

# LiDAR、SfM-MVSによるやぐら玄室の計測情報の検討

～千葉県南房総市 内郷やぐら群を対象として～

中 村 文 洋\*

A study of the measurement method of the Stone Cave-Chambers “Yagura” by  
LiDAR and SfM-MVS.

Fumihiko NAKAMURA

## 要 旨

iPadに搭載されているLiDARとSfM-MVSを用いて、千葉県南房総市に所在する内郷やぐら群の玄室規模の検討とやぐら浮彫五輪塔の形態及び壁面の加工痕について分析を行った。LiDARではやぐら群全体を計測し、巨視的な知見が得られた。内郷やぐら群2号窟・3号窟の右側は左側と対称になっておらず、これらの部分はやぐら玄室掘削時より後の拡張部分であることがわかった。またSfM-MVSでは玄室壁面の加工痕を計測した。粗作り段階では刃付きノミや柄付きノミで敲打が行われ、特に浮彫五輪塔周囲の彫り込みには刃付きノミ削りが用いられる傾向がある。仕上げの段階ではノミ削りや刃付きノミ削りが行われ、特に玄室隅部分の仕上げはノミ削りが用いられる傾向がある。またこれらの観察によって2号窟・3号窟においては、まず奥壁に浮彫五輪塔が彫刻され、後に側壁に追刻するか、奥壁を右側へ拡張しそこへ追刻を行っていた様子が想定できた。

**キーワード：**やぐら、浮彫五輪塔、石材加工痕、SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo)、LiDAR (Light Detection and Ranging)

## I やぐら玄室の三次元計測

### 1 iPadによるLiDAR計測とSfM-MVS計測

本論文ではLiDAR計測とSfM-MVSを用いて、千葉県南房総市に所在する内郷やぐら群の玄室規模の検討とやぐら浮彫五輪塔の形態及び壁面の加工痕について分析を行った。LiDAR計測はApple社iPadPro(第3世代)に搭載されているLiDARセンサーを用いて行った。アプリケーションはNiantic社「Scaniverse」を使用した。LiDAR(Light detection and ranging:光検出と測距)はパルス状に放射した光が物体に当たって返ってくるまでの時間と方向を元に物体の三次元データを取得する技術である。iPadに搭載されている加速度センサーやジャイロセンサーなどのモー

ションセンサーで検知したiPadの動きと、カメラからの画像データを照合することで自己位置推定を行うVIO (visual-inertial odometry) <sup>1</sup>計測をしつつ連続的に三次元データを取得する。やぐら群全体の規模・形状の把握にはLiDAR計測を用いた(図1)。

各やぐら壁面の加工痕及び、浮彫五輪塔の形態の把握はSfM-MVS (Structure from Motion-Multi-view Stereo) を用いて作図を行った(図2～4)。SfMは複数の写真から被写体の特徴点を抽出・結びつけて三次元点群データを取得する技術である。MVSは得られた点群データから高密度点群モデルを作成する技術である。

カメラはSONY製DSC-RX1を使用した。三次元データの処理はAgisoft社Metashape Standardで行った。解析の設定は、写真の位置想定 (Align Photos) 精度が「高」、高密度点群の構築 (Build Dense Cloud) 品質が「高」、メッシュの構築 (Build Mesh) の深度マップ品質が「高」、テクスチャー構築 (Build Texture) が4096pix×1枚である。

## 2 やぐら及び横穴墓、横穴式石室の三次元計測例

三次元計測によってやぐらの玄室規模を検討したものは、内郷やぐら群の近隣では千葉県館山市千手院やぐら [千葉県教育委員会2012] などがある。またやぐら以外では、横穴墓や横穴式石室に三次元計測を用いた研究を多くみる [廣瀬覚2015] [岩村孝平2019] 等。横穴墓や横穴式石室はやぐらと類似する閉塞空間を持つために、これらの研究は大いに参考にしたい。

岩村・瀬谷氏らの研究では和歌山県和歌山市に所在する岩橋千塚古墳群を対象に、SfM計測とスマートフォンによるSLAM計測の比較を行っている [岩村孝平・瀬谷今日子ほか2020]。SLAM計測はiPadを用いたLiDAR計測と同様に自己位置推定を行いながら深度センサーで物体の形状を記録する技術である。SLAM計測では、石室内の割石の細かな形状は記録できないが、石室全体の形状や構成など巨視的な把握に向いているとしている。青木氏は、埼玉県東松山市若宮八幡古墳、同市附川1号墳、埼玉県行田市地藏塚古墳、群馬県藤岡市伊勢塚古墳の横穴式石室を対象に据え置き型レーザーキャナーとハンディキャナー、SfM計測の比較を行っている [青木弘2019]。レーザーキャナーは石材の加工痕まで記録できるのに対し、SfMでは石積みの状況は把握にとどまり、加工痕の把握は難しいというものであった。しかし、大村氏は石棺・石槨の加工痕をSfM計測によって図化している [大村2019]。SfM計測はレーザー計測に比べて分解能は劣るものの、接写するなどの工夫の余地はあるように思う。



