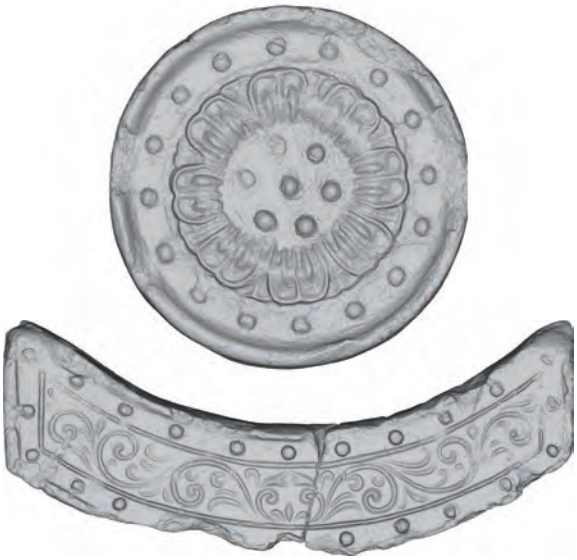
平成 31 年度～令和３年度科学研究費（学術研究助成基金助成金（基盤研究Ｂ））
研究成果報告書（課題番号：19H01355）

３次元データによる
瓦の同笵認識技術の基礎的研究

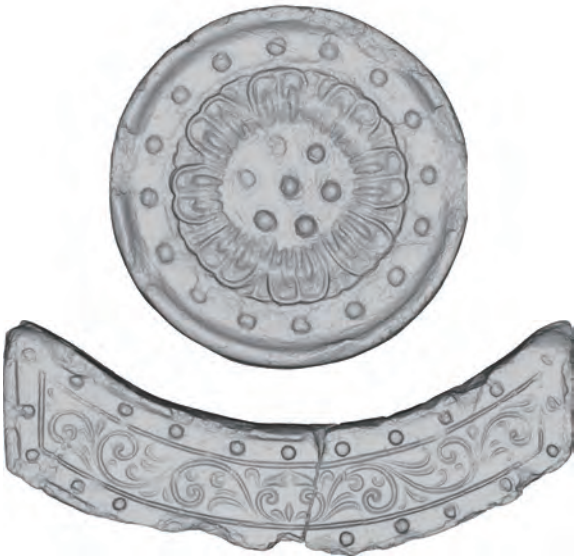


2022 年 3 月

研究代表者
独立行政法人国立文化財機構　奈良文化財研究所
林　正憲

平成 31 年度～令和３年度科学研究費（学術研究助成基金助成金（基盤研究Ｂ））
研究成果報告書（課題番号：19H01355）

３次元データによる
瓦の同笵認識技術の基礎的研究



2022 年 3 月

研究代表者
独立行政法人国立文化財機構　奈良文化財研究所
林　正憲

例　　言

１．本書は日本学術振興会科学研究費（学術研究助成基金助成金（基盤研究（B））の交付を受けて実施した研究の成果報告書である。

課題名：３次元データによる瓦の同笵認識技術の基礎的研究　（課題番号：19H01355）

研究代表者：林　正憲（独立行政法人国立文化財機構　奈良文化財研究所
都城発掘調査部（飛鳥・藤原地区）　考古第三研究室長）

研究経費	総額	直接経費	間接経費
平成 31 年度／令和元年度	3,770,000	2,900,000	870,000
令和２年度	6,630,000	5,100,000	1,530,000
令和３年度	6,630,000	5,100,000	1,530,000
合　　計	17,030,000	13,100,000	3,930,000

２．研究成果

・本　書

・三好佑佳　2021「SfM-MVS を用いた瓦の研究　－西大寺出土軒平瓦 6732M 型式と同型式派生系軒平瓦の比較－」『奈良大学大学院研究年報』26、pp. 39-45

・岩戸晶子・道上祥武　2021「天神山瓦窯周辺出土鴟尾の検討」『奈良文化財研究所紀要 2021』、pp. 22-23

・今井晃樹　2021「昭和 38 年一条院調査出土の軒瓦」『奈良文化財研究所紀要 2021』、pp. 180-183

・岩戸晶子　2021「３次元モデルを活用した平城宮出土唐花文鬼瓦の復元」『奈良文化財研究所紀要 2021』、pp. 194-195

・中村亜紀子・今井晃樹・林正憲・岩永玲　2021「三次元計測データで比較する同紋瓦と同笵瓦－東大寺式軒丸瓦の検討－」日本文化財科学会第 38 回大会ポスターセッション

・中村亜紀子・今井晃樹・林正憲・岩永玲　2022「「瓦様」と瓦笵　－東大寺式軒丸瓦における同紋瓦・同笵瓦の再検討－」『奈文研論叢』第３号、pp. 1-37（本書に再録）

・石田由紀子・新尺雅文・中村亜希子　2022「変形忍冬唐草文軒平瓦 6647C の再検討」『奈文研論叢』第３号、pp. 133-152（本書に再録）

３．本書は、中村亜希子（奈良文化財研究所埋蔵文化財センター客員研究員）が第２章１を、山口欧志（同センター遺跡・調査技術研究室研究員）が第２章２を、第３章は上記成果のうち論文２本を再録し、それ以外の部分を林正憲が執筆・編集した。執筆分担は各章・項の末尾にも示した。

目　　次

第１章　研究の現状と課題
１．本研究の目的 …… 1
２．研究体制と実施状況 …… 3
３．「同笵」と「笵傷」に関する研究史 …… 4

第２章　SfM-MVS による計測方法について
１．Metashape pro 版を使用する瓦当文様の三次元計測方法 …… 11
２．異なるフォトグラメトリ実行プログラムで構築した瓦の三次元モデルの比較 …… 23

第３章　三次元計測データを応用した考古学的研究
１．「瓦様」と瓦笵　－東大寺式軒丸瓦における同紋瓦・同笵瓦の再検討－ …… 29
２．変形忍冬唐草文軒平瓦6647C の再検討 …… 65

第４章　三次元計測データの公開活用に向けて
１．現状の課題 …… 85
２．奈文研ホームページ上での公開 …… 85
３．Sketchfab での公開 …… 87

第５章　総括と展望 …… 89

巻末図版：東大寺式軒瓦・計測図一覧 …… 91

第１章　研究の現状と課題

１．本研究の目的

1-1.「同笵」研究の課題と SfM－MVS の導入について

「同笵」研究の課題　奈良文化財研究所（以下、「奈文研」と略称する）では、平城京及び藤原京において継続的に発掘調査をおこなってきた。その過程で大量に出土する軒瓦は、これら都城遺跡の造営過程や構造の変遷を明らかにする上で欠くことのできない重要な資料である。また、同じ文様構成の瓦や、同じ型（あるいは「笵」）で製作した瓦（以下、これらを「同笵瓦」と称する）が日本各地の遺跡でも出土しているため、日本における古代瓦研究の基準資料として、集成・分類の成果である型式一覧を作成・更新してきた。最新の型式一覧には、軒丸瓦が 100 型式 312 種、軒平瓦が 84 型式 288 種、計 184 型式 600 種が所収されている（奈文研 1996）。

現在、日本の考古学における瓦の記録方法は、拓本と断面の実測図、写真が主な方法であるが、これら従来の手法では色調や質感のほか、瓦の相対年代を確定するための重要な証拠である型の傷（あるいは「笵傷」）などの微細な凹凸を十分に表現することができず、特に「同笵瓦」を認定する際には、実際に実物資料を並べて比較する以外、効果的な方法がない。さらに「同笵瓦」の認定自体も、観察者の経験値に依るところが大きく、客観的・数値的にどの程度相似するかが提示できなかった。また、比較したい資料の所在が別の機関、特に遠方の機関の場合、実物照合の実施自体が困難であり、機会が限定されるという問題もある。

このように、瓦研究においては時期・年代を決めるために重要な軒瓦の瓦当文様を、いかに客観的・効果的に計測・提示するかが、ひとつの大きな課題となっていた。

SfM－MVS の導入について　今世紀に入って以降、文化財の計測法としてレーザースキャナーによる三次元計測が急速に増加してきたことから、瓦当の三次元計測を上述の課題を解決する手法として考えたが、レーザースキャナー本体や解析ソフトが非常に高額であるとともに、計測にかかる時間・生じるデータ量ともに限界があったため、一般的な出土遺物である瓦の計測には、より汎用性の高い手法を模索する必要があった。

しかし近年になって、レーザースキャナー等の高額な機材や解析ソフトを必要としない SfM-MVS（Structure for Motion and Multi-View Stereo）の技術が普及するようになった。これは、カメラで撮影した画像から三次元データを構築する技術であり、高額なレーザースキャナーが不要で、かつ解析ソフトも比較的廉価とあり、汎用性が高い。しかも非接触で記録が取得可能であり、文化財の保護という観点からも有用である。

奈文研の埋蔵文化財センターでは、遺跡や出土遺物の調査技術の開発・応用に向けて、導入可能な価格帯かつ効果的な遺跡・遺物の記録法について開発・検討をおこなってきたが、本研究で扱う SfM-MVS 技術についても、早くから試行を重ねてきており、近年では、SfM-MVS に関するワークショップや研修を積極的におこなってきた。瓦に関しても、センサーサイズの異なる様々なカメラで画像を撮影し、解析にかけたところ、考古学の分野で調査・報告の際に日常的に使用する程度のデジ

タル一眼レフカメラで撮影した画像から、SfM-MVS 技術によって、笵傷による微細な痕跡を反映した三次元データを取得しできることが判明した。そこで、研究代表者及び研究分担者は瓦の計測方法の検討を開始し、これまでにも撮影・解析の試行をおこなうなど、文様や微細な笵傷の痕跡を含む瓦当の三次元データを効率的に取得する手法を検討してきた（中村 2017; 中村・山口 2017; 山口・中村ほか 2017; 中村亜希子・林　正憲 2018a,b など)。

このように、カメラで撮影した画像と解析ソフトで三次元モデルを構築する SfM-MVS のソフト(Agisoft Metashape)が学界で流通するようになると、地方自治体や大学でも、特に遺跡・遺構の計測に積極的に用いられ、三次元による資料の記録は進んだものの、記録したデータを用いた考古学的研究はまだ極めて少ないのが現状である。

本研究の特徴　本研究の最たる特徴は、SfM-MVS で高精度に取得した瓦当の三次元データを分析することによって、従来の瓦研究で習慣的に「同笵瓦」と表現されてきた瓦を、どのように客観的に検証・修正し提示できるか、という点にある。そこで、平城京・藤原京出土瓦を題材として精密な測定結果から従来の同笵認定の軌跡を検証することによって、三次元計測による同笵認定のモデルケースとなるべく取り組み、他地域にも導入できるよう手法を確立することを目指した。

1-2. 本研究の目的

以上の現状と課題を踏まえた上で、本研究の主な目的を整理すると概ね３点にまとめられる。

先学における「同笵」認定の検証と改善　先学の「同笵」認定は、観察者の経験則に依拠していた部分が多いが、三次元計測による客観的データに基づいて、どのような特徴をもつ資料を「同笵」として認定できるのか、学史的な検討・計測値の分析を通して検討する。それをもとに、従来の同笵認定の客観性を検証しながら、新たな同笵認定の基準を設定するための試みを検討する。

「同笵」認定の利便性・客観性の向上　日本の古代瓦研究の基準資料である『型式一覧』掲載資料を三次元デジタル化することによって、従来に比べ、文様の特徴や笵傷による微細な痕跡を明確に提示する。これによって、小片資料や他地域出土資料の「同笵」認定が容易となり、研究の利便性が増す。さらには、従来指摘されてきた笵傷の進行や摩耗具合、作笵方法の比較など、これまで研究が困難であった分野についても研究を進めることができる。そして、将来的に本研究の成果をデータベースとして研究者・一般に公開できるよう、準備を進める。

瓦の記録法としての SfM-MVS による三次元計測の普及と研究法の開発　日本の文化財調査・研究において、SfM-MVS による瓦の三次元計測を普及させる。『型式一覧』掲載資料の三次元計測について、その手法や計測データ、さらには新たな研究法を提示することによってその利点を示し、日本の瓦の記録法のひとつとして SfM-MVS による三次元計測を普及・定着させる。そしてデジタルデータ上での比較検討を経て、自動的に同笵認定ができるシステムの開発に向けた研究の端緒とする。

２．研究体制と実施状況

2-1. 本研究の研究体制

本研究は研究代表者たる林が全体の統括を行うが、大きくは考古学チームと SfM-MVS チームの２班体制に分かれて実際の作業を分担し、互いに情報共有及び連携を行いながら研究を実施した。

考古学チーム　考古学チームは奈文研・考古第三研究室が管理する平城京・藤原京出土軒瓦の基準資料（＝『型式一覧』掲載資料）の三次元計測を実施し、そこから得られたデータをもとに、考古学的な応用方法や従来の方法論との比較などの検討を行った。研究分担者は以下のメンバーである（役職名は令和４年３月現在のものである）。

〇清野孝之（都城発掘調査部副部長）、今井晃樹（都城発掘調査部（平城地区）考古第３研究室長）、森先一貴（都城発掘調査部主任研究員、令和２年度より参加）、岩永玲（都城発掘調査部考古第３研究室研究員、令和２年度より参加）、道上祥武（都城発掘調査部アソシエイトフェロー、令和３年度より参加）、岩戸晶子（企画調整部・展示企画室長）、石田由紀子（飛鳥資料館主任研究員）、清野陽一（飛鳥資料館研究員、令和元年度まで参加）

このほか、三次元計測の実施とデータ分析に係る研究協力者として、以下の２名が参加した。

〇三好佑佳・松島隆介（ともに奈良大学大学院生）

SfM-MVS チーム　SfM－MVS チームは軒瓦の三次元計測に際して、効率的かつ効果的な手法の検討を行う。具体的には計測機器やソフトウェアの検討及び選別、それらを用いた計測手法の開発・普及、同笵認定に関する分析手法の開発などを担当した。

〇金田明大（埋蔵文化財センター長）、山口欧志（埋蔵文化財センター遺跡調査技術研究室研究員）、中村亜希子（埋蔵文化財センター客員研究員）

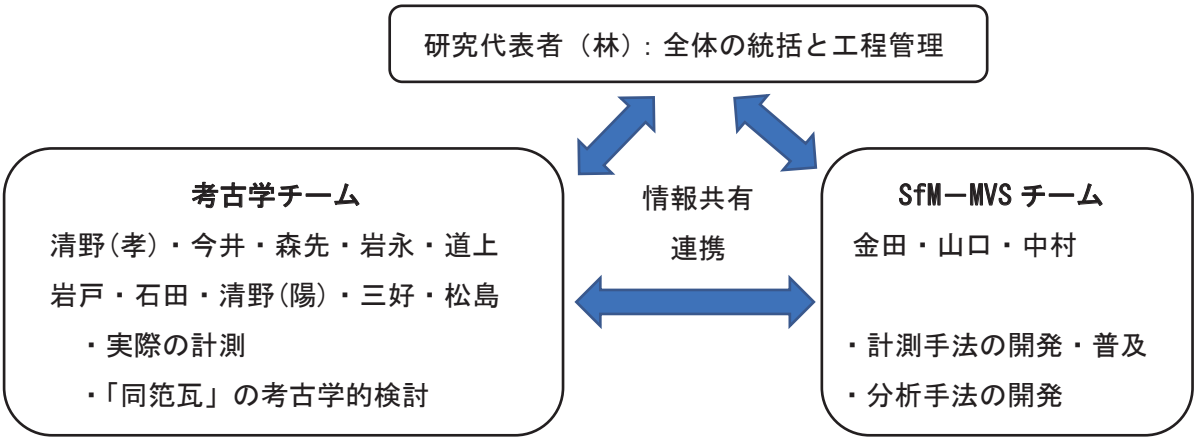


図１　本研究の研究体制

2-2. 本研究の実施状況

本研究は平成 31 年度から令和３年度までの３ヵ年にかけて実施した。各年度の実施状況は以下の通りである。

平成 31 年度及び令和元年度　まず初年度においては、計測に必要な機器等を購入し、基礎データを

収集するために、『型式一覧』掲載資料の三次元計測を順次開始した。それと併行して、計測方法やソフトウェアを用いて試行錯誤を行い、効果的かつ汎用性の高い瓦の三次元計測法の確立を目指した。さらに、得られた計測データと実資料の照合を行い、計測方法へのフィードバックを行った。

平成 32 年度　前年度から継続し、基礎データを収集するとともに、瓦当の三次元計測データを用いて同笵瓦をいかに客観的に抽出するかについて、Cloudcompare などのソフトウェアを用いた分析方法を検討した。そしてその結果をもとに、新たな考古学的成果を導き出すことを目標とした。

平成 33 年度　最終年度については、引き続きデータの収集を行いながら、これまでの２年間で明らかとなった研究成果を論文として公表するとともに、三次元計測法についても現状での方法論について取りまとめを行った（これらの一部は本書に収録）。さらには、巻末図版に掲載した東大寺式軒瓦の計測図について、二次元データ及び三次元データの一般公開を行った（詳細は第４章参照）。

2-3. 本書の構成

本書は本研究の成果報告にあたり、第１章にて研究目的や研究体制を報告するとともに本研究のキーワードである「同笵」や「笵傷」などの研究史を整理し、第２章において分析の基礎となる三次元計測の具体的な手法をまとめる。そして第３章では三次元計測で得られたデータを元に考古学的検討を行った研究成果のうち、２例を再録する（他の成果については例言に記した）。そして第４章で計測データの公開活用に向けた取り組みを紹介し、最後に研究の総括とともに今後の課題について記す。本書が古代瓦研究に投じた一石となれば望外の喜びである。

３.「同笵」と「笵傷」に関する研究史

3-1.「笵型」と「同笵」の使用について

瓦研究では「笵型」や「同笵」なる用語が多用されており、その定義に関しても冒頭に述べたとおり、軒瓦の瓦当を作成する型を「笵」と称し、同一の型で作られた瓦当を有する瓦を「同笵瓦」として位置づけている。

しかしながら、古代瓦の長い研究史において「笵型」や「同笵」なる用語がどのように成立したかについては、これまで整理されてこなかった。そこで、膨大な瓦研究の中から草創期の論考を抜粋し「笵型」や「同笵」、「笵傷」なる概念と用語の成立過程についてまとめておきたい。

1920 年代　この時期における瓦研究については建築学者であり、考古学者でもあった関野貞が先駆的な役割を果たしている。関野がまとめた『考古学講座　瓦』の中で、法隆寺所用軒瓦の製作に際して「巴瓦や唐草瓦の木型を彫刻する」と記述している（関野 1928: 46 頁）。ここで重要なのは筑紫都督府、いわゆる大宰府出土瓦と観世音寺出土瓦を比べ「殆ど同型より作られたもの」（同 108 頁）ないし「同一型」（同 132 頁）と指摘している。また、大官大寺と大安寺から出土した軒平瓦についても「同一型から作られたやうに見ゆる」（同 137 頁）とし[1)]、さらには平安時代の興福寺と平等院鳳凰堂の軒丸瓦が「同じ瓦型より造られた」とも表現しており（同 231 頁）、「同笵」という用語でこそない

ものの、同笵の認識を最初に示した研究といえる。

1930 年代　この時期に顕著な研究活動を行っていたのが木村捷三郎である。木村は初期の論文において、栗栖野瓦窯から出土した緑釉瓦について、平安京大内裏跡発見品と伝平等院出土品と「同一の型による同文品である」と表現する（木村 1930: 99 頁）。これは同笵との意であろうが、この段階では「同笵」の用語は用いられていない。その後の論文でも、「同型」（木村 1937: 215 頁）や「同一雌型」（木村 1939: 105 頁）との表現があり、いずれも同笵と同義として用いられている。

そしてもう一人、後の瓦研究に大きな影響を与えることになる藤澤一夫の諸論考を見てみると、四天王寺出土軒瓦について触れた 1930 年代の論考の中で「同型によって製作されたものが法隆寺よりも發見されてゐる」と述べており（藤澤 1936: 338 頁）、木村と同様の認識を持っていたことが窺える。

これに対して島田貞彦は、いわゆる現今の巴瓦、すなわち軒丸瓦の製作技法の説明に際して、「笵型」の使用に言及しており、管見の限りでは「笵型」を初めて用いた事例といえる。さらに島田は「一般に木型のものが主用されてゐる」（島田 1935: 30 頁）と述べており、材質を説明する「木型」と文様を表出する「笵型」を明らかに区別しながら用いている点は興味深い[2)]。

1940 年代　この時期になると藤澤は島田と同じく「笵型」（藤澤 1941: 245 頁; 藤澤 1949: 236 頁）を使用するようになるが、この段階では「同じ笵型」を指す際には「同笵」ではなく「同型」（藤澤 1941: 242 頁など; 藤澤 1949: 250 頁）を使用するなど、1930 年代と同様の傾向を示していることがわかる。

1960 年代　1950 年代には「笵型」に関する顕著な研究は見受けられないが、1960 年代に入ると藤澤が「笵」の字の代わりに「範」を用いた「範型」（藤澤 1961: 72 頁など）ないし「同一範型」「同範作出」（藤澤 1968: 112 頁）という用語を用いており、「同じ笵型」の表現として「同型」から「同範」への移行が生じていることがわかる。そして 1967 年になると再び「同范」（藤澤 1967: 290 頁など）の表記に戻っている。

そして 1940 年代以降、執筆活動を停止していた木村が 1969 年にまとめた論文では、これまでの「同型」という用語から、「瓦范」（木村 1969: 522 頁）や「同范」（同 523 頁など）といった用語への転換が図られているのがわかる。このように 1960 年代以降、多少字句の差異はあるものの、「瓦笵」や「同笵」などの表現が定着していく状況が窺える。

1970 年代　1970 年になると稲垣晋也はこれまでの研究を総括するかのように、「古瓦の場合、型式とは一個の范型から作り出された作品」と述べ、同一の笵型で製作された軒瓦を同一型式として認識するという方向性を決定づける（稲垣 1970: 210 頁）。これ以降の瓦研究は、この基本方針に則っていると言っても過言ではない。特に「４桁の数字＋アルファベット」によって軒瓦の型式を表示する奈良文化財研究所の方式は、稲垣の方針を定型化しつつ、より発展させたものといえる。

この時期に注目すべきは、「笵傷」の使用が始まることである。ただし 1970 年代以降、古代瓦の論文数が飛躍的に増大することから、そのすべてに目を通すことが適わず、初出論文を探り当てることができなかった。しかしながら、後述の奈良文化財研究所の刊行物の状況を考慮に入れると、1970 年代中頃から使用されていることは確認できる。

例えば、多賀城の創建瓦の製作技法について論じた進藤秋輝・高野芳宏・渡辺伸行の論考におい

て、軒丸瓦の箇所で「范きず」の表現が散見される（進藤・高野・渡辺 1975: 54 頁など）。発掘調査報告書に関しては、古代学協会が刊行した平安宮大極殿跡の発掘調査報告の瓦塼類の説明文の中に「笵傷」が多用されている（(財)古代学協会 1976: 15 頁など）。その平安宮を含む平安京の古瓦を多数収録した『平安京古瓦図録』（平安博物館編 1977）では、概説及び図版解説等において「笵傷」が使用されている（同 320 頁など）。

このように、1970 年代中頃以降、現在の瓦研究者が認識する「笵型」や「同笵」、「笵傷」の概念がほぼ出揃ったことがわかる。

3-2. 奈文研[3)]における「同笵」と「笵傷」の使用

それでは次に、本研究の基礎をなす平城京・藤原京出土瓦の研究と分類を行ってきた奈文研の研究成果において、「同笵」と「笵傷」がどのような経緯で用いられてきたのか、概観する。

1950 年代　奈文研が初めて刊行した発掘調査報告書である『飛鳥寺發掘調査報告』を見ると、既に「笵型」「笵製作時」「笵の痕」などの瓦笵に関する用語が用いられており、「同范」についても使用が認められる（奈文研 1958: 32 頁）。続く『興福寺食堂發掘調査報告』でも「笵」（奈文研 1959: 17 頁）と「同笵」（同 36 頁）が用いられており、瓦笵の存在に関しては共通認識であったことがわかる。

1960 年代　ところがこれ以降、『平城宮発掘調査報告Ⅲ』（奈文研 1963）までは「笵」や「同笵」という用語は用いられておらず、「同型式」という用語のみが確認される。特筆すべきは、軒丸瓦に「４桁の数字＋アルファベット」による型式表記を導入した『平城宮跡第一次　伝飛鳥板蓋宮跡発掘調査報告』においても、あくまで型式を表すものとしており、瓦笵との関係を示すような説明がなされていない点である（奈文研 1961）。そのため、藤原宮から持ち込まれた 6281 型式や 6641 型式について、藤原宮から「同型式」のものが多く出土する、といった記述に留まっているのである。

「同笵」が再び使用されるのは、『奈良国立文化財研究所年報 1965』以降である。その中に掲載されている秋篠寺の調査概要の中で、出土瓦が平城宮及び東大寺出土瓦と「同笵」との記述がある（奈文研 1965: 10 頁）。一方『平城宮発掘調査報告Ⅳ』では、6282H 型式の説明箇所でその文様が崩れていることから、「笵はかなりくずれている」との記述があるものの（奈文研 1966: 21 頁）、「同笵」という用語はなく、従来と同様に、藤原宮式軒瓦である 6643 型式について「同型式のものが藤原宮から出土」と記述している（同 22 頁）。

1970 年代　1972 年になると、奈文研が報告の執筆を行った『平城京羅城門跡発掘調査報告』にも「笵型」（大和郡山市教委 1972: 20 頁など）とともに、「同笵瓦」なる用語が確認できる（同 34 頁）。さらにもう１点重要なのは、笵の彫り直しについても言及していることである。報文では 6316 型式について、１＋４の蓮子だった Da が１＋８へと彫り直された Db の存在や、6710 型式で上下外区珠文帯に×文を配していた Aa から、全体を彫り直して×文を除いた Ab について詳述している（同 21 頁）。

また『平城京朱雀大路発掘調査報告』では、「同笵品」（奈良市 1974: 20 頁）とともに「笵のキズ」という表現が使用されており（同 11 頁）、奈文研が関係した報告における「笵傷」なる概念の初めての使用例となる。具体的には、先に触れた 6316Da と Db が同笵であることを「笵のキズ」の存在によって確認できるとしている（同 11 頁）。

これが『平城宮発掘調査報告Ⅵ』になると、「同笵」の用語は瓦の報文の冒頭から多用されている（奈文研 1975： 33 頁など）。しかも 6011 型式の説明において「同型式が難波宮から２種発見されているが同笵ではない」とあるように、「同型式」と「同笵」とを明確に区別していることが明らかである。また「同笵例」などの用語も見られることから、現在我々の認識する「同笵」とほぼ同様の概念をもって用いられていたと判断して差し支えない。

一方、笵傷については『平城宮発掘調査報告Ⅵ』では「笵の割れ目」（奈文研 1975：36 頁）という表現に留まっていることは注目に値する。『平城宮発掘調査報告Ⅶ』でも「木目の方向にそって型にひびがはいり、この傷が・・・」と表現し、さらに「ひびが比較的小さいものから深く大きいものまで各段階のものがある」として、笵傷進行についても正確に認識しているが（奈文研 1976a： 64 頁）、「笵傷」という用語は見受けられない。また、同じ年に刊行された『飛鳥・藤原宮発掘調査概報６』でも「笵型に縦の傷がつく」（奈文研 1976b： 13 頁）とあり、同様の傾向にある。さらには『西隆寺発掘調査報告』では「笵型の割れ」（西隆寺跡調査委員会 1976： 38 頁）、『飛鳥・藤原宮発掘調査報告Ⅱ』では「笵割れ」（奈文研 1978： 40 頁）ないし「笵の割れ」（同 41 頁）、『飛鳥・藤原宮発掘調査概報８』では「笵の彫りキズ」（奈文研 1978b：45 頁）、などの指摘事例があるが、「笵傷」は用いられていない。

1980 年代　明確に「笵傷」が用いられるのは、1980 年刊行の『研究論集Ⅵ』に掲載された山崎信二の論文においてである。山崎は平安中期の薬師寺や興福寺に関する同笵瓦に関して、「笵傷」の存在に言及している（山崎 1980：151・153・158～159 頁）。さらに笵傷の多寡に応じて薬師寺瓦屋並びに興福寺瓦屋から諸寺への瓦の移動を示唆している。一方、発掘調査報告等における「笵傷」なる用語の定着は遅く、『平城京左京三条二坊六坪発掘調査報告』（奈文研 1986）を待たねばならなかった[4)]。

小　結　このように、奈良文化財研究所では 1950 年代末から「笵」や「同笵」といった用語が使用されてきたが、その後しばらく使用されない時期を経ていたことがわかる。その時期に「４桁の数字＋アルファベット」を用いた型式表記が導入されたが、その段階では型式と笵の関係は不明確であった。そして 1972 年を境に再び「同笵」が用いられるようになり、笵の彫り直しについても認識が深まっていくなかで、「型式＝瓦笵の相違」という認識が定着していく様子が窺える。また、「笵傷」については 1970 年代半ば以降、その存在については認識されていたが、用語としては一定しておらず、「笵傷」として定着していくのは 1980 年代以降となる。

