

SfM/MVS による内部構造の 三次元計測における基礎研究

● 荒木徳人

本研究ではファイバースコープと SfM/MVS 技術を併用した遺物内部の記録手法の確立に向けた基礎研究として、形状に着目し、技術的課題を明らかにするため、器類を対象に検証実験を行った。本研究の結果から、特定の条件を満たす場合には、ファイバースコープと SfM/MVS 技術を併用することで遺物内部の三次元形状の復元が有効であることが示された。

1. はじめに

近年、埋蔵文化財の調査および整理において、デジタル技術の活用が急速に進展している。特に、三次元計測は遺構および遺物を迅速かつ高精度に記録できる方法として、定着しつつある。

一方、遺物の内部構造に関するデジタル技術を活用した記録方法は、未だ確立されていない。例えば、口縁部が狭い壺形の遺物を手実測する際は、物理的な可動域の制限により計測器具を入れる空間が確保できず、内径および底面を正確に計測することが困難である。これは、レーザーの反射を利用して点群データを取得する三次元計測においても同様に、内部までレーザー光が到達しないため、内部構造のデータ化は非常に困難である。これらのように、遺物の内部構造に関する記録方法は未だ確立されておらず、解決すべき課題の一つとなっている。

以上の課題を解決するために、期待されているのがファイバースコープと SfM/MVS による三次元計測である。SfM は異なる位置・角度から撮影された複数の画像を解析し、カメラの撮影位置・姿勢の推定と、対象物の点群を復元する。MVS は得られたカメラパラメータを基に、密度を高めた点群を生成し、より詳細な形状や質感を再現する。すでに、これらの技術は埋蔵文化財の調査および整理で活用されている。

内部構造が観察できない遺物は、ファイバースコープで遺物の内外を撮影し、SfM/MVS によって三次元データを生成することにより、理

論上、内部の計測は可能となる。

実際に、本手法により石塔内部に安置されている「宝塔型舍利容器」を計測した事例（荒木 2024）が報告されており、閉鎖空間での記録が可能であることは、すでに実証されている。

しかし、こうした内部構造の計測には、光量不足、テクスチャーの欠如、複雑な死角、位置推定の困難、スケールの不確定性等、特有の課題があり、撮影条件の最適化や、得られたデータの精度に関する基準については、十分な議論がなされていない。

本手法の有効性が実証できれば、遺物だけでなく、古墳の石室や石棺などの密閉された構造物の内部を、非破壊で調査することが可能となる。これにより、従来の考古学調査において課題であった「遺跡の保存」と「内部情報の取得」が実現し、文化財を傷つけることなく、当時の埋葬状況や副葬品の配置を高い精度で三次元データ化することもできる。

したがって、本研究ではファイバースコープと SfM/MVS 技術を併用した遺物内部の記録手法の確立に向けた基礎研究として、形状に着目し、技術的課題を明らかにするため、器類を対象に検証実験を行った。

2. 研究方法

本研究では、形状および質感に起因する課題を抽出するための検証実験を行う。そのため、まずは使用するファイバースコープの精度を検証する「予備実験」と、遺物の形状に応じた精度を検証する「本実験」の二段階の手順で研究

を進めた。各実験の詳細な方法については、各章で述べる。

3. ファイバースコープの精度検証

(1) 方法

本実験は、ファイバースコープで撮影した画像を SfM/MVS によって生成された三次元データの精度を検証するため、デジタルカメラで撮影したものと比較した。

今回、測定対象となる資料は、愛知県岡崎市に所在する滝町古窯から出土した窯道具の「エブタ」である。本資料は、表面に刻書が施されており、裏面には線刻による紋様が刻まれている。資料の選定理由は、線刻の深さや微細な凹凸に対して、検出・再現性を検証する上で適している特徴を有しているためである（図1）。

三次元データの取得方法は、各撮影機材（デジタルカメラ：RICOH WG-7 / リコーイメージング株式会社、先端可動式ファイバースコープ：EISTAKA0）を用いて、対象資料を多方向から80%以上オーバーラップするように撮影を行い、「Agisoft Metashape」で三次元データの生成を行った。生成された三次元データは、「CloudCompare」でスケール調整を行い、各方法で取得したデータから線刻の形状の差異について比較を行った（図2,3）。

（2）結果および考察

生成した三次元データを図4に示す。まず、全体的にファイバースコープで撮影したデータは、ノイズが多く側面のデータが取得できなかった。これは、今回使用したファイバースコープの解像度や光量などが不足していたことが原因であると考えられる。

