

古墳時代の甲冑の平面展開による比較

世良 京太・Garcia Ricardez Gustavo Alfonso・高松 淳・小笠原 司

(奈良先端科学技術大学院大学) 吉村 和昭 (橿原考古学研究所)

小林 謙一 (奈良文化財研究所) 奥山 誠義 (橿原考古学研究所)

文献史料に乏しい古墳時代の実態を解明する上で、甲冑といった副葬品の調査は重要である。これまでの研究では甲冑製作において板金による部品製作のための平面的な設計図、いわば「型紙」の使用の可能性が示唆されている。その比較の際に各甲冑の3次元データをほぼ同じ角度にあわせた写真上で比較する手法をとっており、甲冑の複雑な3次元の形状を考慮しきれないという問題があった。

本研究では甲冑製作における「型紙」の比較をより正確におこなうため、甲冑の形状を決める重要な部品である後胴押付板の3次元データを平面に展開し比較する方法を提案する。具体的には3次元レーザー計測で測定された甲冑の部品の3次元点群の任意の点間の測地線距離を求め、多次元尺度法を用いて2次元データに圧縮し比較を行う。その結果、よく似た形状の甲冑の部品が存在し、写真上で比較する手法と同様な結果が得られることが確認された。

Plane-expansion and comparison about armors in the Kofun period

Keita Sera / Gustavo Alfonso Garcia Ricardez / Jun Takamatsu / Tsukasa Ogasawara

(Nara Institute of Science and Technology) Kazuaki Yoshimura (Archeological Institute of Kashihara)

Kenichi Kobayashi (Nara National Research Institute for Cultural Properties)

Masayoshi Okumura (Archeological Institute of Kashihara)

Investigation about burial goods such as armors is important because documents to reveal the state of the Kofun period is very few. Previous studies have shown the possibility of using planar dress pattern *Katakami* in armor production. In this study, they compared the 3-dimensional data of each armor in 2D view from the same angle and the complex 3-dimensional shape of the armor is not well considered in the comparison.

In this research, we propose a method to compare 3-dimensional data of the part “Ushirodou Oshitsuke-Ita”, which affect to determine the whole shape of the armor, by extending them onto 2d plane. Specifically, we calculate all the geodesic distances between arbitrary points on the 3-dimensional data measured by 3-dimensional laser measurement, and expand these parts to the plane by using the geodesic distances and the multidimensional scaling. As a result, it is confirmed that there are armors of a similar shape and the same result as the previous method.

1. はじめに

文献史料に乏しい古墳時代の実態を解明する上で、銅鏡、甲冑といった副葬品の調査は重要である。甲冑は、同時代の鉄製品の中でとりわけ複雑で大きな立体形状をもち、その製作において当時の最新技術が用いられること、ヤマト王権による畿内での一元的な生産と各地への配布が想定されることなどから様々な角度から論じられてきた[1][2][3]。

甲冑製作において、板金による部品製作のための平面的な設計図、いわば「型紙」（素材は紙ではない可能性が高い）が使用されたとの想定から、胴甲である短甲について、全体の形状を決定づける重要な部分である後胴押付板の3次元計測データを比較検討し、形状・法量がほぼ一致する組合せを複数例見いだした。このことから、

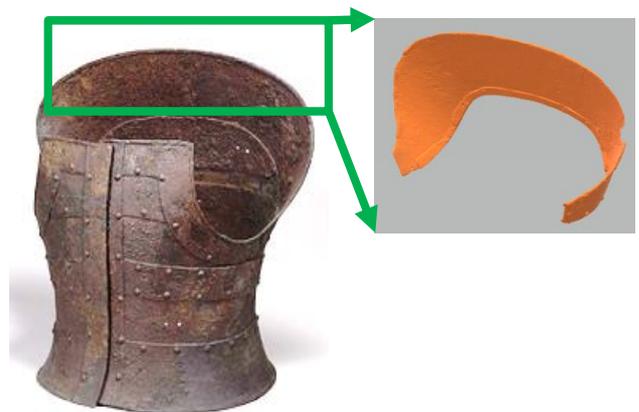


図1 甲冑（横刃板鋳留短甲）と後胴押付板
Figure 1 The Tanko type cuirass and Ushirodou-oshitsukeita

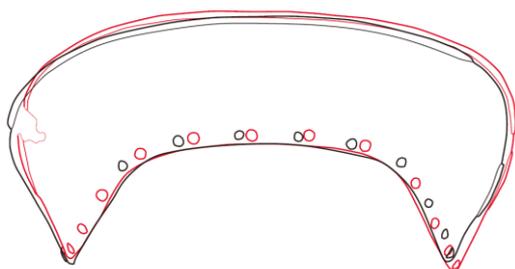


図2 線画をもとにした従来の比較方法
立石寺蔵 横矧板鋳留短甲 (赤)
馬場代2号墳 横矧板鋳留短甲 (黒)