3-3. 青銅鏡研究における「同笵」と「笵傷」について

最後に、瓦とは異なる遺物ながら「同笵」や「笵傷」なる用語を用いてきた青銅鏡の研究についても使用の経緯を整理し、瓦研究との関連性について触れておきたい。

青銅鏡で「同笵」が用いられるのは主に三角縁神獣鏡の研究においてであり、その先駆的な研究としては梅原末治の一連の研究があげられる。まず梅原は鏡を製作する型のことを「鏡笵」と呼称し（梅原 1944： 1 頁）、同じ鏡笵で作られた鏡について「同一笵」（同 78 頁など）ないし「同笵」（同 79 頁）や「同笵鏡」（梅原 1946：25 頁）と表現する[5)]。そしてその同笵鏡論を推し進めた小林行雄の一連の研究（小林 1952 など）によって、青銅鏡研究において「同笵」という用語は定着していく。この点、瓦研究に比べて「同笵」の導入は遅れることがわかる。

「笵傷」についても意外にその使用が遅い。概念的には「鋳型の損傷が鏡背にあらわれ、鋳造の前後を推定しうる」(小林 1959: 724 頁) とされ、早くにその存在は認識されているものの、西田守夫は「鋳型の傷あと」(西田 1970: 34 頁) とし、網干善教は「金工の専門家が使用する「甲張り」というもの」(網干 1975: 239 頁) と表現するにとどまる。仿製三角縁神獣鏡の製作技術を論じた近藤喬一と小林行雄も、それぞれ「型傷」(近藤 1973: 15 頁) と「鋳型に生じた亀裂」(小林 1976: 417 頁) と表現し、「笵傷」は用いていない[6)]。さらに八賀晋も「笵型の亀裂痕」(八賀 1984: 5 頁など) や「笵型の傷」(同 23 頁) と呼称し、1990 年の概説書でも同様の表現を行っている (八賀 1990)。そして現在行われているような典型的な笵傷進行にまつわる研究は、岸本直文の研究以降となるのである(岸本 1991)。

以上、青銅鏡研究における「同笵」や「笵傷」は瓦の研究よりもその使用が遅く、後者から前者へ用語や概念が導入された可能性が高いことがわかる。しかしながら、青銅鏡だけでなく瓦の研究者としても名を馳せた近藤喬一や、奈良文化財研究所に在籍していた八賀晋、京大を中心として親交のあった梅原末治や島田貞彦、木村捷三郎や小林行雄などの存在は、「同笵」や「笵傷」なる概念が両分野で共有される基盤となったのであろう。

3-4. 瓦における同笵の認定

２個体の瓦が同笵かどうかを認定する際に、どのような基準や方法を持って判断するのか、そういった観点から行われた考古学的研究は極めて少ない。上原真人は「同笵の認定は容易ではなく、拓本や写真のみでは確言できない場合が多い」(上原 1978: 27 頁) と述べ、山崎信二も「小さな拓本や写真を比較材料としているために、同笵とは認定できないが」と述べていることから (山崎 1980: 171 頁)、一般的に同笵認定は大きな拓本及び写真や現物照合をもとに行われていたことがわかる。

同笵認定の方法を学術的に記述した数少ない事例の一つであり、かつ先駆的な研究として岡本東三の研究があげられる (岡本 1974)。岡本は下野薬師寺と溝口廃寺の軒平瓦が同笵かどうかを認定するにあたって、「両者を同一の場で直接比較できなかったが、拓本、細部写真や観察記録のほかに、下野薬師寺の石膏形と播磨溝口廃寺の実物を照合することによって同笵を認定した」とする (岡本 1974: 86 頁)。また両者を詳細に計測し、結果得られた値に関しては若干の相違があるものの、「焼成による収縮現象と弧の彎曲度合いによって生ずる許容範囲内の数値とみる」とし、瓦当文様の唐草文と珠文の配置関係及び「笵割れ」(＝「笵傷」) から同笵を認定するとともに、笵割れの状態から使用時期の前後関係をも認定している (同 86 頁)。

しかしながら、詳細な説明ではあるものの、岡本の手法も研究者個人の観察に基づく極めて主観的なものであることに変わりない[7)]。そして現在にいたるまで、同笵認定を方法論として学術的に検討したものはなく、従来の伝統的手法に頼らざるを得ないのが実状である。　　(林　正憲)

註

１)「同型」の用語は 143・175・235 頁でも使用されている (関野 1926)。

２) 既にこの段階で「木型は永年に亘って使用さるる可能性がある」こと、「其反對に古式の木型を再用すると云ふ

様なことも念頭に置かねばならない」との指摘があり、慧眼といえよう（島田 1935：64-65 頁）。

3）ここで取り上げる諸文献の刊行時には「奈良国立文化財研究所」が正式な組織名称である。

4）ただし「笵傷」ではなく「笵キズ」（奈文研 1986：46 頁など）が使用されている。

5）なお梅原が「笵」を用いるのは鋳造品の鋳型を「鎔笵」（梅原 1923： 35 頁など）と呼称していたことに由来するようである。しかし栗栖野瓦窯の報告において、瓦に関しては「同笵」ではなく「同一型」（梅原 1934：30 頁）や「同文同型」（同 36 頁）と記述していることから、梅原はあくまで鋳造品に限って「笵」を使用していたものと想定される。その点、島田貞彦がなぜ瓦に「笵」を用いたのかについては定かではないが、梅原末治と同じく京都帝国大学にて濱田耕作の門下であったことから、梅原からの影響を受けていた可能性がある。

6）ただし、後に近藤は先に触れた『平安京古瓦図録』（平安博物館編 1977）で瓦の概説を担当し、そこでは「笵傷」を多用している（同 320 頁など）。おそらく、1973 年の段階で「笵傷」なる概念は近藤の念頭にあったものと思われるが、この論文が「同笵鏡」ではなく「同型鏡」に主眼を置いたものであるため、あえて「型傷」を使用したのではなかろうか。

7）この問題は青銅鏡の研究においても同じであった。しかし 2000 年代以降、三次元計測で得られたデータを基礎とした研究が始まっており（奈良県立橿原考古学研究所 2005 など）、その点では瓦の研究は後塵を拝していると言わざるを得ない。

参考文献

網干善教　1975「三角縁神獣鏡についての二、三の問題－唐草文帯二神二獣鏡の同型鏡に関連して－」『橿原考古学研究所論集』　吉川弘文館、pp. 231-264

稲垣晋也　1970「飛鳥白鳳の古瓦」pp. 203-305

上原真人　1978「古代末期における瓦生産体制の変革」『古代研究』13・14　元興寺文化財研究所考古学研究室、pp. 1-110

梅原末治　1923「銅劍銅鉾に就いて（一）」『史林』第８巻第１号、pp. 20-39

梅原末治　1934「岩倉村幡枝の窯址」『京都府史跡名勝天然紀念物調査報告』第十五冊　京都府、pp. 2-36

梅原末治　1944「上代鋳鏡に就いての一所見」『考古学雑誌』第 34 巻第２号、pp. 1-14

梅原末治　1946「本邦古墳出土の同笵鏡に就いての一二の考察」『史林』第 30 巻第３号、pp. 18-39

岡本東三　1974「同笵軒平瓦について－下野薬師寺と播磨溝口廃寺－」『考古学雑誌』第 60 巻第１号、pp. 83-92

岸本直文　1991「権現山 51 号墳出土の三角縁神獣鏡について」『権現山 51 号墳』『権現山 51 号墳』刊行会、pp. 157-175

木村捷三郎　1930「山城幡枝發見の瓦窯址－延喜式に見えたる栗栖野瓦屋」『史林』第 15 巻第４号、pp. 93-111

木村捷三郎　1937「王寺出土の古瓦」『大和王寺文化史論』大和史学会、pp. 211-238

木村捷三郎　1939「平安京における緑釉瓦の一考察」『考古学』第 10 巻第３号、東京考古学会、pp. 99-111

木村捷三郎　1969「平安中期の瓦についての私見」『延喜天暦時代の研究』吉川弘文館、pp. 520-549

小林行雄　1952「同笵鏡による古墳の年代の研究」『考古学雑誌』第 38 巻第３号、pp. 1-20

小林行雄　1959「同笵鏡」『図解考古学事典』水野清一・小林行雄編　創元社、p. 724

小林行雄　1976「仿製三角縁神獣鏡の研究」『古墳文化論考』　平凡社、pp. 379-429

近藤喬一　1973「三角縁神獣鏡の仿製について」『考古学雑誌』第 59 巻第２号

財団法人古代学協会　1976『平安宮大極殿跡の発掘調査』平安京跡発掘調査報告第１輯

西隆寺跡調査委員会　1976『西隆寺発掘調査報告』

島田貞彦　1935『造瓦』　岡書房

進藤秋輝・高野芳宏・渡辺伸行　1975「多賀城創建瓦の製作技法」『研究紀要Ⅱ』　宮城県多賀城跡調査研究所、pp. 37-61

関野　貞　1928『考古学講座　瓦』　國史講習会（後に 1940『日本の建築と藝術』上巻、岩波書店に所収）
中村亜希子・林　正憲　2018a「「同笵瓦」と「異笵瓦」の比較－瓦当三次元計測データの検討」、日本文化財科学会第 35 回大会ポスターセッション
中村亜希子・林　正憲　2018b「「同笵瓦と異笵瓦」－東大寺式軒瓦の三次元計測と検討－」『奈良文化財研究所紀要 2018』　、奈良文化財研究所、pp. 76-78
中村亜希子　2017「データベース作成に向けた瓦当の三次元計測方法とその実践」『文化財の壺』Vol. 5、文化財方法論研究会、pp. 12-15
中村亜希子・山口欧志　2017「瓦当の三次元計測法の検討－瓦当データベース構築に向けた模索－」『奈良文化財研究所紀要 2017』、奈良文化財研究所、pp. 66-67
奈良県立橿原考古学研究所　2005『三次元デジタル・アーカイブを活用した古鏡の総合的研究』
奈良国立文化財研究所　1958『飛鳥寺發掘調査報告』奈良国立文化財研究所学報第５冊
奈良国立文化財研究所　1959『興福寺食堂發掘調査報告』奈良国立文化財研究所学報第７冊
奈良国立文化財研究所　1961『平城宮跡第一次　伝飛鳥板蓋宮跡発掘調査報告』奈良国立文化財研究所学報第 10 冊
奈良国立文化財研究所　1963『平城宮発掘調査報告Ⅲ』奈良国立文化財研究所学報第 16 冊
奈良国立文化財研究所　1965『奈良国立文化財研究所年報 1965』
奈良国立文化財研究所　1966『平城宮発掘調査報告Ⅳ』奈良国立文化財研究所学報第 17 冊
奈良国立文化財研究所　1975『平城宮発掘調査報告Ⅵ』奈良国立文化財研究所学報第 23 冊
奈良国立文化財研究所　1976a『平城宮発掘調査報告Ⅶ』奈良国立文化財研究所学報第 26 冊
奈良国立文化財研究所　1976b『飛鳥・藤原宮発掘調査概報６』
奈良国立文化財研究所　1978a『飛鳥・藤原宮発掘調査報告Ⅱ』奈良国立文化財研究所学報第 31 冊
奈良国立文化財研究所　1978b『飛鳥・藤原宮発掘調査概報８』
奈良国立文化財研究所　1986『平城京左京三条二坊六坪発掘調査報告』奈良国立文化財研究所学報第 44 冊
奈良国立文化財研究所　1996『平城京・藤原京出土軒瓦型式一覧』
奈良市　1974『平城京朱雀大路発掘調査報告』
西田守夫　1970「三角縁神獣鏡の同笵関係資料」『ＭＵＳＥＵＭ』No. 232　東京国立博物館、pp. 32-34
八賀　晋　1984「仿製三角縁神獣鏡の研究－同笵鏡にみる笵の補修と補刻－」『学叢』　京都国立博物館、pp. 3-56
八賀　晋　1990「鏡をつくる」『古代史復元第７巻　古墳時代の工芸』白石太一郎編　講談社、pp. 89-101
藤澤一夫　1936「飛鳥期瓦の再吟味」『考古学』第７巻第８号、東京考古学会、pp. 337-349
藤澤一夫　1941「摂河泉出土古瓦の研究　―編年的様式分類の一試企－」『考古学評論』第３輯、東京考古学会、pp. 237-308
藤澤一夫　1949「法隆寺出土の古代屋瓦」『綜観法隆寺』川原書店、pp. 232-253
藤澤一夫　1961「屋瓦の変遷」『世界考古学大系４　日本Ⅳ』浅野清・小林行雄(編)、平凡社、pp. 69-81
藤澤一夫　1965「四天王寺出土の古代屋瓦」『佛教藝術』第 56 号、思文閣出版、pp. 111-118
藤澤一夫　1967「造瓦技術の進展」『日本の考古学Ⅵ　歴史時代（上)』三上次男・楢崎章一(編)、河出書房新社、pp. 286-310
平安博物館編　1977『平安京古瓦図録』解説編　雄山閣
山崎信二　1980「大和における平安時代の瓦生産」『研究論集』Ⅵ（奈良国立文化財研究所学報第 38 冊)、pp. 127-177
大和郡山市教育委員会　1972『平城京羅城門跡発掘調査報告』
山口欧志・中村亜希子・石松智子・金田明大・今井晃樹・林正憲・岩戸晶子　2017「平城宮出土瓦基準資料の三次元デジタルデータベース構築に向けて」2017 年度文化財科学会ポスターセッション

第２章　SfM-MVS による計測方法について

１．Metashape pro 版を使用する瓦当文様の三次元計測方法

はじめに

デジタルカメラ等で撮影した複数の写真画像から被写体の三次元情報を復元する SfM-MVS（Structure from Motion and Multi-View Stereo）の技術で取得する三次元計測データは、使用したカメラ・レンズなどの機材や、解析に使用したソフト、それらの設定によって、データの粗密や信頼度に大きな違いが生じる。そこで、ここでは、本科研プロジェクトにおける基本的な瓦当文様の計測方法について報告する。

なお、三次元計測には、資料の全形を計測する場合と、一部のみを計測する場合があるが、同じ密度のデータを取得しようとする場合、前者は後者に比べ、撮影枚数・処理時間・データ量が飛躍的に増加する。本科研プロジェクトは、同笵瓦の瓦当文様の比較検討を主な目的としており、笵傷など資料表面の微細な凹凸を記録するために、接写写真を多く撮影し、極めて高密度なデータを取得する必要があった。現段階における使用機材のスペックと解析時間、生成データの容量などを総合的に考慮した結果、資料の計測範囲は、基本的には文様の施された瓦当面のみとし、一部資料については解析の精度を落とし全形も計測することとした。ここでは、資料の一部分（文様面のみ）の計測方法について紹介する。

全体の流れとしては、まず写真を撮影し、記録した RAW データを現像することで解析に使用する TIFF の画像セットを取得、それをソフト Metashape pro 版（Agisoft 社）で解析し、三次元データを生成する。取得した三次元データを二次元に図化するにあたっては、オープンソースソフトウェアである CloudCompare を使用し、データの軸の調整と画像の書き出しをおこなう。以下では、これらの作業手順について、項目ごとに説明する。

１．写真撮影

生成する三次元データの密度や信頼度は、撮影した写真画像の大きさ・質に大きく依拠する。ここでは SfM-MVS に使用する写真画像の撮影において注意するべき点をいくつか示す。

1-1. 資料の観察

撮影をおこなう前に、資料の状況をよく観察することは必須である。文様の凹凸具合や笵傷の有無など、どこを重点的に撮影する必要があるかを確認する。なお、長期間展示・保管されていた資料には埃が積もっていることもあり、拓本を採った際の画仙紙の繊維が付着していることもある。接写をして微細な痕跡を計測する場合は、こういった付着物をあらかじめ丁寧に取り除いておく。

1-2. 資料の設置

当然ではあるが、写真に写らない部分は三次元データを取得することができない。そのため、撮

影の際に資料をどのように設置するかも、三次元計測を成功させるにあたり極めて重要になる。資料の欠損状況等を確認し、安定して据えられる置き方を考えることは言うまでもないが、三脚を使用して撮影する際に、計測したい部分が死角とならないかもあわせて考え、資料を設置する。

また、写真に濃い影が生じてしまうと、信頼度の高い三次元データが取得できない。そのため、後述のように、可能な限り影が生じないよう、均一に光が当たるようにライティングをおこなう。凹凸が比較的少ない資料は、瓦当面が斜めになるように資料を立てかけるだけで撮影できるが（図１－１)、外縁が高い資料などは、適宜ターンテーブルなどを併用して撮影する（図１－２）必要がある。

なお、SfM-MVS によって取得する三次元データは、それ自体では大きさの情報を持たないため、大きさが分かるものを資料と一緒に撮影する必要がある。定規などを一緒に撮影することもできるが、解析のエラー値などを確認しやすくするため、本プロジェクトでは、Metashape pro 版で出力できるターゲットマーカーを複数配置した枠を作成し、資料とともに撮影した（図１－２)。

1-3. ライティング

ライティングにはLEDライトを使用した。極端な影が生じないように、上と左右の三方向から均一に光が当たるようにするか、もしくは、カメラのレンズに取り付けるリングライトを使用した。施釉瓦など光が反射しやすい資料を撮影する際は、直接強い光が当たらないように注意する必要がある。

1-4. カメラの設定

撮影の前に、使用するカメラのセンサーサイズや画素数をはじめ、カメラやレンズのスペックを確認し、必要とするデータを取得できる機材かどうか確認する必要がある。カメラのファームウェアにアップデートがないかも確認し、あるようであれば事前にアップデートしておく。

本プロジェクトで使用したカメラは、OM-D E-M1 MarkⅡ（オリンパス社）であり、レンズはマクロレンズ（30㎜/F3.5もしくはF2.8）を装着した。SfM-MVSに使用する一連の写真は、Ｆ値を固定して撮影する必要がある。カメラは絞り優先モードに設定しＦ値は10前後に固定した。Ｆ値の数値が大きいほど、暗くなり、シャッタースピードが遅くなるため、撮影には必ず三脚を用いる。シャッターを押す際の振動による手振れを防止するため、レリーズやタイマー機能、ＰＣやタブレットを使用してシャッターを切る。測光モードは中央重点測光にし、記録する画像のファイル形式は、一般的なJPEG以外にRAWも必ず記録する。

1-5. 資料の撮影

今回図示した資料は、外区に鋸歯縁をもつ。この場合、まずは、レンズと文様面が平行するように資料・カメラを設置し、画角に文様面全体が収まるようにする。そのうえで、文様面と平行になるようにグレーカードを配置し、資料名等が書かれた付箋などを入れて、１枚撮影する（図２－P4152467)。次に、グレーカードと付箋を取り除き、同じアングルで１枚撮影する（図２－P4152468)。続いて、文様の微細な凹凸を記録するために、接写写真を撮影する。今回は、文様面とレンズの距離がおおよそ20㎝になるようにして撮影した。接写写真は、上下左右に隣り合う写真が半分程度以

1．文様面とレンズが平行するように設置

2．ターンテーブル上に設置（ターゲットマーカー使用例）

図１　撮影時の資料の設置

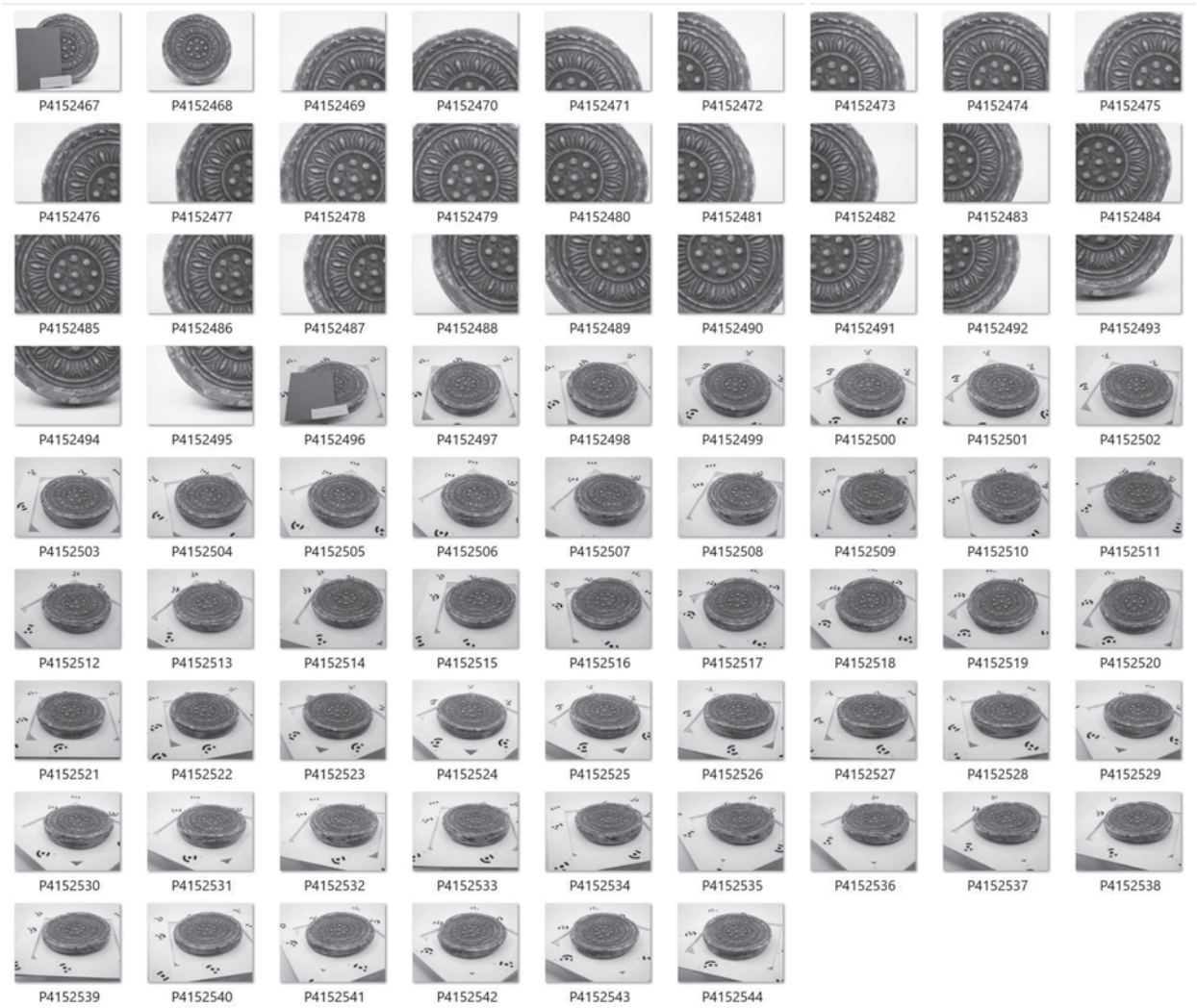


図２　撮影した全写真

上オーバーラップするように、連続的に撮影する（図２－P4152469～P4152495）。

正面からの接写写真の撮影後、瓦当の文様面が上になるようにしてターンテーブルに乗せる。この時、ターゲットマーカーを配した枠を設置する。画角に文様面と瓦当側面の両方が写るようにカメラを設置し、再度、グレーカードと付箋を入れて撮影する（図２－P4152496）。１周目は、珠紋や蓮子、鋸歯文等、文様の凹凸が激しい部分にピントを合わせて撮影する（図２－P4152497～P4152520）。２周目は、三脚を若干下げ、１周目に比べて瓦当側面が多く写るようにカメラを設置する。ピントは外縁外端に合わせて撮影する（図２－P4152521～P4152544）。各画像には、それぞれ４点程度以上のターゲットマーカーが写るようにした。なお、今回提示した写真画像は、研究協力者である三好佑佳氏によって撮影されたものである。

２．RAW の現像と TIFF 画像の書き出し

記録した画像のうち、JPEG 画像は、ピンボケなどの有無の確認や、撮影した画像セットで三次元データが取得できるかを急いで確認する必要がある場合の仮解析に使用し、本解析には RAW データのホワイトバランス等を補正し TIFF 画像として書き出した画像を用いる。以下は、画像の現像と書き出しの手順である。

2-1. データの複製

SD カード等に記録されたデータをパソコンにコピーし、RAW と JPEG で別のフォルダに分ける（図３）。両者を入れるフォルダ名は、撮影資料が分かるように、アルファベットと数字を用いて命名する。JPEG 画像を確認し、不要な画像があれば JPEG・RAW ともにデータを削除する。

2-2. RAW データの現像

現像ソフトに RAW データを読み込む。今回、現像ソフトは Lightroom（Adobe 社）を使用したが、カメラ会社によって無償のソフトが提供されている場合も多い。グレーカードが写った写真のデータを元に、全画像のホワイトバランスを補正する（図４）。写真の明るさにばらつきが認められる場合は、露光量を微調整してそろえる。現像を終えたデータは、撮影日時やカメラの設定などのメタデータを保持する TIFF 画像として書き出す。この TIFF の画像セットを SfM-MVS の解析に使用する。

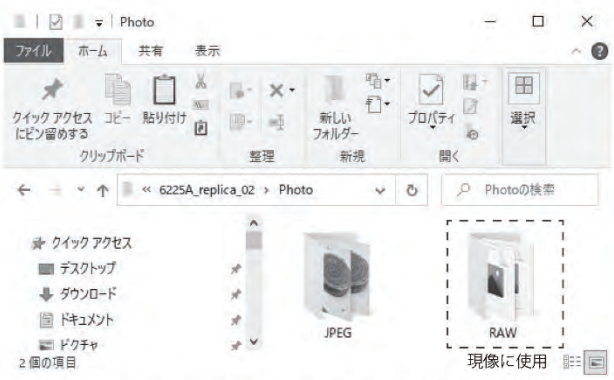


図３　写真データのフォルダ分け

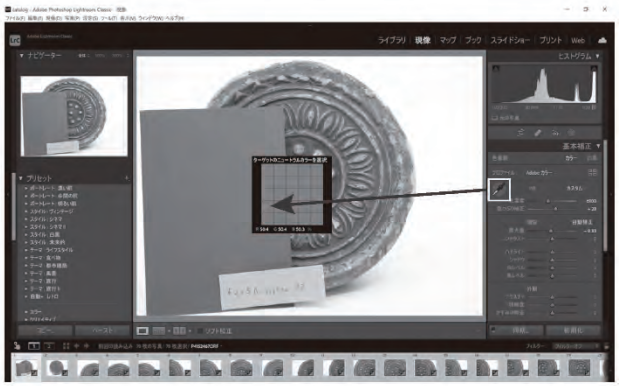


図４　RAW の現像（ホワイトバランスの調整）

３．Metashape pro 版による SfM-MVS の解析

SfM-MVS では、複数の写真画像の情報から、撮影時のカメラ位置を推定し、被写体の形態や質感を再現する。また、大きさ情報を持つターゲットマーカーや定規等を、資料と一緒に撮影することで、三次元データに大きさの情報を与えることができる。以下では、Metashape pro 版（Windows 64bit 版バージョン 1.7.6）を使用した場合の、SfM-MVS の解析の手順を紹介する。

3-1. 画像の読み込み

2-2 で書き出した一群の TIFF 画像のうち、グレーカードが写ったもの以外を Metashape pro 版に読み込み（Workflow＞Add Photos... 、図５－１）、名前を付けて保存する（File＞Save as...、 図５－２）。ファイル名は通常、年月日（例：20220101）とし、一群の写真を入れたチャンクの名称を、アルファベットと数字で示した資料名とする（例：6225A）。

3-2. ターゲットマーカーの検出

枠に配置したターゲットマーカーを自動で検出する（Tools＞Markers＞Detect Markers...）。このターゲットマーカーは、大きさ・形を指定して作成することができる（Tools＞Markers＞Print Markers...）。遺物の計測の場合、円形 12bit のターゲットマーカーを利用することが多い（図５－３）。検出後、座標データ（Reference）に表示されたマーカーの名称・数を確認し（図５－４）、使用していないターゲットが検出されていた場合は削除する。

3-3. 写真のアラインメント

読み込んだ画像のカメラ位置を推定し、粗い点群（tie point）を生成する（Workflow＞Align Photos...）。設定は、精度（Accuracy）を最高（Highest）にし、汎用事前選択（Generic preselection）にチェックを入れる（図５－５）。アラインメントが終わると粗い点群が表示される。

次に、カメラの最適化をおこなう（Tools＞Optimize Cameras...）。なお、２枚の画像から生成されたタイポイントは信頼性が低いため、フィルタリングして（Model＞Gradual Selection...＞Image count）削除した後、再度カメラの最適化をおこなう。