(2) 結果および考察

しかし、表面の刻書に関しては、デジタルカメラおよびファイバースコープの両機材間において、決定的な優劣は見られず、文字の形状を十分に認識できることが明らかとなった。

一方、資料裏面に施された線刻の検出においては、両機材で明確な差が認められた。デジタ

一方、資料裏面に施された線刻の検出においては、両機材で明確な差が認められた。デジタ

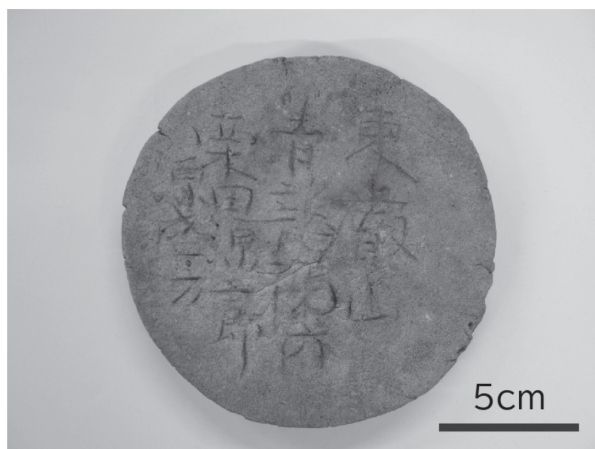


図1 滝町古窯から出土したエブタ

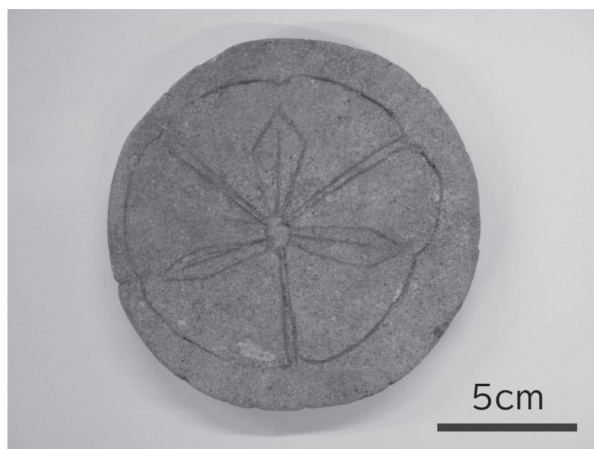


図2 実験に使用したファイバースコープ

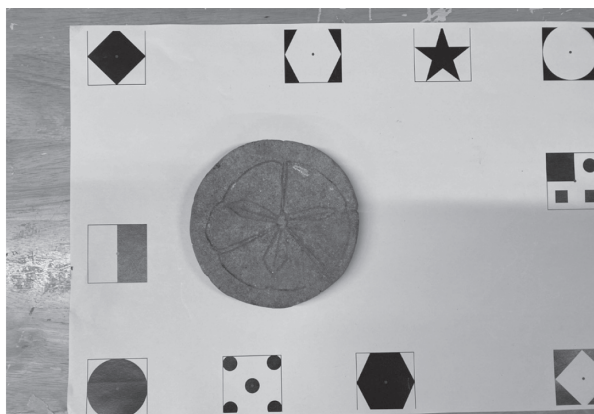


図3 撮影の様子

ルカメラで撮影したものは、紋様の細部まで良好に三次元データを取得できたのに対し、ファイバースコープで撮影したものでは、紋様が明確に再現されておらず、良好な三次元データを取得することができなかった。

表と裏の結果に違いが生じた理由として、線刻の深さの違いと撮影機器の性能が関係していると考えられる。裏面は表面より線刻がやや浅い所も多くファイバースコープの解像度が低いことから微細な凹凸を精細に捉えることが困難

であったと考えられる。

しかし、表面の線刻に関しては十分なデータを取得できたことから、一定の条件を満たせばデジタルカメラに近い質で三次元データを生成することが可能であることが明らかとなった。