図1 内郷やぐら群全体図

## Ⅱ 石材の採石・加工痕

和田氏は石材の採石・加工の工程と工具について、新潟県佐渡相川〔宮本1973〕や大分国東半島〔段上1983・48〕の民俗例を元に以下のように整理している〔和田1991〕。

相川の例の工程を、まず採石場で行われる「山取り」と細工所で行われる「細工」に分ける。さらに「山取り」は「山取り」と「荒造り」に、「細工」は「すみ引き」・「ふち取り」・「小造り」・「目つぶし」・「水とぎ」に細分する。これを石棺に観察される加工痕に即して、石材の切り出しを「山取り」、石棺の形がほぼ出来上がるまでの成形段階を「粗作り」、その後の表面調整を「仕上げ」に対応させ分類をおこなっている。

工具については、先が尖った手持ち工具を「ノミ」、先に刃がつく手持ち工具を「刃付きノミ」、刃が柄に直交する柄付き工具は「チョウナ」、刃が柄に並行する柄付き工具は「ヨキ」と定義している。後述する矢穴に差し込む棒状工具を「ヤ」、それを打ち込む金槌を「セット」は民俗例の名称に従っている。本論文もこれに従う。

## Ⅲ 内郷やぐら群の計測

### 1 やぐら群の概要と周辺のやぐら群

内郷やぐら群は千葉県南房総市和田地区に所在するやぐら群である。南西方向に開口する谷の最深部に日枝神社があるが、その境内南方の岩壁にやぐらが穿たれている。やぐらは全部で3窟確認でき、南西方向へ開口している。向かって左から番号を振り「第～号窟」のように呼称する。また、壁面についてもやぐらに向かって「右壁」もしくは「左壁」と呼称する。3窟ともに奥行がなく龕状であるが、3号窟に向かって奥行は深くなっていく（図1）。

井上哲朗は安房・上総地域に所在するやぐらの浮彫・線刻五輪塔の形状について分析をおこなっている〔井上2004〕。その中で、火輪の形状についてA～Dに分類している。Aタイプが丸彫りの五輪塔形に近い形状で、両側の軒が下端から外側に斜め上方に上るもの。その他が異形のタイプで、Bタイプは水輪との両接点から外側に上がり全体として菱形になるもの。Cタイプは内側に上がるもの。Dタイプは両端に上がる軒が無い全体として台形状のものである。内郷やぐら群の所在する和田町内のやぐらはAタイプが多いとしているが内郷やぐら第1号窟奥壁右のものはAタイプより火輪両端部の上方突出が強調されている。空風輪の突出は他のやぐら群に比べて弱く空輪上部が丸みを帯びる。内郷やぐら群内の浮彫五輪塔彫出の新旧関係については、第3号窟C・D塔→第2号窟A・B・C・D塔としている。

### 2 浮彫五輪塔の観察

#### 第1号窟

第1号窟は向かって左壁に浮彫五輪塔A、奥壁にB・C塔が彫刻されている（図2）。A塔は無種字で周囲に浅い彫り込みを確認できるが、左半分が玄室側壁とともに削れている。B塔は周囲を浅く彫り込み、無種字である。C塔も同様に周囲を浅く掘り込むが、塔表面には菩提門種字

が刻まれる。3基とも井上氏の火輪形状の分類ではAタイプだが、丸彫りの五輪塔と比べると火輪先端が持ち上がり、また風輪の突出も強い。A塔の火輪形状は半分を失っているものの、水輪接続部から軒が直線的に斜め上方に上がっておりBタイプに近いと思われる。

### 第2号窟

左壁に浮彫五輪塔A、奥壁にB・C・D塔を刻む(図3)。A塔は無種字、B・C塔には菩提門種字を刻む。D塔はしたからアク・バン・ランまでが確認できるが他は不明である。D塔の梵字はB・C塔より浅く小さい。また、全ての浮彫五輪塔の周囲は浅く彫り込まれている。

第2号窟の浮彫五輪塔は共通して板塔婆状に細長い。A～C塔は型式を踏襲した感がある。外反しながら開く風輪や台形を呈する火輪形状、地・水・火輪幅が揃う特徴がこれらに共通する。D塔は第2号窟内で唯一型式を模倣しない。水輪が小さく、火輪は幅が広くBタイプ、また空風輪も火輪に呼応して端部の突出が強くなっている。D塔掘り込みがC塔掘り込みに勝っているためD塔はC塔に遅れて彫出された。また、B・C塔の彫り込み形状は二重光背状で、五輪塔に向かって傾斜するのに対して、A塔周囲の彫り込みの形状は、地輪から火輪までを方形、空風輪はドーム状としている。特に方形部分は彫り込み側面と底面の間に明確な稜線を刻む。D塔彫り込みは地輪から水輪付近までは方形、それより上部は大きく開く火輪に合わせて菱形という変則的な形状であるが、この方形部分もまた側面と底面の別が明確である。

