

VI 分析と考察

1. 上桐の神社裏遺跡第3次調査出土管玉の形状解析

森 貴教 (新潟大学研究推進機構超域学術院)

月山 陽介 (新潟大学工学部)

はじめに

上桐の神社裏遺跡第3次調査で鉄石英製管玉が1点出土した(遺物番号21。以下、本資料)。本稿では、本資料を対象として行ったマイクロフォーカスX線CT装置によるコンピュータ断層撮影、走査電子顕微鏡(SEM)による孔端部の観察、表面粗さ測定の結果を報告する。

1. X線CT調査

(1) 分析方法

X線CT調査は、新潟県工業技術総合研究所下越技術支援センター設置のNikon製計測用CTシステムMCT225により実施した(写真1)。

本分析は、試料にX線を照射し、回転走査して得られた透過X線強度の二次元マッピングをもとにコンピュータ処理により画像再構成することで、試料の内部構造や内部組織に関する三次元的な画像情報を得るものである。CTとはComputed Tomographyの略称で、コンピュータ断層撮影ともよばれる。日本でも昭和50(1975)年に医療用CTが導入され、現在は全国の主要病院に普及している。さらに医療用よりも透過能力の高い高出力のX線を利用した産業用X線CTも自動車産業、航空機産業の検査装置として導入され、近年は産業・理工学の様々な分野の材料解析・研究に応用されている(戸田2019)。調査対象に対して非破壊かつ非接触であり、貴重な文化財の内部構造を安全に調査できるとして文化財分野においても早くから着目されてきた(今津ほか2012、赤田2017)。

測定は、試料を装置内のX線源とフラットパネル型のX線検出器の間の試料回転ステージに置いて行う。X線源から放射状に照射され、試料を透過したX線は検出器上で光電変換され二次元画像となる。この二次元画像は、試料の材質(密度・質量)や形状に応じて、コントラスト(明暗)の差で表示される。試料を回転ステージ上で360°回転させながら二次元のX線画像を連続して撮影し、この撮影画像をCTデータ解析ソフトウェア(Volume Graphics製VGStudio)で処理して三次元CTデータを構築する。画像の画素値ヒストグラムの閾値を用いたセグメンテーションやシェーピング補正、座標軸の設定など、基本的な画像処理は新潟県工業技術総合研究所下越技術支援センターにて中部昇氏にご教示を頂き実施した。

なお、本分析で使用した装置のマイクロフォーカスX線源(マイクロフォーカス管)は、非常に小さな実効焦点をもち、より高い空間分解能での測定が可能とされる。メーカーによれば測定精度は $9 + L/50$ (μm) (L : 測定長 (mm)) であり、本資料に対する測定精度は $10 \mu\text{m}$ 以下である。



写真1 マイクロフォーカスX線CT装置

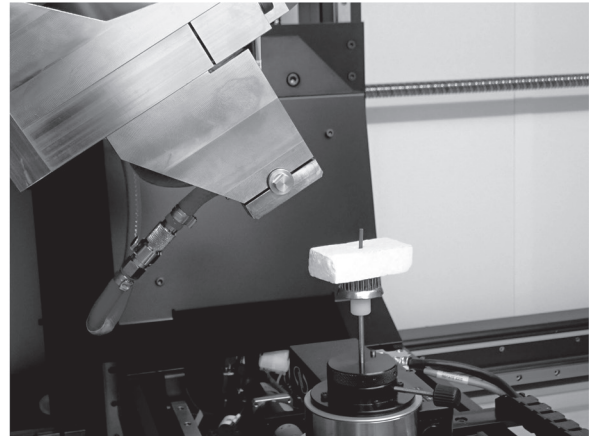


写真2 装置内の資料設置状況 (左側がX線源)

(2) 測定条件

本資料を対象とした測定の条件は、管電圧 150kV、管電流 150 μ A、露光時間 708ms、撮影枚数計 1,200 枚である。

本資料は、発泡スチロールブロックに径約 5 mm、深さ約 5 mmの穴をあけ、その中に立てかけるように静置し、装置内の試料回転ステージに固定した (写真2)。なお、条件において発泡スチロールはCTデータに影響しない。

(3) CT画像による形状測定

CTデータビューアソフトウェア (Volume Graphics 製 myVGL3.5) を用いて、得られたCTデータを展開し、三次元画像を詳細に観察した。また、ビューアソフトウェアの測定機能を用いて、本資料の寸法の測定を行った。このCT画像には縮尺を表示させることができるため、これをもとに画像編集ソフトウェア上で縮尺を合わせた。