以上の結果から、遺物の外面はデジタルカメラを、器の内面はファイバースコープを用いるという、部位に応じた機材の使い分けが必要であると考えられる。

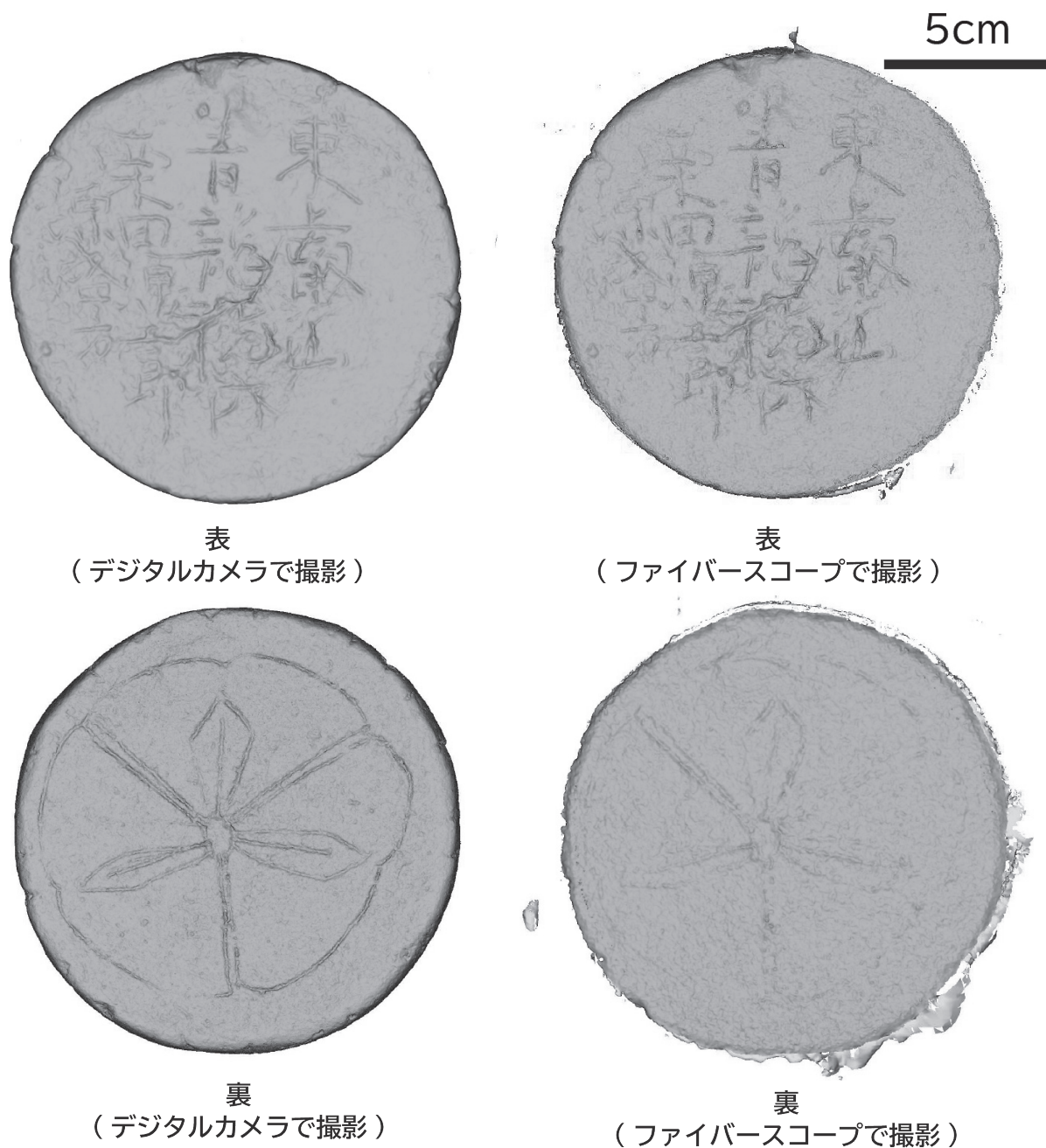


図 4 各機材を用いて生成したエブタの三次元データ

4. 遺物の形状に応じた精度の検証

(1) 方法

考古遺物の出土品において器類が占める割合は高く、その形状也多岐にわたる。そのため、形状の異なる個体を比較・検証することは、計測技術における課題の抽出において極めて重要である。本実験は、器形の違いが三次元データ取得の精度に及ぼす影響を検証することを目的とし、形状の異なる2種類の出土遺物を対象に計測を実施した。

