

SfM/MVS による石棺・石槨加工技術の検討

大村 陸
(筑波大学大学院)

はじめに

石棺・石槨といった古墳時代の石材加工物の製作技術を探る研究は、表面に残る加工痕跡の分析というミクロな視点を基盤としており、これまではその手段として主に拓本や写真が利用されてきた。しかし、近年、考古学の分野で 3D 計測が広く用いられるようになり、石材加工技術研究でも加工痕の立体形状を欠けることなく記録できることなどから、3D 計測が新たな分析手段として注目されつつある。報告者は、従来のある程度蓄積された研究手段があるなかで、3D 計測とくに SfM/MVS を用いた加工痕の分析を実践しているため、本報告を通して改めてその意義を示しておきたい。そこで本報告では、まず石材加工技術研究のこれまでの分析において重要とされてきた属性を抽出し、その属性を 3D 計測ではいかに捉えることができるかについて検討することで、新たな分析手段としての有効性を示す。そして、実際に石棺や石槨を 3D 計測で分析するなかで、報告者が実施している SfM/MVS がどのような有用性をもっているかについて報告する。

従来の分析結果からみた加工痕分析における属性

石材加工技術研究は、1983 年に和田晴吾氏が石棺製作技術における加工技法を設定した(和田 1983)以降、数 cm から 10 数 cm 程度の加工痕の観察からその加工技法を認定し、技術を検討するというミクロな視点のなかで進展してきた。そこで技法認定された加工痕は、拓本や写真、実測図によって示されていたが、近年 3D 計測による加工痕の分析(廣瀬 2015 など)という新たな手段が提示されてきている。報告者は、このような中で 3D 計測を用いた分析を積極的に取り入れていく前に、一度 3D 計測による分析を従来の分析と比較し、正当性について検討する必要があると感じた。そこで、まずはこれまでの分析方法を属性に分解することで再評価し、その属性をもとに 3D 計測による分析を検討する。

従来の加工痕の分析方法について、はじめから想定される細かな属性を羅列して検討するのではなく、具体的な分析結果をみることから探っていきたい。石橋宏氏は、古墳時代の石棺秩序と製作技術との相互的関係性を探る目的で詳細な加

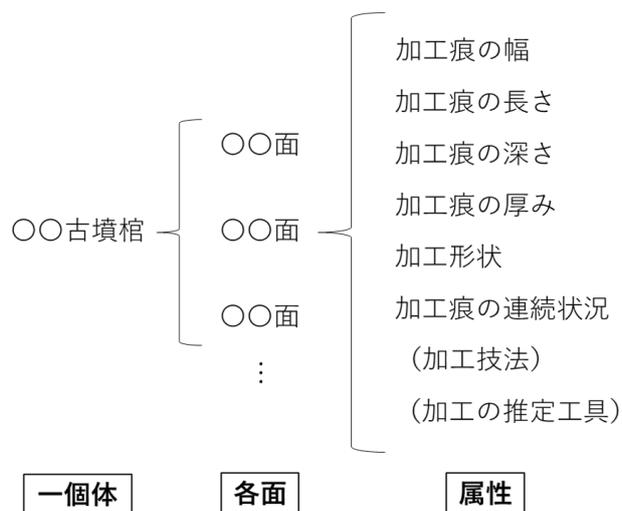


図 1 加工痕の分析における属性

工痕の分析を行っている（石橋 2013）。ここでは他の加工痕研究と共通する方法論で一般的な分析がされているため、一例として取り上げるとする。石橋氏のある石棺一個体の分析例を挙げると、「磨白山古墳の棺身外面では、側面の段より上は幅 3～4cm 程のやや刃先によるチョウナ叩き技法、段より下は凹凸と一部幅 2～3cm、長さ 2～3cm の U 字の削り痕があり、まずノミ叩き技法を行なった後に一部チョウナ削りを試しているのではないかと判断した」（石橋 2013）と書かれている。ここから、加工痕の分析では、まず石棺をある程度の面ごとに把握し、その面において、確認された加工痕の幅や長さを計測していることがわかる。そして、「やや刃先」や「U 字」として述べられているように加工痕の形状が抽象的に記述され、それぞれで認定した技法を提示している。また、石橋氏の他の分析例をみると、「刃の厚さ」（加工痕の厚み）や「ピッチ」（加工痕の連続状況）なども記述していることから、ひとまずこれらを加工痕分析における属性として考えていきたい（図 1）。