写真のアラインメント終了後、モデルの画面にはバウンディングボックスが表示されるが、これを回転・拡大縮小させることで、その後解析する範囲を指定する（図５－６）。

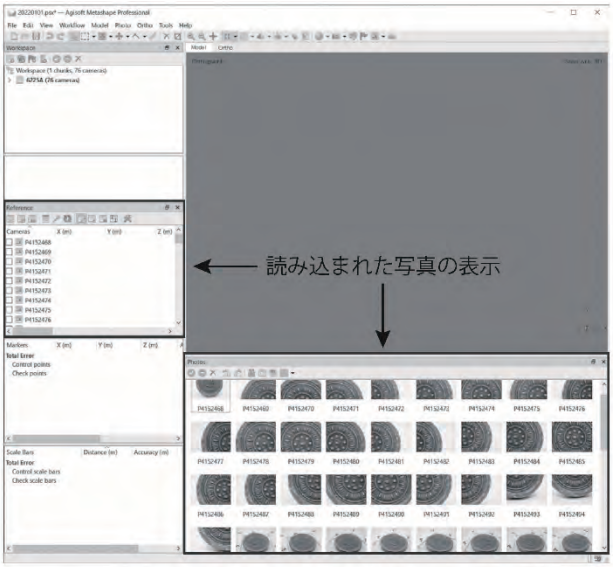
3-4. 画像の背景にマスクを入れる

不要な高密度クラウドを生成させないため、高密度クラウド構築の前に、Photos に表示された画像の資料以外の背景部分を覆うマスクを入れるが、そのマスクを作成するための簡易的なメッシュ（三次元モデル）を生成する（Workflow＞Build Mesh...）。この簡易的なメッシュのソースデータは深度マップ（中程度）を選択する（図６－１）。

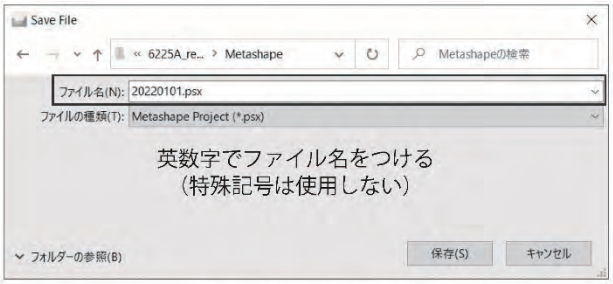
生成されたメッシュは、不要部分を選択して削除し（図６－２）、その後、画像上で右クリックをして画像にマスクをインポートする（Masks＞Import Masks...）。マスクは、モデルを置き換える（すなわち、三次元モデル以外の部分を覆う）形で入れる（図６－３）。

3-5. 高密度クラウドの構築

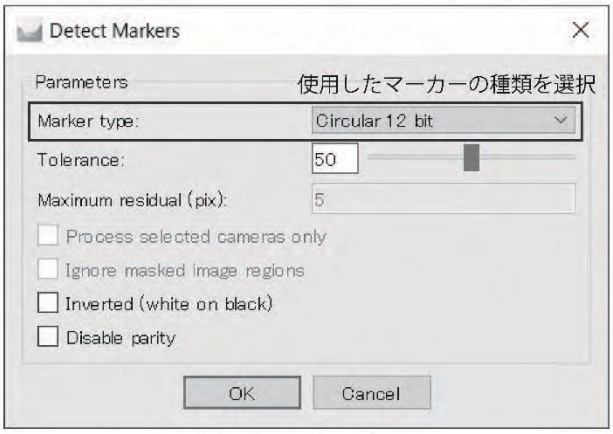
次に、高密度クラウドを構築する（Workflow＞Build Dense Cloud...）。高密度クラウドの品質は最高



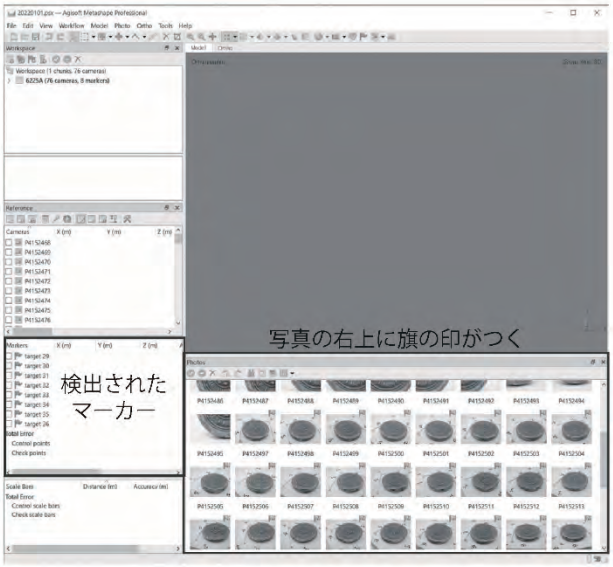
1．写真の読み込み



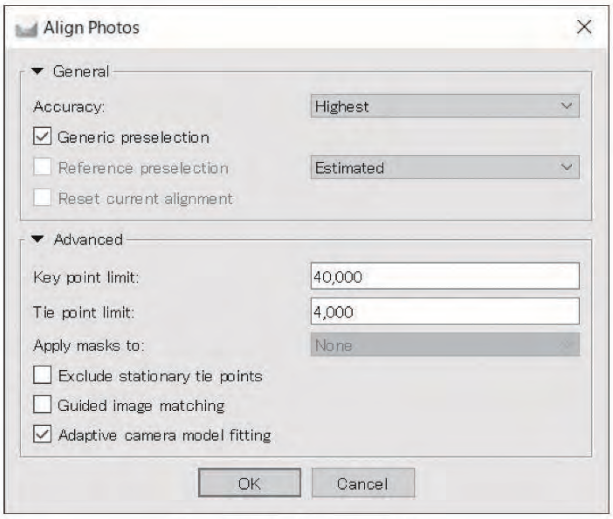
2．名前をつけて保存



3．マーカーの検出



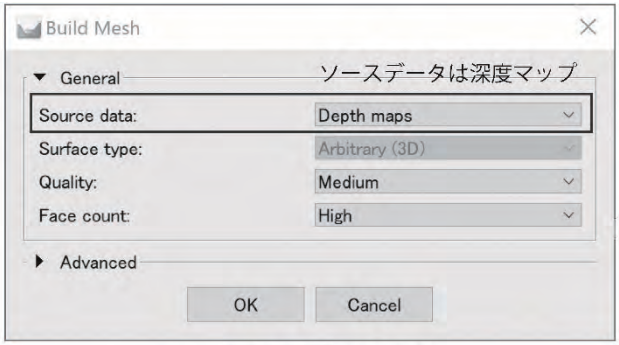
4．検出されたマーカーの確認



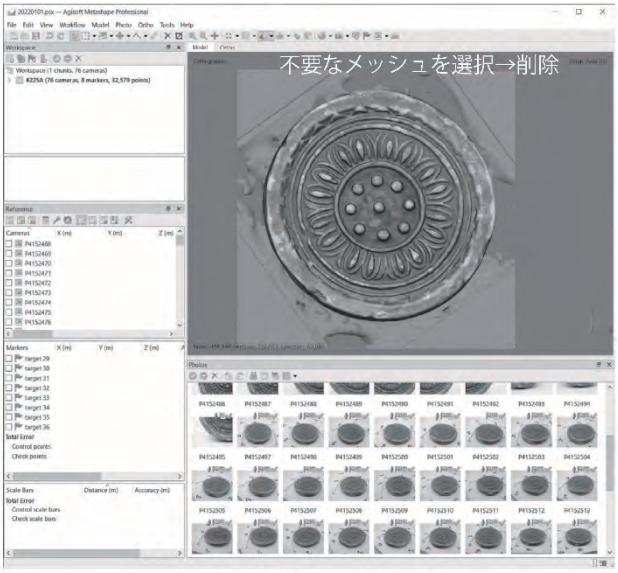
5．写真のアラインメント

6．バウンディングボックスの調整

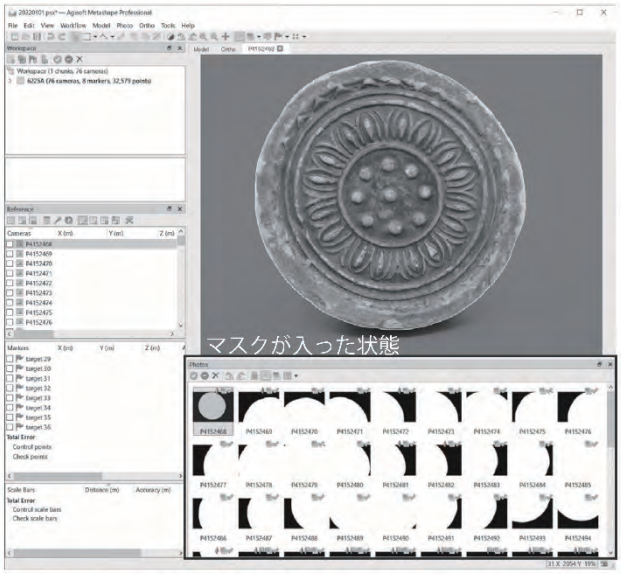
図５　Metashape pro 版による SfM-MVS の流れ（１）



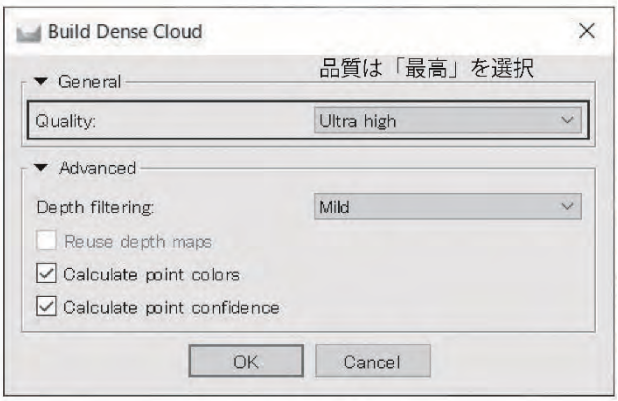
1．マスク用のメッシュ構築



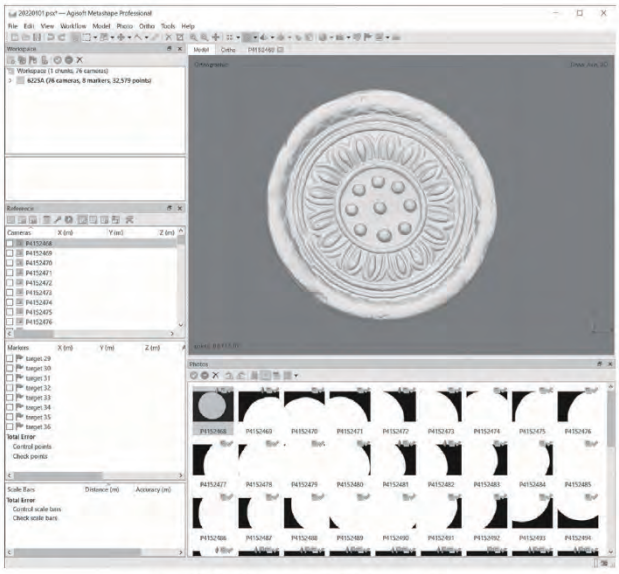
2．不要なメッシュの削除



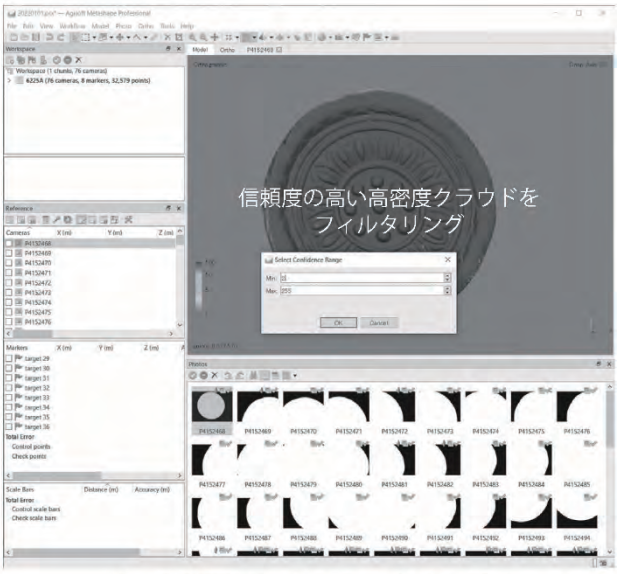
3．画像の背景にマスクを入れる



4．高密度クラウド構築



5．構築された高密度クラウド



6．高密度クラウドのフィルタリング

図６　Metashape pro 版による SfM-MVS の流れ（２）

（Ultra high）を選択し、ポイントの信頼性を計算する設定にする（図６－４）。構築された高密度クラウド(図６－５)は､信頼度によってフィルタリングし(Tools＞Dense Cloud＞Filter by Confidence...)、最小値がおおよそ２以下のものを選択して削除後、フィルターをリセットする（図６－６）。

3-6. メッシュの構築

以上で選別した信頼度の高い高密度クラウドをソースとして、再度メッシュを構築する（Workflow＞Build Mesh...）。この時、サーフェスタイプは自由形状（３Ｄ）を、ポリゴン数は高（High）を選び、内挿補間を有効に、頂点カラーを計算するように設定する（図７－１）。

なお、内挿補間を有効にした場合、端部には波状のメッシュが生成される（図７－２）。この不要なメッシュは手動で選択し削除するが、最後に、微細な浮いたメッシュが存在しないかフィルタリングして確認し（Model＞Gradual Selection...＞Connected Component size...）、ある場合は選択して削除する。

3-7. テクスチャーの構築

次に、構築したメッシュに、色情報・質感であるテクスチャーを貼り付ける（Workflow＞Build Texture...）。テクスチャーの種類は「拡散マップ」を選択し、ソースデータは「イメージ」を、マッピングモードは「汎用」を選択する。ブレンドモードは「モザイク(標準)」にし、テクスチャーサイズは 4,096 ピクセル１枚に指定する。解析が終わると､三次元モデルにテクスチャーが与えられる。

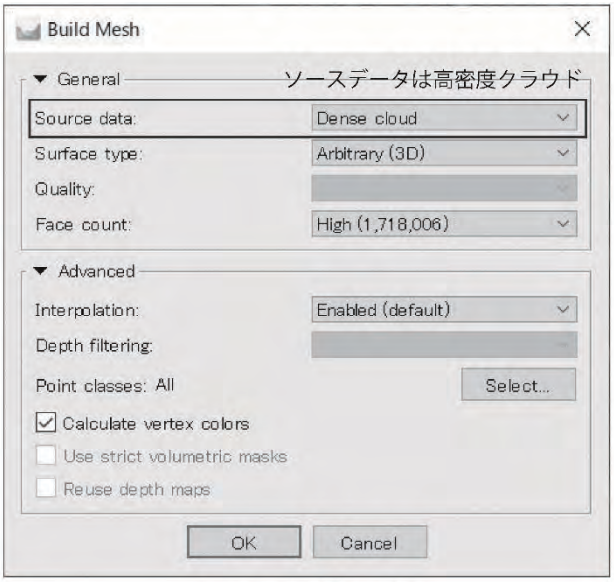
3-8. スケールの設定

最後に、三次元モデルに大きさ情報を与える。座標データ（Reference）に表示されたマーカーの中から２つを選択し、右クリックで「スケールバー作成」を指定する。すると、その間の距離を入力できるスケールバーが作成される（図７－３）。「距離(m)」の空欄をダブルクリックし、あらかじめ測っておいた２点間の距離をメートル単位の数値で入力すると、三次元モデルに大きさ情報が与えられる。スケールバーが１つでも大きさ情報を与えられるが、資料を囲うように配置された任意の４点のマーカー間の距離を入力することで、より信頼度の高い大きさ情報を得ることができる。スケールバーの設定後は、必ず座標データ（Reference）における「トランスフォーム(変換)を更新」のアイコンを押し、スケールバーのエラー値を確認する（図７－４）。

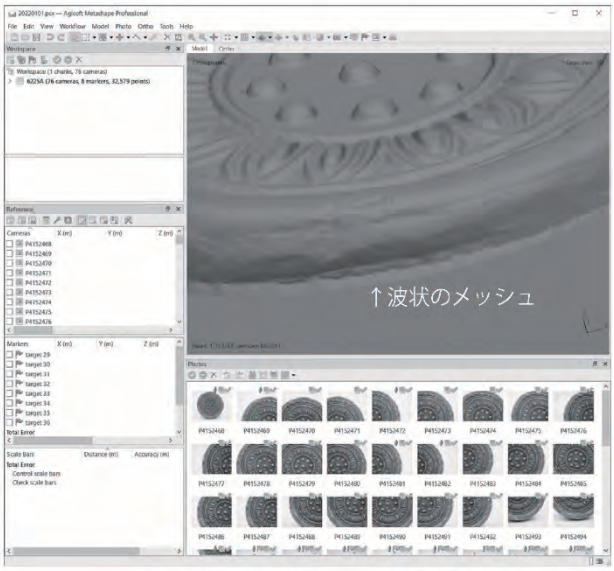
3-9. データの書き出し

取得した三次元データを、他のソフトで閲覧・編集できるように、データ形式を指定して書き出す。高密度クラウドを書き出す場合（File＞Export＞Export points...）や、三次元モデルを書き出す場合（File＞Export＞Export Model...）があるが、今回は三次元モデルを Wavefront OBJ（*.obj）の形式で書き出した（図７－５）。データは基本的に英数字で命名し書き出すが、三次元モデルを Wavefront OBJ で書き出すと.obj 以外に.mtl と.jpg など計３種類のデータが生成される（図７－６）。

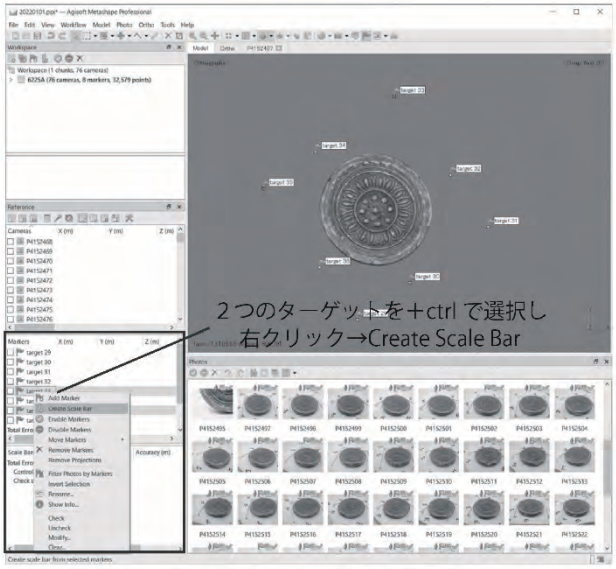
なお、どのように解析して三次元データを取得したかという情報も極めて重要である。三次元モデルの書き出しとともに、解析レポートを作成し PDF として保存する（File＞Export＞Generate Report...）。



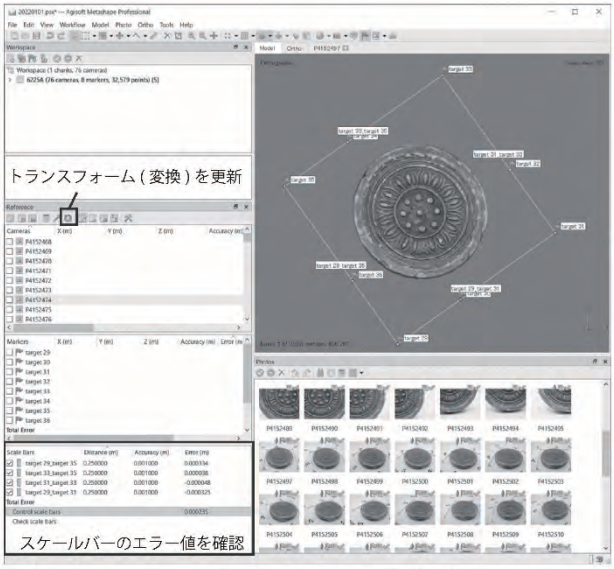
1．メッシュ構築の設定



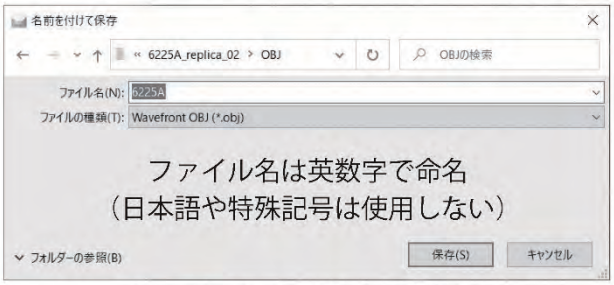
2．端部に生成された波状のメッシュ



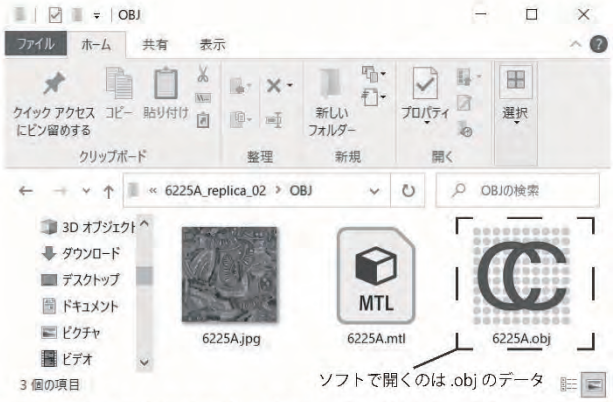
3．スケールの設定



4．スケールのエラー値の確認



5．三次元モデル（OBJ）の書き出し



6．書き出された三次元モデル（OBJ）のデータ

図７　Metashape pro 版による SfM-MVS の流れ（３）

４．CloudCompareによるデータの調整と画像の書き出し

Metashape pro から直接画像を書き出すこともできるが、三次元モデルの傾きを微調整し、大きさや色、光源等を指定して画像を書き出すには、外部ソフトを用いる方が容易である。今回は、オープンソースソフトウェアである CloudCompare を使用した。本プロジェクトで利用した最終バージョンは 2.11 である。

4-1. データを CloudCompare に読み込む

CloudCompare を開き、画面の設定をおこなう。初期設定では、画面の色が青から藍色のグラデーションで表示されるため（図８－１）、背景色などの設定をおこなう（Display＞Display settings＞Colors and Materials）。背景が白の画像を書き出す場合は、display gradient background の欄のチェックを外し、Colors の Background の色を白（HTML：#ffffff）に変える。この場合、Bounding-box や Text の色も、黒など見やすい色に変更する。メッシュの色を変える場合には Default Materials の各項目において、ライティングの色を変える場合には Light の各項目において、同様に設定する。この時、各色の HTML のカラーコード（例：#8d8d8d）を控えておくと、後で同じ条件の画像を書き出すときに便利である。背景色を決めたら Apply と Ok を押して設定を確定する（図８－２）。

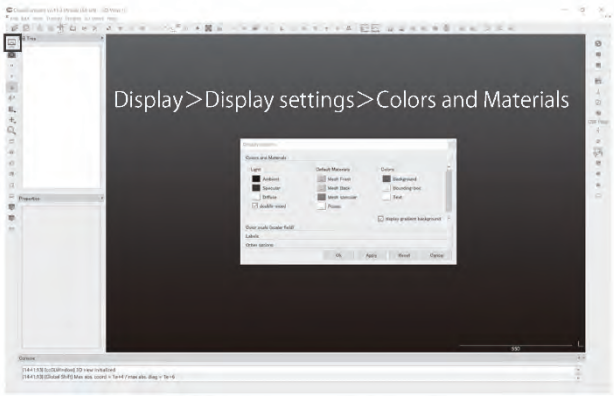
次に、OBJ データを読み込む（File＞Open）。画面中央に三次元モデルが表示され、右下にスケールバーが表示される。Metashape でスケールの単位をメートルに設定し解析した場合、書き出された三次元モデルの単位はメートルであるため、スケールバー下の数値の単位もメートルである。なお、CloudCompare には「戻る」機能や自動保存機能がない。そのため、こまめに保存するよう注意する必要がある。保存の際には、保存するファイルなどを選択し、慣れないうちはバウンディングボックスが表示された状態であることを確認してから保存する（File＞Save）。データは、ファイル名やファイルを入れるフォルダ名に日本語や特殊記号が含まれないよう、注意して命名する。CloudCompare のデータの拡張子は.bin である。

4-2. 三次元モデルの軸を調整

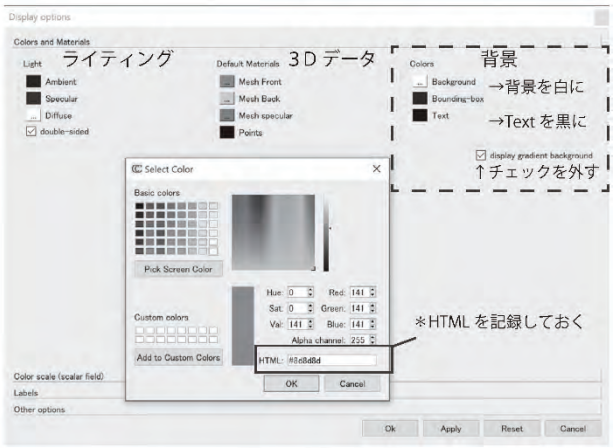
続いて、三次元モデルの軸を調整する。同じ条件のライティングで複数の瓦当文様の画像を書き出す場合は、瓦当面が上になるように三次元モデルの傾きを変える。左列の Viewing tools から Set top view を押して表示し、三次元モデルを選択してバウンディングボックスを表示させる。そのうえで、上列のメインツールバーから Translate/Rotate を選択すると、三次元モデルの軸を変えられる（図８－３）。適宜、Viewing tools によって正面や左右からの表示に切り替え、瓦当面が平らになるように調整するが、この時、回転する方向を XYZ の全方向ではなく、ひとつの方向に固定して調整すると扱いやすい（図８－４）。また、テクスチャーよりもサーフェスで表示した方が三次元モデルの傾きを確認しやすい場合は、Properties の Mesh の Materials/textures のチェックを外す。傾きを決めたら緑のチェックボタンを押し、確定する。

4-3. 画像の書き出し

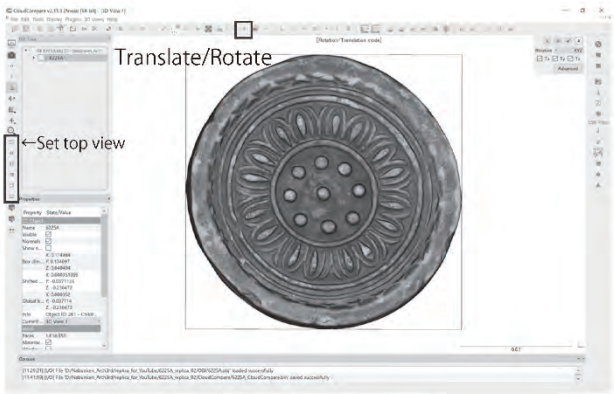
画像を書き出す前に、左の Viewing tools から Set current view mode を長押しし、三次元モデルが正射投影表示（Orthographic projection）されているか確認する。正射投影表示になっている場合



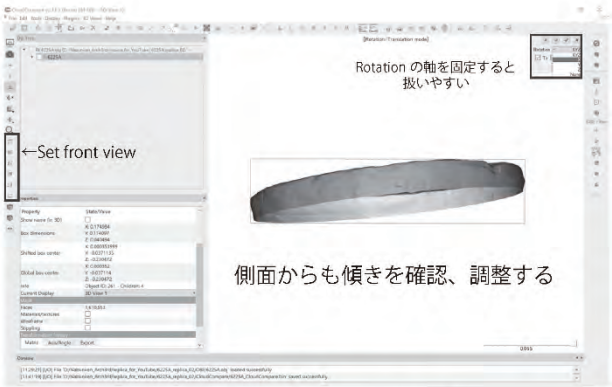
1．CloudCompare の初期設定



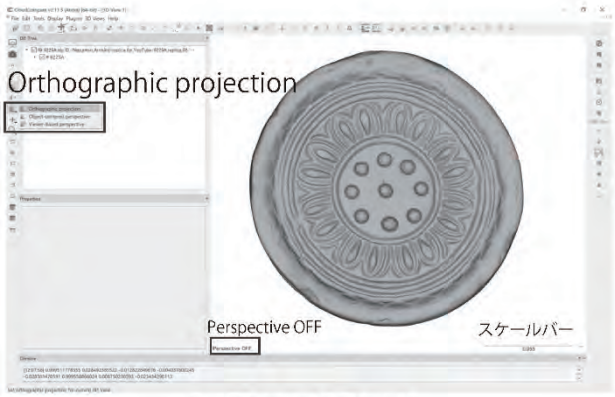
2．画面の設定



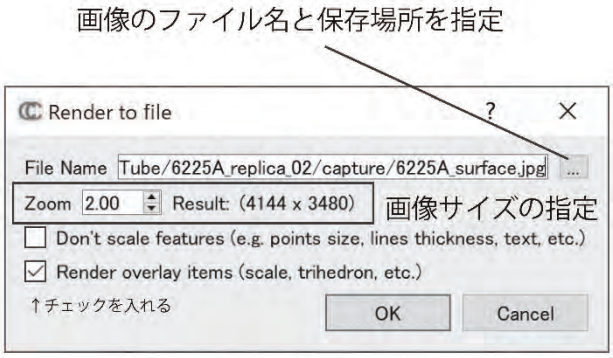
3．三次元モデルの軸の調整 1



4．三次元モデルの軸の調整 2



5．正射投影表示の確認



6．画像の書き出し

図８　CloudCompare による画像の書き出し

1．テクスチャー画像

2．サーフェス画像

図９　CloudCompare で書き出した画像

は、画面左下に Perspective　OFF の文字が表示される（図８－５）。ライティングは、本報告に掲載された図は基本的にサンライトのみを使用した（Display＞Lights＞Toggle Sun Light）が、笵傷等、細かな凹凸をはっきりと表示させたい時には、カスタムライトを使用する。ライトの詳細な設定は、前述した Display＞Display　settings＞Colors　and　Materials の Light の項目で行うことができる。ここで Ambient や Specular の濃淡を調整する。