図1は、本資料のCT画像および表面形状の三次元オブジェクトモデルを正投影図として示したものである (左側面 - 正面 - 右側面 - 裏面)。図の上側の小口面を端部A、下側を端部Bとする。a・b・cが本資料の主な横断面、dが縦断面のCT画像である。各断面の位置は三次元オブジェクトモデル上に線分で示している。また、本資料のように中空 (筒状) のものはCTデータのクリッピング処理により、内面の表面形状も表示させることができるため、この画像により縦方向の見通し断面 (孔内の表面) を観察した。

CT画像から、本資料は全長 22.34 mmで、両側からの回転穿孔によって孔があげられていることが分かった。孔の形状は円筒形で、穿孔の終点 (孔先端部) はそれぞれ「U」字状をなして接し貫通している。両者の切り合い関係は判然としないが、端部A側からの穿孔の終点の方が縦断面においてやや屈曲が強い (図1-g)。直径は端部Aで 2.66 mm、端部Bで 2.68 mm、中央で 2.82 mm、孔径は端部Aで 1.36 mm、端部Bで 1.33 mm、中央で 1.21 mmを測る。穿孔貫通部 (両側からの穿孔の接点) は、端部Bから 1.41 mmの位置にあり、この部分で孔径 0.87 mmと最も径が小さくなる。側面 (外側表面) は、研磨によって長軸方向に長い