従来の加工痕分析における課題：加工技法

従来の分析結果例をみると前述したような属性が抽出された一方、ここで検討しなければならない課題が 2 点存在する。まず 1 点目は、加工技法の問題である。石橋氏の分析結果例では、計測数値や形状の表現とともに加工技法の記述があるが、この加工技法については和田晴吾氏によって別に定義付けられているため、さらに掘り下げる必要がある。そして 2 点目は、これらの分析結果が 1 枚の写真のみで示されていることである。分析のなかで実際の数値情報や加工痕の状況を述べている一方で、その証拠となっている写真は石棺の全体形状が分かるような画角にスケールを入れて撮影したものとなっており、分析情報を図上で確認できない状態にあるのは問題といえる。この点について、他の先行研究とも比較して課題を明らかにする。

では、まず加工技法における定義を再確認することからはじめていきたいが、先にも少し述べた通り、最も早く石材加工技術における加工技法を設定したのは和田晴吾氏である。和田氏は、古墳時代の石工と石棺製作技術について研究し、製作工程や技術の変遷、石工の性格など、多岐にわたる検討と考察を行った（和田 1983）。そこで加工技法についても検討しており、製作工程ごとにそれぞれの技法を設定した。ここでひとつひとつの技法の定義について再確認していくと論旨とずれてしまうため、本報告では軟質の石材で粗削りの段階や仕上げの段階の技法とされた「チョウナ削り技法」を一例に、技法の定義を再確認する。また、和田氏は 1991 年に加工技法の名称を一部変更していることから、この論文をもとに技法の定義について引用する。和田氏は、チョウナ削り技法を一言では「チョウナによる削りを指す」と表現しており、また「工具の痕跡はチョウナの刃による削り痕」で、「削りの精粗には著しい差が」あること、「この工具の刃先には丸みをもつものも、直線的なものも存在する」（和田 1991）と記述して説明している。この定義付けから先程と同じように属性の抽出を試みると、「チョウナによる削り」という特徴的な形状がひとつの属性として挙げられるかもしれないが、この表現によって明確に他の技法と区別することは難しく、技法の定義が曖昧なものとなっているために属性は十分に考えられなかった。

和田氏の論文では、このような説明とともに 2 枚の拓本がチョウナ削り技法の例として挙げられているが、この研究以降、ほとんどの石材加工技術研究で和田氏の設定した技法がそ

のまま利用され、石橋氏の研究事例のように加工技法が認定されていることを考えると、かなり不十分な定義付けであるだろう。これは別の課題といえるが、ここでひとつ、和田氏の設定した加工技法とは異なる技法を提示した研究を取り上げたい。磯貝龍志氏は、出雲東部地域の終末期古墳の石材加工技術を検討するにあたって、和田氏が提示した技法研究による畿内の技術様相とは異なる様相があるとして、技法の設定から再検討している。このなかで、再び「チョウナ削り技法」を取り上げると、「刃幅が 4cm 以上の幅広の工具によって薄く匙面をなすように表面を削った痕跡がみられる」（磯貝 2016）としている。これを和田氏の定義付けと比較すると、技法認定における条件が明記されており、技法の定義としてはより明確といえるのではないだろうか。



図 2 従来の写真による図示のイメージ

このように加工技法の定義から属性を抽出できるか検討をおこなった結果、定義の不明瞭さによる属性の不分化が明らかとなり、新たな課題が生じてしまった。ただ、和田氏の技法以外にも技法の検討を行う研究があり、今後はこのような再検証の積み重ねによって、明確な技法の定義が確立されなければならない。