### 3号窟

左壁に浮彫五輪塔A、奥壁にB・C・D塔、右壁にE塔を刻む(図4)。B塔の火輪には「ラン」、C塔の水輪には「バン」、火輪には「ラン」の種字が確認できる。B・C塔には菩提門が刻まれていたことが推測される。A・E塔の周囲は浅く彫り込まれているが、B塔は彫り込みを持たない。C・D塔周囲は壁面が大きく掘り込まれており、その分厚みを持った五輪塔となっている。内郷やぐら群の浮彫五輪塔は壁面から立ち上がって一定の高さで平坦面を造るシルエット型の造形だが、このC・D塔のみ厚く立ち上がりかつ、立ち上がり方向の凹凸をも表現する半立体型の造形である。

A塔とE塔は型式を共有している。火輪は三角形に近い。空風輪の区別がほとんどなく、円形に近い。しかしA塔はわずかに軒を持ち、外側へ開くように立ち上がっている。一方E塔は火輪の軒を持たない明らかなDタイプである。C塔とD塔も型式を共有しており、地～火輪の内、水輪が小さい。火輪軒は薄く、屋弛みも小さい。空風輪は凹線でのみ両輪の区別を表すような砲弾形である。3号窟内ではB塔のみ独自の型式を持つ。火輪は1号窟B・C塔と同様に、先端の上方突出が強調されたAタイプである。また空風輪の区別が明快で、風輪は外に開き、空輪は正五角形に近い。