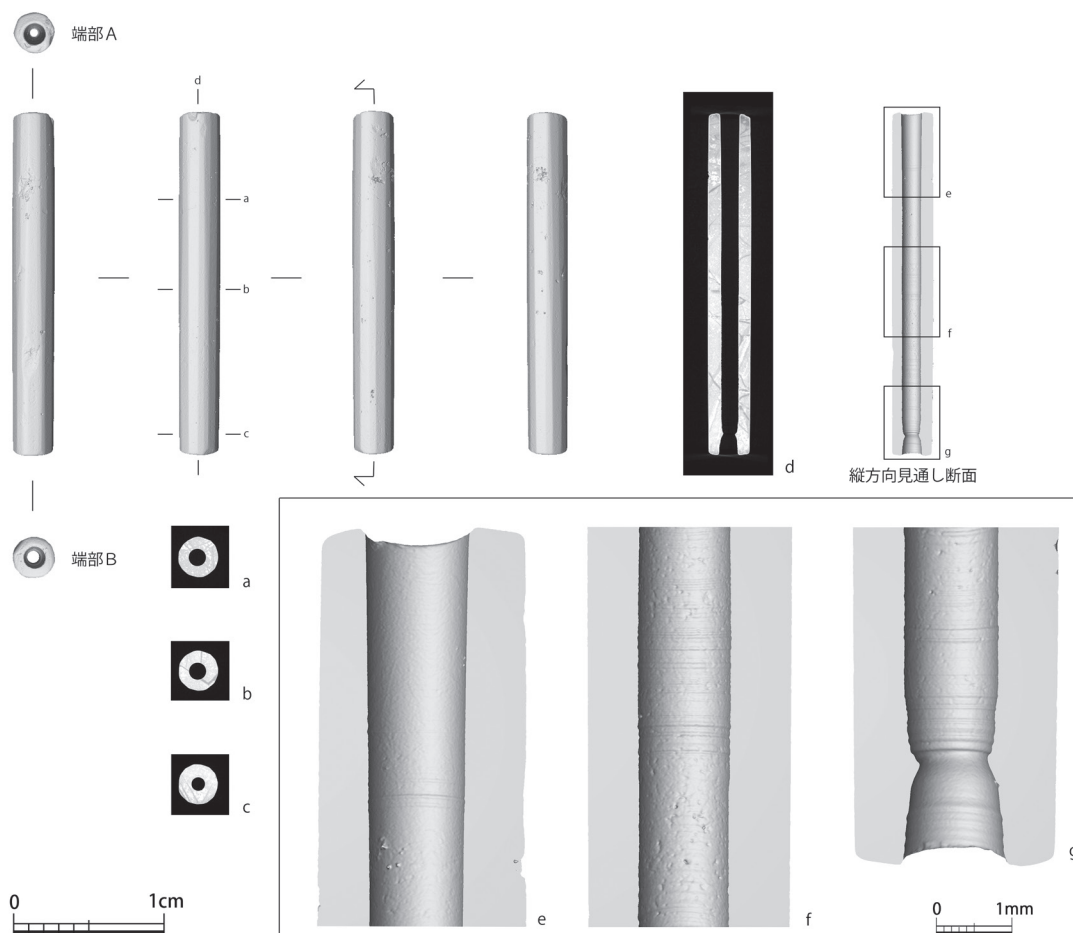


図1 上桐の神社裏遺跡第3次調査出土管玉のX線CT画像（×2、×10）

平坦面をつくり出し、それを左右に接続させて断面円形に近づけるように仕上げている。そのため、それぞれの平坦面の境は直線的な稜線となっており、横断面は八角形状（不明瞭な稜線も含めると十一角形）をなしている。側面の平坦面には極微細な擦痕が認められる。なお穿孔形態が円筒形であることは、穿孔具の径が一定で、断面形が円形、穿孔具の回転ブレが限りなく小さいと指摘されている（米田 2009, p. 96）。

2. 走査電子顕微鏡による観察

新潟大学工学部設置の走査電子顕微鏡（日本電子株式会社製マルチタッチパネル走査電子顕微鏡 JSM-6010PLUS/LA）を用いて、本資料の孔端部（孔内の表面）を観察した。

端部A側の孔内の表面は、長軸に直交方向して平行する極微細な擦痕がみられるものの、非常に平滑な状態である（図2）。また、外面と比較して、より平滑であることが画像から分かる。小口面と孔の内壁の境は直角をなし、紐擦れは判断できない。一方、端部B側の孔内の表面には、幅約 30 μmの断面「凹」字状をなす周期的な線條痕が4条みられた（図3）。X線CT画像では、端部A側からの穿孔の終点周辺でも同様の線條痕が顕著にみられる（図1-g）。こうした微細な線條痕は、孔を回転穿孔により少しずつ拡張する（長くす

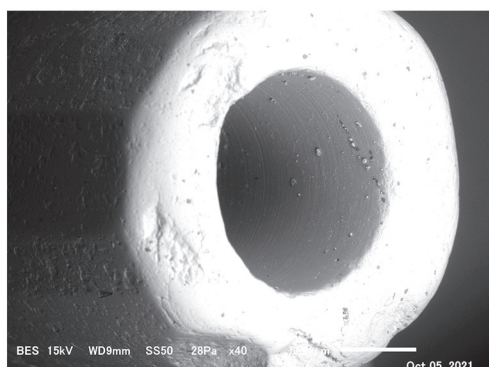


図2 端部AのSEM画像(×20)

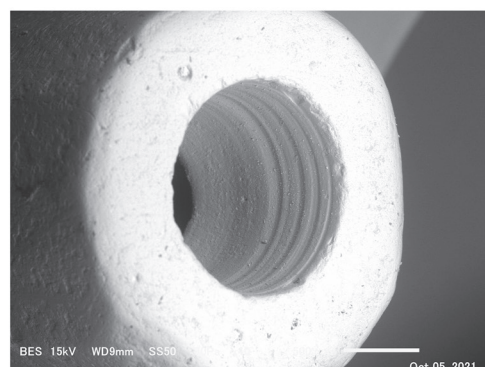


図3 端部BのSEM画像(×20)

る)際に、接触圧力(面圧)が相対的に強くかかった孔先端部で形成された痕跡と考えられる。小口面と孔の内壁の境は、端部Aに比べて摩耗が認められる。

玉類の穿孔形態は、寺村(1966)が穿孔具と孔の断面形態の関係性を提示して以降、製作技術の観点から重要視されてきた。近年、米田(2009)が玉類の詳細な穿孔形態(孔の断面形態、孔内の痕跡)の分類と変遷を提示し、日本列島において穿孔具は打製石針、磨製石針、鉄針という順序で変遷したことが共通理解になっているといえる。石針による穿孔では横方向の線条痕が明瞭に認められ孔内の表面が微細な波状を呈する一方、鉄針による穿孔では線条痕が不明瞭で孔内の表面が平滑になるとされる。