従来の加工痕分析における課題：分析結果の図示

続いて、前節にて 2 点目の課題として提示した、加工痕の分析結果を従来ではどのように図示しているかについて取り扱う。石橋氏の分析結果を示すものとして 1 枚の写真しか提示されておらず、和田氏の技法設定でも 2 枚の拓本のみで例示していることは先に述べた通りである。これらを具体的にみると実際に行っている加工痕の分析結果が検証できないものとなっている。写真による加工痕の提示は、質感や色情報を示すことができる一方で、大きさや形状を示すことには限界がある。また、拓本による提示についても、陰影から加工痕を示すことはできるものの、大きさや形状、質感や色情報が示せない点で不十分といえる。また、石橋氏は写真の他にも、加工痕の連続状況を石棺の実測図上に模して図示した模式図を作成しているが、連続状況を把握できる一方で、加工痕の実際の形状は反映されておらず、確実な図化とはいえない。

このように、従来の加工痕分析では、写真や拓本、実測図、模式図などを用いて分析結果を図示してきたが、ひとつひとつをみていくと、加工痕の分析が十分に再検証できるようなものはほとんどない。正しい図化ということを考える際にも、先の属性についての検討は有効であり、加工痕分析における属性をいかに再検討可能なかたちで示せる図面を作成するかによって、より良い図示が可能となるのではないだろうか。この課題については 3D 計測による加工痕分析である程度解決できると考えており、次節で検証していく。

3D 計測は新たな加工痕分析の手段となるのか

ここまで石材加工技術研究において重視されてきた加工痕の属性を検討し、従来の加工痕分析の課題を提示してきたが、3D 計測による加工痕分析ではこれらをいかに捉えることができるのか検証してみたい。

まずは、属性について考えると、3D 計測では立体物の 3 次元情報をそのまま記録するため、作成した 3D モデルを分析することで、加工痕の幅や長さといった数値をデータ上で計測することができる。次に、加工痕の形状の分析をみると、3D データから立体形状をそのまま示すことで検証可能である。この点については、2 次元の分析では十分に行えなかった、加工痕の立体形状から石材加工工具の推定という新たな属性を提示できるかもしれない。これらのことから、3D 計測では従来の分析で重視されてきた加工痕の属性を従来通り、またはそれ以上の情報量をもって分析できるといえる。そして、これらの分析を 3 次元という情報量をもってデータ上で検証可能であるということから、一個体の資料で加工痕を全点分析しデータ解析するといった新たな方法による研究が行える可能性をもっている分析手段として評価できる。また、3D 計測によるデータ分析が進んでいけば、加工技法の定義についてもより明確な設定が可能となるだろう。

続いて、分析結果の図示については 3D データ計測でどのように行えるかを考える。先ほども記したように、3D 計測では立体物の 3 次元情報を記録することで 3D モデルを作成しており、その 3D モデルには当然 3 次元情報が含まれている。ここから、加工痕の数値を分析した結果などもスケールをもって示すことが可能である。そして、作成した 3D モデルではテクスチャーを除去して立体形状のみを示すことができ、加工痕をより見やすくする処理が行える。その他にも、作成した 3D モデルの表現の変更や、加工を行うことで、分析をより分かりやすく示すことができることも特筆すべき点といえる。このように 3D 計測による分析結果の図示では、これまでおこなわれてこなかったスケールの表示が簡便であり、加工痕の図示方法も 3D モデルを編集することで様々に行えるという点で有効である。ただ、3D 情報を 2 次元媒体で図示する際には情報を削減する必要があるが、インターネットでの 3D 情報の公開などの別媒体を用いることでこれは解決できるだろう。

石棺・石槨における SfM/MVS の有用性

上述してきた検討から、3D 計測は加工痕分析において有効な手段であることを改めて示すことができたが、最後に報告者が実際に石棺・石槨を対象に行っている SfM/MVS を用いた加工痕分析について述べたい。報告者は石棺・石槨を対象として加工痕の分析を行う際には、SfM/MVS による 3D 計測が最も適していると判断し、これを実践している。ここではその有用性について考えていくが、これは以下の前提条件による

