

## 第4章 金工品・彫金技術の記録、計測と今後の課題

### 1 はじめに

金工品やそれに施された彫金技術を記録する方法としては、これまではもっぱら実測図と写真によってきた。しかしながら帯金具にみられる煩雑な透かし彫りや、1mmにも満たない加工痕跡を、実物大以下を基本とする従来の実測図で正確に表現することは難しい。本書のように実測図の作成方法について明記したものは少ないが（第1章3参照）、良質の図面の多くが、実物資料の詳細な観察を前提としつつも、何らかの方法で撮影された俯瞰写真から文様や彫金を描き起こしているのではないかと推測する。もちろん実物大以上の図面によって蹴り彫りの進行方向を図示する小林謙一〔1982〕の試みや、微細な加工痕跡を図化した清喜裕二らによる奈良県新沢126号墳出土品の復原模造品製作の際の基礎作業など〔古谷・清喜2002〕、個別資料に対する良い仕事はいくつも挙げられるが、そのような視点、水準で異なる地域、異なる所蔵機関に分散した資料を悉皆的に調査することが容易でないことは、想像に余りある。

一方、写真はどうか。資料化の精度に著しい格差がある実測図に比べると、比較的均質な情報を提供することは確かである。ただ、透かし彫りや文様はともかくとして、彫金技術の詳細を従来の報告書図版から観察することは難しい。特定資料に対する顕微鏡観察に始まり〔杉山1991、村上1997など〕、鈴木勉を中心とする説明的な高倍率写真の提示と再現実験によって明らかとなっていく彫金技術の詳細は〔鈴木・松林1996、勝部・鈴木1998、鈴木2004など〕、金工品研究を飛躍的に進めていく大きな原動力となったが、本研究のように文化財写真の立場から深められることはあまりなく、廣川守・内田純子らによる青銅器文様の研究で試みられた程度である〔廣川・内田・岳2014〕。

今回、栗山雅夫によって撮影された高倍率写真は、汎用性と可搬性のある装備で撮影できるものとしては現時点で最高水準の写真といってよい。無作為に、あるいは撮影者の目的意識のもとに、資料に近接して撮影された顕微鏡写真や高倍率写真と違って、広範な範囲の彫金が一枚の写真の中におさまっているため、コンピュータの画面上で特定部分を拡大して観察することが可能である点も画期的である。これによって、実物資料に対する肉眼観察では見落としがちな微細な加工痕跡を、調査後に検討することが可能となる。実際、第2章で紹介した知見の中には実物資料、すなわち一次資料の観察ではなく、高倍率写真、すなわち二次資料の観察によって気づかされた部分も多くある。第3章で示された写真撮影機材や具体的な方法は、今後、金工品の資料写真に被観察性と計測性を両立させて撮影する際の一つのモデルとなっていくものと考えている。

それでは、第1章で課題として掲げたレンズの歪みとは、実際のどの程度のものなのであろうか。本章では、高倍率写真から彫金の加工痕跡を計測する上で最も根幹となる写真の限界を把握するために実施したSfM-MVSによる三次元計測の成果を紹介し、今回撮影した写真や直接接触による実測図と比較しながら、金工品・彫金技術の記録、計測と今後の課題を整理したい。（諫早）

### 2 SfM-MVSによる金工品の三次元計測

#### （1）SfM-MVSとは

奈良国立博物館が所蔵する五條猫塚古墳出土帯金具の中で、彫金の遺存状態が比較的良好な銚6（図8-6、図版7-3）についてSfM-MVSによる三次元計測を実施した。SfM-MVSとは、SfM（Structure from Motion）and MVS（Multi-view stereo）の略称である。SfM-MVSは対象物を複数の角度から撮影した写真から三次元モデルを構築する手法で、コンピュータビジョンの分野で開発された。



写真14 撮影風景

SfM-MVS はデジタルカメラがあれば着手でき、遺跡全体から遺物の微細な痕跡まで、多様なスケールの対象に応用することができるため、近年普及が進んでいる〔文化財方法論研究会2017〕。ただし、作成する三次元モデルの精度は、解析の元データとなる写真の質と、スケールの精度や、地球上の位置を定める際の基準となる座標精度に依拠する。