対象資料には、愛知県瀬戸市・桑下城跡出土の「扁球形合子」と、同県岡崎市・小針遺跡出土の「長頸壺」を選定した。

各資料の選定理由は以下の通りである。

扁球形合子は、器高が低く扁平な形状であり、口縁部は比較的広いものの内側へ強く内湾している。そのため、肩部内面がレーザー計測における物理的な死角となる(図5)。

長頸壺は、頸部が極めて細長く伸長している。そのため、レーザー計測手法では深部へのアプローチおよび正確なデータ取得が理論上不可能である(図6)。

以上2点の資料を対象に、外側はデジタルカメラ、内側はファイバースコープで撮影し、三次元データの生成を試みた。

(2) 結果および考察

今回、底部内面の計測を行っていないため、底部の厚さは再現できていない。

まずは、扁球形合子を計測した結果について

述べる(図7)。合子は、肩部内面における三次元データの欠損が生じ、完全な形状復元には至らなかった。この要因として、内湾する肩部内面を画角に収めるためには、ファイバースコープの先端部を器内で上方へ「U字状」に湾曲させる必要がある。しかし、本資料は器高が約3cmと極めて低く、内部容積の制限からファイバースコープの可動域を確保することが困難であった(図8)。今回の欠損に対する今後の改善策としては、先端と側面の双方にレンズを搭載したファイバースコープを使用することで、このような内部容積の小さい遺物でも詳細な撮影が可能になると考えられる(図9)。

次に、長頸壺を計測した結果について述べる(図10)。長頸壺は、内部構造データの取得に成功した。得られたデータから、胴部と頸部を別々に作り、後に接合した痕跡も確認できた(図11)。

長頸壺の計測にあたり、幾度か失敗を重ねたが撮影方法を改善することで三次元データを取得することができた。当初、ファイバースコープを壺の中心に据え撮影を行っていたが、これでは特徴点を捉えることが難しく、位置推定が困難であった。そのため、できる限り壁側までファイバースコープを寄せて、広い画角で撮影することによって、位置推定ができ内部の三次元データを取得することができた(図12)。

以上の結果から、一定以上の内部容積を有する個体においては、釉薬や器面の凹凸といった特徴点を常時画角に収めながら撮影できるため、本計測手法の有効性が示唆された。

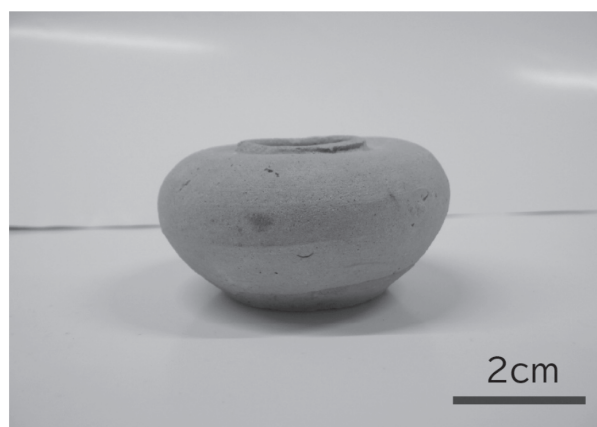
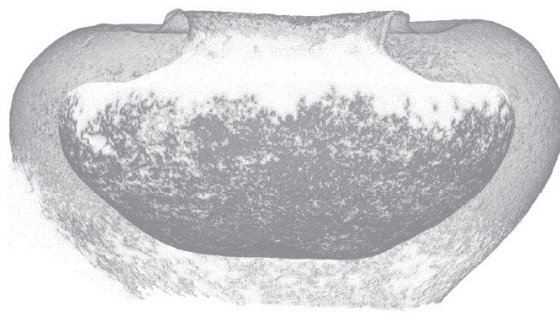
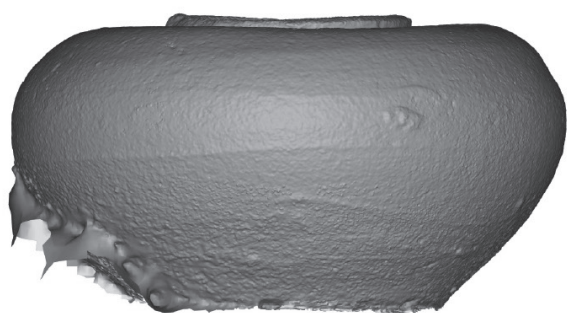