ライティングの調節が終わると、いよいよ画像の書き出しである（Display＞Render to File）。File Name の項目に書き出す画像の名前を入力し、保存場所を指定する。ディスプレイでの表示以上に拡大して画像を表示したい場合は、Zoom の数値を大きくする。画像サイズは横に示される。スケールも一緒に表示した画像を書き出す場合には、Render overlay items にチェックを入れる（図８－６）。Materials/textures のチェックを切り替えることによって、同じ位置・サイズのサーフェス画像とテクスチャー画像を書き出すと便利である（図９）。

書き出した画像は、Photoshop や Illustrator などのソフトを用いて縮尺を整え使用する。

おわりに

簡単ではあるが、以上が、本科研プロジェクトにおける基本的な瓦当文様の計測および図化の方法である。SfM-MVS による三次元計測は、写真を撮影する機材（カメラ・レンズ）と撮影方法（設定・アングル・枚数等）、解析の設定によって、得られるデータの粗密・質が異なってくる。また、大量の画像を処理するためには、スペックの高いワークステーション等が必要になる。計測の目的や、取得データの利用法を考慮し、それに適した撮影・解析方法を選ぶ必要がある。（中村亜希子）

２．異なるフォトグラメトリ実行プログラムで構築した瓦の三次元モデルの比較

はじめに

フォトグラメトリを利用した文化財の三次元計測が近年急増している。しかし文化財におけるフォトグラメトリ（Photogrammetry：写真測量）は、特段真新しいものではない。文化財調査にフォトグラメトリを利用した最も古い例の一つは、昭和 30 年（1955）の奈良文化財研究所が東京大学生産技術研究所の協力を経て実施した飛鳥地方の航空写真測量である。以来、鎌倉の大仏、仏像、建造物の記録、あるいは発掘調査で検出した遺構や出土遺物、石造物等の記録に利用されてきた（牛川ほか 1969）。2000 年代にはデジタル写真測量に加えて三次元レーザースキャナーが一定程度普及し、三次元計測方法の選択肢が増えた（番 2009）。2010 年代頃になると計算機の大幅な性能向上により、フォトグラメトリの一種である SfM-MVS（Structure from Motion and Multi-view Stereo）が普及しはじめ、今日では SfM-MVS を用いる事例が多くを占めるようになった（金田 2019）。

そこで文化財におけるフォトグラメトリの有効性を検証するため、三次元レーザースキャナーと SfM-MVS による計測結果を詳細に比較するなど、正確度・精密度・解像度の観点から有効であることを確認した上で文化財調査に応用した（中村・山口 2017、山口 2021）。それら計測の質の検証や実際の調査研究で利用してきた SfM-MVS の実行プログラムは、その費用対効果の高さからこれまで Agisoft Metashape（Standard 版および Professional 版）を選択していた。しかし競合する Capturing Reality 社（2021 年 3 月に Epic Games の傘下となった）の RealityCapture の価格体系が変わるとともに価格も低廉化し、Agisoft Metashape Professional 版と比較して安価に導入可能になったため、RealityCapture を用いた計測試験を実施した。小稿はその結果を報告するものである。

表１　Metashape と RealityCapture の価格体系の比較

プログラム名	価格体系	価格
Metashape Standard Edition （オルソ画像構築やスケール付与の機能は無し）	買い切り （ver.1.9.x まで更新無料）	$179 （教育版ライセンス：$59）
Metashape Professional Edition （オルソ画像構築やスケール付与の機能は有り）	買い切り （ver.1.9.x まで更新無料）	$3499 （教育版ライセンス：$549）
RealityCapture Enterprise	機能無制限ライセンス 永久ライセンス （ver.1.x.x まで更新無料）	$3750 ※他に非営利目的調査用ライセンス割引や教育用ライセンスがある[1)]。
RealityCapture Pay-Per-Input License	14000 万画素分の解析が可能 32000 万画素分の解析が可能	$10 $20

１．検討に用いた資料

比較検討のために用いた資料は、平城宮出土軒瓦基準試料である軒丸瓦 6235 型式の 6235Mb-1（第３章第１節図１－６）と 6235Mb-2（同図 11－３）である。本資料を選択した理由は、これまでに三次元計測とこのデータを用いた同笵の検討などが進められており、また本書収録の別論文でも検討の対象となっているからである。6235Mb-1 と 6235Mb-2 の詳細は第３章第１節でふれているので、そちらをご参照いただきたい。

２．分析に用いたデータ

分析に用いたデータは、6235Mb-1 は 42 枚の画像とマーカー間の距離、6235Mb-2 は 46 枚の画像とマーカー間の距離である。撮影機材は Olympus E-M1 MarkⅡと同社 30mm（換算 60mm）マクロレンズである。撮影後は Adobe 社 Lightroom を用いて RAW ファイルのホワイトバランスを調整後、Tiff ファイルに現像した。現像後の画像のサイズは 5,184×3,888 ピクセルである。データ作成者は本研究の作業補助を担当した北野智子（奈良文化財研究所有期雇用職員）である。

３．Metashape と RealityCapture の比較

3-1. 導入費用と機能

表 1 は Metashape と RealityCapture の価格体系の比較である。両者は SfM-MVS の代表的な実行プログラムである[2)]。本検討では、Metashape Professional Edition（以下 Metashape Pro と略す）と RealityCapture Enterprise（以下 RealityCapture と略す）を比較した。

Metashape Standard Edition は Metashape Pro と比較していくつかの機能制限があるものの、基本的な機能である三次元モデルの構築の質は Metashape Pro と大差ない。また RealityCapture Pay-Per-Input License は RealityCapture Enterprise と機能は同じであるが、前者は解析する画像群の総画素数に応じて費用を算出する価格体系である。なお費用は三次元モデル構築時ではなく（三次元モデルの構築は無償で実行できる）、三次元モデルの出力時に必要となる。たとえば本検討で使用したデジタルカメラの画素数は 1 枚およそ 20 メガピクセルなので、費用 20 ドルで利用できる 32000 メガピクセルでは 1600 枚の画像を解析できる。この数値はたとえば本分析資料を解析した場合（1 モデル 50 枚とする）、32 資料分に相当する。

プログラムの機能は、Metashape Pro と RealityCapture のどちらも三次元モデルの構築、テクスチャーマッピング、三次元モデルの編集機能、スケールや国家座標など位置情報の追加、ＤＥＭ

表２　推奨構成の比較

	Agisoft Metashape	RealityCapture
CPU	6-24 コアの Intel/AMD 製 CPU 3.0+GHz	12 コア以上の Intel/AMD 製 CPU
RAM	32 - 128 GB	32 - 128 GB（メモリ消費がより少ない）
GPU	GeForce RTX 2080 Ti/Radeon VII など	GeForce RTX 2080 Ti/Radeon VII など

(Digital Elevation Model) の構築、オルソ画像の構築、各種解析結果データの出力など、文化財の三次元計測に必要な基本的な要素を有している。

3-2. SfM-MVS 実行プログラムが要求する計算機の性能

表２のように、現時点での両者の高度な利用の場合の推奨構成を比較すると RealityCapture のほうが要求性能は低く抑えることができる可能性がある。特に高画素の画像を大量に扱う場合はその傾向が強い。ただし、計算機の性能が高いほど安定かつ高速に計算できる点は共通する。

3-3. 構築した三次元モデルの比較

Metashape Pro と RealityCapture を用いてテクスチャーをもつ三次元モデルを構築した[2)3)]。

各プログラムが構築する三次元モデルの違いは、解析するデータが同一のものであれば、それぞれのプログラムによる解析時のパラメーターの違い（データを粗く解析して軽い処理にするか、あるいはデータを詳細に解析して重い処理にするか）に起因するものが大きいことは明らかである。

そこで両者で構築した三次元モデルのメッシュ数が同等になるよう解析した[2)]。構築した三次元モデルは CloudCompare を用いて位置合わせをおこなった後、メッシュ間の距離を計算した。その結果、いずれも約 80％は 0.1mm 未満、平均距離は 0.05mm 未満であった（図 10）。いっぽう解析に要する時間は Metashape より RealityCapture が短い傾向であった（表３）。より大規模なデータを解析する事例ではこの差はより大きくなると推測するが、今後事例を蓄積し検証したい。

図 10　Metashape と RealityCapture によって構築した三次元モデルの比較
（左：6235Mb-1　右：6235Mb-2）

表３　各モデルごとの所要時間

資料名	プログラム名	解析の所要時間
6235Mb-1	Agisoft Metashape	17 分 23 秒
（解析画像数 42 枚：画像数約 20 メガピクセル）	RealityCapture	10 分 44 秒
6235Mb-2	Agisoft Metashape	23 分 37 秒
（解析画像数 46 枚：画像数約 20 メガピクセル）	RealityCapture	12 分 8 秒

まとめ

小稿ではフォトグラメトリの一種である SfM-MVS の現在最も一般的な実行プログラムの Metashape と RealityCapture によって構築した三次元モデルの比較を実施した。その結果、今回の事例では構築する三次元モデルに大きな差は生じないことを確認した。また解析時間は RealityCapture のほうが短い傾向を看取した。今後は事例を蓄積するとともに、いわゆる高性能な三次元レーザースキャナーで計測した三次元モデルとの比較を進め、検証事例を蓄積したい。

（山口欧志）

註

１）RealityCapture Enterprise を調査研究目的で使う場合、CapturingReality 社にその旨を申請し承認を受けると表１に示した 30％の価格で購入することが可能である。教育機関における教育目的の利用の場合は、無償で利用可能だが複数の制限がともなう利用規約を遵守する必要がある。文化財のデータを解析対象とする場合、利用規約が導入目的や対象の性質等に対して適切か確認が必須である。

２）解析時のパラメーターは Metashape の Align：Highest、Build Dense Cloud：High、Build Mesh：High、Build Texture：8192×10 を基準とし、RealityCapture の設定はこれと同等になるようにした。

３）解析に使用した計算機の主な仕様とプログラムのバージョンは次のとおりである。OS：Windows 10 Pro、CPU：Intel Xeon(R)CPU E5-2667 v4@3.20GHz、GPU：NVIDIA GeForce GTX1080Ti×2、RAM：192GB、Agisoft Metashape Professional Edition (Ver.1.8.1)、RealityCapture (Ver.1.2)、CloudCompare (Ver.2.12)。

引用・参考文献

牛川喜幸・長谷川誠・伊東太作・佃幹雄・坪井清足　1969「写真測量の文化財調査への応用」『奈良文化財研究所年報 1969』、pp.2-8

金田明大　2019「３次元技術等によるデジタル技術の導入」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用』奈良文化財研究所研究報告、第 21 冊、pp.13-20

中村亜希子・山口欧志　2017「瓦当の三次元計測法の検討 －瓦当データベース構築に向けた模索－」『奈良文化財研究所紀要 2017』、pp.66-67

番　　光　2009「デジタル写真測量による遺構の記録」『奈良文化財研究所紀要 2009』、p.3

山口欧志　2021「文化財の三次元計測方法による収集データの比較」『日本考古学協会第 87 回総会研究発表要旨』、p.31

Agisoft Metashape (https://www.agisoft.com/) 2021 年 12 月 10 日最終確認

RealityCapture (https://www.capturingreality.com/) 2021 年 12 月 10 日最終確認

CloudCompare (https://www.danielgm.net/cc/) 2021 年 12 月 10 日最終確認

第３章　三次元計測データを応用した考古学的研究

はじめに

本研究では、前章で掲げた計測方法に則って、平城京・藤原京出土軒瓦の三次元計測データを取得した上で、従来の考古学的研究にどのように応用していくかについて、検討を行うことを目的の一つとしている。そこで本章では、本研究で得られた研究成果のうち、代表的な応用例といえる２本の論文を再録する。

これらの論文における重要な視点としては、①これまで研究者の主観的な判断で行われてきた軒瓦の型式認定について、三次元計測データを参照することによって、より客観的な検討を行った点と、②従来の研究では見落とされてきた視点が、三次元計測データから明らかとなったため、軒瓦の各型式を改めて分析することによって、新たな考古学的知見を得ることができたという点である。

特に第１節では、明らかに異なる瓦笵による軒瓦について、三次元計測データ間において比較を行ったところ、文様の平面配置がかなりの精度で一致することを明らかにすることができた。これは従来の実物実見や、拓本や写真による比較では気づくことが難しく、三次元計測を行って初めて気づきうる視点である。そして、この視点は従来から指摘されてきた「瓦様」なる存在に迫る手がかりとなるものであり、「瓦様」の存在を前提としながら軒瓦の分布状況を改めて検討することによって、平城京に築かれた諸寺院における造瓦体制の関連性について、新たな歴史的背景を導き出すことが可能となるのである。

第２節においては、これまで瓦笵の彫り直しとされてきた軒瓦に異笵の可能性が指摘されたため、三次元計測データを用いて客観的かつ厳密な比較を行った結果、異笵であることを明らかにすることができた。第１節でも、これまでの肉眼等による型式認定の結果を三次元計測データで検討し直すことにより、一部は異笵であることが判明しており、従来の主観的な型式認定に限界があることと、三次元計測データによる再検討の重要性が明らかになりつつある。また第２節では、拓本などでは表現しにくい瓦笵の木目痕が三次元計測データでは明瞭に表現できることを示し、異笵の判断の際に重要な指標となり得ることを証明した。

このほかにも、研究成果の中には大型品の破片を三次元計測することにより、破片をデータ上で接合・復元することによって、これまで全形が不明であった大型瓦製品の全容を明らかにしたものがある（岩戸晶子・道上祥武「天神山瓦窯周辺出土鴟尾の検討」『奈良文化財研究所紀要 2021』、岩戸晶子「３次元モデルを活用した平城宮出土唐花文鬼瓦の復元」『奈良文化財研究所紀要 2021』）。これは考古学的研究だけではなく、遺物のレプリカ作成等の活用事例にも援用でき、極めて発展性の高い手法といえる。

このように、三次元計測データの応用は考古学的研究に大きく資するものといえるが、その着手は未だ端緒についたばかりである。今後、さらに三次元計測データの蓄積を踏まえた上で、それらを比較・検討し、従来の型式認定のみならず、そこから導き出されてきた歴史的見解についても再

検討を行うと共に、新たな応用方法の開発についても、検討を深めていきたい。

なお第１・２節の再録にあたっては、編集上の都合により多少体裁に変更を加えているが、字句や図面、内容については同一である。ただし印刷の関係上、カラー図面をモノクロに変更せざるを得なかった。したがって、図面の詳細を確認されたい方は、これらの論文を所収する『奈文研論叢』第４号（2022 年、奈良文化財研究所）を合わせて御覧いただきたい。

1.「瓦様」と瓦笵

—東大寺式軒丸瓦における同紋瓦・同笵瓦の再検討—

中村亜希子・今井　晃樹・林　正憲・岩永　玲

要　　旨

本稿は、東大寺式軒丸瓦と呼称される6235型式の瓦のうち、紋様が酷似する同紋異笵の瓦について、三次元計測データから再検討するものである。同型式の中でもＡ・Ｊ・Ｍ種は極めて紋様構成が似ており、目視観察では時に判別が難しいこともある。このことは、先学による型式分類の検討過程にもうかがうことができる。なぜこのような同紋異笵の瓦が作製されたのだろうか。筆者らはその背景に「瓦様」と呼ばれたであろう瓦当紋様の下図の存在を想定する。この紋様下図の存在を検討するために、本研究ではSfM-MVSの技術で取得した三次元計測データを用いて詳細な検証をおこなった。分析の結果、6235A・J・M種の紋様は、蓮子や珠紋等で若干のズレが認められるものの、各紋様構成要素の平面的な位置関係はほぼ一致することが判明した。しかし、いっぽうで蓮弁や間弁の断面形態は同笵といえるほどの一致度は認められなかった。

なお、瓦笵は使用過程で彫り直し等の改変が加えられることがある。本研究では、改笵前後で特徴が変わらない点を選びデータの位置合わせをおこなうことによって、同笵瓦がどのように変化したかについても検討した。その結果、従来6234Abとして認識されていた瓦片の多くが、6235Aの改笵が進んだ段階のものであることがあきらかになった。いっぽう、6234Aは紋様が簡略化されているものの、6235A・J・Mと紋様構成が一致する。したがって、6235Aの紋様下図が6234Aの作笵の際にも使用された可能性が高い。また、両者では笵傷の出現場所も酷似するため、あるいは6234Aの瓦笵の板材そのものが6235Aの瓦笵の再利用だった可能性もある。その歴史的背景として、造東大寺司と造興福寺司の間で紋様下図や瓦笵が移動していたことが想定できる。同じ紋様下図で作笵された瓦笵による瓦の研究は、紋様の型式学的研究というマクロな瓦研究と、笵傷の進行の研究というミクロな瓦研究の間を結ぶ、新たな瓦研究の手法になると期待する。

キーワード：東大寺式軒丸瓦、6235型式、同紋異笵、同笵、三次元計測

１．はじめに

東大寺式軒丸瓦と呼称される瓦の中には、同紋異笵とされながらも紋様構成が酷似する瓦が複数種存在する。目視観察による判別が極めて困難なものもあり、これまでの半世紀以上にわたる型式分類の変遷を紐解くと、先学の検討時における詳細な観察や分析の工夫に気づかされる。なぜ、このように判別がつきにくい同紋異笵の瓦が生産されたのだろうか。本稿では、瓦当紋様を三次元計測し、データを比較検討することで、先学がその存在を意識しつつも言及することが少なかった瓦当紋様の下図の存在について考察する。

以下、第２章では、東大寺式軒丸瓦に係る研究史を、型式分類、系統と年代、瓦笵の作成と製品の供給という項目ごとに整理し、従来の手法による型式認定の課題について論じる。第３章では、本研究で扱う軒丸瓦の三次元計測データの取得方法と分析方法について説明し、続く第４章において、取得データによる紋様復元の結果や、同紋異笵瓦の紋様の比較、同笵瓦の笵傷の進行や彫り直しの過程について図を多用しながら考察する。ここまでで、東大寺式軒丸瓦には紋様下図を共有する複数の瓦笵が存在することがあきらかになるが、さらに第５章では、瓦笵に出現する笵傷と紋様の位置的関係から、紋様下図を共有する瓦笵がどのように作成されたかを復元し、瓦の出土遺跡との関係から、紋様下図や瓦笵が造東大寺司と造興福寺司の間をどのように移動したかについて論じる[1)]。

２．東大寺式軒丸瓦の研究史

東大寺式軒瓦に関する研究の蓄積は厚く、これまで、瓦笵の認定と彫り直しの段階による細かな分類以外に、製作技法と出土地の検討を踏まえた系統の整理、どの寺院・宮の所用であったか等、様々な観点から研究が進められてきた。ここではそれぞれの項目ごとに既存の研究の経緯をまとめた上で、本研究の目的を提示する。

2-1. 型式分類

軒丸瓦 6235 型式は、従来、軒平瓦 6732 型式と合わせて「東大寺式軒瓦」と呼称されてきた。この「6235」という型式番号については、『平城宮発掘調査報告Ⅱ』で「6235B」が使用されるのが初出であり（奈文研 1962：59 頁）、型式学的分類については岡本東三（1976）による東大寺式軒瓦の論考においてはじめて言及された。岡本は、軒丸瓦 6235 型式について「内区に複弁８弁蓮華文を配し、外区内縁に大きな珠文 16 をめぐらし外縁は素文となる。中房は大きく１＋６の蓮子を配置する」（岡本 1976：２頁）としており、以後、これが大筋の定義とされていく。その後、1978 年に発行された『平城宮出土軒瓦型式一覧』[2)]では 6235 型式の中にＡ～Ｈの８種類が確認され（奈文研 1978b）、次いで刊行された補遺篇[3)]ではＩ～Ｋ・Ｍ・Ｎの５種類を追加したが（奈文研 1984）、蓮子が１＋６以外に１＋５のもの、珠紋は 16 以外に 17 もしくは 18 のものも含まれる。

1990 年代後半には、平城宮に加え藤原宮で出土した軒瓦を集成した『平城京・藤原京出土軒瓦型式一覧』[4]が刊行されたが、ここでは 1984 年以降にあきらかとなった新型式を追加するとともに、従来の型式の再整理がおこなわれた（奈文研 1996）。6235 型式については、O・P・Q種が新たに追加される一方、N種が欠番となっており、計 15 種類に細分されている[5]。その後も、1989～1999 年にかけて実施された東大寺防災施設工事に伴う発掘調査の報告書（奈良県教委 2000）等において、101F2・101F3・101M2 の各型式や、D種の彫り直しと思われる型式、G種に類似する型式など、散発的に新型式が報告されているが、現時点では型式の再整理がおこなわれていないため、前述の『平城京・藤原京一覧』における型式分類をひとつの到達点として扱う。

2-2. 系統と年代

上述のように、現状で 15 種以上の瓦笵の存在が確認されている東大寺式軒丸瓦 6235 型式であるが、さらに、出土地や製作技法の特徴等によっていくつかの系統に分けられる。また、研究初期段階（奈文研 1975a : 15 頁）において、大仏開眼会のおこなわれた天平勝宝四年（752）頃とされた製作年代についても、研究の蓄積によってより細かな変遷について論じられるようになってきた。以下では、軒丸瓦 6235 型式の系統と年代に関する先行研究の概要を記す。

出土地による東大寺式軒丸瓦 6235 型式の分類は、前述の岡本東三（1976）の論考に始まり、東大寺で出土したものを第Ⅰ類、他寺院等で出土したものを第Ⅱ類に大別後、前者を７種に、後者を平城宮出土のものと西隆寺・西大寺出土のものの２種に細別した[6]。

これに対し、平城宮・京出土軒瓦全体の体系的な分類および分析をおこなった毛利光俊彦らは、6235 型式を３群に大別する（毛利光・花谷 1991[7] : 255-256 頁）。毛利光は、弁や外縁の形態変化と、内外縁を分かつ圏線の存否に着目し、弁が肉彫り風に盛り上がり外縁が傾斜縁でつくりが厚く、外区に内外縁を分かつ圏線をもち、中房の蓮子が１＋６のものを第１群とする。これらはE・G種に該当する。いっぽう、第２群は、弁や外縁が第１群と共通するが、圏線が省略され蓮子も１＋５のものが出現するとあり（B・F・J・M・N種が該当）、第３群は外縁が直立縁のものとする（C・D・I・K種が該当）。変遷は第１群→第２群→第３群の順と想定し、第１・２群は東大寺の造営が一段落する天平宝字元年（757）までの生産、第３群のうちC・I 種は神護景雲元年から宝亀二年頃（767-771）までの生産、D・K種はそれ以降の生産と位置付ける。

さらに、山崎信二（2003）は岡本論考以降の研究成果を総括し、製作技法の所見を反映させて、東大寺式軒瓦を再検討した。山崎は東大寺式軒瓦の定義を狭義と広義に分けるが、狭義の東大寺式軒丸瓦を「奈良時代の東大寺出土例で文様の酷似した一群」に限定し、その特徴として、①複弁蓮華紋で 8 弁をもつこと、②外区内縁に珠紋を配し、内縁に珠紋 16 をもつこと（E・F・G・H・K・M種が該当、D種のみ珠紋 18 で例外）、③珠紋が興福寺例などと比べて大きいこと、④外区外縁は素紋で傾斜縁が多いこと（D・F・G・H・K・M種が該当、例外として圏線をめぐらすE種が存在）、⑤間弁が独立していること、⑥中房が大きく１＋６の蓮子を配することを挙げる（山崎 2003 : 161 頁）[8]。いっぽう、広義の東大寺式軒丸瓦は 6235 型式全体を示すが、これらは製作技法と出土地の違いによって、①紋

様が狭義の東大寺式で丸瓦端面を片刃状に加工する東大寺出土のＤ～Ｍ種、②紋様は狭義の東大寺式の特徴をもつが丸瓦端面を未加工とする興福寺出土のＡ・Ｊ種、③紋様が狭義の東大寺式とは異なり丸瓦端面も未加工のＣ種の３つに大別し、①の東大寺出土瓦と②の興福寺出土瓦の間に極めて密接な関係を主張するには躊躇すると述べる（山崎 2003：177 頁）。

その後、2016 年には奈文研で「東大寺式軒瓦の展開」をテーマとするシンポジウムが開催され、平城宮や平城京内の諸寺院、頭塔をはじめ、日本各地の遺跡で出土した東大寺式軒瓦について総合的な検討・議論がおこなわれた。この 2016 年のシンポジウムの発表内容は、刊行物として出版されている（奈文研 2018）。

2-3. 瓦笵の作成と製品の供給

ここでは、上記の東大寺式軒丸瓦 6235 型式がどのように生産・供給されていたかについて、先学諸氏の研究の要点をまとめるとともに、それらを踏まえた本研究の目的を記す。なお、瓦の生産・供給については、一般的に同笵瓦の出土状況や製作技法の差異等によって検討されるが、本稿ではさらに一歩進めて、同紋異笵、すなわち紋様が酷似するものの異なる笵で製作されたと考えられる軒瓦の検討をおこなってから、瓦笵の作成に関する研究についても触れる。

2-3-1. 瓦の出土分布と生産地

東大寺式軒丸瓦の出土分布が種によって異なることは、1976 年の岡本論文で既に指摘があったが、近年の研究成果を踏まえた 2016 年のシンポジウム（奈文研 2018）によって、その傾向がより鮮明にわかるようになった。ここでは、6235 型式軒丸瓦のうち、東大寺所用瓦はＤ・Ｅ・Ｆ・Ｇ・Ｈ・Ｋ・Ma・Mb・Ｑ種、平城宮所用瓦はＢ種、興福寺所用瓦はＡ・Ｊ種、元興寺所用瓦はＯ・Ｐ種、西隆寺所用瓦はＣ・Ｉ種、頭塔所用瓦は Mb 種と理解する。

各遺跡での出土分布の背景として、岡本（1976）は、①瓦の移動（造東大寺司造瓦所で製作した瓦を他寺院に運搬）、②笵型の移動（造東大寺司所有の笵型を他寺院に貸与）、③工人の移動（他寺院に派遣された造東大寺司工人が東大寺を模して作瓦）の３つの可能性を想定し（岡本 1976：14-15 頁）、東大寺で出土する第Ⅰ類については①の瓦の移動、第Ⅱ類については③の工人の移動と考えた。東大寺所用瓦のうちＧ・Ma 種は新薬師寺でも高い比率で出土するが、製作技法の分析から製品そのものが造東大寺司から供給されたことが原田憲二郎（2018）によって検証されている。頭塔所用瓦である Mb 種については、組み合う軒平瓦 6732F の分析から、やはり造東大寺司によって製作されストックされていた瓦が頭塔に用いられたと考えられている（岩永 2001）。いっぽう、山崎（2003）以降、東大寺出土瓦との製作技法の差異が注目されたＡ・Ｊ種の生産地について、今井晃樹（2018）は造興福寺司の造瓦所で製作した興福寺所用瓦と考察したが、製作技法には東大寺や平城宮所用瓦からの影響も認められるとする。

以上の状況をまとめると、6235 型式に限定すれば、概ねどの種ももとは決まった寺院の所用瓦として、造寺司付随の造瓦所で製作されたものであり、他の寺院で出土した瓦については、基本的には瓦のみが移動、すなわち運搬されたと考えられている。

2-3-2. 瓦工と「瓦様」

同じ紋様の瓦当を大量生産するにあたり、瓦笵の存在は欠かせない。正倉院文書等の史料の分析によって、東大寺式軒丸瓦の生産母体である造東大寺司の造瓦組織については、ある程度状況があきらかになっている。すなわち、造東大寺司そのものの成立は天平二十年 (748) 頃と推定されるが、造瓦所に関する記載は天平宝字三年（759）の造東大寺司造瓦所解が初見であり、そこには将領と瓦工の記載がある。造東大寺司が深く関わっていた天平宝字四年（760）の阿弥陀浄土院の造金堂所解によると、瓦工には、生瓦作工・瓦焼工・玉瓦作工・瓦葺工（堂・垣）・瓦竈作工の区分があり、作業工程ごとに職務が細分されていたことがわかる。ただし、造瓦所において瓦笵等の製作に係る工人についての記載はない。

では、瓦笵の製作にはどのような工人が携わっていたのだろうか。瓦笵の製作は仏工など彫刻意匠を担当していた工人が担当したとの指摘が古くからあるが（関野 1928 : 46 頁など）、これを体系的に整理したのは森郁夫（1976・1982）である。森は造東大寺司の「写書所食口帳」に着目し、天平勝宝八年四月（756）の記事に画師９人のうち３人が「瓦様」を作成したとの記載があることを指摘する（森 1982 : ８頁）。この「瓦様」は瓦の下絵という意味であることから、造東大寺司では瓦当紋様の下絵を画工が描いたことが確実であり、その後、造仏所や木工所に下書きが渡され瓦笵を作成したとする。ここで森は、瓦当紋様の決定と瓦笵の製作は各造寺司や平城宮の造営官司がそれぞれおこなうものであり、瓦笵作成における画工の関与は造東大寺司にとどまらないと判断した（森 1976）。ただし、本稿で扱う 6235 型式のように「複数の造営官司の間で全く共通した瓦当文様が見られること」については、「他から一方へ瓦当笵製作の依頼があった場合や、上部機関が瓦当笵を管理した場合を考えることができるが、にわかには決めがたい」（森 1982 : ９頁）[9] とする。森が「にわかには決めがたい」としたこの点こそ、本稿の研究を通じて今後あきらかにしたいと考えている課題である。