他方、レーザースキャナーによる三次元計測は、対象の大きさや必要精度に応じた三次元レーザースキャナーが必要である。またガラス質や光沢感のある材質

の文化財には不向きである。くわえて高精度の機器は導入費用も高価になる傾向が強く、導入の敷居が高い。

以上のように、SfM-MVS による三次元計測は、その精度を外部の基準に依存するものの、様々な文化財に利用することができ、三次元レーザースキャナーと比較して応用の幅が広いことを指摘できる。また、導入のための初期費用や機器の維持コストの面でも費用対効果は高いと評価できる。

## (2) 撮影

撮影機材は Olympus OM-D EM-1 Mark II および30mm (35mm 換算60mm) マクロレンズとカメラ三脚、三次元デジタルモデルにスケールを入れるための定規、ホワイトバランス調整用のグレーカード、LED 照明 2 灯、このほかに資料保護のため高透過アクリル板を設置した (写真14)。撮影枚数は47枚、記録ファイル形式は Raw および jpeg で記録した。撮影時間は 9 分であった。なお、当日の撮影は山口がおこない、中村亜希子、石松智子が撮影補助をおこなった。また金田明大の助言を得た。

## (3) 解析

Adobe Lightroom で Raw データを開き、撮影したグレーカードを用いてホワイトバランスを調整し、TIFF 形式で保存した。続いて SfM-MVS 実行プログラムの 1 つ、Agisoft 社の Photoscan Pro に画像を取り込み解析した。解析に要する時間はプログラム上で設定可能な構築モデルの精緻さ次第であるが、全て最高の場合の解析時間は約 3 時間、精緻さを一段階下げると約 1 時間であった。

## (4) 結果

以上の作業を経て作成した結果が図13上段の三次元モデルである。本方法による記録と、文化財写真や実測図による記録との相違点の 1 つは、対象の三次元形状と色情報およびスケールをひとまとまりのデジタルデータとして有するため、三次元形状解析が可能な点にある。例えば、コンピュータ上で三次元モデル操作して照明位置を調整し、さらに色情報を非表示にして表面の凹凸のみを表示することにより、図13下段のように彫金の加工痕跡を強調して表示することができる。

ただそのいっぽう、今回の方法では微細部分の記録は文化財写真と比較して不十分である。また三次元モデルそのものには学術的知見・解釈はほとんど反映しないので、実測図としては機能しない。

前者の課題には、SfM-MVS に細部まで高精細に記録する深度合成を組み合わせる方法〔山口2017〕や、光源位置の異なる写真を撮影して作成する RTI (Reflectance Transformation Imaging) による詳細画像が有効である〔金田2017〕。後者には三次元モデルを下地に知見・解釈を追記する方法が有効である。現在、これらの方法の開発と洗練に取り組んでいる。(山口欧志)

### 3 SfM-MVS と文化財写真、実測図との比較

本章で取り上げるのは、記録と計測の接点を探る試みである。本章1で諫早が述べているように俯瞰写真と金工品の彫金技術研究は密接不可分の関係にある。そこで記録精度を検証するためその比較対象として、従来の直接接触による実測図に加えて近年急速に実用化が進んでいるSfM-MVSによる三次元モデルを取り上げた。三次元モデルに関しては、比較的小型の遺物計測にも向いたハンディタイプもある三次元レーザースキャナーに先行実績があるが、数百万円の機材費は導入が容易ではない。本研究の記録視座は、「どこでも誰でも記録できる機材と手法」、すなわち汎用性と可搬性と簡便性に重きを置いているため、レーザースキャナーは比較対象から外している。また、大きな撮像センサーを採用した中判デジタルバックタイプのデジタルカメラを用いることも有効であるが、レーザースキャナーと同様にレンズを含めた機材費が高額で、使用者が限定される。撮影機材構成については第3章(拙稿)で述べたが、フルサイズ一眼レフタイプのカメラが上記の目的と合致すると考えている。

以上の状況を踏まえて、ここではSfM-MVSによる三次元モデル、フルサイズ一眼レフカメラによる高倍率写真、実測図の3手法によって得た外形線をトレースして重ね合わせた図14と、高倍率写真と実測図の外形線をトレースして重ね合わせた図15をもとに、写真の計測精度の観点に軸足を置きつつ、明らかになった点を述べることにする。