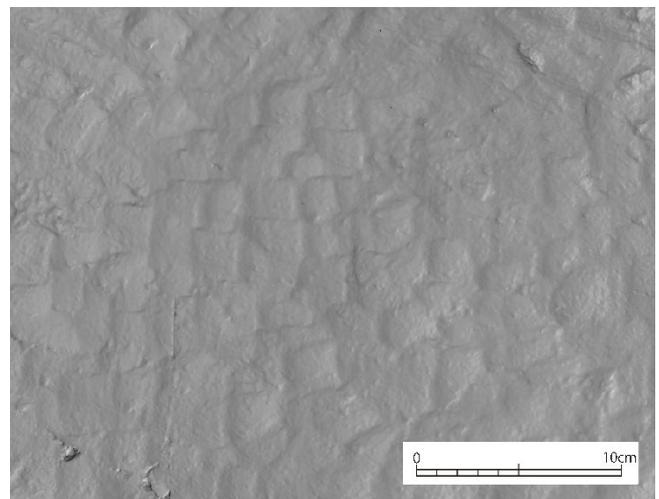


図3 3D 計測(SfM/MVS)による加工痕の図示

判断であり、これと異なる場合は他の分析手段の方が適切となる可能性があることに注意していただきたい。

前提条件として、はじめから個人的な問題であるが、レーザー計測機器を購入する研究費がないことが挙げられる。石棺・石槨を 3D 計測する際にハンディ型のレーザー計測器があれば、より迅速に直感的に 3D 計測ができるが、それを購入することが出来ないため、カメラと PC、PC ソフトのみで対象物の 3D モデルが作成できる SfM/MVS を行っている。第二に、加工痕の分析には高い精度の 3D モデルが必要となることが条件としてある。加工痕は数 cm 程度の大きさでみられることも多いことから、それが計測できる程度の精度が求められる。レーザー計測器には比較的安価なものもあり、その入手は困難でないが、加工痕の分析が可能となる程の精度は持っていない。そのため、カメラの撮影状況を変えることによってマクロな 3D モデルもミクロな 3D モデルも作成できる SfM/MVS はその点で優れているといえる。

主にこの 2 点の条件から SfM/MVS を利用しているといえるが、ここで石棺と石槨の計測対象としての特徴についても述べておく。第一に、石棺と石槨は対象として比較的規模の大きい特徴をもつものである。これらを遺物と評価する意見もあるものの、大きさは長辺部で 1~2m 程度もつものが一般的であり、石槨については高さも同程度あることを考慮すれば、撮影するには遺物のように扱うことは出来ない。具体的には、カメラを固定した状態で対象を回転台の上に乗せて回転させながら撮影するようなことはかなり難しく、対象の周りを自らが回りながら撮影していくことになる。そして、これに関連するものとして保管状況が様々であることも注意しなければならない。石棺や石槨は、野外に移転展示しているものもあれば、石棺を覆う屋根がつけられていたり、供物台がつけられていたりすることもある。これらの保管状況によって、表面の風化が進んでいたり、破壊されている箇所がみられたり、様々な影響を受けているため、このことに考慮して撮影や分析を行う必要がある。そして、もちろん石室内でそのまま保管されていることもあるが、この際には暗い環境で撮影しなければならないという問題と、石室側壁と石棺の間のような十分に撮影範囲を確保できないという問題が生じてしまう可能性があることを把握しておかなければならない。このように石棺・石槨を対象とする場合は、それぞれで異なる保管状況と資料の状況ごとに的確に対応して 3D 計測を行う必要があるのである。

以上のような条件・特徴のもとで、SfM/MVS によって石棺・石槨の 3D モデルを作成し、本報告でもそれを図示しているが、図化方法についても少し述べておきたい。まず、SfM/MVS のソフトには Agisoft 社 Metashape Standard を用いており、そこで作成したモデルを obj ファイルで出力し、オープンソースの CloudCompare にてスケールを調整している。そのモデルをもとにして、基本的には CloudCompare 上で数値の計測や、ライティングの変更によって加工痕の可視化を行い、保存したキャプチャー画像を Adobe Illustrator で編集したものが図 3~5 である。加工痕の図化についてはこれ以外の方法も多くあると思われるが、加工痕の形状を明確に示すこととスケールを付与することの 2 点を重視した結果、上記の方法で行っている。