中村大介は西アジアや南アジア、朝鮮半島における穿孔具に関する先行研究を概観し、製作工具の材質と穿孔形態の関係について整理している。それによれば、磨製石針による穿孔では、どの地域においても断面「I」字形の穿孔形態を残し、南アジア(インダス文明)で利用されたアーネスタイトのような極めて硬質の磨製石針の場合は線条痕が観察されないものの、日本列島の安山岩製や瑪瑙製石針では線条痕が良好に残存するという(中村2016)。

そして、福岡県糸島市潤地頭給遺跡と北九州市城野遺跡出土の水晶および碧玉製玉類の穿孔部についてマイクロスコプを用いて30～200倍で観察した。観察の結果、線条痕の発達度合いは穿孔具の素材に左右されるものであったと推定し、弥生時代に利用された鉄針は線条痕を残しがたいものであったとする(中村前掲)。

一方、石井清司らは京都府市田斉当坊遺跡出土の孔内に石針が残存する管玉未成品について、CTスキャンによる連続断面画像をもとに検討した。そして、極細砂が石針と管玉孔内壁の空隙に介在していることを確認し、孔内の線条痕は石針先端との接触によるものではなく、研磨剤と考えられる極細砂との回転摩擦によって生じた痕跡であると指摘している(石井ほか2006)。

以上の点をふまえると、本資料は孔内が非常に平滑であることから、穿孔具は鉄針であると推定される。端部B側の孔内の表面および端部A側からの穿孔の終点周辺に残存する線条痕も、石針による穿孔の場合のものほど発達したのではなく、穿孔具の先端部が孔を拡張する際に、接触圧力が強くかかり生じたものと考えられる。ただし、穿孔具の材質の差異と孔内の表面性状の関係については、トライボロジー(摩擦学)や痕跡研究の観点から実験による検証が必要であり、今後の課題といえる。

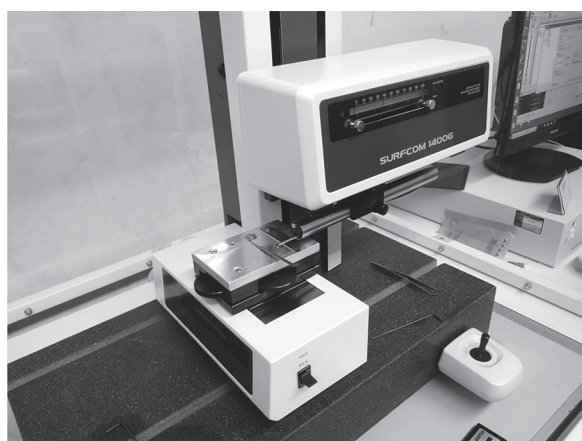


写真3 表面粗さ測定機

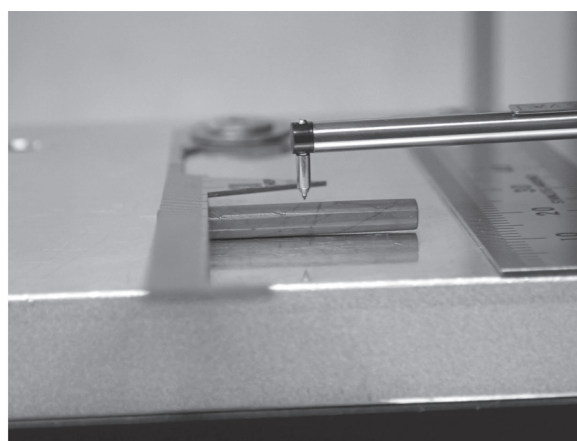


写真4 表面粗さ測定の状態 (中央が検針部)

3. 表面粗さ測定

(1) 分析方法

新潟大学工学部設置の表面粗さ測定機（東京精密製サーフコム 1400-G12）を用いて、表面粗さの各種パラメータについて測定した（写真3・4）。カットオフ値は0.8 mm、測定長さは4.0 mmに設定し、本資料に対して長軸方向に測定した。測定箇所は、側面の任意の5箇所である。

表面粗さ測定とは、先端径2 μm のダイヤモンド探針を嵌め込んだ検針部で分析対象物の表面の一定区間を触針し、その粗さを計測するものである。粗さは、山と谷をもつ粗さ曲線として定量的に評価され、基準長さを基に表面性状に関する各種パラメータの測定値が得られる。本分析では、代表的な表面粗さパラメータである算術平均粗さ（Ra）、最大高さ粗さ（Rz）、粗さ突起の形状を示すスキューネス（ひずみ度、Rsk）およびクルトシス（とがり度、Rku）を測定した。