まず図14の中心にある帯金具をみると、客観的な事実として三次元モデルの外形線と写真の外形線がほぼ一致していることを確認しておきたい(実測図は直接接触できる部分のみを作成している)。一方で小札の外形線にはバラつきがみられる。重ね方にもよるだろうが、傾向としては実測図の線が上部と左側で外に膨らみ、上部と右側では高倍率写真の線が内側に切り込み、下部ではそれぞれが交錯していることがわかる。SfM-MVSによる三次元モデルについては、最も計測精度が高いとされるCTスキャナーや3次元レーザースキャナーと精度検証比較がおこなわれており、三次元モデルの点群のうち約95%でCTスキャナーによる計測値との距離が±0.4mmの範囲に収まることが確認されている〔山口2016〕。今回実施した3手法の中で、三次元モデルが最も正しい計測値と仮定した場合、実測図と高倍率写真では外形部分で実寸0.5mm内外のズレが生じる箇所がある。問題は、これを誤差の範囲と捉えることができるかどうかである。写真は一点透視で画像を形成するため、原理的には特に画角周辺部で歪みが生じやすくなる。この歪みの影響を少なくするため、今回の撮影では長焦点レンズを使用し、レンズ補正を併用することで極力歪みを低減させる撮影方法をとっている。

今回の場合は、SfM-MVS用写真と高倍率写真の撮影日や機材が異なり、また遺物の設置角度が撮影角度に微妙な影響を与えている可能性が考えられた。具体的には、高倍率写真撮影時には平らな台の上に遺物を置き、その下に支えとなる小さな消しゴム片を挟みこんでできる限り厳密に水平を出そうと試みたのに対して(写真1・2)、三次元モデル用の撮影では斜面台に直置きしている(写真14)。この差が形状に影響を与えているのか確認する必要があると考え、支えを置いて水平にしたものと直置きしたものを改めて撮影した。両者のズレを検証したところ、わずかであるが支えを置いて水平にした方が三次元モデルに近いものとなった。また、実測図についても両者を描き分けることを試みたが、鉛筆の描写限界を超えてしまい結果的には同じ図となった。

上記の手順を踏んで作成した図14では、先述のように帯金具に関しては三次元モデルと高倍率写真の外形線がほぼピタリと重なっており、写真記録の計測精度がほぼ期待されるものに収まっていることを指摘できる。なお、広角レンズやズームレンズを用いた場合、程度の差はあるものの何らかのレンズの歪みが生じることになる。本研究では、長焦点レンズにより、歪みの少ない画像を得て、レンズ補正による微調整をおこなう立場をとっており、歪みの影響はかなり少ないものと想定している。三次元モ