ここまで、SfM/MVS と石棺・石槨の特徴、そして実践状況を示してきたが、SfM/MVS の有用性について考えると、従来以上の加工痕の分析が可能となる程の細かな 3D モデルが作成できることが最も大きい。先に示した通り、3D 計測は石材加工技術研究の新たな分析手段

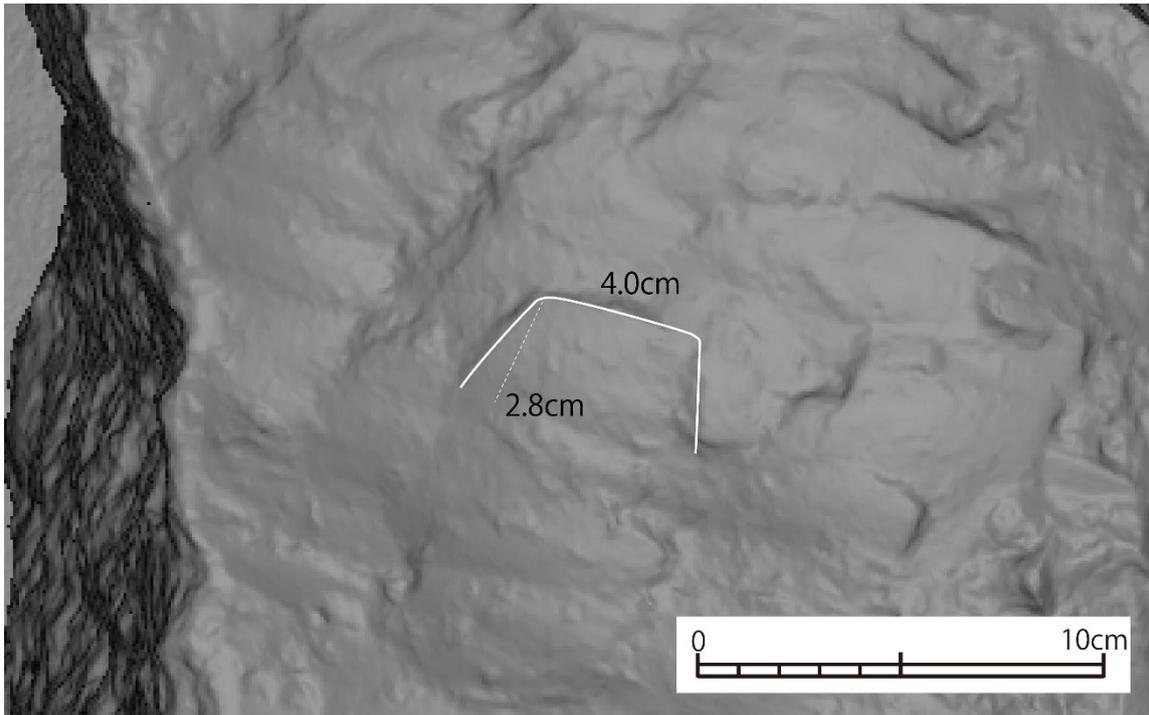


図4 SfM/MVS を用いた加工痕の形状と計測値の図示方法(一例)

となりうる方法であり、SfM/MVSでも当然加工痕の幅や長さなどの従来の属性を検討し、それを図示できる3Dモデルが作成可能である。また、従来よりも明確に加工痕の形状や計測値をスケールとともに図化できることも、拓本や写真による提示と比べて評価できる。そして、これらがレーザー計測などよりも安価で、細かな形状を復元できることも重要な点として挙げられる。このように、ミクロな視点を必要とする石材加工技術研究では、これまでの拓本や写真による分析よりもSfM/MVSによる分析のほうが優れている点が多いことから、より有用性のある分析手段といえる。今後はこうした加工痕の分析が、新たな分析手段として広く利用されていく必要がある。また、これまでの研究における加工技法の課題や、図示の課題についても、3D計測からアプローチしていくことで、早急に解決していかなければならないだろう。