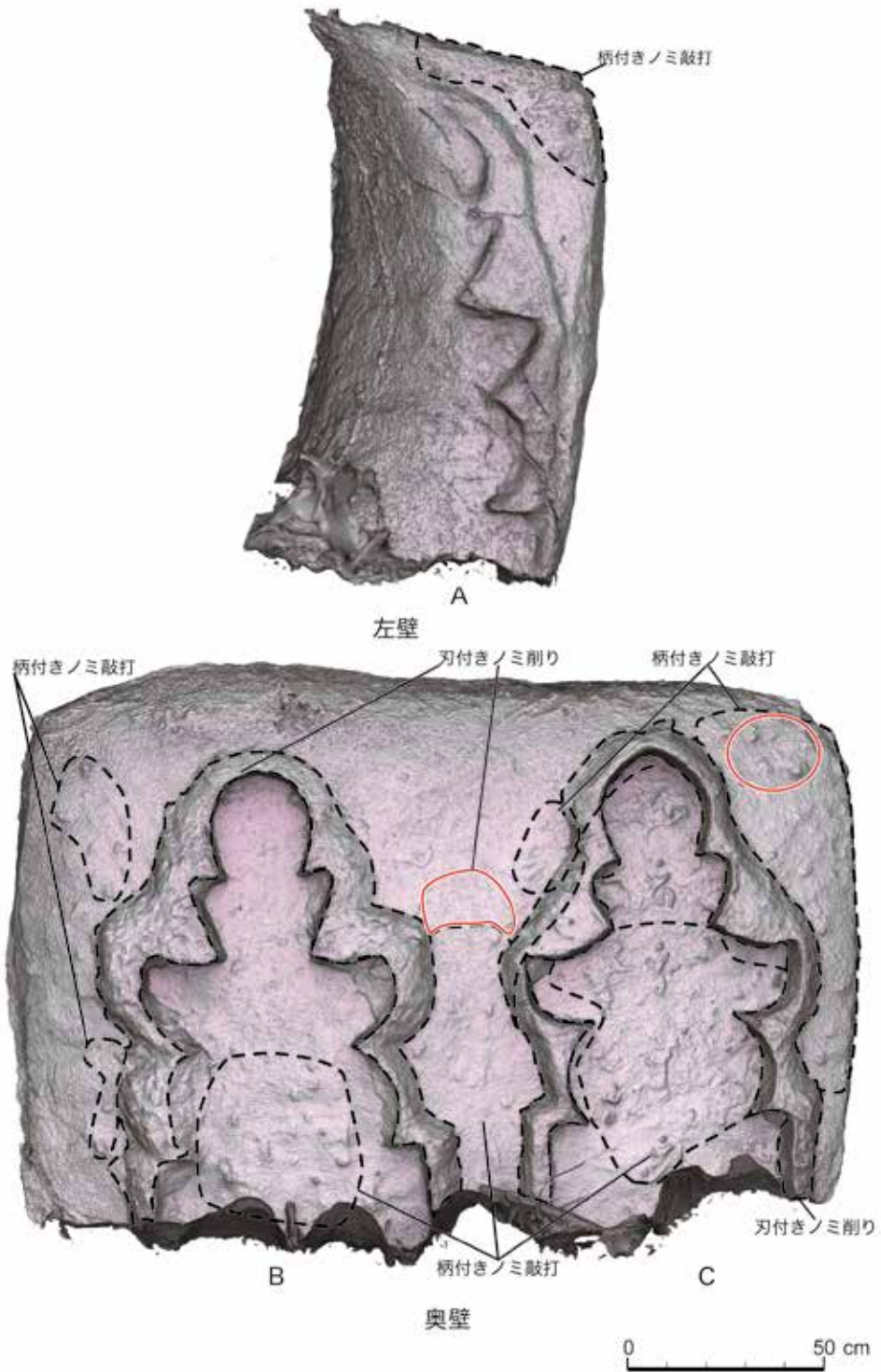


図2 内郷やぐら群第1号窟



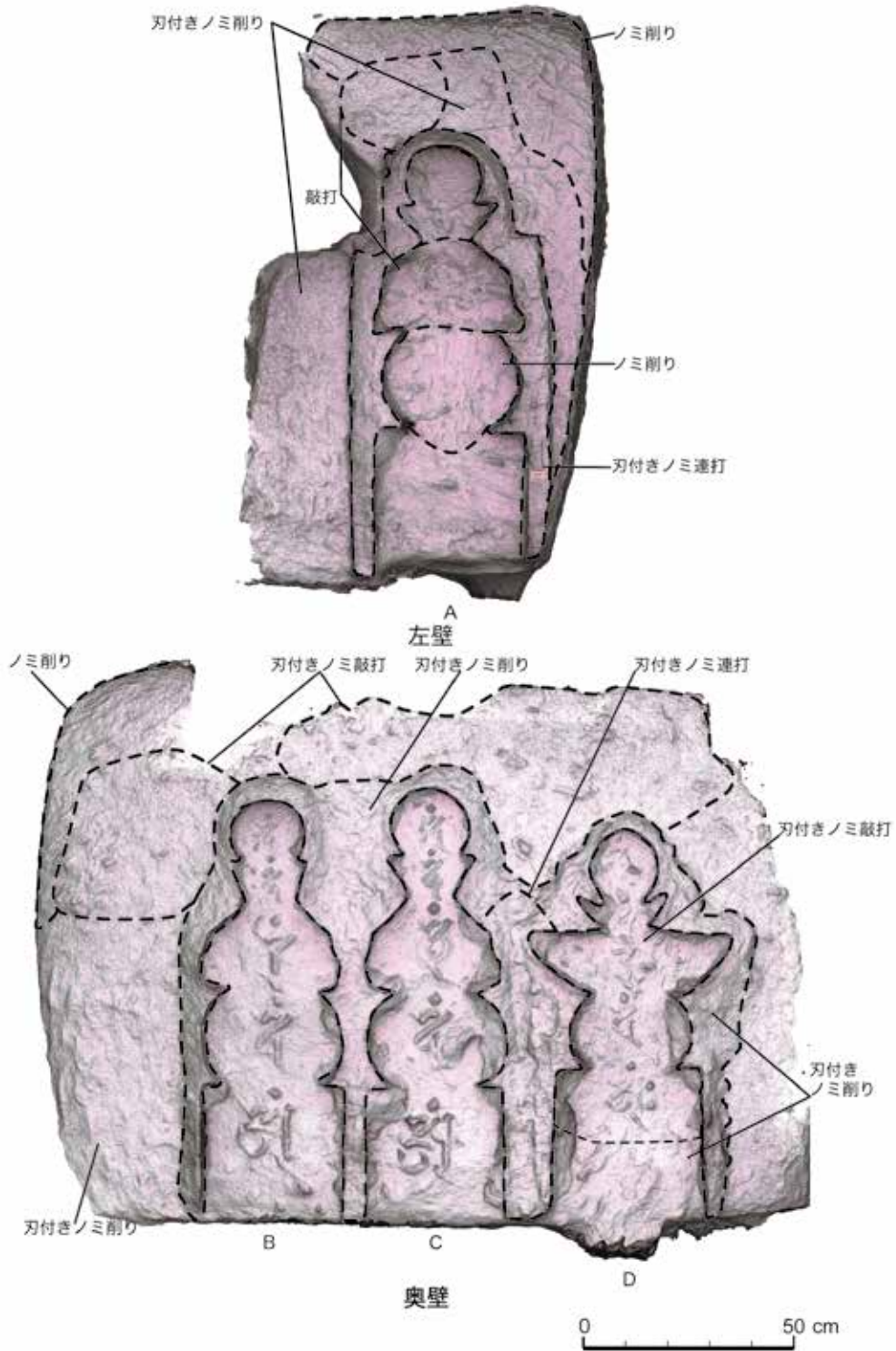


図3 内郷やぐら群第2号窟

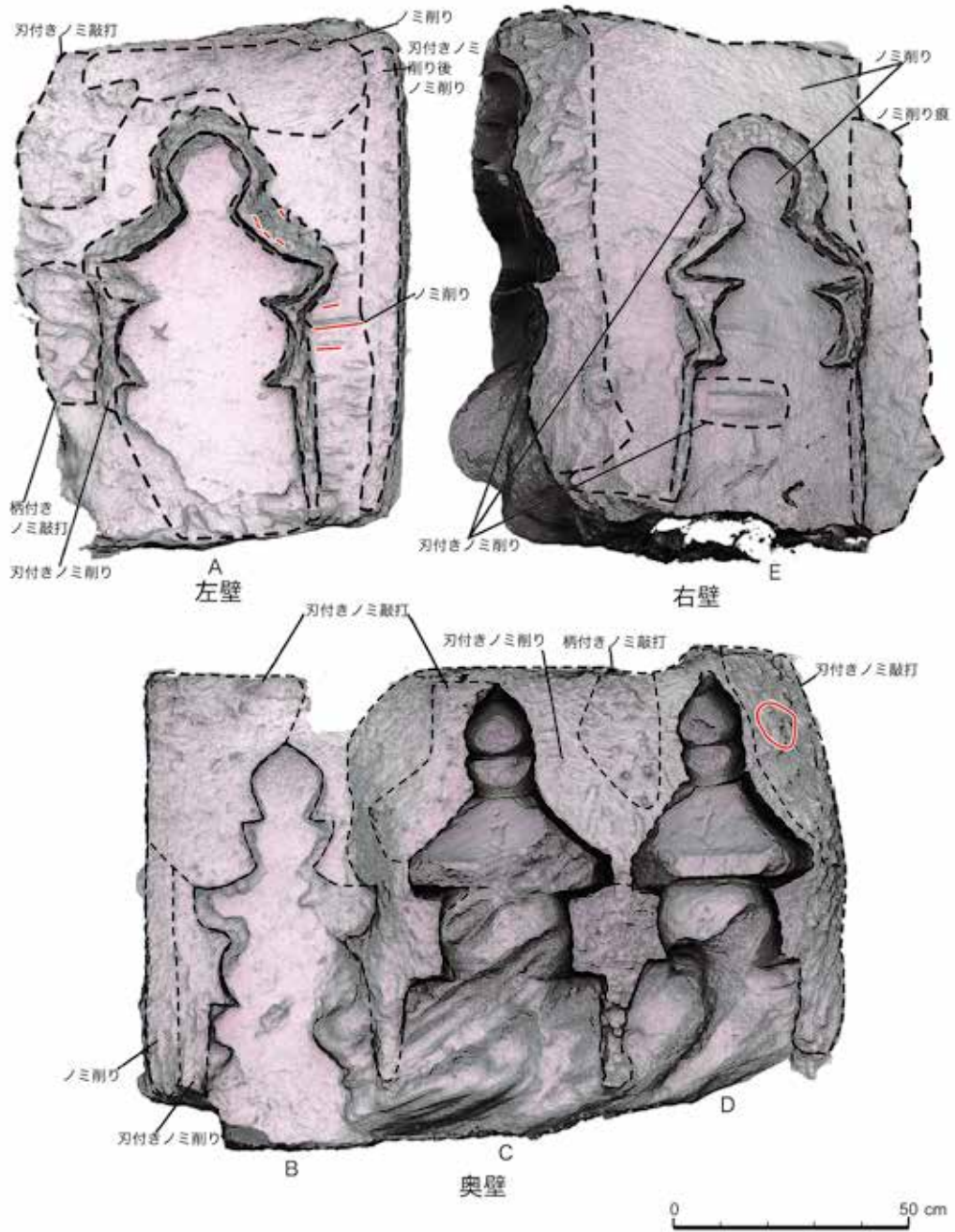


図4 内郷やぐら群第3号窟



### 3 加工痕の観察

(図2～4)を見ると、内郷やぐら群全体を通して、加工の段階と加工する箇所によって観察される加工痕は一定している様に思う。まず浮彫五輪塔周囲の彫り込みと壁面表面に刃付きノミ削りが観察できる。前者には、工具の先端形状の分かる痕跡が多く残る。刃付きノミを壁面に対して立てて使い、浮彫五輪塔周囲を彫り窪めたことが想定できる。これは粗作り段階の刃付きノミ削り痕である(図5-①)。後者は壁面上斜め方向などに長く伸びている。これは端部を造形するためではなく壁面を平滑にするナラシ技法であり、仕上げ段階の刃付きノミ削り痕である(図5-②)。

玄室の隅部分や浮彫五輪塔の表面にはノミ削り痕(図5-③)が観察できる。後者は工具先端が壁面にのめりこんで止まっているものもあるが、いずれも表面に沿って打ち込んだ軌跡が残っているため、仕上げ段階の加工であることが判断できる。前者について、ノミのみを用いて端部の粗作り段階の調整をすることがあったのかは分からないが、第3号窟左壁の隅部分の調整では刃付きノミ削りで隅を彫り出してからノミ削りで頂点の角を立たせていることが窺える。石材との接触面積が小さいノミは、大量の岩石を割り出す<sup>ii</sup>粗作り段階には向かず、仕上げ段階に多用されたのかもしれない。