なお、この瓦の紋様下図については山崎信二（2003）も言及する。山崎は東大寺の防災施設建設に伴う調査で新たに出土した 6235 型式の新種とされる 101F2・F3 型式について、紋様と製作技法の検討から、天平勝宝八年に造東大寺司が興福寺三綱務所に依頼して興福寺瓦窯で生産し、東大寺に運ばれた瓦に相当すると位置付けた。造東大寺司が興福寺に瓦の製作を依頼する際、興福寺側は、

表１　東大寺式軒丸瓦の紋様分類

型式	グループ	蓮弁	蓮子数	珠紋数	種	主な出土地
6235	1	複弁８弁	1＋5	16	C・I	西隆寺・西大寺・平城宮
6235	2	複弁８弁	1＋5	17	B	平城宮・西隆寺他
6235	3	複弁８弁	1＋6	16	A・E・F・G・J・K・Ma・Mb	A・J：興福寺 E・F・K：東大寺 G・Ma：東大寺・新薬師寺 Mb：東大寺・頭塔・西大寺
6235	4	複弁８弁	1＋6	18	D	東大寺
6235	5	複弁８弁	1＋6	不明	O・P・Q	O・P：元興寺 Q：東大寺
6234	3	複弁８弁	1＋6	16	A	薬師寺・東大寺・新薬師寺

大きさや紋様についての一定の「瓦の図」と標識見本としての現物を受け取り、それをもとに笵型を作成したが、この笵型で作られた軒瓦が興福寺の寺域内で出土しないため、製品とともに笵型も東大寺に納品したと想定している（山崎 2003：297-298 頁）。

上述のように、東大寺で出土する軒丸瓦 6235 型式の各種瓦は、基本的には製品である瓦のみの移動と解釈されている。しかし、山崎（2003）が推定するような紋様下図を渡した上で、瓦の生産依頼がおこなわれていたとすれば、「瓦様」と記された瓦笵製作用の紋様下図についても詳しく検討する必要がある。この紋様下図を共有する型式・種の存否とその特徴を検討することによって、当時の寺・宮を造営する官司の関係性の一端を明らかにすることができると考えるからである。

2-4. 本稿で扱う主な型式

軒丸瓦 6235 型式の 15 種は、前稿（中村・林 2018）でも表に示したように、蓮子や珠紋の個数によって５つのグループに分けられるが（表１）、同じグループ内の種には、蓮子・珠紋の個数や位置が酷似するため判別が困難なものが複数存在する。本稿では、中房に１＋６の蓮子、外区内縁に 16 の珠紋をめぐらし、山崎（2003）によって狭義の東大寺式とされた軒丸瓦 6235 型式のうち、奈文研が多くの資料を所蔵するＡ・Ｊ・M種について検討する。M種は東大寺所用瓦、Ａ・Ｊ種は興福寺所用瓦とされ、出土地とともに製作技法、ひいては生産地の違いが指摘されてきたが、紋様の特徴は極めて近く、後述するように種の認定が何度か見直された経緯がある。さらに、これらの種の分析過程で、複弁の表現が異なるものの蓮子・珠紋の個数が同じである 6234 型式Ａ種にも共通性が認められたため、これも検討対象資料に加えた。以下ではこの２型式４種（図１）について、これまでの瓦笵の認定経緯について記す。

2-4-1. 6235 型式Ａ種（図１－３）

6235A という型式名および種は『平城宮発掘調査報告Ⅵ』（奈文研 1975b）で初めて使用され、平城京東三坊大路の調査区において 6235B・D の２種とともに出土が報告された。それ以前では、『興福寺食堂発掘調査報告』（奈文研 1959）において第９型式[10]として瓦当の写真が掲載されたのが 6235A の初見であろう。軒丸瓦第９型式が、現在の 6732E に相当する軒平瓦第 21・22 型式と組み合うことを指摘し、さらに、軒丸瓦第 10 型式について「第９型式の笵の崩れたもので、諸寺で同様の型式のものが報告されている」（17 頁）と記述する。この、第 10 型式が第９型式と同笵瓦で、笵傷や紋様の崩れが進行したものであるとみなす点は、特筆すべきである。

6235A の命名後も、当該型式・種の瓦を、報告や論文において異なる名称で記載する事例は散見される。前述した岡本（1976）の論文では東大寺式軒丸瓦第Ⅰ類Ａとされ、『興福寺防災施設工事・発掘調査報告書』（興福寺 1978）では笵傷の崩れが進行した段階と思われる軒丸瓦を 16D として掲載する。また、藪中五百樹（1990）の「奈良時代に於ける興福寺の造営と瓦」ではⅡ丸 A1 が 6235A に相当する。なお、このように 6235A は、興福寺の発掘調査で出土例が確認されていたが、岡本（1976）は主な出土地は東大寺であるとし、6235 型式のうちＡ～Ｈ種を掲載した『平城宮一覧』（奈文研 1978b）では岡本の認識を踏襲、『平城宮発掘調査報告ＸⅢ』においてもＡ種は東大寺の創建瓦と認識した

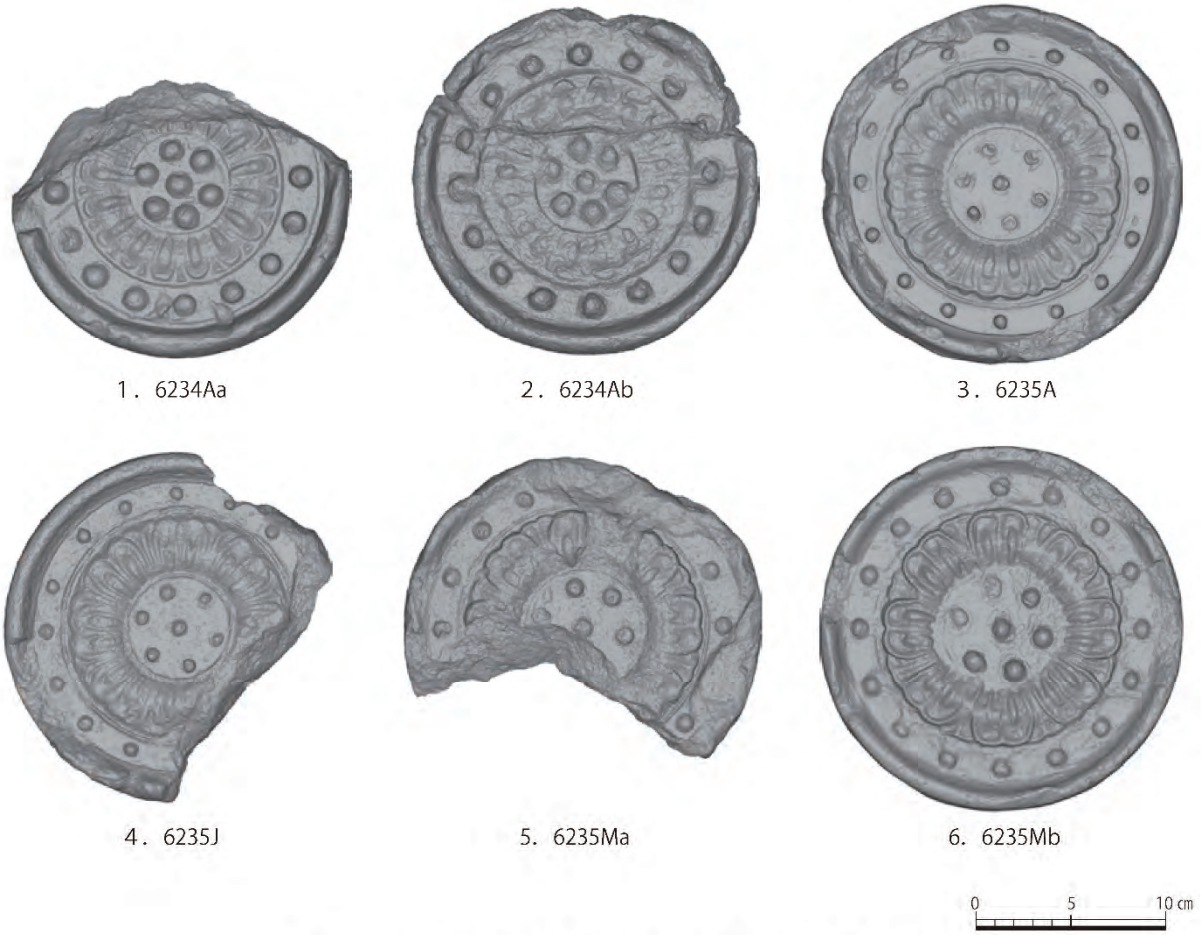


図１　本稿で扱う東大寺式軒丸瓦6235型式と6234型式

（毛利光・花谷 1991）。しかし、『東大寺防災施設工事・発掘調査報告書』（奈良県教委 2000）では東大寺境内におけるＡ種の出土例は報告されていない。

以上を踏まえ、6235A を興福寺所用の東大寺式軒丸瓦と初めて明記したのは山崎信二（2003）の「東大寺式軒瓦について」である。山崎は、6235A の製作技法上の特徴として、瓦当に接合する丸瓦端面を片刃状に切り取らないことを挙げ、東大寺所用瓦との違いを指摘した。今井（2018）が 6235A を再検討した結果、当該瓦は興福寺以外からほとんど出土していないことがあきらかとなり、さらに、瓦当裏面には興福寺式軒丸瓦に特徴的な布目押圧技法や、丸瓦先端に刻みを入れて瓦当に接合するなどの特徴が確認されたため、興福寺所用の軒丸瓦であることを改めて承認した。

2-4-2. 6235 型式Ｊ種（図１－４）

6235J の型式名は、1984 年刊行の『平城宮一覧補遺篇』が初出である。岡本論考において ID 種として初めて認識され、「蓮弁の反転が少なく瓦当面が平坦である」（岡本 1976）と表現される。藪中（1990）の分類ではⅡ丸 A2 に該当し、「蓮弁の反転はなく、また弁の先端はなだらかに傾斜するように彫られる」と特徴づけられ、毛利光・花谷（1991）の分類では第２群に含まれる。他に、今井（2018）は、Ａ・Ｂ種と同様に外区外縁と瓦当の地の部分との境目に段が見られる点や、Ｊ種の間弁の幅がＡ種よりも広い点を特徴として指摘するが、今回扱う他の種に比べ圧倒的に出土数が少ない種であ

ることもあり、既存の報告書や論文におけるＪ種の記述内容は極めて少ない。

Ｊ種は、これまで興福寺旧境内からのみ出土しており、興福寺所用の瓦であると考えられている（石田 2015：今井 2018）。特に、後の一乗院から出土する割合が多い。一乗院出土瓦の検討をおこなった今井（2021）は、6235J が 6235A とともに軒平瓦 6732E と組むこと、およびその出土状況から、天禄元年（970）の一乗院創設以前の基壇建物で使用した可能性があることを指摘する。ところで、先述の岡本（1976）は、ID 種を東大寺のものと認識したが、同論文に掲載されているのは、現在瓦又[11]が所蔵する表採瓦の拓本であり、正確な採集地点は知られていない。東大寺においてＪ種の出土が確認されていない状況を踏まえると、岡本（1976）が東大寺のものとして掲載した表採瓦も、興福寺旧境内で採集された可能性があるといえる。

2-4-3. 6235 型式Ｍ種（図１－５・６）

6235M が初めて記載されたのも、J 種同様に 1984 年の『平城宮一覧補遺篇』である。ここでは Ma・Mb という笵の彫り直しに関する記載はなく、1991 年刊行の『平城宮発掘調査報告ＸⅢ』における毛利光・花谷（1991）の報告でも言及されない。いっぽう、同じく 1991 年に刊行された上人ヶ平遺跡の発掘調査報告書（京都府埋文 1991）には 6235Ma の記載があることから、これが Ma・Mb の区分をおこなった初めての報文といえる。

その後、1996 年刊行の『平城京・藤原京一覧』では Ma・Mb の区分が用いられるようになるが、ここで注目すべきは、『平城宮一覧補遺篇』や『平城宮発掘調査報告ＸⅢ』で使用された種に欠番が認められ、かつてＮ種とされていた資料が『平城京・藤原京一覧』では Ma 種に変更されている点である。岩永省三は、Ｍ種の認定時期は 1978 年の頭塔の第 114 次調査における大量出土の後であり、上人ヶ平遺跡で出土した笵傷が少なく彫り直しがない個体を Ma とし、頭塔出土品を Mb に変えたと考えるが（岩永 2001：140 頁）、上人ヶ平遺跡の出土瓦の検討によって、従来Ｎ種とされていたものがＭ種であることが判明したため、Ma・Mb の区分をおこないＮ種を欠番とするに至ったのであろう。

2-4-4. 6234 型式Ａ種（図１－１・２）

6234 型式はＡ種のみで、やはり『平城宮一覧補遺篇』（奈文研 1984）が初出である。この段階で笵の彫り直しがあったと認識された。これは奈文研が調査した薬師寺西小子房の調査（奈文研 1978b：29-31 頁）および東大寺祭器庫の建設にともなう調査（奈文研 1980：35 頁）の出土品の観察による。その後、『薬師寺発掘調査報告』（奈文研 1987）で 6234Ab の詳細が報告され、『平城宮発掘調査報告ＸⅢ』（毛利光・花谷 1991）では「大きくは東大寺系に属するが（中略）東大寺式のくずれた軒瓦」（262 頁）とし、東大寺式軒平瓦 6732D・H と組むと考えた。『唐招提寺防災施設工事・発掘調査報告書』（奈良県教委 1995）でも 6234Ab の出土例が報告され[12]、『東大寺防災施設工事・発掘調査報告書』（奈良県教委 2000）では 6234Aa とともに 6234Ab も一定程度出土していることが報告された。また、『新薬師寺旧境内』（奈良教育大学 2012）では、新薬師寺でも 6234Aa が少量ながら使用されたことがあきらかになった。

2-4-5. 目視観察による型式判別から見えてきた課題

以上、6235 型式のＡ・Ｊ・M種および 6234 型式Ａ種の型式認定の経緯をまとめたが、これらに関しては型式・種を超えた判別の課題も存在する。まず、6235 型式Ａ種とM種の判別について述べると、Ａ種は岡本（1976）の論文には東大寺で出土したと記載されるが、いっぽう 1991 年の『平城宮発掘調査報告書ⅩⅢ』や 1996 年の『平城京・藤原京一覧』には、Ａ種は東大寺ではなく、興福寺からの出土として掲載される。このＡ種の出土地に関する記載の変化の背景として、岩永は、かつてＡ種と認識されていた東大寺出土品がM種として見直された結果ではないかと推測する。理由として、Ａ・Ｆ・Ｊ・Mの各種は類似度が高く、それでもＦ・Ｊ種の区別は可能であるが、Ａ種とM種の違いは頭塔でM種が多量に出土されるまで認識されなかったことを指摘する（岩永 2001：140 頁）。さらに、6235 型式Ａ種と 6234 型式Ａ種の区別も、笵の彫り直しを重ねた段階では困難になる。今井（2018）は 6235 型式Ａ種が笵傷と彫り直しの状態によって３つの段階に分けられることを指摘したが、このうち第２段階と第３段階の資料として提示した瓦は、従来 6234A として認識されていたものである。同笵の根拠となった中房内を走る笵傷は両方の型式に認められる特徴であるため、個別資料の型式判定にあたっては悉皆的に調査・検討する必要が生じた。

このように、比較的研究が蓄積されている東大寺式軒丸瓦においても、目視観察による個別瓦当の型式判断には困難を伴う部分がある。本研究では 6235 型式Ａ・Ｊ種と 6234 型式Ａ種については悉皆的に、資料数が膨大な 6235 型式M種については、段階ごとに残存状況が良好な資料を選別して三次元計測し、そのデータを比較することで、これらの型式・種の同定に関して再検討し、なぜ高い類似性が認められるのか、その原因について考察する。

３．研究の手法

既存の多くの瓦研究において、瓦という考古資料の観察はもっぱら目視によっておこなわれており、同笵瓦かどうかについての判断も、比較する複数の資料を実際に並べて検討することが多い。胎土や色調によっては紋様の微細な凹凸が確認しにくい資料もあり、また、同笵製品であっても乾燥・焼成時の収縮率の違いによって瓦当径に大きな違いが生じることもある。さらに、瓦の記録と所見の提示には、文章での説明以外に写真や拓本、実測図という手法が用いられてきたが、それらによって記録・表現できる情報には限りがあり、資料を実見できない第三者がその所見を検証することは非常に困難であった。

そこで、本研究では、資料を検討するにあたり、従来の目視観察に加え、三次元計測データを利用することにした。以下では、瓦当紋様の三次元計測の手法と、取得した三次元計測データを比較する手法について記す。なお、本研究における手法の検討段階の状況については前稿（中村 2018：中村・林 2018）に述べている。

表２　SfM-MVSによる瓦当面の三次元計測の流れ

	作業工程	データの状態
画像セットの作成	写真撮影（瓦当1点につき50枚程度）	JPEG+RAW
	RAWの現像とTIFF画像の書き出し	RAW→TIFF
SfM-MVS	Metashape proでの解析	
	1．写真のアラインメント	点群（低密度）
	2．高密度クラウド構築	点群（高密度）
	3．メッシュ構築	三次元モデル（精細な色情報なし）
	4．テクスチャー構築	三次元モデル（精細な色情報あり）
	5．スケール情報の入力	三次元モデル（大きさ情報あり）
三次元データの完成	三次元データの書き出し（メッシュOBJ）	OBJ

3-1. 瓦当の三次元計測

今回の瓦の三次元計測には、デジタルカメラで撮影した複数の写真画像をパソコンソフトで解析し、三次元形態情報を取得する SfM-MVS（Structure from Motion and Multi-View Stereo）という技術を用いた。写真を撮影したカメラはミラーレスの一眼カメラ OM-D E-M1 MarkⅡ（オリンパス社）であり、マクロレンズ（30 ㎜ /F3.5）を装着した。写真は絞り優先モードで撮影し、Ｆ値を 10 前後、ISO は 200 に設定し、瓦当１点につき 50 枚程度を撮影した。画像の画素数は 5,184×3,888pixel で、解析には RAW データを TIFF に現像した画像を使用した。

SfM-MVS の解析には、ソフト Metashape Professional（Agisoft 社）を用い、写真のアラインメントを最高、高密度クラウド構築を最高でおこない、信頼度が低い（おおよそ２未満の）点群をフィルタリング・削除した後、それをもとにメッシュ（ポリゴン数：高）を構築して三次元モデルにする。最後に、三次元モデルのメッシュに 4,096pixel のテクスチャーを貼り付け、ターゲットマーカーをもとにスケール情報を与えた。本稿で提示するデータを解析した時の Metashape の最終バージョンは 1.7.2 である。生成したメッシュデータは.obj 形式で書き出した[13]（表２）。

3-2. 三次元計測データの比較

取得した三次元データの比較には、オープンソースソフトウェアである CloudCompare（バージョン 2.11）を用いた。まず、瓦当の紋様面が平らに、かつ資料としての天地が合うように三次元モデルの傾きを調整し、正射投影表示（Orthographic projection）にする。なお、三次元モデルは、色情報のあるテクスチャー表示（図２－１）ではなく、サーフェス表示（図２－２）にすることで、表面の微細な凹凸が観察しやすくなる。パソコンのモニター上で観察することもできるが、実資料と見比べながら確認する場合などは、等倍以上に拡大した画像として書き出すこともできる（Display＞Render to File）。この画像をもとに、各型式・種の紋様構成を検討した。

次に、各型式・種の瓦が平面的・立体的にどの程度一致するかを検討したが、これにはソフト

1．テクスチャー表示

2．サーフェス表示

0　5　10 cm

図２　三次元モデル（6235A）の表示

CloudComapre の位置合わせ機能（Aligns two clouds by picking (at least 4) equivalent point pairs）を用いた。この位置合わせ機能は、選択した２つの三次元モデルそれぞれの上で、一致すると判断した任意の場所４か所以上に参照点を置き、それをもとにコンピューターで２つの三次元モデルの位置を合わせる機能である（図３）。２つの三次元モデルをコンピューターのICPアルゴリズムによってさらに厳密に位置合わせする機能（Finely registers already (roughly) aligned entities (clouds or meshes)）も存在するが、そもそも、この機能は同じ型や設計で作られた工業製品が規格に合っているかを検査する際等に使われるものであり、乾燥や焼成によって収縮し、個体ごとの焼き歪みや欠損等が生じやすい出土土製品の比較においては、必ずしも適しているとはいえない。ましてや、古代においては、時に１つの瓦笵を用いて 1,000 を超える瓦当に施紋したことが知られており、使用過程において、瓦笵は摩耗したり傷が生じたり、時には彫り直しなど改笵をおこなうこともある。目視観察により同笵瓦の識別と先後関係を判断する際は、紋様の同じ箇所に共通する笵傷が存在するか、笵傷の進行具合と改笵による紋様の変化が逆行しないかということ等に着目する。しかし、笵傷の出現や進行、改笵によって生じる紋様の変化は、コンピューターによる比較では、「異なる」特徴として認識され得る性格のものであり、「同じ」型による製品かどうかを判断するには適さない。

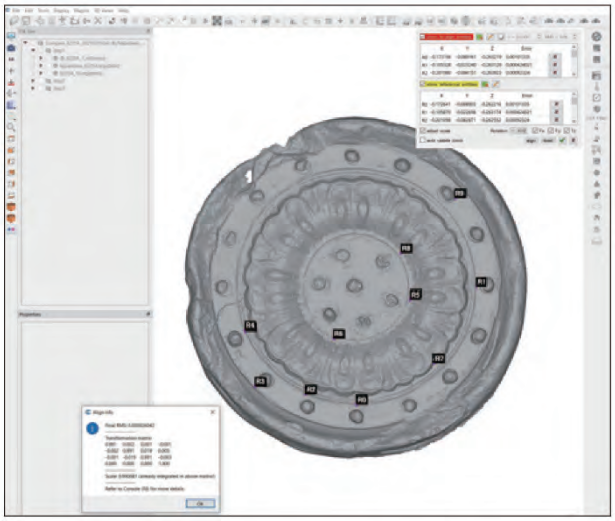


図３　三次元モデルの位置合わせ

上記の点を踏まえ、本研究では、①三次元計測した瓦当の表面情報（サーフェス画像）を目視で観察

し、瓦笵の紋様や劣化・笵傷の状態を確認・分類、②同紋異笵と考えられる複数の三次元モデルを位置合わせし平面や断面を比較検討、③同笵と考えられる複数の三次元モデルを笵傷の状態や彫り直しの段階が近いと考えられるものから順に位置合わせし、平面や断面を比較検討する、という手順を踏んだ。

位置合わせの際に指定する４点以上の参照点は、③のうち瓦笵の劣化・彫り直しが近い段階と考えられる資料の比較をおこなう際には、瓦当の地の面のうち紋様の始点やくびれ部分に接する場所に置いたが（図３）、異笵製品のデータと考えられる②や、同笵でも大きく改笵した前後と考えられる瓦のデータを比較する際には、残存する珠紋と蓮子全点の中心に置くものとした[14]。なお、同笵瓦であっても、収縮率の違いにより紋様面の大きさが異なることが多い。そのため、位置合わせの際は、瓦笵の劣化・彫り直しが少ない段階で、かつ紋様面が完形に近い資料の三次元データを基準データ（Reference）とし、比較・位置合わせする方のデータ（Aligned）の大きさを適宜拡大・縮小する（adjust scale）よう設定した。

４．分析結果と考察

本章では、まず、各型式・種の瓦当のサーフェス画像から紋様構成について考察する。その際、破片資料しか残存していない型式・種に関しては、上記の方法で複数の三次元モデルの位置合わせをおこなうことで、できるだけ完形に近い紋様を復元する。次に、同紋異笵と考えられる 6235A・J・M と 6234A の平面および断面形態を比較し、型式・種間の差異をあきらかにする。その上で、各型式・種の瓦笵がどのように劣化し改笵されたかについて検討する。

4-1. 各型式・種の紋様構成

4-1-1. 6235 型式Ａ種

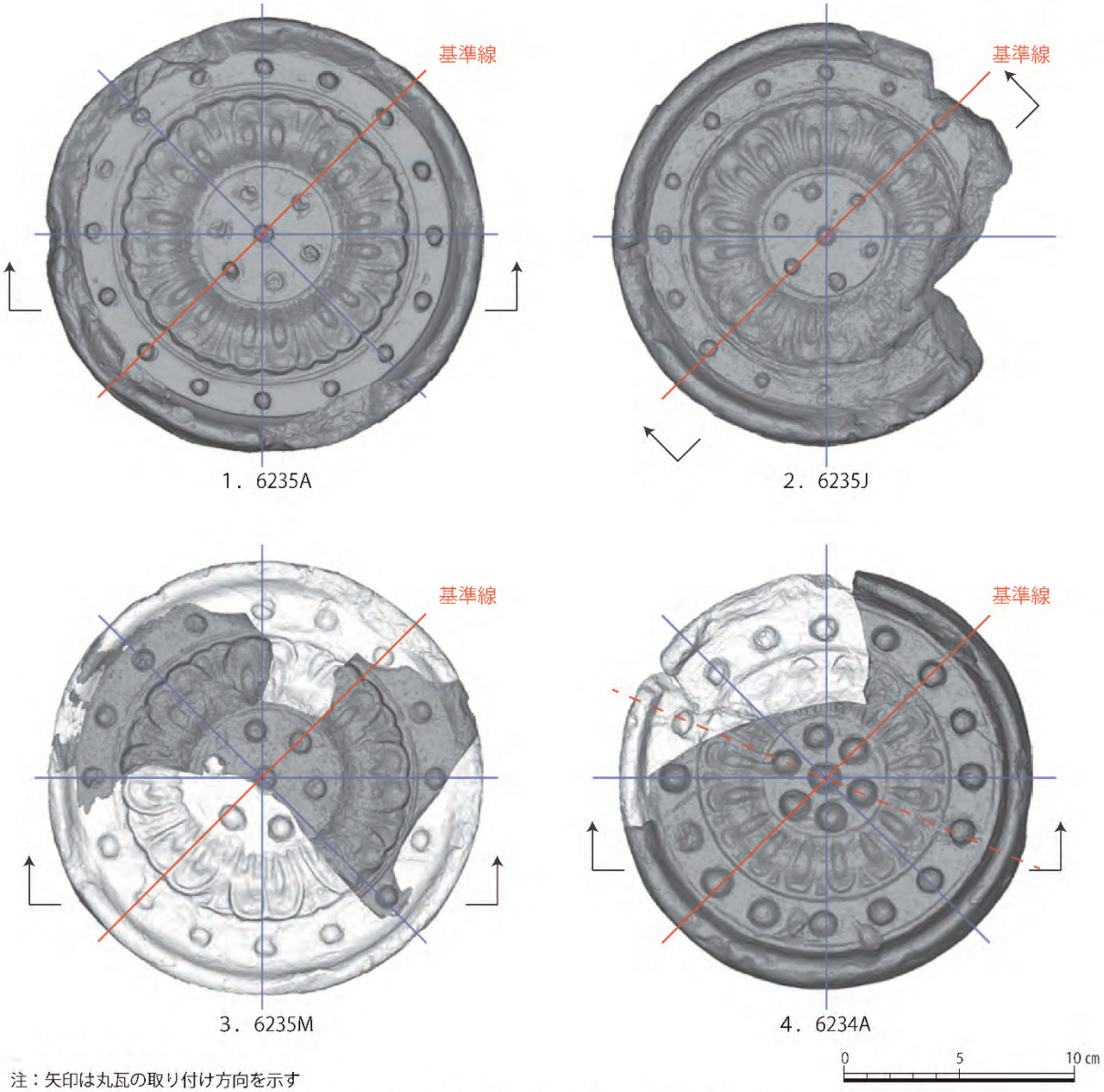
図４－１は 6235A の資料のうち、残存状況が極めて良好で、笵傷が少ないもの１点分の三次元モデルのサーフェス画像である。この三次元モデルは、図４に示した丸瓦の取り付け位置（矢印が指す方向が天の向き）に従って天地の表示をおこなった。前述したように紋様は８弁複弁蓮華紋で、蓮弁間をＹ字形の間弁でつなぎ、内区中房に１＋６の蓮子を配置する。蓮弁の外側には圏線を１条めぐらせ、外区外縁の立ち上がりの境目にも段が認められる。外区内縁には 16 の珠紋を配置する。ここで、向かい合う２つの複弁の中心線を結び、その延長線上に位置する外区の２つの珠紋を通る補助線を引くと、赤線で示したように、そのうち１本が中房で中央蓮子を含む３つの蓮子を通ることがわかる。これを紋様の基準線とする。

基準線で分けると、6235A の紋様はおおよそ左右対称の関係になるが、中房の中心の蓮子と外側の蓮子の距離は左上側に比べて右下側がやや長い。蓮弁および間弁の輪郭線は強めに線状に強調され、子葉の高く盛り上がった部分の両隣りが盛り上がり、間弁の輪郭線が曖昧になる部分もある。外区の珠紋は小さく、ほぼ均等に配置される。