Figure 2 Previous comparison method by line drawing

Tanko type cuirass in Tateisi temple (red)
Tanko type cuirass at Babadai No.2 tomb (black)

出典：吉村和昭. 古墳時代甲冑製作における「型紙」の新例発見とその意義 -科学研究費による研究成果報告-(2017)の図3の一部.

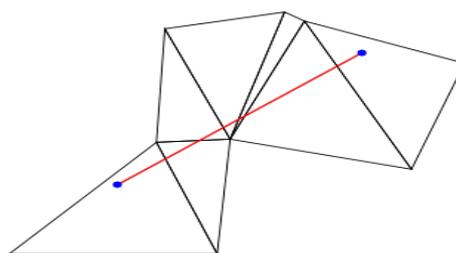
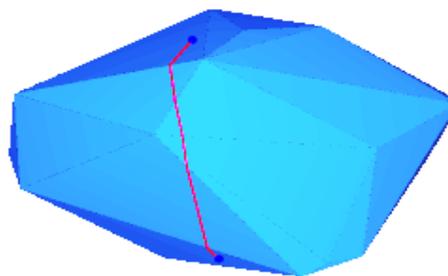


図3 測地線距離の例

Figure 3 Geodesic distance example

出典：“CGAL 4.13 - Triangulated Surface Mesh Shortest Paths”

https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_shortest_path/index.html, (参照 2018-10-26).

甲冑製作における「型紙」使用の蓋然性をあきらかにしている[4][5]. この「型紙」という分析視点は、甲冑製作、ひいては生産組織の実態解明につながる重要なものである.

これまでの研究では、各甲冑の3次元データをほぼ同じ角度にあわせた画像上で、あるいは画像から起こした線画で比較する手法(図2)をとってきた. しかし、この手法では複雑で、個体間で微妙な差異もある甲冑の3次元形状を比較しきれないという問題があり、比較条件の統一が急務であった.

本研究では甲冑製作における「型紙」の比較をより正確におこなうため、甲冑の形状を決める重要な部品である後胴押付板の3次元データを平面に展開し比較する方法を提案する. 具体的には3次元レーザー計測で測定された甲冑の3次元点群の任意の点間の測地線距離を求め、多次元尺度法[6]を用いて2次元データに圧縮する. この方法で展開することにより、3次元データの点群の距離を等しくした状態で、平面に展開することが可能である. これとは別に点群同士が作る面を等しくした状態で平面に展開する手法も存在するが、その性質から展開図に細かな隙間が多数存在し正確に展開できない可能性があるため、本研究では点の距離を等しくする手法を用いた.

2. 提案する展開手法

2.1 測地線距離

測地線距離とは図3に示すように3次元空間で物体上の2点が与えられたときに、物体の表面上を通る2点間の最短距離である[7]. 3次元点群の任意の点間の測地線距離を計算するため、3次

元計測データの点と辺を、ノードとエッジとして捉えグラフの最短経路問題として考える.

この問題を解くにあたってダイクストラ法が一般的に使われているが、各任意のノード間の最短距離を求めるための計算時間はノードの数を N 個としたとき、 $O(N^3 \log N)$ である. 甲冑の3次元点数は約50万点であり厳密な処理を行う場合、膨大な時間が必要である.

そこで本研究ではダイクストラ法を、探索点との遠さに関するフィルタリングを用いて不要な探索を減らし、探索点と途中の点の距離から優先度を定める方法で改良した手法[8]を用いる. その結果各任意のノード間の最短距離を求めるための計算時間が $O(N^3)$ と短縮される.

2.2 多次元尺度法

多次元尺度法は個体間の親近性データを類似したものを近く、そうでないものを遠くに n 次元空間へ配置しデータの構造を考察する方法である. 多次元尺度法は、距離データを扱う計量多次元尺度法と、順序尺度のデータの類似度あるいは距離に変換可能な親近性データを扱う非計量多次元尺度法に大別されるが、本研究では距離データを低次元に配置する計量多次元尺度法を用いる.