図5 扁球形合子



図6 長頸壺



3cm

図7 扁球形合子の三次元データ（左）ソリッドモデル（右）ポイントクラウド断面



図8 ファイバースコープの可動域の限界

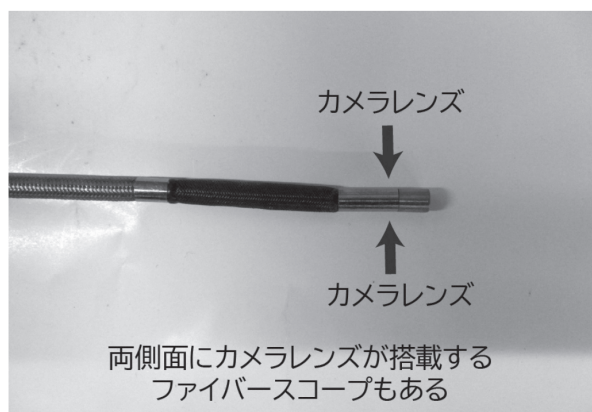


図9 ファイバースコープのレンズ位置



5cm

図10 長頸壺の三次元データ（左）ソリッドモデル（右）ソリッドモデル断面

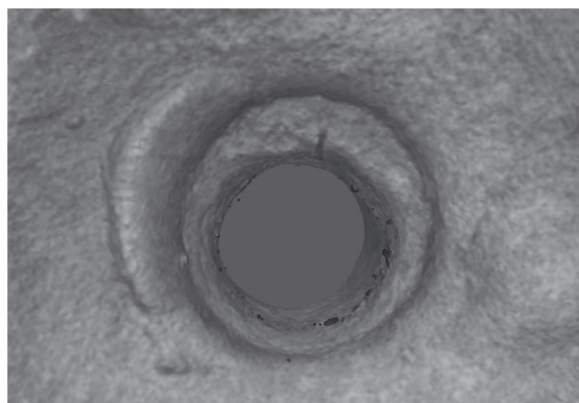
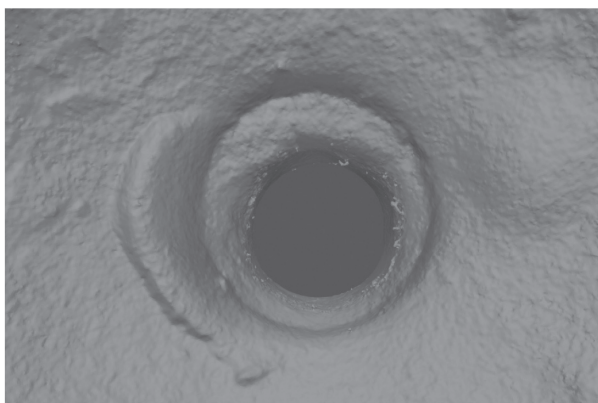


図 11 頸部を後に接合した痕跡（左）ソリッドモデル（右）ソリッドモデルカラー

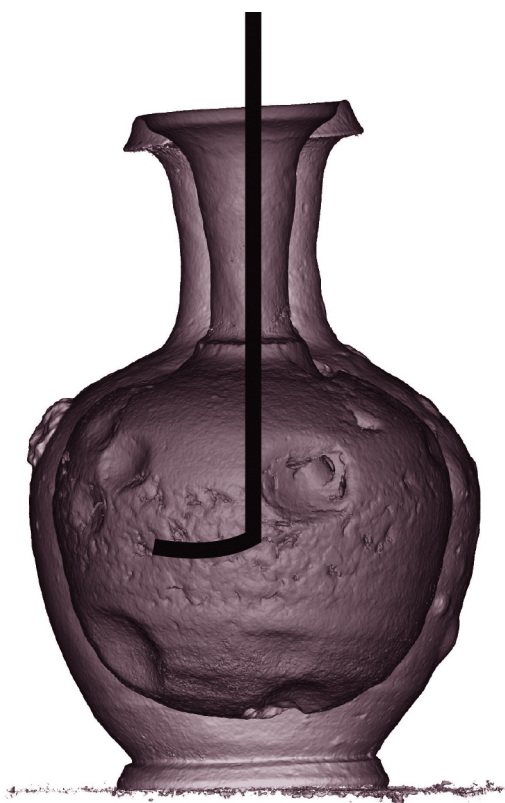


図 12 ファイバースコープの撮影位置（左）失敗例（右）成功例

5. さいごに

本研究の結果から、特定の条件を満たす場合には、ファイバースコープと SfM/MVS 技術を併用することで遺物内部の三次元形状の復元が有効であることが示された。

一方で、現段階では三次元モデルの厚みの定

量的な精度評価には至っていない。また、SfM/MVS の特性上、石膏などの充填材は特徴点の抽出が難しく、モデル生成が困難な場合がある。

今後は、破壊可能なサンプルを用いた厚さの精度検証に加え、対象の形状や質感による影響をより精査し、実用化に向けた基礎データを蓄積していく必要がある。

【参考文献】

荒木徳人 2024「華嚴宗新薬師寺に所在する実忠和尚御歯塔の造立年代について」『日本文化財科学会 41 回大会』