4-1-2. 6235 型式 J 種

図４－２で提示した 6235J の紋様は、残存状況が良好な資料（図１－４）の三次元モデルを基準に、瓦笵の状態が近いと判断した２点分の資料の三次元モデルの位置を合わせ、復元したものである。6235J の資料が少なかったため、今回は紋様全体を復元できなかった。上記の手法で補助線を引くと、6235J にも 6235A と同様に基準線が設定できる。6235J の丸瓦の取り付け位置は、確認できたものでは基準線と並行している。

内区から順に紋様の特徴を観察する。中房の蓮子の配置は基準線を中心にほぼ左右対称であるが、基準線の右側下方に位置する蓮子は他に比して中房端部に寄る特徴がある。中心の蓮子と周囲の蓮子の間の距離には大きな差がなく、周囲の蓮子と中房の輪郭線の距離が 6235A に比べると近い。蓮弁や間弁はなだらかに盛り上がり、立体的に表現される。蓮弁の周囲を圏線が１条めぐり、その外



注：矢印は丸瓦の取り付け方向を示す

図４　6235型式A・J・M種と6234型式A種の紋様構成

側の外区には小ぶりの珠紋が配されるが、間隔は場所によってややばらつきが認められる。外区外縁の立ち上がりには、Ａ種同様に段がある。

4-1-3. 6235 型式Ｍ種

図４－３は、図１－５で提示した 6235Ma の三次元モデルに、同図－６で提示した残存状況が良好な 6235Mb １点の三次元モデルを位置合わせし、復元したものである。奈文研が所蔵する 6235Ma の資料は極めて少ないため、紋様の全容を理解する助けとして、6235Mb の資料のデータで補った。なお、両者は彫り直しの段階が異なると判断される資料のデータであるため、図４では、改笵後と思われる Mb のモデルを表示した部分を淡色で示した。

6235M にもＡ・Ｊ種と同様の紋様基準線が設定できる[15)]。内区の蓮子の大きさはＡ・Ｊ種に比べると大きい。中房の輪郭線は、改笵前の Ma の三次元モデルで比較的明瞭に観察できる。基準とした 6235Ma の資料は既に瓦笵の劣化が進んだ段階のものと思われ、蓮弁の子葉部分付近が盛り上がり、蓮弁や間弁の輪郭が曖昧になっている。なお、Ｍ種の蓮弁や間弁の表現はＪ種よりＡ種に近い。外区の珠紋はＡ・Ｊ種に比べると大きく、おおよそ等間隔に配置される。

4-1-4. 6234 型式Ａ種

6234A は 6235 型式の各種とは異なり、間弁と蓮弁中央の輪郭線の見分けがつきにくく、単弁蓮華紋のような表現をとる。6234A も改笵前の Aa 段階の資料が少ない。図４－４は、図１－１で提示した 6234Aa の基準資料の三次元モデルに、もう 1 点分の Aa 段階の資料の三次元モデルと、図１－２で提示した Ab 段階の三次元モデルの位置を合わせて復元した画像である。Ab 段階の紋様部分は淡色で表示した。紋様基準線は赤の実線で示したもの以外に、それを反時計回りに約 112.2 度回転させた赤の破線も候補として挙げられるが、本稿では実線で図示した線を基準線とした場合の分析結果を示す。

6234A の中房の蓮子は、6235 型式の各種のものに比べると、改笵以前においてすでに極めて大きい。そのため、蓮子間の距離が近い。蓮弁と間弁が前述のように同化しており、単弁蓮華紋のような印象を受ける。また、蓮弁を外周する圏線は蓮弁の先端と接しており、一体化している。外区をめぐる珠紋も蓮子同様に巨大であり、その間隔は場所によって若干ばらつきが認められる。

表３　各型式・種の瓦当の半径と中央蓮子―珠紋間の距離

型式・種	段階	主な使用図版	A（瓦当半径）単位：cm				A平均	B（中央蓮子・珠紋間）単位：cm				B平均	C（B/Aの値）				C平均
			−X	+X	−Y	+Y		−X	+X	−Y	+Y		−X	+X	−Y	+Y	
6234Aa		図１－１	8.8	9.2	9.1	−	9.0	6.5	6.5	6.3	−	6.4	0.73	0.70	0.70	−	0.71
6234Ab		図１－２	9.1	9.1	9.0	9.2	9.1	6.6	6.7	6.6	6.7	6.7	0.73	0.74	0.73	0.73	0.73
6235A	0	図1-3、図8-1-1	−	9.6	9.5	9.5	9.5	7.4	7.5	7.3	7.3	7.4	−	0.78	0.77	0.77	0.77
6235A	1	図８－１－２	9.1	9.4	9.2	−	9.2	7.2	7.4	7.1	−	7.2	0.79	0.79	0.77	−	0.78
6235A	2	図８－１－３	8.8	−	9.1	−	9.0	7.1	7.2	7.3	−	7.2	0.80	−	0.80	−	0.80
6235A	3	図８－１－４	−	9.2	−	8.5	8.9	−	7.1	−	6.9	7.0	−	0.78	−	0.81	0.79
6235A	4	図８－１－５	−	−	−	9.4	9.4	7.0	−	−	7.0	7.0	−	−	−	0.74	0.74
6235A	4	図15-2	9.1	−	8.7	−	8.9	6.8	7.3	7.0	−	7.0	0.75	−	0.80	−	0.78
6235J		図１－４	9.3	−	−	9.3	9.3	7.0	−	−	7.1	7.1	0.75	−	−	0.76	0.76
6235Ma		図１－５	9.5	9.4	−	−	9.4	7.5	7.4	−	−	7.4	0.79	0.79	−	−	0.79
6235Mb	4	図１－６	9.6	9.6	9.5	9.6	9.6	7.4	7.5	7.5	7.4	7.4	0.77	0.78	0.78	0.77	0.78
6235Mb	7	図11-3	9.6	−	−	9.5	9.6	7.5	−	−	7.5	7.5	0.78	−	−	0.78	0.78

なお、6234A は 6235A・J・M に比べ、紋様面がやや小さい。図４の各型式・種の三次元モデルの大きさは、それぞれ基準とした資料のものであり、補完するために位置合わせした資料の三次元モデルは基準資料に合わせて拡大・縮小されている。表３に、本稿で扱った個別資料の計測値を提示するので適宜参照されたい[16)]。

4-1-5. 各型式・種の紋様の重複関係と断面形態の比較

このように、6235A・J・M および 6234A の瓦当紋様は、蓮子や珠紋、蓮弁の数が同じであることに加え、同様の位置で紋様基準線が設定でき、各紋様構成要素の相対的な位置関係が極めて類似することがわかった。次に、6235A の三次元モデルを基準とし、6235J・M と 6234A の三次元モデルそれぞれの大きさと位置を合わせ、両者の紋様の重複関係と細部の断面形態を比較する。

図５は 6235A を基準に、赤表示した 6235J の三次元モデルの大きさ・位置を合わせ、比較した図である。紋様の重複関係が分かるように、6235J の三次元モデルは図５－３では欠損部分を除去し、透過度を下げて表示した。全体を示す図５－３では蓮子や珠紋、中房輪郭線等でズレが若干確認できるが、蓮弁や間弁、圏線の位置が基本的に一致しており、紋様の重複関係は極めて良好といえる。同図－４で示す左上部分を拡大して表示・比較したものが同図－５～７である。平面では、中央の蓮子と下から２番目の珠紋を結ぶ線上で紋様のズレが大きく、間弁の形態や大きさも一致しない。断面は、①間弁の中心、②複弁蓮華紋の中心、③子葉の中心を通るように３か所で切断したが、それぞれ立ち上がり方の特徴に若干の違いが認められる（図５－７）。

図６では 6235A を基準に、6235Ma の三次元モデル（赤）を位置合わせ・比較した。後者の欠損部分が大きいため、比較できるのは紋様の半分にも満たないが、蓮弁や間弁の形態、珠紋の間隔は図 5 よりも一致度が高い。蓮子は、6235Ma の方が相対的に大きく、位置も全体的に若干のズレが生じている。右上部分（図６－４）を拡大した図６－５～７でも、蓮子のズレと大きさの違いが目立つ（図６－７）。断面形態も比較的特徴が似ているが、Ma の方が全体的に輪郭線を太く彫っていることがうかがえる。

図７では 6235A を基準に、6234Aa の三次元モデル（赤）の位置・大きさを合わせた。表３のＣで示したように、この両者は瓦当径に対する紋様面の比率が異なるため、蓮子と珠紋に参照点を置いて紋様の位置合わせをおこなうと外区外縁の位置が大きくズレる。図７－４で示す右下部分を拡大すると、6234A は 6235A に比べ蓮子や珠紋の相対的な大きさが２倍近くあり、外区外縁下の段の位置が大きくズレる。いっぽう、蓮弁と間弁が紋様面に占める割合は同程度であり、中房の輪郭線の位置もおおよそ一致するが、蓮弁の外側をめぐる圏線は、6234A では蓮弁に一体化しており 6235A と同じ場所には認められない。こうしてみると、笵傷の無い段階の 6235A と 6234A の紋様の一致度はさして高くないように思われる。しかし、瓦笵が劣化し彫り直しを経ると、両型式の製品の紋様は極めて類似し、見分けがつきにくくなる。それを示すために、次に、複数の同笵瓦の分析から、それぞれの型式・種の瓦笵がどのように劣化し改笵されたかを検討する。

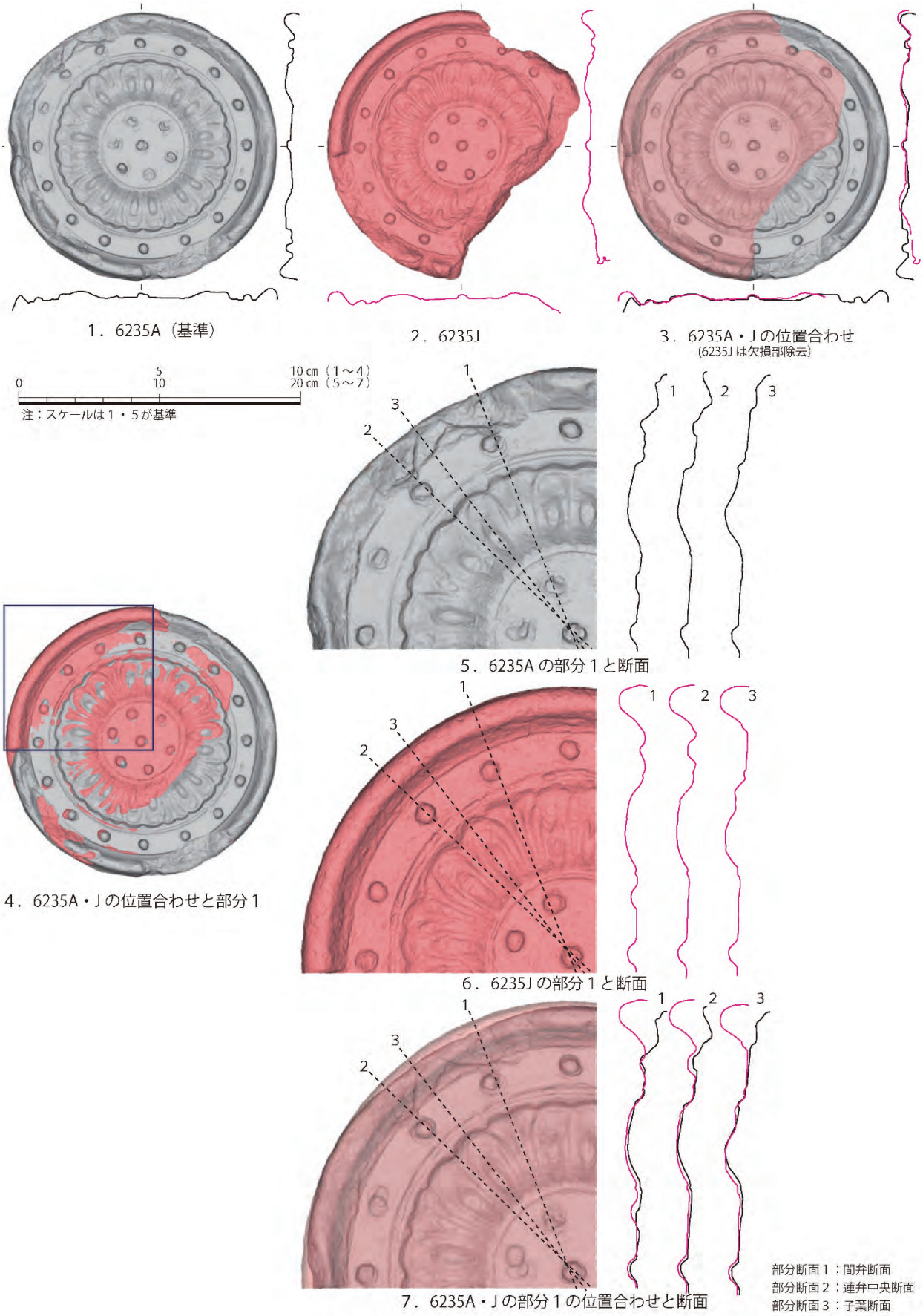
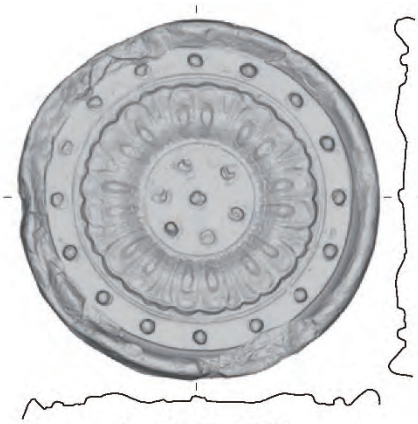
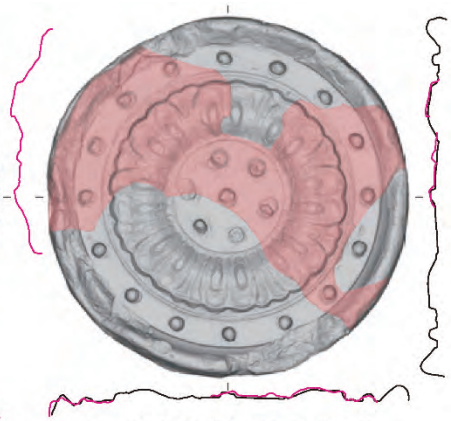


図5　6235型式A・J種の紋様比較

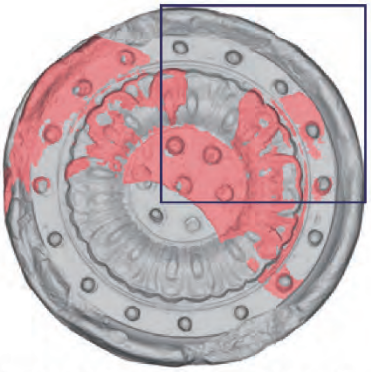


1．6235A（基準）

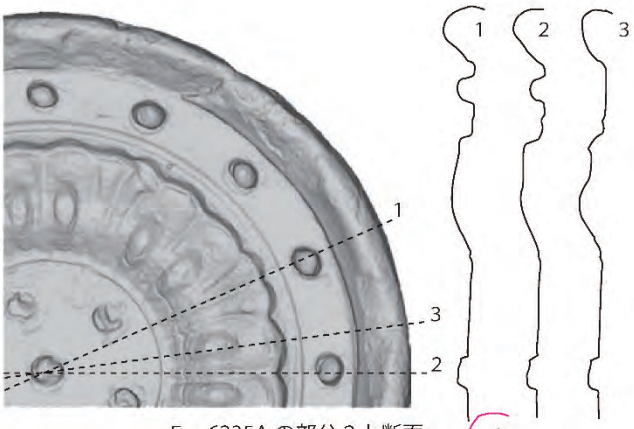
2．6235Ma



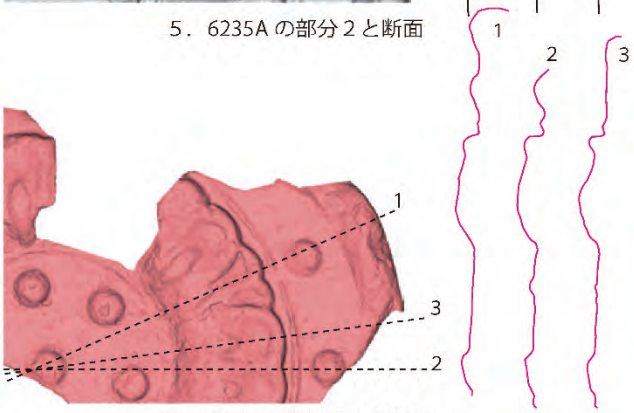
3．6235A・Ma の位置合わせ
（6235Ma は欠損部除去）



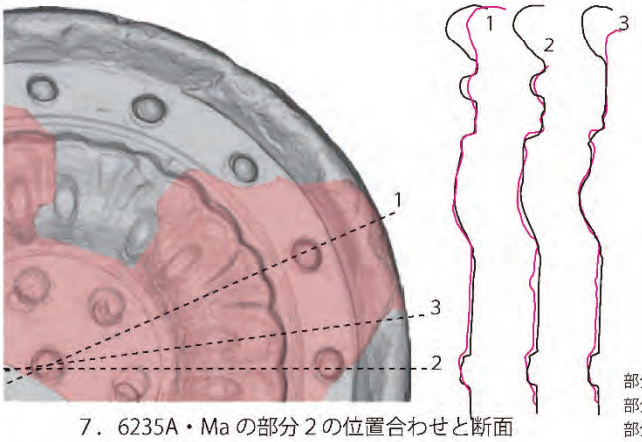
4．6235A・Ma の位置合わせと部分２



5．6235A の部分２と断面



6．6235Ma の部分２と断面



7．6235A・Ma の部分２の位置合わせと断面

部分断面１：間弁断面
部分断面２：蓮弁中央断面
部分断面３：子葉断面

図６　6235型式Ａ・Ｍ種の紋様比較

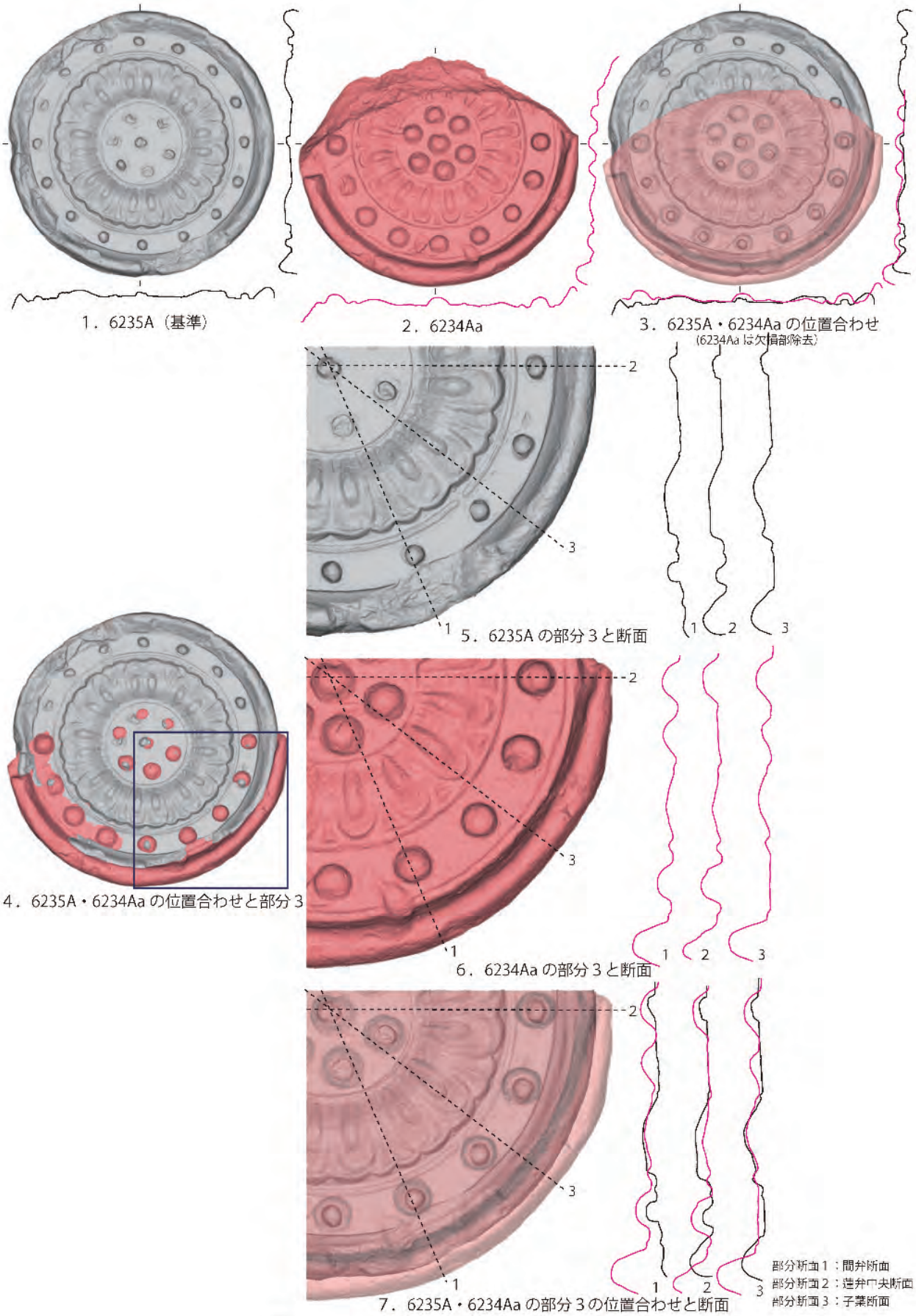


図７　6235型式Ａ種・6234型式Ａ種の紋様比較

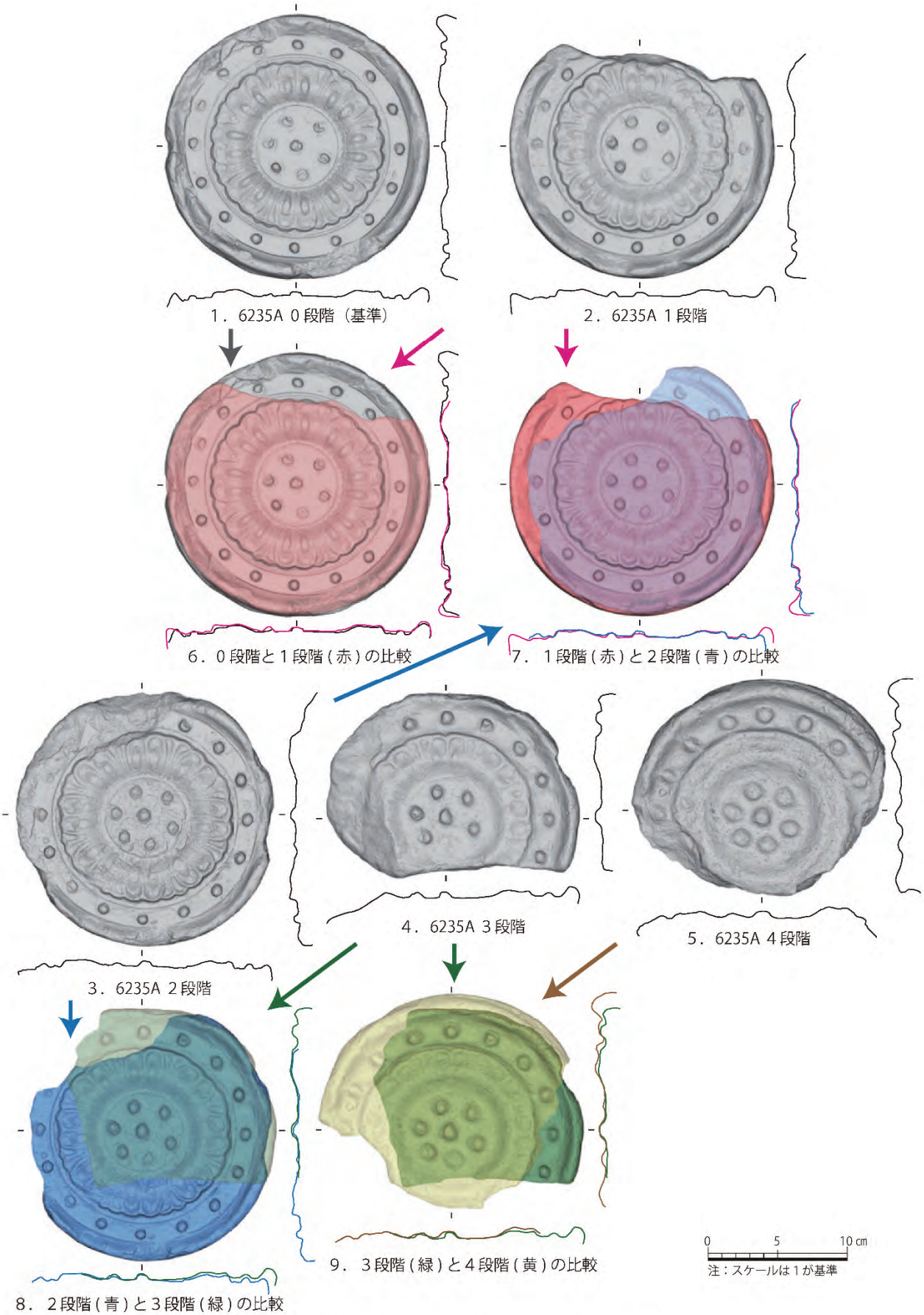


図8－1　6235型式A種の瓦笵の変化（全体その1）

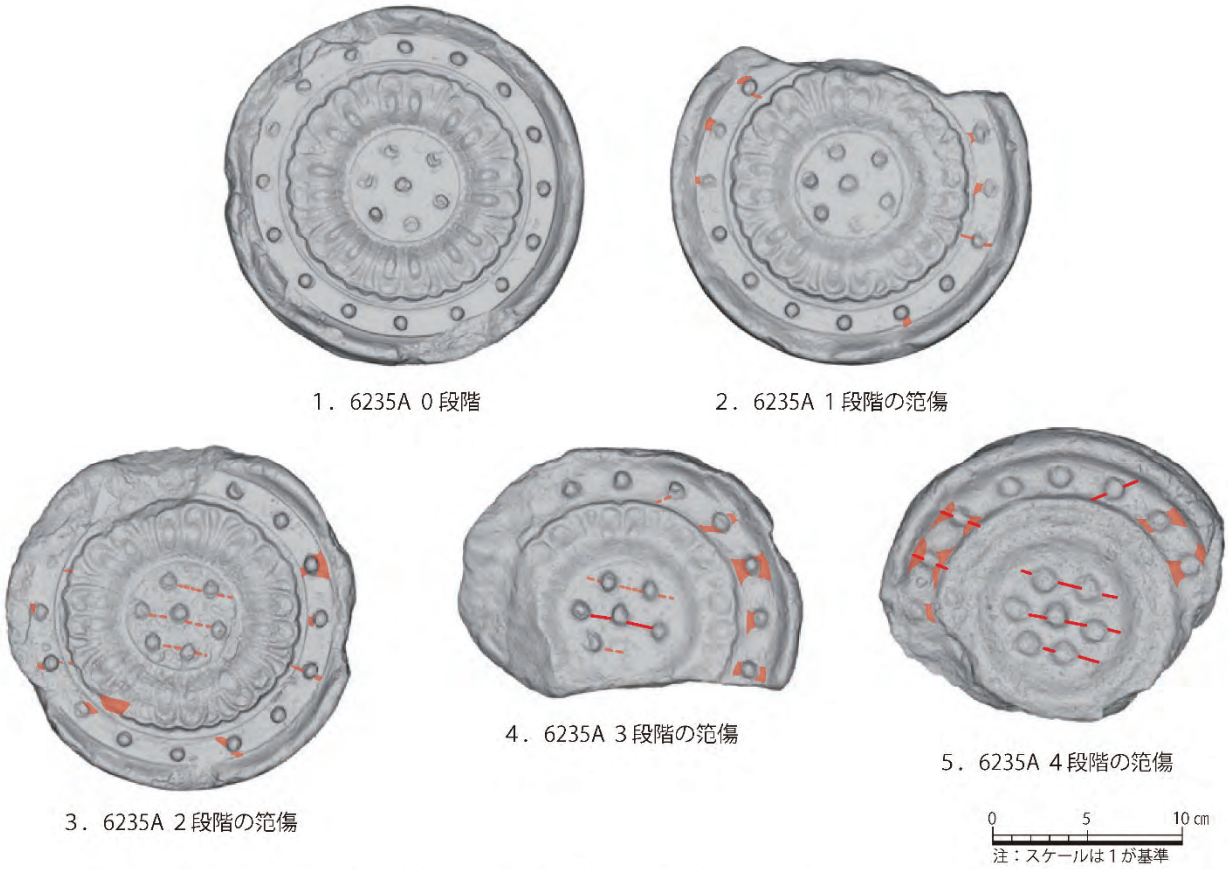


図８－２　6235型式A種の瓦笵の変化（全体その２）

4-2. 瓦笵の劣化と彫り直し

4-2-1. 6235 型式Ａ種

6235A は破片資料を含む計 26 点（すべて興福寺出土）[17] を計測し、笵傷の進行状況から０～４の計５段階を設定した（図８・９）。図８－１では、連続する二つの段階の紋様がどのように重複するか、瓦当紋様全体を図示する。図８－１のうち、１～５では各段階の資料の三次元モデルを灰色で示し、６以降では、１段階を赤、２段階を青、３段階を緑、４段階を黄色に変え、連続する二つの段階の三次元モデルのサーフェス画像を重ねて表示した。この時、後の段階の画像の透過度を下げることによって、紋様の重複関係を確認できるようにした。なお、6235A の位置合わせの基準は０段階の資料（1）であり、他の段階の三次元モデルの大きさは、位置合わせに伴い適宜拡大縮小されている。