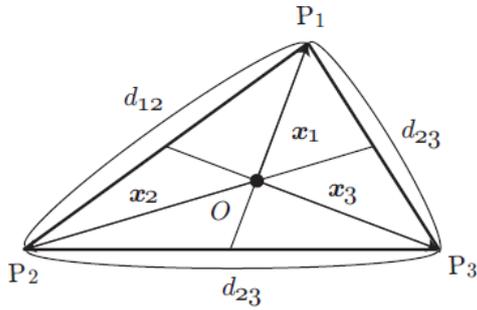


図4 原点Oからの3点の配置
Figure 4 3 points arrangement from the origin

多次元尺度法ではN個の点において任意の2点間の距離 d_{ij} のみが入力として与えられている。ただし (i, j) は1からNまでの任意の自然数とする。このとき距離に基づき r 次元上にある配置されたN個の点 x_i の位置は、以下の行列で表現されているものとする。

$$X = (x_1, \dots, x_N)^T = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{Nr} \end{pmatrix}$$

このとき d_{ij} は以下の式を満たす。

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^r (x_{ik} - x_{jk})^2 = x_i \cdot x_i + x_j \cdot x_j - 2x_i \cdot x_j$$

距離の行列を、

$$D^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & d_{12}^2 & \dots & d_{1N}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & \dots & d_{2N}^2 \\ d_{31}^2 & d_{32}^2 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1}^2 & d_{N2}^2 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

と定義する。このとき、以下の式が成り立つ

$$Q = I - \frac{1 \cdot 1^T}{N} \quad -\frac{1}{2}(QD^{(2)}Q) = QXX^TQ$$

Qのような中心化行列を用いることで、図4のように原点から平行移動した成分として考えることが出来る。

点間の距離の行列

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	0	1	2	1	1.41	2.24	2	2.24	2.83
b	1	0	1	1.41	1	1.41	2.24	2	2.24
c	2	1	0	2.24	1.41	1	2.83	2.24	2
d	1	1.41	2.24	0	1	2	1	1.41	2.24
e	1.41	1	1.41	1	0	1	1.41	1	1.41
f	2.24	1.41	1	2	1	0	2.24	1.41	1
g	2	2.24	2.83	1	1.41	2.24	0	1	2
h	2.24	2	2.24	1.41	1	1.41	1	0	1
i	2.83	2.24	2	2.24	1.41	1	2	1	0

二次元表示

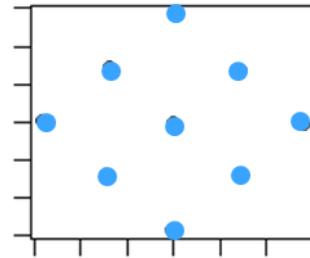


図5 多次元尺度法の例
Figure 5 Multidimensional scaling example

さらに左辺の対角化を行い、0以上の固有値の数を m とすると、以下の式のように展開できる。

$$-\frac{1}{2}(QD^{(2)}Q) = P \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \sqrt{\lambda_m} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \sqrt{\lambda_m} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} P$$

とおける。以上より中心が原点にくるように移動した座標の1つとして、行列Xが求まる。

$$X = P \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \sqrt{\lambda_m} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

距離行列を満たすためには m 次元空間に配置する必要がある。距離の関係をできるだけ保存しながらより低次元1次元空間に埋め込むためには、下位 $(m-1)$ 個の固有値を0であるとして同様の計算をおこなうことで得られる。