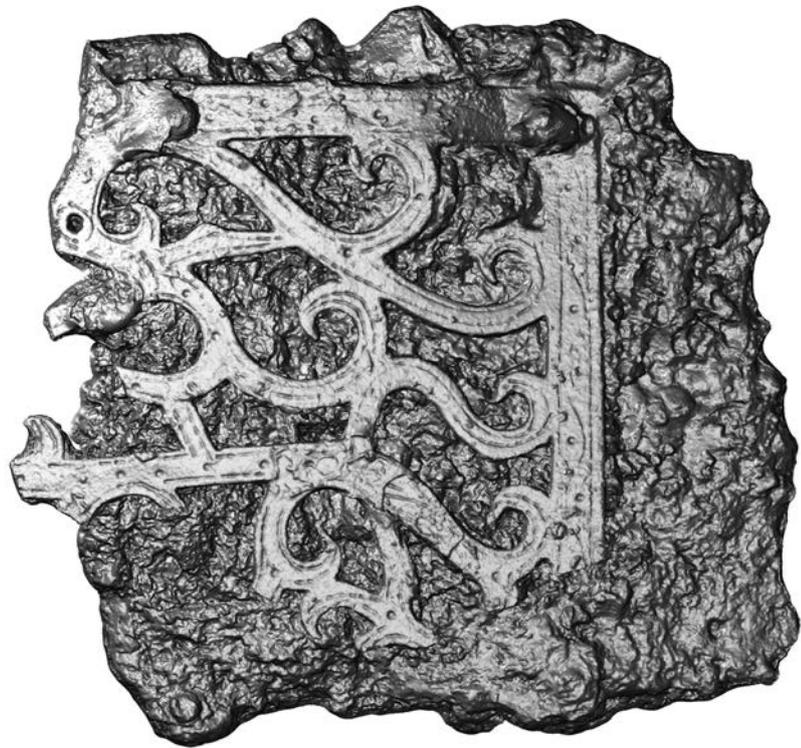
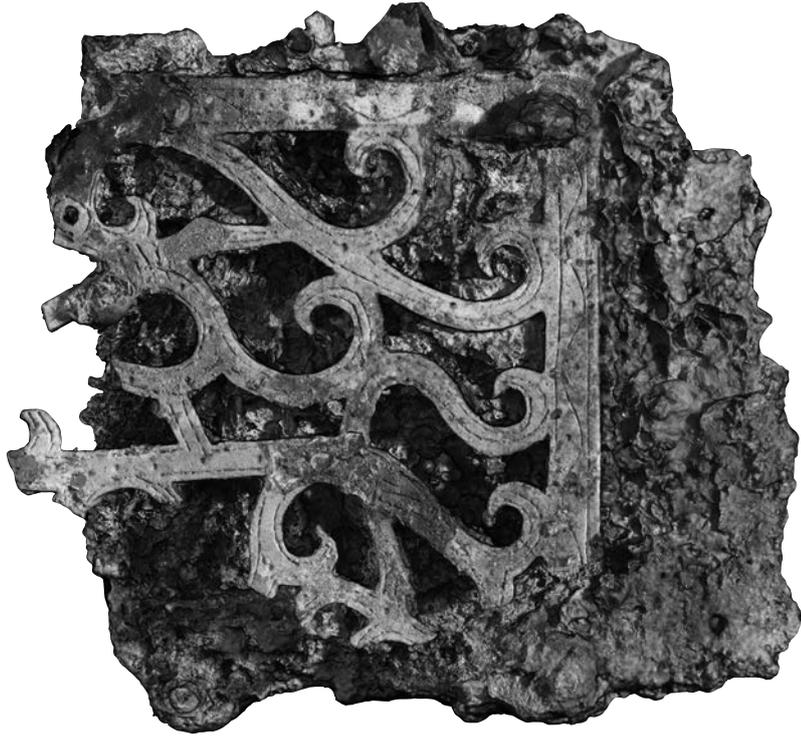


図13 SfM-MVSによる三次元計測画像 ※2倍 五條猫塚古墳出土土鍔6 (奈良国立博物館所蔵)  
上段：テクスチャー有り 下段：テクスチャー無し、斜光照明 (MeshLab を用いて作成)