この図８－１と、笵傷の場所を赤で着色した図８－２を参考に、6235A の笵傷進行について説明する。０段階は傷のまったくない段階（1）。中房の圏線、蓮弁、間弁の輪郭、外区内縁内側の圏線などが鮮明である。1 段階は外区内縁の珠紋に傷が生じる（2）。２段階は珠紋の傷がさらに増加するほか、中房の蓮子の間に線状の傷が生じる（3）。３段階になると、すでにあった珠紋の傷の範囲が拡大するほか、蓮子間の傷も明確になる。また、蓮弁の子葉部分から基部にかけての摩滅が進行する。中房の圏線、外区内縁内側の圏線、珠紋帯外側の段差もみられない（4）。蓮弁と間弁の端部は一部連続しているようにも見え、彫り直しの可能性も考えられるが、この段階の良好な資料が極

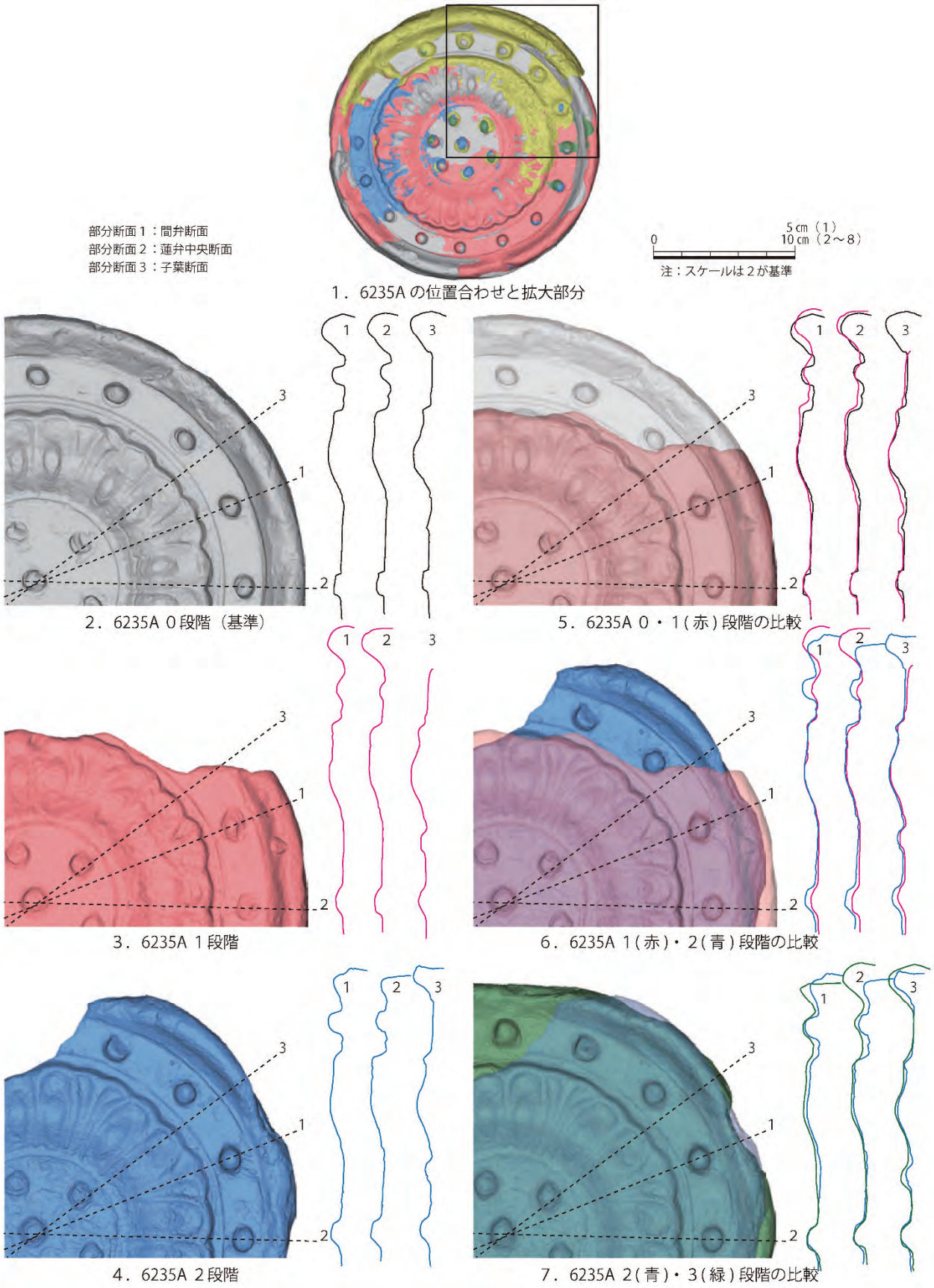


図９－１　6235型式A種の瓦笵の変化（部分その１）

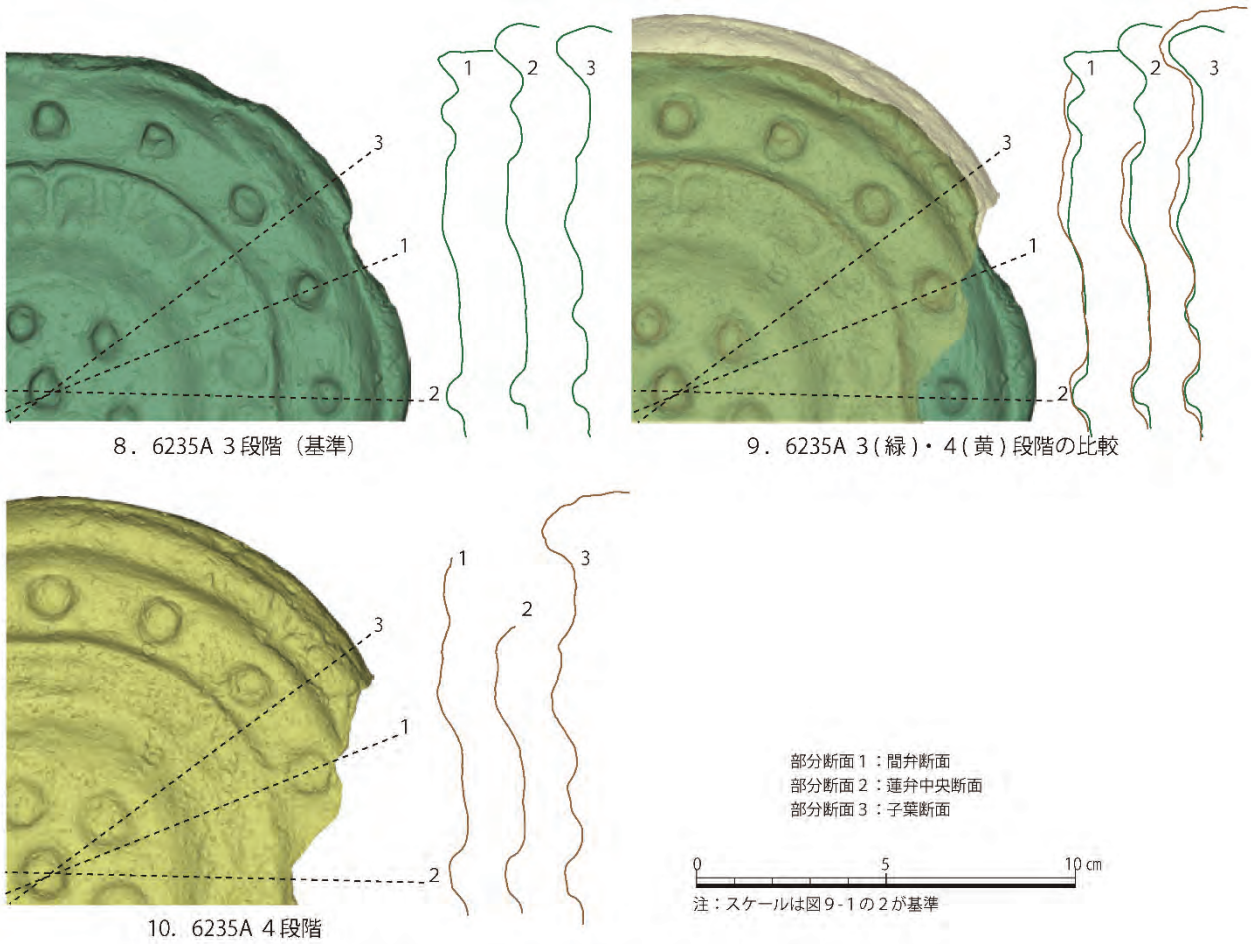


図９－２　6235型式A種の瓦笵の変化（部分その２）

めて少ないため、彫り直しの有無は今後の資料の増加を待って判断したい。４段階は蓮子間の傷がさらに目立ち、珠紋の傷の数も範囲も増大する（5）。この段階では蓮子、蓮弁と間弁、珠紋を彫り直していることが明確である。

図９－１・２は、紋様の重複関係および断面形態を部分的に拡大して表示・比較したものである。なお、瓦は焼成した土製品であり、同笵品であっても粘土の詰め方や瓦笵の外し方、乾燥・焼成時の収縮や変形、その後の欠損等の影響を受けるため、形態や大きさに個体差が生じやすい。しかし、連続する二つの段階の同笵瓦の紋様の重複関係は、同紋異笵瓦の比較結果（図５～７）に比べ格段に一致度が高く、歪みの少ない資料の部分的な比較では、蓮弁や間弁、蓮子や珠紋といった各紋様で目立ったズレが認められない。また、サーフェス画像では笵傷の進行具合を表現しやすいため、従来は見落とされがちであった微細な凹凸も観察しやすくなった。図９の紋様細部の断面形態の比較では、０～２段階では欠損・潰れが確認できる部分等を除いて、大きな差は見いだせない。しかし、３段階では中房の輪郭線や外区外縁下の段差が明瞭に観察できず（図９－１－７）、４段階では蓮子や珠紋が大きくなり、蓮弁や間弁も深く彫り直したことが見て取れる（図９－２－９）。

4-2-2. 6235 型式Ｊ種

6235J は、前述のように現状では残存状況が良好な破片が 3 点しかなく、明らかに目立つ笵傷や彫り直しの痕跡は確認していない。いずれも興福寺の出土である。今後、データの増加を待って検討したい。

4-2-3. 6235 型式Ｍ種

6235M については、これまで岩永省三（2001）によって詳細な分類がおこなわれてきた。岩永によると、6235M はａ・ｂを通じて笵傷の進行を 10 段階に区分することができるという（図 10）。笵傷はいずれも外区に現れ、段階を経るごとにその数を増していくことが説明される。全ての笵傷がほぼ平行線状に生じていることから、木目に沿って現れていることがわかる。

今回、計測・検討し 6235M と判断した資料は、ａ・ｂ合わせて 10 点である。出土地は東大寺が２点（Ma）、頭塔が８点（Mb）である。このうち、図 11・12 には１段階ないしは２段階と考えられる 6235Ma の資料（図 11－１・４・７；図 12－２）と、笵傷の位置から 6235Mb の４段階と目される資料（図 11－２・８；図 12－３）、７段階と目される資料（図 11－３・９；図 12－４）を提示した。適宜、４段階目は赤、７段階目は青で図示する。なお、笵傷の少ない 6235Ma の資料の残存状況が良くないため、位置合わせ・大きさの基準は 6235Mb の４段階の資料とする。図 11－４～６では、欠損部分の三次元モデルを除去し、各段階の紋様全体の重複関係を図示した。蓮子や珠紋、蓮弁や間弁といった各紋様の位置関係の一致度は極めて高く、あきらかなズレは確認されない。同図７～９では笵傷の位置を赤で着色したが、従来の分類で明記されていたうち直線的で太い傷を実線で示し、それ以外に観察できた笵傷を透過度の低い赤で着色した。４段階では、珠紋の内側および外側に向かってハの字状に広

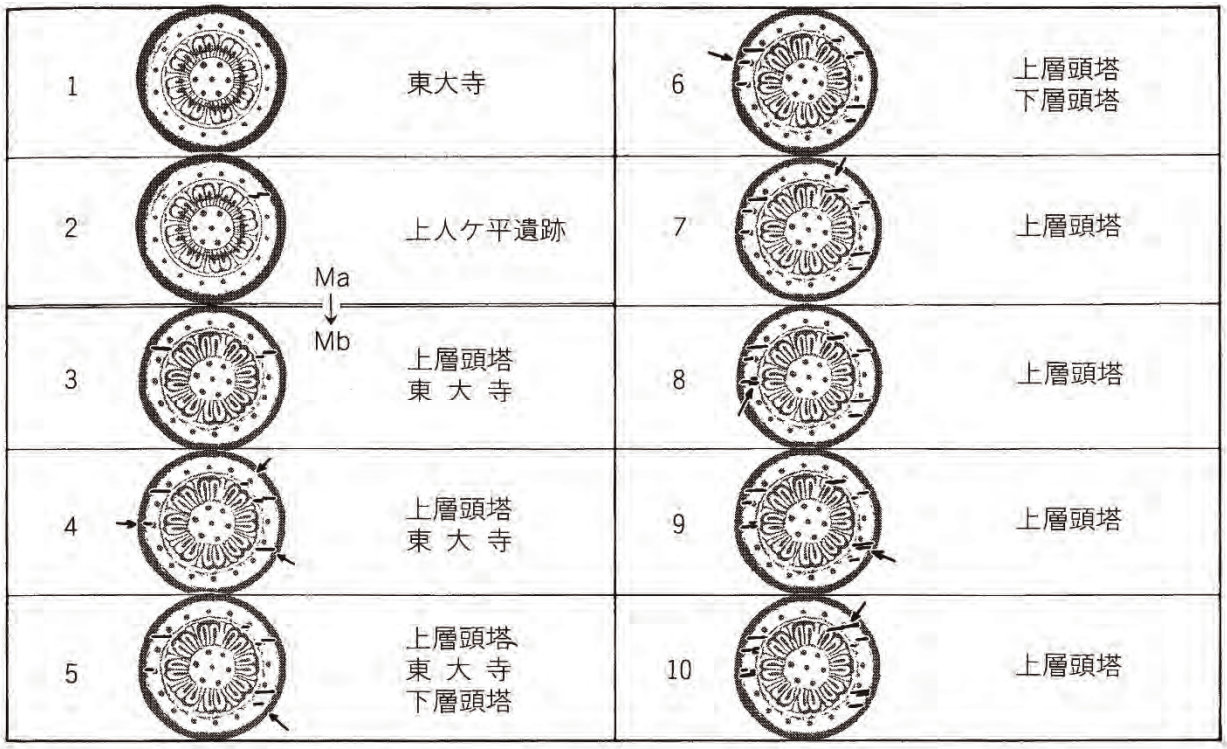


図10　6235型式M種の笵傷進行（岩永2001 のFig.41を引用）

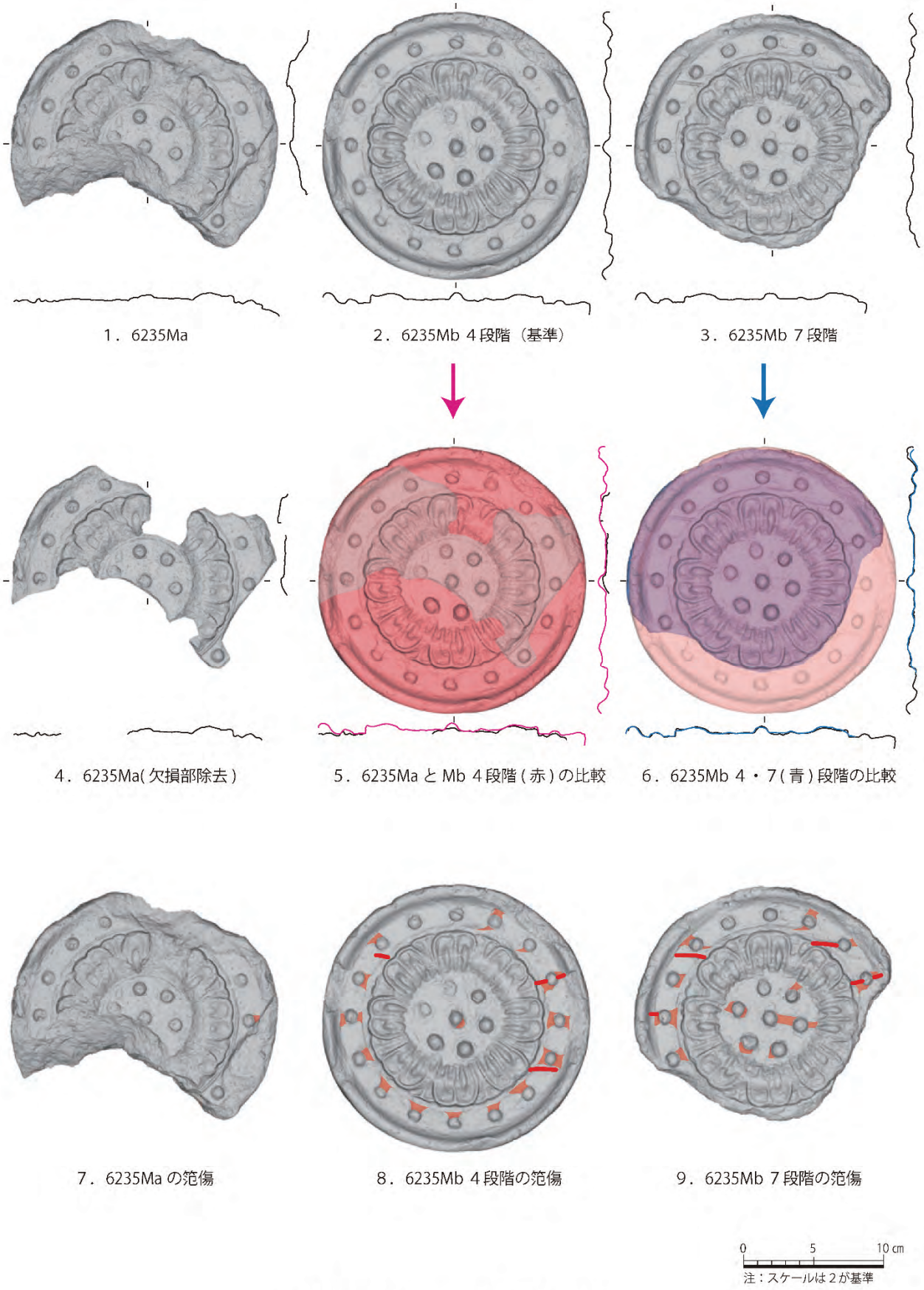


図11　6235型式M種の瓦笵の変化（全体）

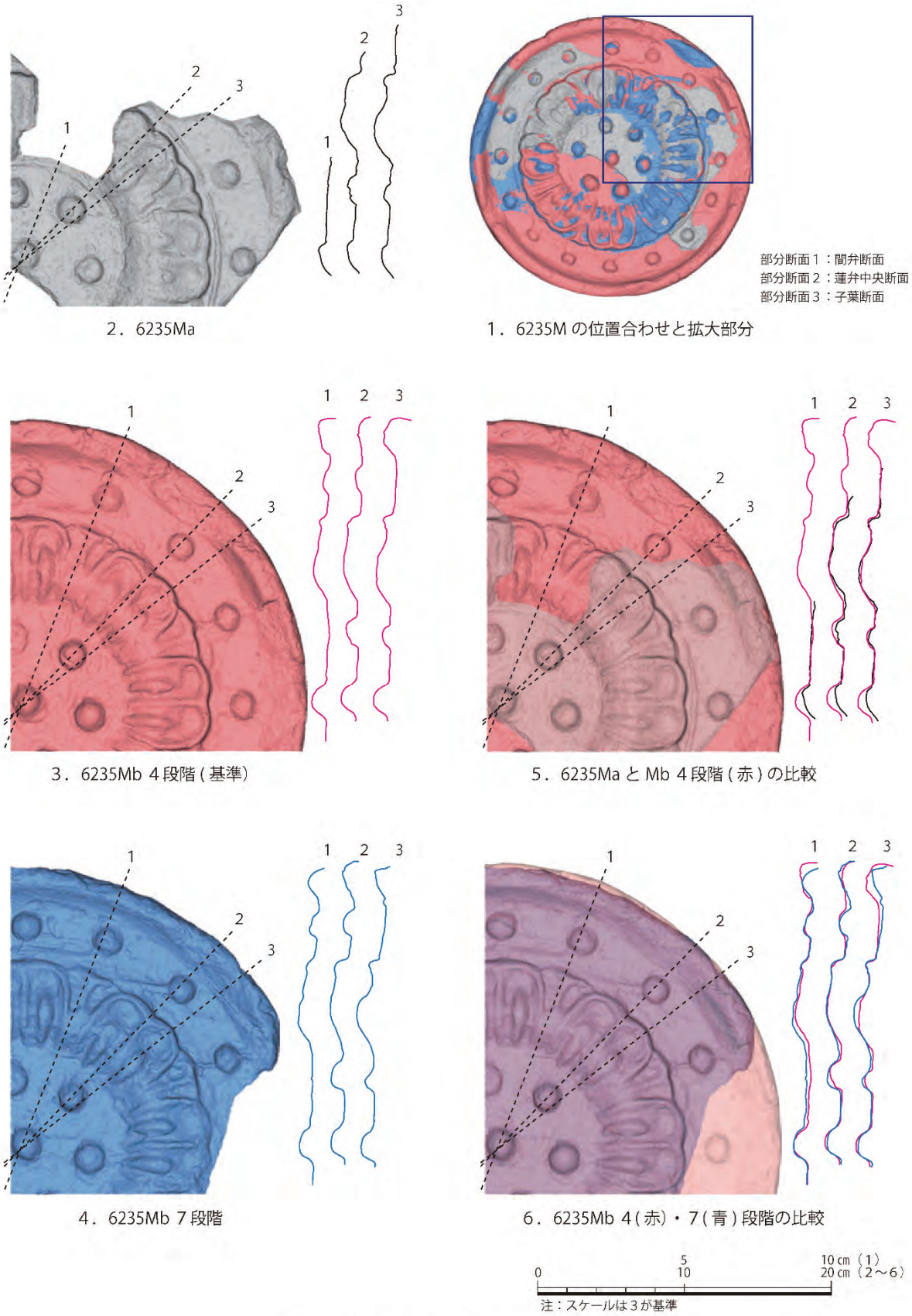


図12　6235型式M種の瓦笵の変化（部分）

がる笵傷が確認でき（図 11－８）、７段階では、それに加え、中房の蓮子付近に直線状の低い盛り上がりが認められる（図 11－９）。

図 12 では瓦当の右上部分（図 12－１）を拡大して平面・断面を表示するが、段階が進むに従い中房の輪郭線および蓮弁外の圏線が不明瞭になっていき、笵傷が増えていく様子があきらかである。Ma と Mb の段階の間で瓦笵の彫り直しが指摘されてきたが、図 12－２から３に至るまでに蓮弁の輪郭線や子葉がやや太く彫られたことが、平面・断面の比較からも首肯できる。

なお、今回は、従来の笵傷 10 段階の進行すべてを三次元計測データから検討することはかなわなかった。しかし三次元計測によって、これまで観察が困難であった微細な笵傷も確認できるようになったため、今後、悉皆的な調査をおこなうことによって、笵傷の進行過程をさらに具体的・可視的に検討することができるようになるのではないかと考える。

4-2-4. 6234 型式Ａ種

6234A は小片を含む９点を計測した。出土地は東大寺が６点（Aa・Ab）、薬師寺が３点（Ab）である。小片が多く Aa・Ab の判断ができない資料や、Aa・Ab の間の段階である可能性がある資料も存在するが、出土資料総数が少ないため本稿では細分せず、6234Aa（図 13－１）と、彫り直しを経た Ab（図 13－２）という従来の分類に従う。

図 13 は 6234Aa のデータを基準とし、6234Ab の三次元モデルの位置と大きさを合わせ取得した画像である。図 13－５に示すように、Aa の段階で中房の蓮子間に傷が生じている。Ab は蓮弁全体を深く彫り直しており、Aa 段階よりも紋様が盛り上がっていることが断面から見て取れる（図 13－４；図 14－５）。また、珠紋外側の圏線が消滅している（図 14－３）。蓮子の傷は数と範囲が増大し、一部、蓮弁上にまで及ぶ。また、珠紋の傷が増え、蓮弁の摩滅も著しい（図 13－６）。今後、資料が増加すれば、さらに細かな笵傷進行があきらかになるだろう。

4-2-5. 瓦笵の劣化と彫り直しの特徴

ここで、6235A・M および 6234A の瓦笵の劣化と彫り直しの特徴を比較する。それぞれの型式・種の瓦のうち、劣化が進んだ段階の状況を確認するために、まずは劣化が進んだ段階の複数の破片資料の三次元モデルを統合し、瓦当紋様と笵傷の位置関係を復元した。図 15 に 6235A の４段階の紋様復元の方法を示すが、１の資料の三次元モデルを基準とし、それに２でオレンジ色に示した別の資料の三次元モデルの位置を合わせ、不要な重複部分を削除した後に（3）、ひとつの三次元モデルとして統合した（4）。図 16－３で示した 6235Mb の三次元モデルも、同様の手法で、6235Mb の４段階の三次元モデルを基準とし、それに 7 段階のモデルの位置を合わせて取得したものである。

図 16 は、各型式・種の紋様基準線と笵傷の位置関係が分かるように図示したものである。いずれの型式・種の瓦にも、並行して直線的に走る笵傷の存在が確認できるが、それらは紋様基準線とＸ字状に交差する。その出現の特徴から、瓦笵の素材となった木材の木目に従って生じた笵傷と考えられる。なお、これら線状の笵傷は、中房では複数の蓮子を繋いで伸びるが、特に 6235A（図 16－２）と 6234A（図 16－１）ではその角度や出現する位置が酷似する。6235A は彫り直しを経ることによって蓮子や珠紋が大きくなり、蓮弁と間弁が繋がり環状の高まりとなってめぐることも 6234Ab と共

通するため、破片では目視観察による型式の識別が非常に困難となる。

また、線状に長く伸びる笵傷以外に、外区内縁の珠紋周辺にはハの字形に広がる笵傷が出現することも指摘できる。これらは瓦笵の劣化が進むとほとんどの珠紋周囲で生じ、瓦当の中心に向かって、もしくは反対に外縁に向かって広がる傾向があるが、上部中央左側のように比較的生じにくい部分もある。上述の線状の笵傷と同じ位置に重複して生じることもあるが、こちらは瓦笵の割れというより使用中の摩耗によって生じ広がったものと考えられる。