図5の例では、9個の点それぞれの距離を表した行列から、この手法を用いて2次元平面上に配置した結果を示す。

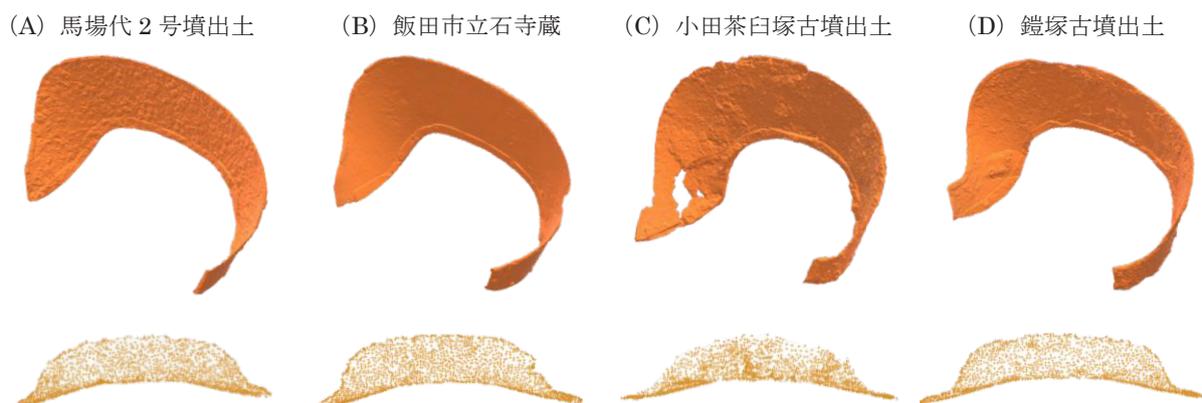


図6 短甲押付板の3次元図と展開図
Figure 6 3 dimensional pictures and developments of Oshitsuke-Ita

3. 実験

3.1 後胴押付板全体の平面展開

対象の短甲には、吉村ら[5]が3次元形状による比較で一致していると判断した (A) 馬場代2号墳出土と (B) 飯田市立石寺蔵, および A, B とは一致しないと判断した (C) 小田茶臼塚古墳出土, (D) 鎧塚古墳出土短甲を用いた。

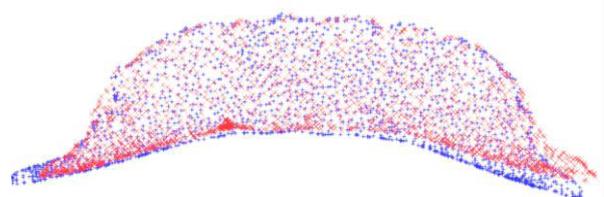
平面展開の処理時間短縮のため, 前処理として各押付板の3次元点数を50万点から2500点程度に削減した. 図6に4点の押付板を平面展開した結果を示す。

ここでCの押付板の展開図は, 他の展開図よりも間延びした形になっている. これは押付板自体に大きな欠損がありその付近の測地線を測定するとき, 欠損を迂回したことが原因だと考えられる。

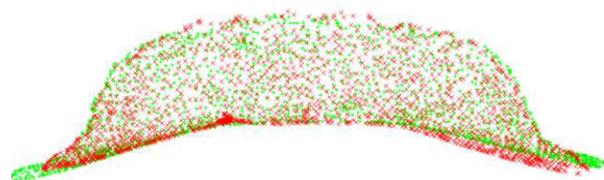
次にA, B, Dの押付板を比較した結果を図7に示す. 後胴押付板の中央部分の幅と, 左右の末端の形状についてわずかに差異が見られる. しかし, 左右の末端の形状が不自然に細長くなっており, はっきりとした違いは出ていない. これは本来複雑な曲面であるものを平面に展開するため, 押付板の末端が大きく歪んでいるためであると考えられる。

3.2 分割した後胴押付板の平面展開

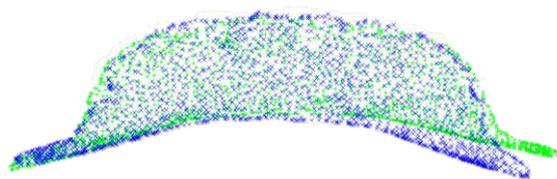
3.1より全体の距離の構造を保ったまま埋め込んだ結果先端部に大きな歪みが生じてしまった. そこで部分的な構造のみを保ったまま埋め込みをおこなうため, 押付板の3次元点群を左右それぞれの末端から等しくなるように分ける方法で半分に分割し, それぞれに先ほどと同じ手法を適用した。



(a) A: 馬場代2号墳出土 (赤) と B: 飯田市立石寺蔵 (青)



(b) A: 馬場代2号墳出土 (赤) と D: 鎧塚古墳出土 (緑)



(c) B: 飯田市立石寺蔵 (青) と D: 鎧塚古墳出土 (緑)

