014』44-45

金田明大・川口武彦・三井 猛・木本挙周

2010 『文化財のための三次元計測』東京: 岩田書院

小森政嗣・川村 智・横山卓未・森下佳昌

2012 「楕円フーリエ記述子を用いたボディソープボトル形状の分析と評価」『日本包装学会誌』21(6): 479-492

柴田将幹

2014 「初期遠賀川式土器の成立地域と伝播」『季刊考古学』127: 19-23

城倉正祥編

2017 『殿塚・姫塚古墳の研究 人物埴輪の三次元計測調査報告書』早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所調査研究報告第3冊、東京: 六一書房

城倉正祥・平原信崇・渡邊 玲編

2016 『シンポジウム予稿集 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』、東京: 早稲田大学総合人文科学研究センター

館内魁生

2021 「平安時代陸奥国における陶磁器模倣とその地域性—幾何学的形態測定学の手法を用いた土器形状の定量化—」『考古学研究』68(1): 75-96

- 田畑直彦
2018 「遠賀川式土器の特質と広域編年・暦年代」森岡秀人編『初期農耕活動と近畿の弥生社会』、pp. 19–38、東京：雄山閣
- 田村光平
2020 『文化進化の数理』東京：森北出版
- 田村光平・宍松唯・山口雄治・松本直子
2017 「遠賀川式土器の楕円フーリエ解析」、中尾 央・松木武彦・三中信宏編『文化進化の考古学』、pp. 35–62、東京：勁草書房
- 津村宏臣
2007 『『ダイメンション』でながめるカタチ学の未来』『日本の美術』496: 66–69
- 永井宏幸
2007 「条痕紋土器様式の研究」『愛知県埋蔵文化財センター研究紀要』8: 23–32
- 中尾 央
2020 「日本考古学の理論的・哲学的基礎：発掘報告書と型式(学)を中心に」『旧石器研究』16: 1–9
- 中園 聡
2011 「三次元レーザーキャナを用いた土器表面痕跡の3D マッチング」『鹿兒島国際大学情報処理センター研究年報』17: 1–12
- 中園 聡編
2017 『季刊考古学』140 (特集 3D 技術と考古学)、東京：雄山閣
- 野下浩司・金田明大・田村光平・中川朋美・中尾 央
準備中「田村遺跡・綾羅木郷遺跡・矢野遺跡出土遠賀川式土器の同一形式内変異に関する数理的考察」
- 平川ひろみ・川宿田好見・太郎良真妃・江神めぐみ・中村有希・中園 聡
2012 「鹿兒島県三島村における考古学的・博物館学的実践—三次元レーザーキャナを用いた物質文化の記録とその利用を中心に—」『日本情報考古学会講演論文集』9: 17–24
- 平川ひろみ・川宿田好見・太郎良真妃・中村有希・中園 聡
2012 「鹿兒島県三島村黒島の滑石製石鍋—文化財の記録と博物館活動の一環としての三次元化を兼ねて—」『国際文化学部論集』13(2): 167–177
- 藤尾慎一郎
1999 「福岡平野における弥生文化の成立過程—狩猟採集民と農耕民の集団関係」『国立歴史民俗博物館研究報告』77: 51–84
- 豆谷和之
2009 「西日本における遠賀川系土器の成立と西からの影響」設楽博己・藤尾慎一郎・松木武彦編『弥生時代の考古学 2：弥生文化誕生』123–139
- Bonhomme, V., Picq, S., Gaucherel, C. and Claude, J.
2014 Momocs: Outline Analysis Using R. *Journal of Statistical Software*, 56(13): 1–24.
- Brechbühler, C., Gerig, G., and Kübler, O.
1995 Parametrization of Closed Surfaces for 3-D Shape Description. *Computer Vision and Image Understanding*, 61: 154–170.
- Forte, M.
2014 3D Archaeology: New Perspectives and Challenges—The Example of Çatalhöyük. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology*, 2(1): 1–29.
- Howland, M. D., Kuester, F., and Levy, T. E.
2014 Structure from motion: twenty-first century field recording with 3D technology. *Near Eastern Archaeology*, 77(3): 187–191
- Kaneda, A., Noshita, K., Tamura, K., Nakagawa, T., and Nakao, H.
submitted A proposal of a new systematic method for SfM/MVS 3D measurement through comparisons of 3D data by SfM/MVS and handy laser scanners.
- Kaneda, A., Nawabi, Y. A., and Yamaguchi, H.
2015 Application of structure from motion in Japanese archaeology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W7: 23–239.*
- Kelemen, A., Szekely, G., and Gerig, G.
1999 Elastic model-based segmentation of 3-D neuroradiological data sets. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 18: 828–839.
- López, J. A. B., Jiménez G. A., Romero, M. S., García, E. A., Martín, S. F., Medina, A. L., and Guerrero, J. A. E.
2016 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10: 495–506
- Morales, J. I., Lorenzo, C., and Vergès, J. M.
2015 Measuring retouch intensity in lithic tools: A new proposal using 3D scan data. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 22: 543–558.
- R Core Team.
2020 R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RStudio Team.
2020 RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Roosevelt, C. H., Cobb, P., Moss, E., Olson, B.R., and Ünlüsoy, S.
2015 Excavation is digitization: advances in archaeological practice. *Journal of Field Archaeology*, 40 (3): 325–346
- Smith, N. G., Passone, L., Mohamed al-Farhan, S., and Levy, T. E.
2014 Drones in archaeology: integrated data capture, processing, and dissemination in the al-Ula Valley, Saudi Arabia. *Near Eastern Archaeology*, 77 (3): 176–181
- Vicory, J., Pascal, L., Hernandez, P., Fishbaugh, J., Prieto, J., Mostapha, M., Huang, C., Shah, H., Hong, J., Liu, Z., Michoud, L., Fillion-Robin, J. C., Gerig, G., Zhu, H., Pizer, S. M., Styner, M., and Paniagua, B.
2018 Slicersalt: Shape analysis toolbox. International Workshop on Shape in Medical Imaging 11167: 65–72.
- 実測図を使用した報告書
愛知県教育委員会 1990 『月繩手遺跡・貴生町遺跡』愛知県埋蔵文化センター調査報告書第 12 集
愛知県教育委員会 1994 『貴生町遺跡Ⅱ・Ⅲ 月繩手遺跡Ⅱ』愛知県埋蔵文化センター調査報告書 第 55 集
大阪府教育委員会 1996 『田井中遺跡発掘調査概要・V—八尾空港北濠改修工事に伴う事前発掘調査—』
大阪府教育委員会 2000 『田井中遺跡発掘調査概要 IX』
京都府埋蔵文化財調査研究センター 1997 『京都府遺跡調査報告書第 22 冊 雲宮遺跡』
豊橋市教育委員会 1993 『白石遺跡』豊橋市埋蔵文化財調査報告書第 15 集
津屋崎町教育委員会 1981 『今川遺跡：福岡県宗像郡津屋崎町今川所在遺跡の調査』津屋崎町文化財調査報告書第 4 集
長岡京市教育委員会 1985 『長岡京市文化財調査報告書第 14 冊』
横路遺跡調査団 1982 『横路遺跡』