刃付きノミ敲打痕(図5-④)は第2号窟D塔を除いて浮彫五輪塔表面に観察されることはなく、壁面に点在している。しかし玄室隅部分や第3号窟C・D塔の彫り込みに特に集中して分布する。これらの部分は意図的に壁面を掘り込む必要があり、壁面に対して垂直に打ち込む敲打技法が用いられたのだろう。つまり刃付きノミ敲打は粗作り段階の技法である。またこのような平坦面ではなく仕上げ調整が難しいために敲打痕が残るのかもしれない。

1号窟奥壁の両端、3号窟左壁入り口付近、3号窟奥壁C・D塔彫り込み部分に観察できる敲打痕を柄付きノミの痕跡(図5-⑤)とした。分類基準は、先端形状が平刃のものを刃付きノミ、尖っていてノミ削り痕に観察できる先端形状よりも直径が大きいものを柄付きノミによる調整と判断した。刃付きノミ敲打技法と同様に壁面に対して垂直に工具を使う技法のため、粗作り段階の加工痕であろう。

刃付きノミ連打痕(図5-⑥)は第2号窟A塔彫り込み右側、第2号窟C塔とD塔の間の彫り込みに観察できる。「ノミ連打法」は、「やや斜めに倒したノミの先端を上げずに、少しずつずらしながらセットで連打していく技法で、『ノミ叩き技法』のなかでも工具の使用により習熟した技法といえることができるものである」[和田1991]。また和田氏はこのノミ連打法について仕上げ段階の下地となる平坦面を造る作業で、粗作りの中では後半の段階であるとしている。

浮彫五輪塔の項で述べたとおりノミ連打法を用いている部分の彫り込みは、側面と底面の間に明確な稜線を持ち、造形と技法の関連を指摘できる。

### 4 やぐらと浮彫五輪塔の彫出過程

最後に浮彫五輪塔や加工痕の観察を元にやぐら毎また、浮彫五輪塔の彫出新旧関係を考えてみる。第3号窟の平面形状をみると左壁は奥壁左隅までやや開いていくのに対して、右壁はC・D塔彫り込みに合わせて大きく外反している(図1-第3号窟)。玄室左側を当初の玄室プランと