図7 押付板の展開図の比較

Figure 7 Comparison of Oshitsuke-Ita developments

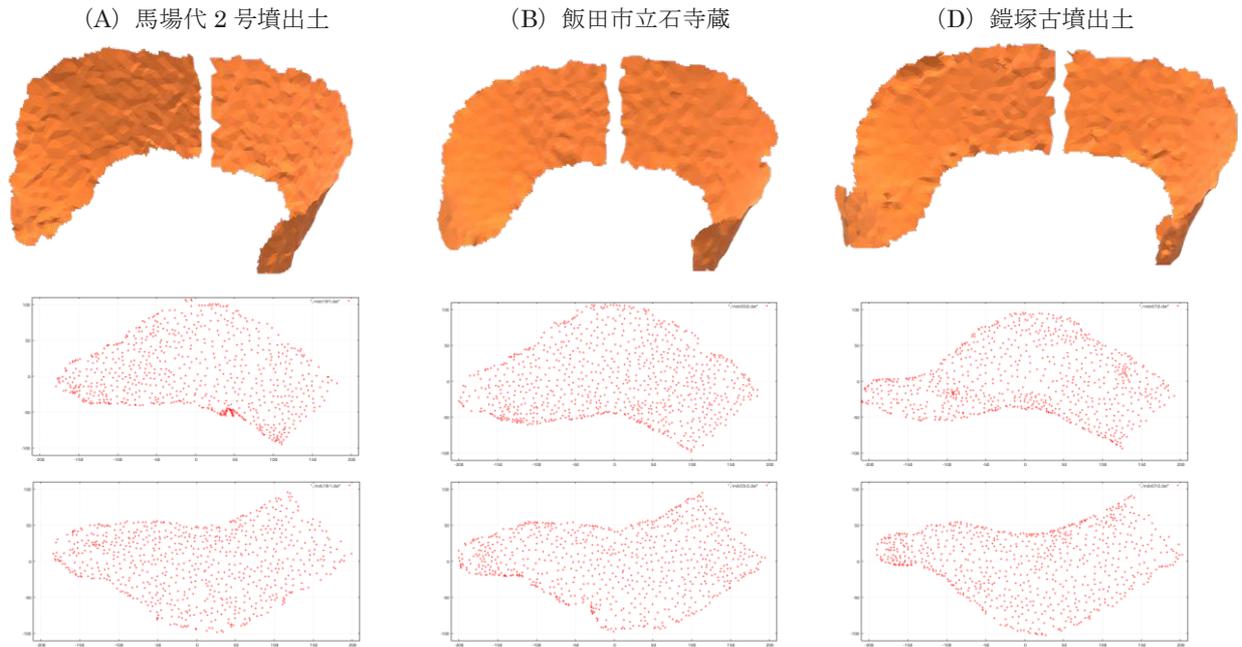


図8 分割された押付板の3次元図と展開図
 (二段目) 押付板の右肩側 (向かって左) (三段目) 押付板の左肩側 (向かって右)
 Figure 8 3 dimensional pictures and developments of divided Oshitsuke-Ita
 (Second stage) Right shoulder side of armors (Third stage) Left shoulder side of armors