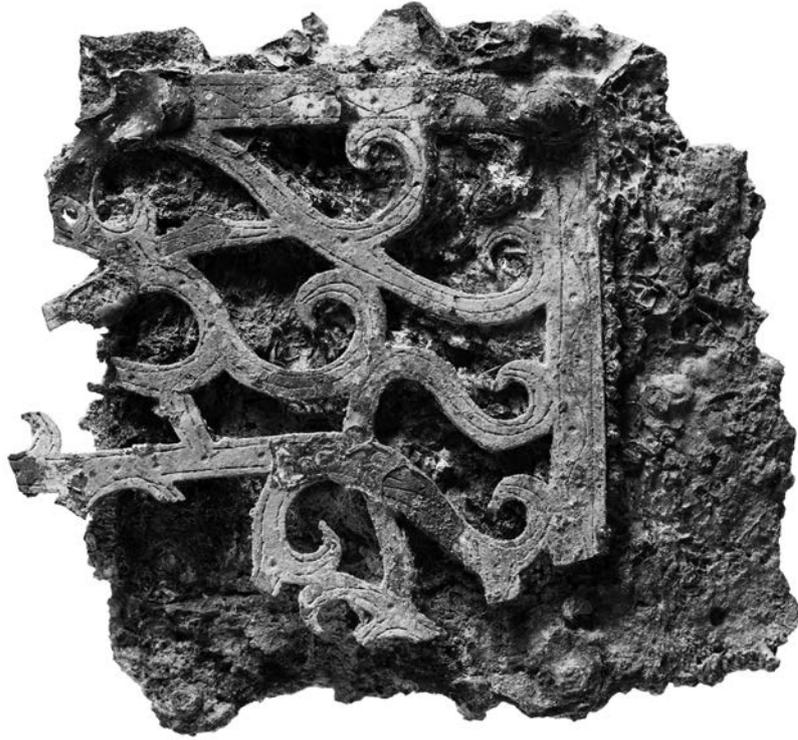


写真15 高倍率写真 ※2倍 五條猫塚古墳出土土鍔6 (奈良国立博物館所蔵)