三次元データの取得・整理などに使用した機器・ソフトウェア一覧

Blender: <https://www.blender.org/>
Creaform HandySCAN BLACK™ | Elite: <https://www.creaform3d.com/ja/ce-ding-soriyusiyon/potaburu3dsukiyannahandyscan-3d/ji-shu-shi-yang>
GOM inspect: <https://www.gom-inspect.com/jp/>
Meshlab: <https://www.meshlab.net/>
Meshmixer: <http://www.meshmixer.com/>

*本研究で用いた3次元データはいずれ理化学研究所のサーバーを用いて公開予定である。URLなどは未定であるが、公開に際しては<http://out-of-eurasia.jp>にて告知するのでそちらを参照されたい。

(2021年9月18日受付、2021年12月16日採録)

A Comparative Analysis of Two- and Three-dimensional Data Using Ongagawa Pottery as an Example

Koji NOSHITA, Tomomi NAKAGAWA, Akihiro KANEDA, Kohei TAMURA, and Hisashi NAKAO

3-dimensional data have recently attracted many archaeologists' attention because of their various kinds of merits. The present study compared 3-dimensional data and traditional 2-dimensional data, especially measured drawings, and examined their merits and demerits. We obtained 3-dimensional data of Ongagawa pottery, which has relatively uniform and simple forms used in the early Yayoi period, with a laser scanner (Creaform HandySCAN BLACK™ | Elite) and mathematically analyzed the 3-dimensional and 2-dimensional data of Ongagawa pottery by spherical harmonics and Elliptic Fourier Analysis. The results suggest that we could capture more detailed geographical and durational difference in pottery by spherical harmonics though both results by two different methods are not significantly different. Given the costs and efforts of 3-dimensional data acquisition and analysis, we could conclude that 2-dimensional data are still useful and important to some degree.

(Manuscript received Sep. 18, 2021; accepted Dec. 16, 2021.)