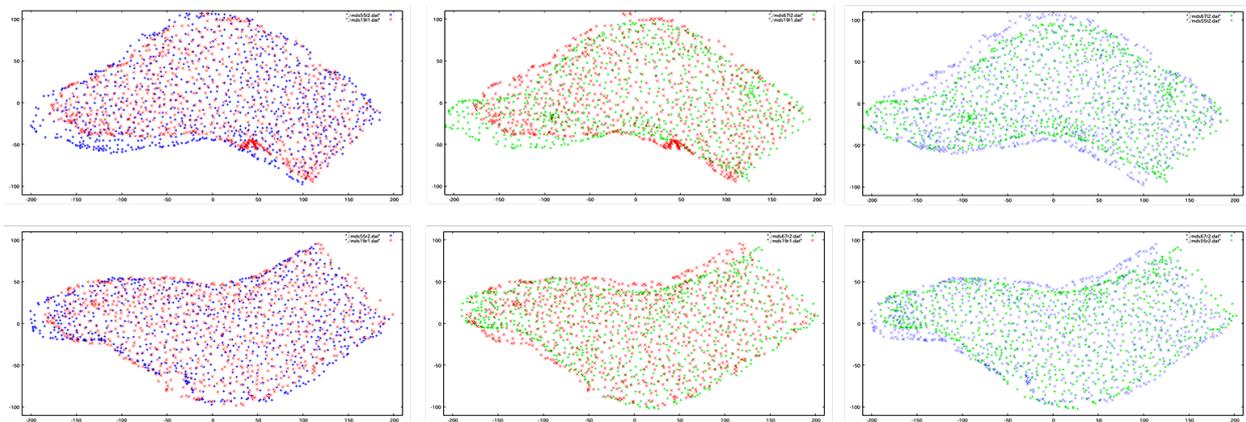


図9 分割された押付板の展開図の比較 (一段目) 押付板の右肩側 (二段目) 押付板の左肩側
 (左) A: 馬場代2号墳出土 (赤) と B: 飯田市立石寺蔵 (青)
 (中) A: 馬場代2号墳出土 (赤) と D: 鎧塚古墳出土 (緑)
 (右) B: 飯田市立石寺蔵 (青) と D: 鎧塚古墳出土 (緑)
 Figure 9 Comparison of divided Oshitsuke-Ita developments
 (First stage) Right shoulder side of Oshitsuke-Ita (Second stage) Left shoulder side of Oshitsuke-Ita

図8にA, B, Dの押付板のデータを分割し平面展開した結果を示す。図6の結果と比べ左右の末端の形状の歪みが大きく改善されていることが確認された。これは半分に分けていない押付

板に比べ、分割された押付板は形状の複雑さが少なくなっているからである。

次にA, B, Dの押付板の比較した結果を図9に示す。多次元尺度法は剛体変換に対するあいまい性が残っているため、任意に剛体変換を加えて

も問題がないため、それぞれの展開図に対して比較しやすいように変換を加えている。後胴押付板の中央部分の幅と、左右の末端の形状について考えると A と B はよく似た形であることがわかる。しかし B と D は中央部の幅が、A と D は中央部の幅と末端の形状に大きな差異が見られる。これにより、吉村らの先行研究[5]と同じ結果が確認できた。

4. おわりに

本研究では古墳時代の甲冑の比較方法における問題の解決を行うため、甲冑製作に平面的な設計図「型紙」が使用されたとの想定を糸口に3次元点群データを測地線距離と多次元尺度法を用い、2次元平面上に展開し視覚的に比較する手法を提案した。実際にこの手法を用いて甲冑の各押付板を展開し、比較を行った。

小田茶臼塚古墳出土の短甲では、大きな欠損があるため正確な測地線を測ることができず、実際の平面展開よりも間延びした形になっていることが確認された。さらに各展開図の左右の末端が、実物に比べ棒状に大きく圧縮された形となっていることも確認された。

そこで、後胴押付板の半分に分割する手法を用い末端の形状の歪みを抑えることが出来た。さらにこの方法を適用した平面展開図を用いて複数の押付板の形状比較を行った。その結果先行研究で示されていた、馬場代2号墳出土と飯田市立石寺蔵の短甲押付板が他の短甲の押付板に比べ類似度が高いことが確認できた。

今後は、土圧による変形や欠損といったノイズに対しても厳密に平面展開できる手法の構築を検討する。加えて、より多くの甲冑の押付板に対してこの手法を適用し得られた展開図を、押付板の3次元データに当てはめ、この手法の精度等さらに検証する。

参考文献

- [1] 小林謙一. 東アジアにおける武器・武具の比較研究, 平成 16 年度 ~ 平成 19 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 研究成果報告, 2008.
- [2] 高橋工. 東アジアにおける甲冑の系統と日本, 日本考古学, 1995, Vol. 2.2 pp. 139-160.
- [3] 阪口英毅. 古墳時代甲冑成立・展開期の基礎的研究, 2016.
- [4] 吉村和昭. 古墳時代中期甲冑製作における「型紙」存在の確認: 3次元計測技術を用いた分析成果, 考古学論叢: 橿原考古学研究所紀要第37冊 = Studies in archaeology: Proceedings of the Kashihara Archaeological Institute, 2014, Vol. 37 pp. 1-24.
- [5] 吉村和昭, 小林謙一, 奥山誠義ほか. 古墳時代中期における甲冑生産組織の研究 - 「型紙」と製作工程の分析を中心として -, 平成 26 年度 ~ 29 年度科学研究費助成事業基盤研究 (B), 研究成果報告書, 2018.
- [6] Shepard Roger. Multidimensional scaling, tree-fitting, and clustering, Science Vol. 210.4468, 1980, pp. 390-398.
- [7] Surazhsky Vitaly, Surazhsky Tatiana, Danil Kirsanov, Steven Gortler & Hugues Hoppe. Fast exact and approximate geodesics on meshes, ACM transactions on graphics, 2005 July, Vol. 24, No. 3, pp. 553-560.
- [8] Shi-Qing Xin and Guo-Jin Wang. Improving Chen and Han's algorithm on the discrete geodesic problem, ACM Transactions on Graphics, 2009.