最後に、本報告ではミクロな視点に焦点をおいて議論をすすめてきたが、3D計測ではマクロな視点でも有効であることを紹介して終わりたい。図5は、SfM/MVSによって作成したモデルのスケールを調整して先行研究の実測図と重ねたものであるが、比較すると全体の形状や中央に空いた穴の形状など多くの異なる点がみられる。古い実測図などにおいては形状が簡略化してかかれていることが多々あるため、全体の形状をみる際にも、実測図より3D計測によるモデルの方がより細かな形状を示す場合がある。また、3Dモデルの図示では、表面の加工状況や風化状況などを示すことができるという点でも優れているといえる。こうしたマクロの視点は、型式研究や石槨における構築研究などへとつながっていくものであり、こちらについても新たな手段として注目していきたい。

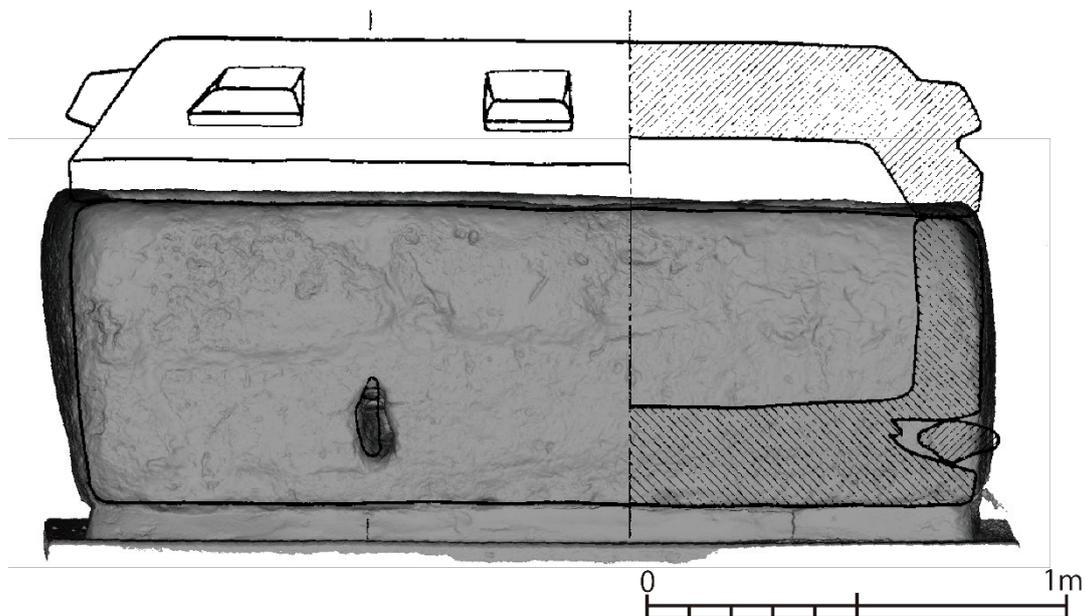


図 5 3D モデルと実測図の比較

掲載図出典

図 1～4 は、すべて報告者が作成したものである。図 2・3 で示した資料は伊豆の国市洞古墳石槨（白石の石棺）で、図 4 の資料は長泉町原分古墳棺（静岡県埋蔵文化財センター所蔵）である。また、図 5 は静岡市駿河丸山古墳羨道棺の 3D モデルを『駿河丸山古墳』（望月薫弘・手島四郎 1962）の実測図と比較したものである。これらの 3D データについては、管理する各自治体に許可を得て作成し、掲載している。

引用文献

- 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』、島根大学法文学部考古学研究室
- 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
- 望月薫弘・手島四郎 1962 『駿河丸山古墳』、静岡市教育委員会
- 和田晴吾 1983 「古墳時代の石工とその技術」『石川考古学研究会々誌』第 26 号、石川考古学研究会
- 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