(2) 測定結果

表面粗さ測定の結果を表1に示す。以下では、表面粗さパラメータのうち、RaとRskの測定値に注目して考察する。

Raは粗さ突起の平均的な高さを示すものであり、数値が小さいほど表面が滑らかであることを示す。Raは構成される粒子の細かさ、研磨荷重、研磨方向などによって変化すると考えられる。一方、Rskは粗さの山と谷の分布の偏りを示し、値が0の場合は山と谷が均

表1 表面粗さ測定の結果

No.	Ra (μm)	Rz (μm)	Rsk	Rku
1	1.686	13.131	-1.500	8.078
2	0.519	3.932	-1.770	6.628
3	2.467	22.945	-2.450	11.687
4	0.825	5.056	-1.085	4.312
5	0.766	5.387	-1.650	6.455

等に分布しており、値が正の場合は山の割合が多く、負の場合は谷の割合が多いことを示す。値の絶対値の大きさは粗さの大きさではなくその傾向の強度を示すため無次元量である。例え

ば、ランダムな表面ではRskは0になるが、研磨された面では表面粗さの山のみが選択的に削られるため値は負になる。また、切削加工された面では表面に周期的な突起（山）が選択的に形成されるため値は正になる傾向にある。

本資料のRaの平均値は1.25 μmであり、これは現代の機械加工において表面仕上げに使用される研削加工後の表面、もしくは穴あけにおけるリーマ加工による仕上げ面と同等の平滑さである。また、Rskの平均値は-1.69で研磨面の特徴を示す。以上から側面は丁寧に研磨仕上げされているといえる。孔内の表面粗さについては、孔径が小さく探針を挿入できなかつたため計測できなかつた。しかし、2で述べたようにSEM画像から、リーマ仕上げと同等の表面粗さであった側面よりも端部（特に端部A）の孔内の表面は滑らかであった。また、側面と比べて孔内は損傷する可能性が低いこと、穿孔によるものと思われる微細な線条痕や擦痕がみられること、明らかな紐擦れがみられないことから、孔の内面は穿孔した直後の表面に近いと考えられる。

おわりに

本稿では、マイクロフォーカスX線CT装置によるコンピュータ断層撮影および走査電子顕微鏡により、本資料の詳細な断面構造・形状解析を行った。その結果、孔内の表面は非常に平滑であることから、穿孔具は鉄針であると推定した。また、本資料の側面に対して行った表面粗さ測定の結果、非常に滑らかに仕上げられた研磨面の特徴を示すことが明らかになった。今後、本研究で得られた内容をふまえて、玉類の穿孔や研磨技術に関する考古学的研究を進めていきたい。本稿が関連する研究の参照となれば幸いである。

なお本章は森が全体を執筆し、2・3について月山が補訂した。

参考文献

- 赤田昌倫 2017「文化財用X線CTスキャナを用いた調査の現状と課題」『季刊考古学』第140号、雄山閣、18-21頁。
- 石井清司・岩松 保・田代 弘 2006「玉類製作技法の検討—市田齊当坊遺跡出土の管玉孔内に遺存する石針を巡って—」『京都府埋蔵文化財情報』第101号、財団法人京都府埋蔵文化財調査研究センター、13-20頁。
- 今津節生・鳥越俊行・輪田 慧 2012「X線CTによる商周青銅器の構造解析」『X線CTスキャナによる中国古代青銅器の構造技法解析』九州国立博物館、121-125頁。
- 寺村光晴 1966『古代玉作の研究』吉川弘文館。
- 戸田裕之 2019『X線CT—産業・理工学でのトモグラフィー実践活用—』共立出版。
- 中村大介 2016「環日本海における石製装身具の変遷」『古代学研究所紀要』第24号、日本古代学研究所、3-23頁。
- 米田克彦 2009「穿孔技術から見た出雲玉作の特質と系譜」『出雲玉作の特質に関する研究—古代出雲における玉作の研究Ⅲ—』島根県古代文化センター、93-126頁。

上桐の神社裏遺跡 2 赤坂遺跡 1

島崎川流域遺跡調査団報告 第2集
新潟大学考古学研究室調査研究報告 21

令和4(2022)年3月23日

発行 島崎川流域遺跡調査団
新潟市西区五十嵐2の町8050番地

印刷 有限会社平電子印刷所
福島県いわき市平北白土字西ノ内13