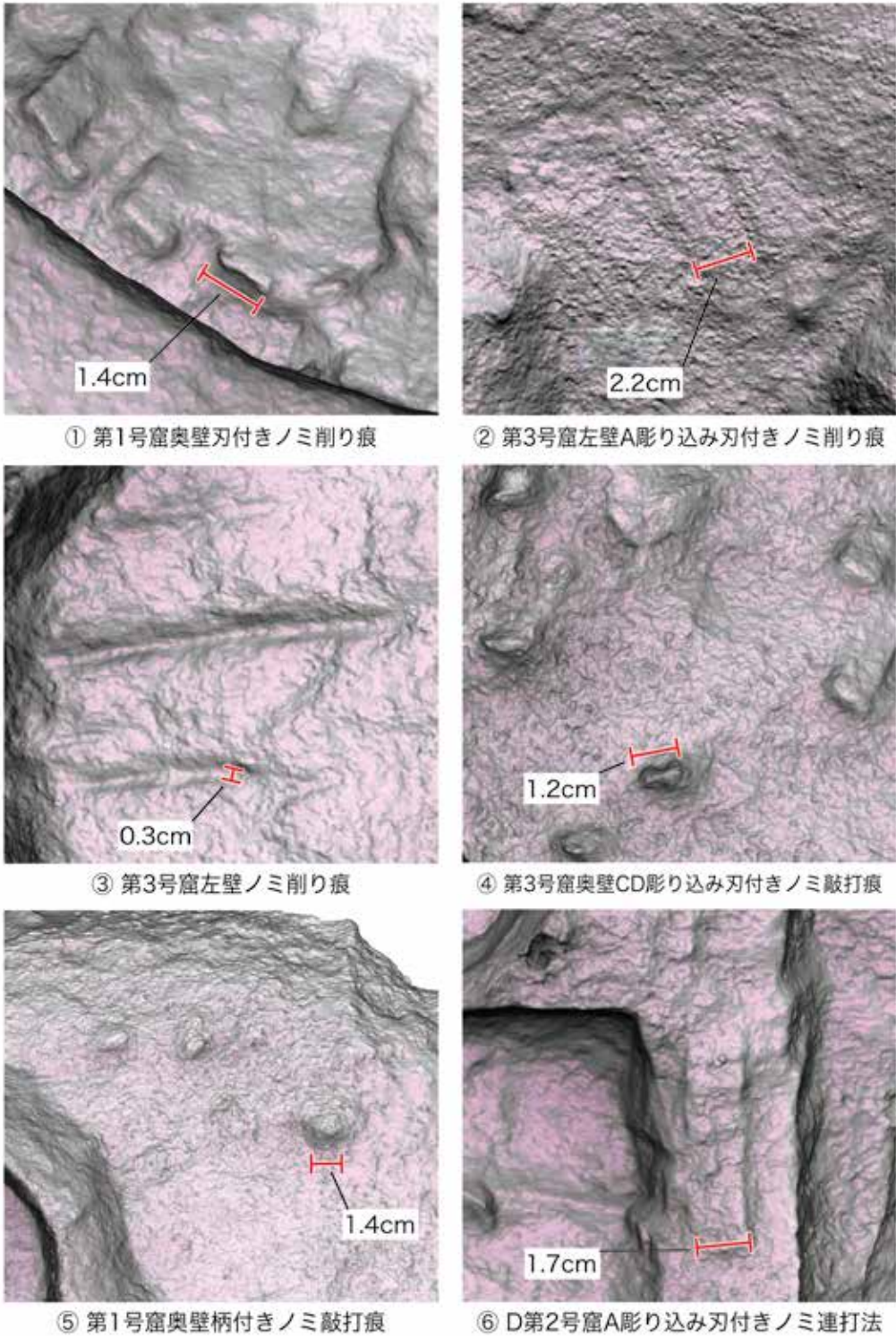


図5 内郷やぐら群玄室壁面加工痕 (縮尺任意)

すると、C・D塔の彫り込みと右壁側は玄室掘削よりも後の行われた拡張部分であると考えられる。

B塔の火輪右側は一見C・D塔彫り込みに勝っているように見えるが、軒先端が屋弛みの傾斜とずれており、ずれている部分がまた彫り込み壁に合わせて奥へ傾斜している。この部分はC・D塔の周囲を彫り込んでいるときにB塔の火輪を削ってしまったために彫刻し直したのだろう。また、左壁隅部分で帯状に加工痕が「ノミ削り」から「刃付きノミ削り後ノミ削り」に変化するの、B塔彫出前に一旦左壁表面を仕上げ調整し、再び奥壁を仕上げるのと同時にB塔を彫出したことを示す可能性がある。B塔がC・D塔に先行すると考えられる。

3号窟C・D塔は半立体型の浮彫五輪塔である。浮彫五輪塔は立体の五輪塔の代用であり、造形が立体五輪塔の型式に近く厚みのある五輪塔は、浅い浮彫に先行すると考えられていた[井上2004]がこれよりB塔が先行するのは意外である。またD塔は彫り込みの傾斜に合わせてかなり正面が左壁側を向いており窮屈である。これはB塔が先行することを傍証する。

A塔とE塔は先述のとおり型式を模倣するために同時期に彫出されたと考える。E塔は拡張部分と考えられる右壁に彫刻されているので、両塔は玄室拡張後に彫出された。まとめると3号窟の浮彫五輪塔の彫出順は以下の通りとなる。

第3号窟：B塔→右側への玄室拡張→C・D塔→A・E塔

2号窟も右壁が左壁に比べて外反が大きい。また奥壁下の低壇に穿たれた納骨穴a・bは同程度の大きさで奥壁に沿っている。一方納骨穴cはやや大きく壁面から離れている。粗作り段階の加工痕である刃付きノミ敲打が奥壁左側は隅部分に集中しているのに対して、右側はD塔表面にまでみられる。またD塔の型式は同じ奥壁に彫刻されるB・C塔とは異なっており、D塔の彫り込みはC等彫り込みに勝っている。このことから当初の玄室プランでは納骨穴Bのやや外側に奥壁右隅があったものを、のちに右壁側に拡張を行いD塔も彫出されたと考えられる。

A塔はD塔とは型式が異なるものの彫り込み部分に、D同様に刃付きノミ連打法による明確な底面を持つ。また低壇との切り合い関係からB・C塔より後に彫出されたことが分かる。これ以上は判断材料に欠けるが、A塔はD塔よりも先行する奥壁のB・C塔に型式に近いことと、D塔彫出には右側への拡張が必要なることを考えると、A塔の後にD塔が彫出されたのではないだろうか。まとめると2号窟の浮彫五輪塔の彫出順は以下の通りとなる。

第2号窟：B・C塔→A塔→右側へ玄室拡張→D塔

第1号窟については玄室や浮彫五輪塔彫出の新旧関係を示す要素を見出すことができなかった。しかし他のやぐらと比較すると、奥壁両隅部分や浮彫五輪塔表面に敲打痕が残り仕上げ段階の調整が甘い、C塔に刻まれる梵字が第2号窟B・C塔のものに比べて浅く小さいなどの特徴が指摘できる。各やぐらの現存入り口幅が1号窟は118cm、2号窟は130cm、3号窟は127cmで1号窟は他のやぐらに比べて10cmほど入り口幅が短い。1号窟のすぐ左は露出する岩壁の西端にあたる。この入り口幅の小ささは2号窟を避けて岩壁の端ぎりぎりにやぐらを穿った結果ではないだろうか。内郷やぐら群は第2号窟か第3号窟が最初に穿たれ、その後第1号窟が穿たれて現在の