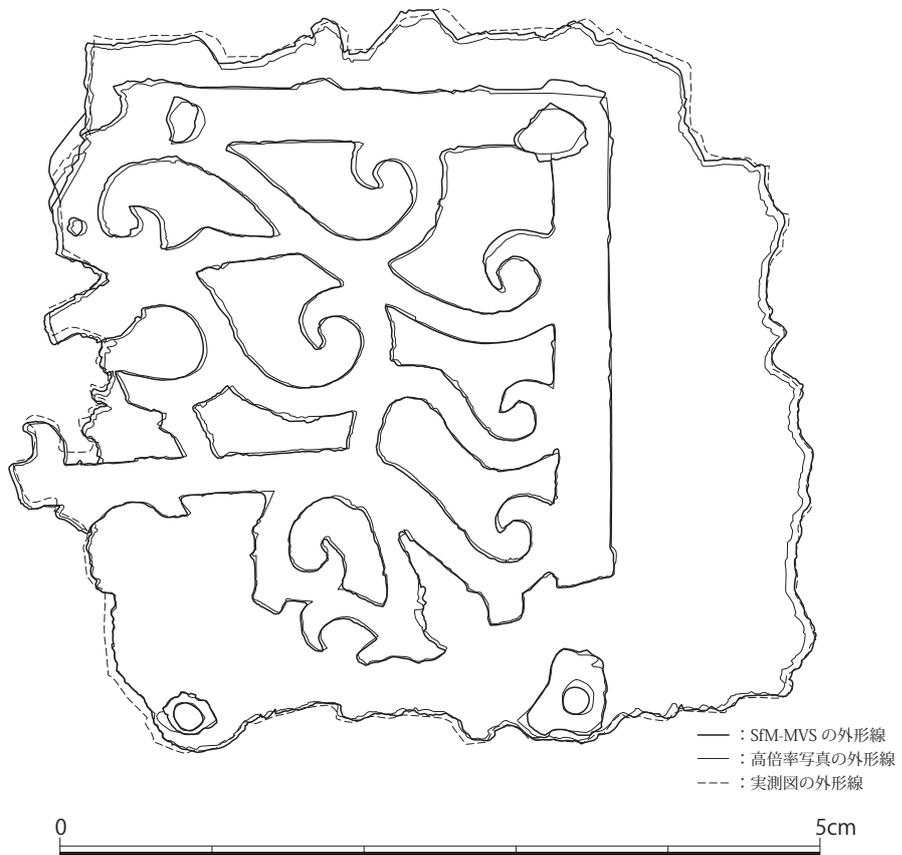


図14 外形線の比較① ※2倍 五條猫塚古墳出土土鍔6

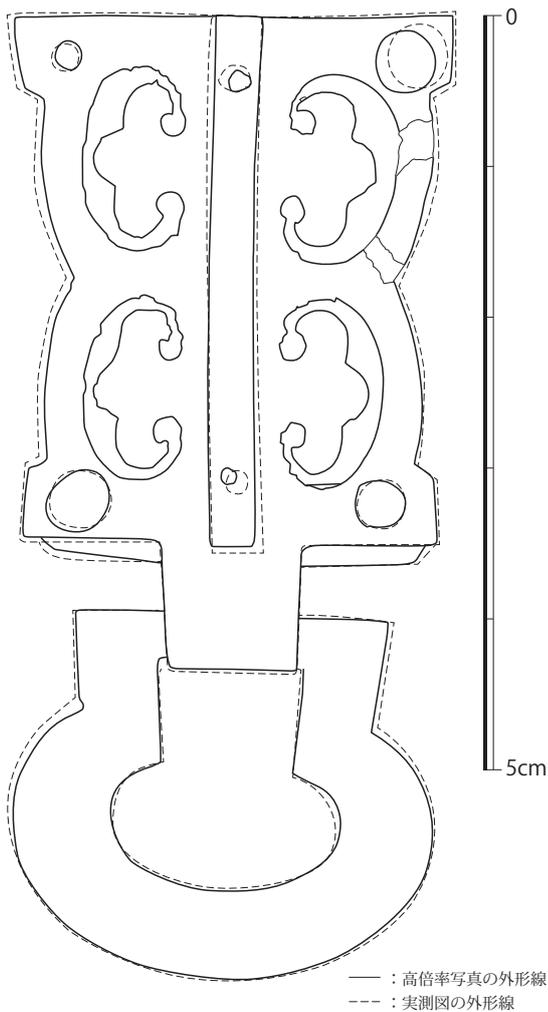


図15 外形線の比較② ※2倍 新山古墳出土鏡13

デルと写真で小札外形線のズレが生じる原因として、三次元モデルでは外形縁辺の立面サイドにあたる部分まで図化している可能性が考えられる（逆に言えば、写真ではレンズ中心から離れた縁辺部の立面サイドまで見えていない）。また一緒に写し込んだスケールから寸法を割り戻す際の微妙な数値の違いが、影響を与えている可能性もある。前述したように誤差をどの程度と捉えるかは厄介な部分であるが、少なくとも画角中心の計測精度が高いことは確実である。小札外形線については、即断を避けておきたいというのが本音であるが、実測図と比べると十分な精度を有しているのではないだろうか。このことを担保するものとして、最後に高倍率写真と実測図の外形線を重ねた図15を提示しておきたい。両者を比べると、形状的に傾きの影響を受けにくい上下部分で一致していることがわかる。

今回例示した資料に限らず、計測精度を確保するためには、いかにして撮影時に遺物を水平におくか、遺物とレンズ面を正対できるかが、その形状に影響を及ぼす可能性が高いと改めて認識したことを明記しておきたい。記録と計測の境界は、デジタル化の進展によって今後ますます垣根が取り払われていくものと思われる。写真については、マルチショット機能を搭載した一眼レフカメラの使用や中判センサーの標準化など高精度化を図る余地は未だあるといえよう。三次元

計測についても、山口が述べているように深度合成の利用が高精度化のカギになるだろう。こうした精度に対して実測図はどこまで追従し存在意義を見いだしていくのだろうか。（栗山）

#### 4 おわりに

本章では同一遺物に対する SfM-MVS による三次元計測、高倍率写真、実測図の外形線の比較を通じて、金工品・彫金技術を記録、計測する上での課題を整理した。結果として、1mmにも満たない彫金の加工痕跡を記録、観察する手段としては、現時点では今回の方法で撮影された高倍率写真に一日の長があることを確認した。また SfM-MVS の外形線と、高倍率写真の外形線がほぼ一致するという事実は、今回の撮影対象と撮影方法に関してはレンズの歪みは無視できるレベルにあることを意味し、高倍率写真にもとづく彫金の加工痕跡の計測値の信頼性を担保するものといえよう。

一方で図14にみられた0.5mmという外形線のずれの原因に、結局のところ SfM-MVS も高倍率写真も、遺物をどのように設置し、どのように撮影し、どのようにして一緒に写し込んだスケールから寸法を割り戻したのか、さらには前者の場合、どこを正面とみなして二次元データを作成したのか、といった極めて個別かつアナログな問題が潜んでいることが浮き彫りとなった。研究者の必要な情報を取捨選択して伝えられる最も簡便性の高い記録方法である実測図を含めて、資料の観察や目的意識の共有の程度によって、その精度は大きく左右される。三者の長所と短所を見極めつつ、相互に検証できるかたちで併用する、必要に応じて使いわける、これが現状では最善の記録方法であろうと考える。（諫早）