形になったと推測する。

## まとめ

内郷やぐら群は小規模なやぐら群ながらも加工痕や浮彫五輪塔、浮彫五輪塔周囲の彫り込み形状など様々な要素を持ち合わせていた。今回行った計測を要素に分解すると、大きい順にやぐら群全体の形状、やぐら玄室の形状、浮彫五輪塔、加工痕となる。要素ごとに適切な計測方法を併用することでやぐら内でも玄室拡張の痕跡や浮彫五輪塔の彫出の新旧関係を理解することができた。個々のやぐら群の造営過程また、玄室プランと浮彫五輪塔彫出の関係を明らかにすることでやぐら群同士の比較も高い精度で行えるはずである。

## 注

i Apple社Webページより

[https://developer.apple.com/documentation/arkit/configuration\\_objects/understanding\\_world\\_tracking](https://developer.apple.com/documentation/arkit/configuration_objects/understanding_world_tracking)

ii やぐらも採石遺構と同様に山取り段階の技術、すなわち堀割技法が用いられたかは不明で、今後の課題である

## 参考文献

- 青木 弘 2019 「レーザースキャナとSfM/MVSによる横穴式石室の調査」  
『第2回考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン古墳・横穴墓×3D予稿集』 考古形態測定学研究会
- 石橋 宏 2013 「製作技術からみた石棺の系譜」『古墳時代石棺秩序の復元的研究』 六一書房
- 磯貝龍志 2016 「終末期古墳の埋葬施設にみる石材加工技術」『廻原1号墳発掘調査報告書』  
鳥根大学法文学部考古学研究室
- 井上哲郎 1997 「房総半島における「やぐら」—線刻・浮彫五輪塔を中心として—」『史館』第29号 史館  
同人
- 井上哲郎 2004 「第3章 房総の「やぐら」—線刻・浮彫五輪塔の再分析—」  
浅野晴樹・齋藤慎一編『中世東国の世界2 南関東』 高志書院
- 岩村孝平 2019 「スマホで横穴式石室を測りまくる」『第2回考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン古墳・横穴墓×3D予稿集』 考古形態測定学研究会
- 岩村孝平・瀬谷今日子ほか 2020 「複数手法の併用による横穴式石室の3D計測と形態比較研究」『日本情報考古学会講演文集』 通巻43号
- 大村 陸 2019 「SfM/MVSによる石棺・石槨加工技術の検討」  
『第2回考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン古墳・横穴墓×3D予稿集』 考古形態測定学研究会

- 鎌倉市教育委員会 2017『神奈川県鎌倉市西瓜ヶ谷やぐら群調査報告書』
- 下大迫幹洋 2016「二上山凝灰岩製石造物の採石・加工技術について」  
『中世採石・加工技術研究会発表資料集 第2回』 中世採石・加工技術研究会編
- 段上達雄ほか 1983・84『国東半島の石工』1・2  
大分県風土記の丘歴史民俗資料館報告書第1・2集
- 千葉県教育委員会 2012『千葉県館山市千手院やぐら群—千葉県やぐら調査報告書—』
- 千葉県史料研究財団 1996『千葉県やぐら分布調査報告書』
- 廣瀬 覚 2015『三次元計測による飛鳥時代の石工技術の復元的研究：平成23年度～26年度科学研究費（学術研究助成金（若手研究B））研究成果報告書』、奈良文化財研究所
- 松田真一 1981「二上山東側の石切場について」  
『二上山凝灰岩の石切場と石造物—生産地と消費地—』 石造物研究会
- 松田朝由 2016「讃岐における軟質石材の採石・加工技術」『中世採石・加工技術研究会発表資料集 第2回』  
中世採石・加工技術研究会編
- 宮本常一監修 1973『佐渡相川の歴史』資料集2
- 和田晴吾 1991「石工技術」『古墳時代の研究5 生産と流通II』 雄山閣

## Abstract

I investigated the shape of the five-ringed pagoda in relief and analyzed the work marks on the wall in the Uchigo Yagura group in Minami-Boso City, Chiba Prefecture, using LiDAR on an iPad and SfM-MVS mounted. The LiDAR measurements of the entire Yagura group provided macroscopic insights. The right side of caves No. 2 and No. 3 are not symmetrical with the left side, indicating that these parts were enlarged later than the first time of excavation of the Yagura chamber.

I also measured the work marks on the wall surface of the chamber by SfM-MVS mounted. In the roughing stage, chisels with blades or chisels with handles were used for clapping. Especially chisels with blades tended to be used for carving, around the five-ring pagoda in relief. In the soothing stage, chiseling or chiseling with a blade tends to be used, especially for the edges of the corner part of the stone chamber. These observations also suggest that in caves No. 2 and No. 3, the five-ring pagoda was first carved in relief on the back wall and later added to the side walls, or that the back wall was enlarged to the right side and added to the carving there.

**Key words** : Yagura (Rock cave tombs) , Five-ringed pagoda in relief, Stone work marks, SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) , LiDAR (Light Detection and Ranging)