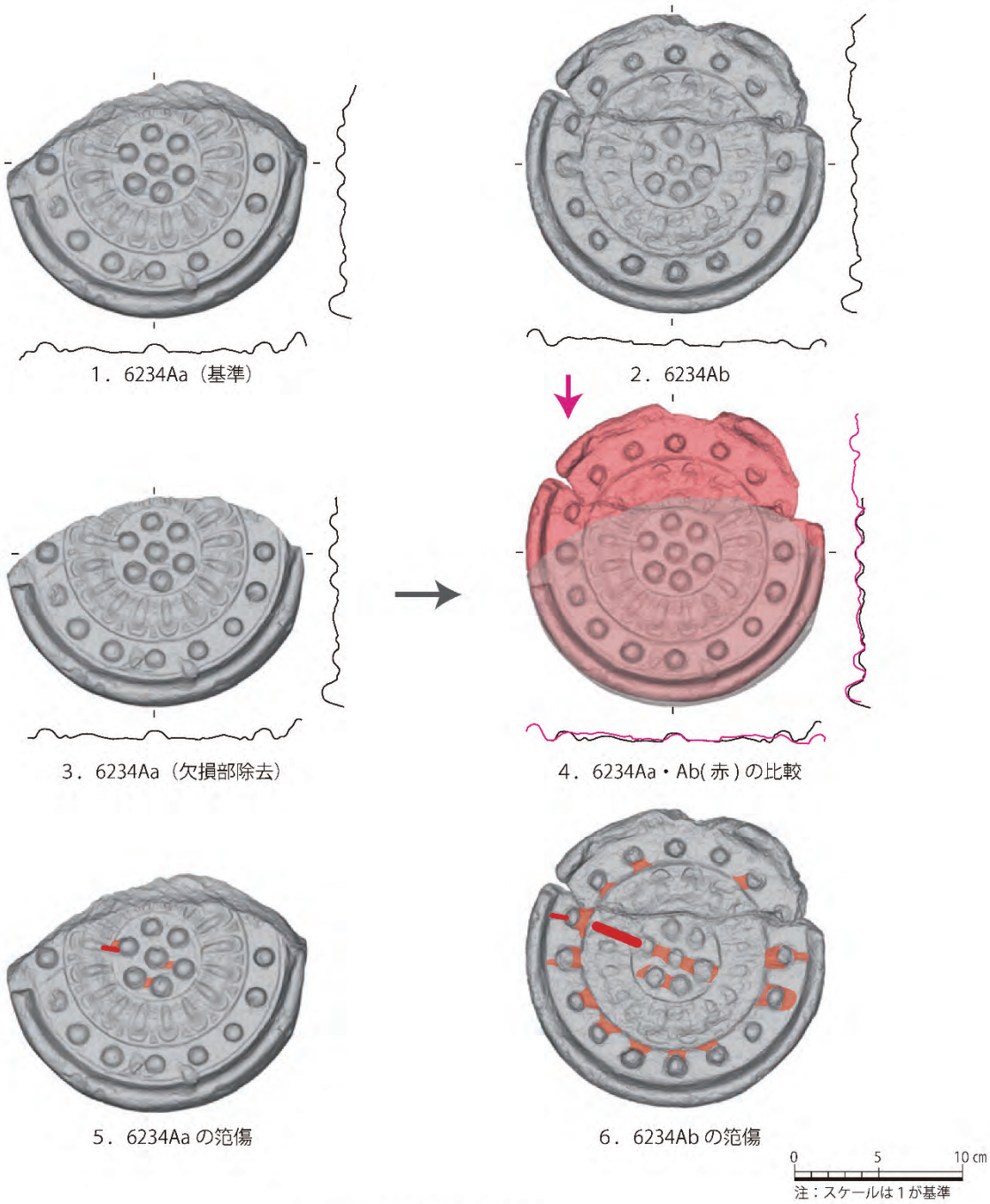


図13　6234型式A種の瓦笵の変化（全体）

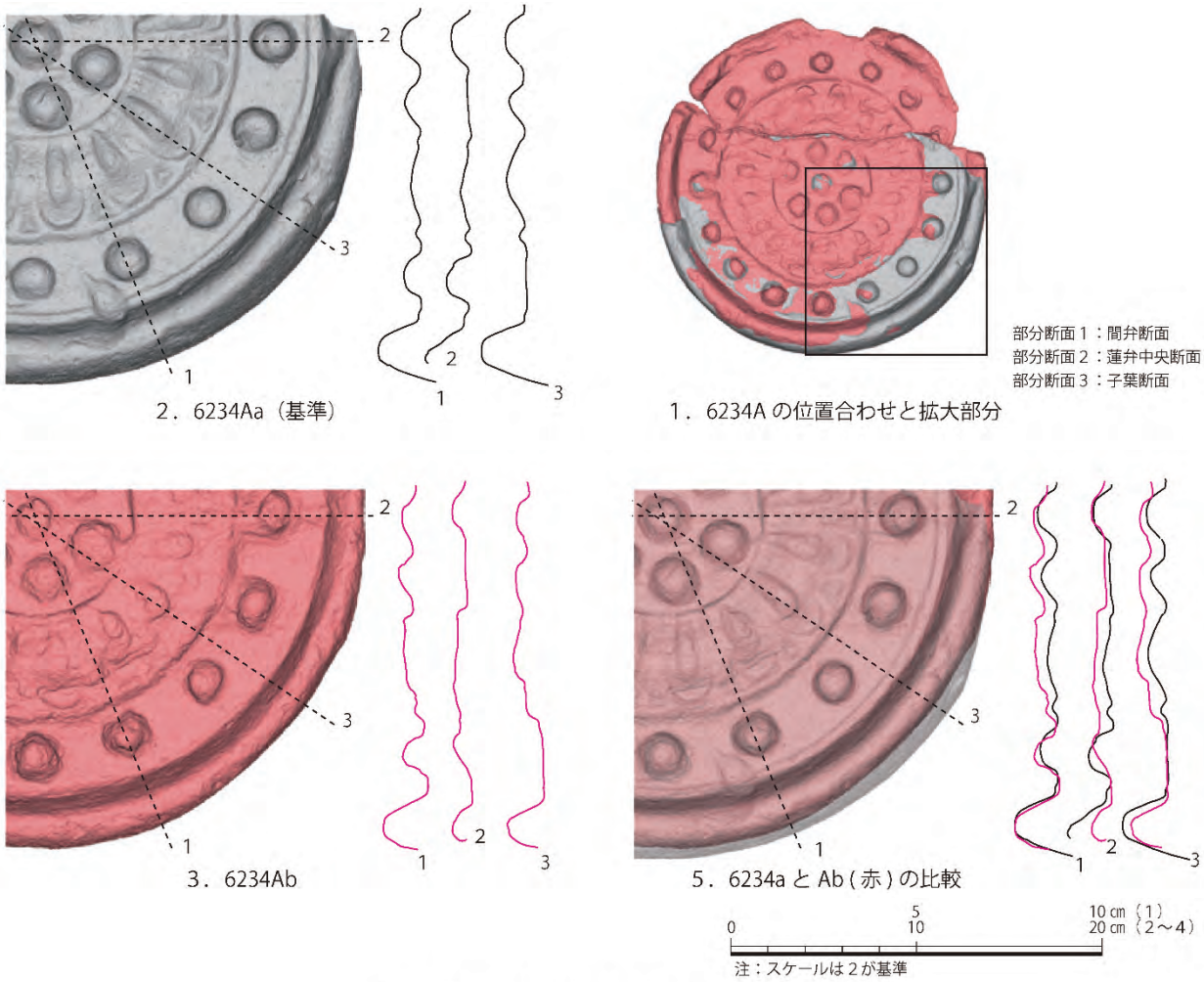


図14　6234型式A種の瓦笵の変化（部分）

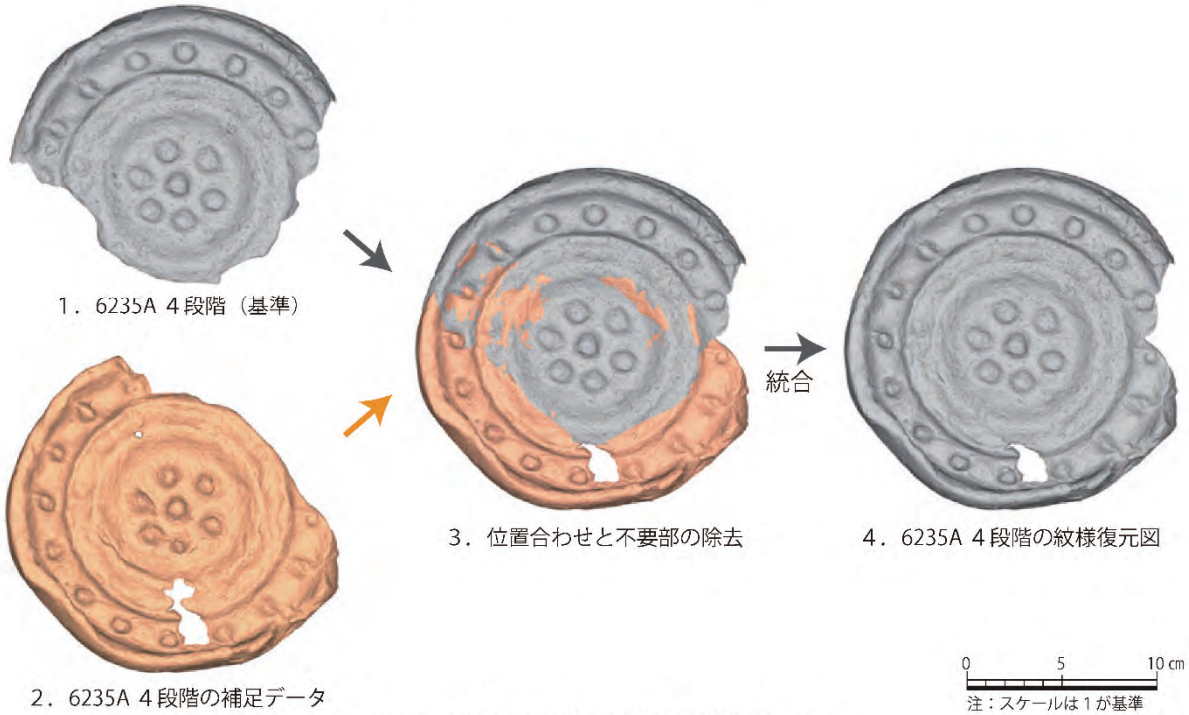


図15　6235型式A種４段階の紋様の復元

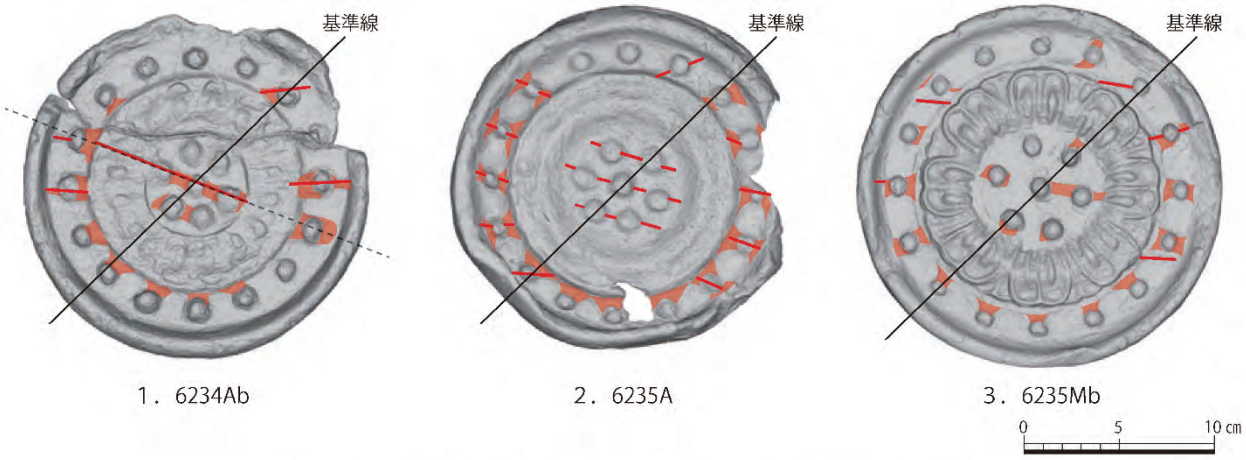


図16　6235型式A・Mb種と6234型式Ab種の笵傷と基準線の関係

５．東大寺式軒丸瓦の瓦笵の作成と供給、その背景

5-1．瓦笵の作成

ここまで見てきたように、6235A・J・M は同笵瓦ではないものの、紋様構成が極めてよく似ており、その背景として、紋様下図を共有したのではないかということがうかがわれる。6235A・M と 6234A では、紋様基準線と、木目方向に由来すると思われる線状の笵傷の方向がＸ字状に交差すること、丸瓦を接合する際の下端ラインと紋様基準線の角度が約 45 度であること（図４）等を踏まえると、瓦笵の素材である板材上に置かれた紋様下図の設置の向きは同じであったと考えられる。おそらくは、図 17 で示すように、正方形の紙の斜めに向き合う二つの角を合わせて折った線が紋様基準線になっており、紋様下図の辺と板材の辺が並行になるように設置して瓦笵の下絵を転写したのではないだろうか。6235A・M と 6234A に関していえば、丸瓦の設置位置は図１で示した向き、もしくはそれを 180 度回転した向きに限られていることから、瓦笵の形態は長方形であったと目される。

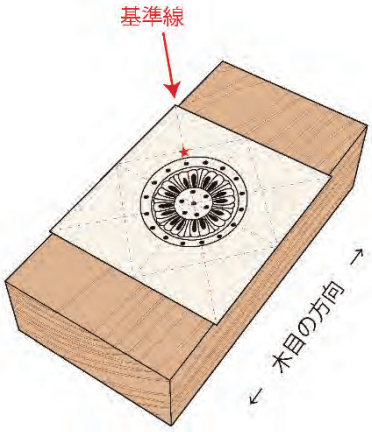


図17　紋様下図を用いた瓦笵の作笵

さて、紋様の一致度から 6235A・J・M は、比較的近い時期に作笵されたと考えられるが、6234A の作笵時は状況がいささか異なったようである。6234A は前述したように複弁の中心線と間弁の表現がほぼ同じである。また、中房で３つの蓮子を通る紋様基準線の候補が２本存在するが、図４－４および図 16－１において破線で示した線は、複弁の中心線を通る他の基準線とは異なり、間弁の中心を通る。また、この破線の補助線を採用すると、線状の笵傷と紋様基準線の向きの関係や丸瓦の取り付け位置が 6235A・M とは異なることになる。以上のことから、6234A の紋様基準線は実線で示した線である蓋然性が高いと考える。この 6234A の紋様は、彫り直し前の段階である Aa において

既に蓮子や珠紋が 6235A の４段階と同様もしくはさらに大きく、蓮弁を外周する圏線は蓮弁や間弁に一体化しているなど、紋様としてデフォルメされた印象がある。さらに、6235A と 6234A の笵傷の出方が極めて類似することを考えると、あるいは 6234A の瓦笵は 6235A の瓦笵を全面的に彫り直して作りかえたものである可能性も排除できない。

図 18 は復元した 6235A の 4 段階の三次元モデル（1）に 6234Aa（2）・Ab（5）の三次元モデルの位置を合わせ、紋様（3）および笵傷の位置（6）を比較した図である。図 18－３では左上方向の蓮子２つに若干のズレが認められ、6234Aa の外区の珠紋が全体的に 6235A のそれに比べ外側に向かって大きくなっているが、紋様構成はおおよそ一致している。ただし、断面を見ると、6234Aa では蓮子と珠紋の彫りが深いのに対し、蓮弁は 6235A の４段階に比べて浅い。また、両者では外縁の位置や大きさが大きく異なる。いっぽう、笵傷の位置を比較した図 18－６を見ると、完全とは言わないまでも、笵傷の位置・方向ともにかなり一致することがわかる。仮に 6235A の４段階の瓦笵を彫り直して 6234Aa に改笵したとすると、一度紋様の地の面をある程度平らに均した後、新たに紋様を彫り、外縁部分については作り直す必要があったのではないだろうか。

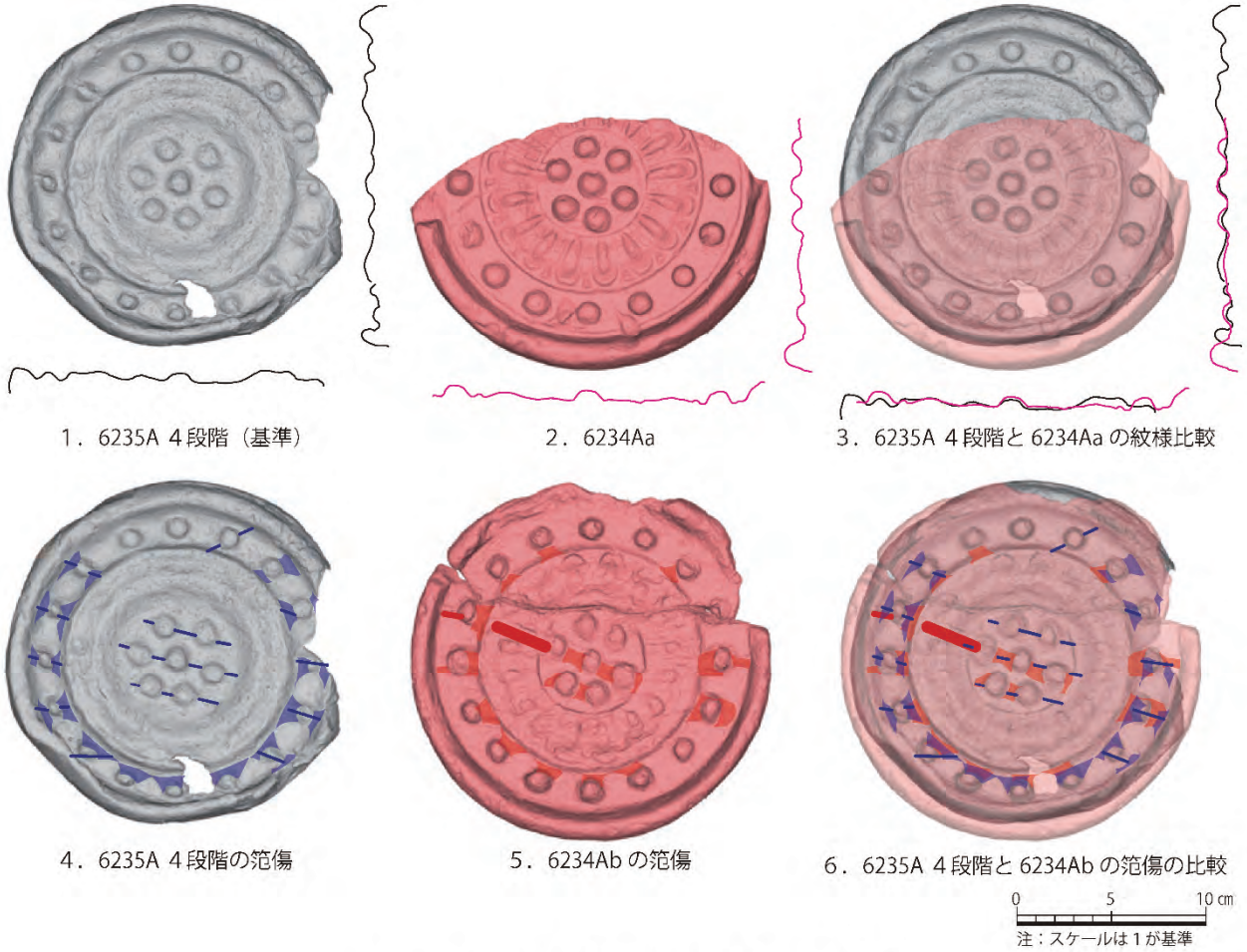


図18　6235A ４段階と6234Aの紋様と笵傷の比較

それでは、これらの瓦笵を作成するのに用いられた紋様下図や瓦笵は、どのように各寺の工房を行き来したのだろうか。最後に、当時の歴史的背景を踏まえながら紋様下図の移動について考察する。

5-2. 紋様下図の移動の歴史的背景

5-2-1. 6235Ma と 6235J

本稿で取り上げた東大寺式軒丸瓦のうち、最も初期に製作されたと考えられるのは 6235Ma である。6235Ma において最も笵傷の少ない段階のものが東大寺より出土することから、造東大寺司の管轄のもとに製作されたと考えてよい。すなわち、6235Ma の製作にあたっては、造東大寺司に属する画師や木工によって紋様下図および瓦笵が製作されたといえる。そして、瓦笵の使用が進んだある段階で、瓦笵を彫り直して 6235Mb となり、東大寺のほか、頭塔に供給されたのは先学が指摘する通りである。

この 6235Ma と瓦笵を異にしながらも、共通のデザインをもつものが 6235A・J である。6235A・J が興福寺所用の東大寺式軒丸瓦であることは先に触れたが、その製作技法は 6235M とは異なるため（山崎 2003：今井 2018）、造東大寺司の手によるものではなく、やはり造興福寺司の所管する瓦工房で作られたと考えられる。その一方で、6235A・J と 6235M を三次元計測データに基づいて詳細に比較すると、瓦笵を異にするものの、紋様の類似度が極めて高いことから、同一の紋様下図を元にして作られたと推定される。以上のことを踏まえ、6235M の紋様下図が造東大寺司から造興福寺司へともたらされ、それをもとに 6235A・J の瓦笵が作られたと考える。

奈良時代後半の平城京において、東大寺式軒瓦が平城宮ならびに京内寺院の軒瓦に大きな影響を与えていたことは言うまでもないが、これら諸寺院の造寺司が製作する東大寺式軒瓦は、あくまで製品の模倣と考えられている。6235A・J のように紋様下図の共有が認められるケースは、少なくとも現段階では、極めて稀な事例となっている[18]。そうであるとすれば、ここからは造東大寺司と造興福寺司の関係の深さをうかがい知ることができる。

造興福寺司は奈良時代前半から存続しており、壮大な伽藍に多くの瓦を供給していたことから、相当規模の瓦生産体制を有していたと考えられる。そのため、天平勝宝八年（756）に東大寺が３万枚の瓦製作を依頼するに当たって、興福寺を頼ったことは自然なことであった。その際、造東大寺司から紋様下図と見本製品が造興福寺司へともたらされ、それらをもとに軒丸瓦 101F2・F3 型式が製作されたのち、製品とともに瓦笵が東大寺へと持ち運ばれたと考えられている（山崎 2003）。これとほぼ同じ流れで 6235M の紋様下図が造興福寺司にもたらされ、6235A・J の創出へと至ったのではなかろうか。

次に、軒丸瓦とセットをなす軒平瓦の側面から見てみよう。6235M と組み合う軒平瓦は 6732F であり、これは 6732G・H・J とともに東大寺で創出された（山崎 2003）。一方、6235A と組み合う軒平瓦 6732E も、紋様から見ると「東大寺系（古）」として 6732F・G・H・J と同一のグループに位置づけられるが（毛利光・花谷 1991：288 頁）、製作技法は、東大寺で創出された一群がブロック状の粘土で成形

されるのに対し、6732E は粘土板成形であるなど、大きく異なっている（山崎 2003）。したがって、軒平瓦 6732E は軒丸瓦 6235A・J 同様に造興福寺司の手によって独自に製作されたものと考えられる。

これを紋様下図の観点から見てみると、軒平瓦 6732E と F も紋様の類似度が高い。軒平瓦の瓦当紋様は同笵瓦であっても平瓦部分の曲率の違い等によって歪みが生じやすく、軒丸瓦の瓦当紋様に比べ比較が難しい。本稿執筆時にはまだ検証を終えていないが、今後の検討課題としたい。なお、興福寺では軒平瓦 6732E 以外に、東大寺所用の 6732F も、東面回廊（平城第 308 次調査）と西室（第 516 次調査）から 1 点ずつ出土している。このことから、6732E は造東大寺司が製作した 6732F の製品を模倣して、造興福寺司によって創出された可能性も考えられる[19]。

5-2-2. 6235A と 6234A

上述のように、造興福寺司において創出された 6235A であるが、本稿の分析および検討の結果から、さらに、東大寺所用として新たに製作された 6234A とも紋様下図を共有していた、もしくは 6234A が 6235A の瓦笵を再利用して製作された可能性があることがあきらかとなった。6234Ａは古段階に当たる Aa が東大寺僧房北方において使用され、かつ Ab に改笵してまで使い続けられていることから、基本的には造東大寺司による製作と見てよい[20]。したがって、今度は造興福寺司から造東大寺司へ、紋様下図（あるいは瓦笵そのもの）が移動したことがわかる。これは、先に述べた 6235M から 6235A・J や 101F2・F3 へという紋様下図の動きとは逆方向の移動であるが、101F2・F3 の製品とは移動の方向が同じであるため、造東大寺司と造興福寺司の間では、紋様下図（と瓦笵）、そして製品とが相互に移動していた状況がうかがえるのである。しかも、6235A・J や 101F2・F3 が製作されていた 750 年代だけではなく、6234A が製作された 760 年代後半においても、その関係は続いていたことがわかる[21]。

最後に、6234A についてもセットとなる軒平瓦を見ておこう。使用場所である東大寺僧房北方での瓦の出土状況から、これまで軒丸瓦 6234A は 6235D・K とともに軒平瓦 6732D・H と組み合うことが想定されてきた（毛利光・花谷 1991）。軒丸瓦 6235 と軒平瓦 6732 の組み合わせは典型的な東大寺式軒瓦の組み合わせではあるが、その中で 6234A はやや異質と言わざるを得ない。

そこで、注目したいのが薬師寺における軒丸瓦と軒平瓦のセット関係である。6234A は東大寺において Aa と Ab が使用されているが、薬師寺では Ab のみが出土する。点数もさほど多くないことから、薬師寺内建物の補修用として東大寺から製品が運ばれたものと考えられる。いっぽう、組み合わさると考えられる 6732 型式の軒平瓦は、食堂北方で出土した 6732C の 1 点のみであり、他に同地区では 6763B が出土する。この軒平瓦 6763B は、6732 型式の紋様をデフォルメして作られたと考えられ、軒丸瓦 6235 型式と 6234A の関係との共通性が見いだせる。しかも、この 6763B は東大寺防災施設工事に伴う発掘調査において、6234A と同地区で出土したことが確認される（奈良県教委 2000）。したがって、軒丸瓦 6234A と組み合うのは軒平瓦 6763B であり、薬師寺にもセットとして持ち込まれたことがわかる。6235A から紋様を改変して作られた 6234A には、同様に 6732 型式の紋様をデフォルメして作られた 6763Ｂが組み合い、共に造東大寺司の所産であったと考えられるのである[22]。

６．おわりに

本稿では、東大寺式軒丸瓦 6235 型式のＡ・Ｊ・Ｍ種および 6234 型式Ａ種の三次元計測データの分析から、従来同紋異笵とされてきた瓦と、同笵とされてきた瓦について検討をおこなった。その結果、紋様の平面および断面の比較から、同紋異笵とされてきた当該型式・種の瓦笵は、同じ紋様下図を使用して作笵されたであろうことをあきらかにした。その中でも、6235A・J・M の笵は比較的近い時期に作笵されたと考えられるのに対し、6234A の瓦笵は、表現される紋様の単純化や蓮子や珠紋の巨大化が進んでいるため、作笵の時期が遅れると考えられる。さらには、6235A と 6234A では、瓦笵の劣化とともに出現する笵傷の場所と方向の一致度が極めて高いため、6235A の瓦笵を全面的に彫り直して 6234A の瓦笵が作成された可能性もある。瓦笵の素材として用いられた板材の木取りと笵傷の出現の関係性については、今後さらなる検討をおこなう必要がある。

今回、同紋異笵の東大寺式軒丸瓦の検討によって、同型式の瓦当紋様の下図が、造東大寺司と造興福寺司の間を移動していたであろうことがあきらかになった。東大寺式軒瓦の中には、今回検討した軒丸瓦 6235A・J・M および 6234A 以外にも紋様下図を共有する瓦笵によって製作された瓦群が存在する可能性が高い。また、このように同じ紋様下図を用いて複数の瓦笵を作成するという現象は、東大寺式軒丸瓦に限られた事ではないだろう。紋様の重複関係の可視化や断面形態細部の比較は、実測図や拓本、写真といった従来の記録法では困難であったが、三次元計測を用いることでより容易に検討することが可能となった。今後、同一の紋様下図によって作笵された兄弟姉妹笵の関係性とその製品の出土分布状況を明らかにすることで、諸寺・宮を造営した官司の関係性をもあきらかにできるのではないだろうか。なお、先学（武者小路 1981 等）による指摘があるように、「瓦様」の「様」は「様（ためし）」であり、今回明らかとなった紋様下図のように平面的な「様」以外に、雛型・模型のような立体的な「様」の存在も考慮する必要がある。今後は後者のような「瓦様」の存在も射程に入れ検討していきたい。

これまでの瓦研究は、主に、紋様・製作技法の類似性とその変化の方向による型式学的研究というマクロな瓦研究と、笵傷の進行具合の検討というミクロな瓦研究によって構成されてきた。紋様下図の検討や、彫り直しの具体的な検証とといった、瓦笵の性格を明らかにする本研究の手法は、従来のマクロな瓦研究とミクロな瓦研究を結ぶ新たな研究方法のひとつとなり得るのではないかと考える。

謝　辞

本研究に用いた SfM-MVS による瓦当の三次元計測データの取得は、中村の指導のもと、北野智子・三好佑佳・松島隆介の三氏がおこなった。また、研究を遂行するにあたり、瓦の観察においては奈良文化財研究所考古第３研究室関係諸氏のご協力を、三次元データの取得と分析においては同遺跡・調査技術研究室関係諸氏のご教示を賜った。記して謝意を示したい。

なお、本研究は JSPS 科研費 19H01355「３次元データによる瓦の同笵認識技術の基礎的研究」（代

表：林正憲）の助成を受けたものである。

註

1）本稿は、東大寺式軒丸瓦全体の研究史について林正憲が執筆し、各型式・種の認定背景の整理や紋様の観察所見は、6235A と 6234A を今井晃樹、6235J を岩永玲、6235M を林が担当した。三次元計測とデータ分析については中村亜希子が担当し、笵傷の進行や彫り直しの検討は、各型式・種の担当者の所見を踏まえて中村が図化・執筆した。特に、今井が担当する 6235A と 6234A の比較の中で、瓦当紋様の変化と笵傷の出現の仕方に両者に共通する特徴が確認されたことにより、紋様下図を用いた作笵過程の復元に至ったが、その歴史的背景については林が考察した。なお、文体等を統一するため、中村が論文全体を編集している。

2）以下、『平城宮一覧』とする。

3）以下、『平城宮一覧補遺篇』とする。

4）以下、『平城京・藤原京一覧』とする。

5）奈文研による瓦当の型式名は、数字が大別の型式名であり、大文字のアルファベットが瓦笵の違い、小文字アルファベットが瓦笵の彫り直しによる段階を示す。

6）岡本の分類は奈文研の型式設定とは一致しない。双方の対応関係は、岡本ＩA＝Ａ種、岡本ＩB＝Ｆ種、岡本ＩC＝Ｅ種、岡本ＩD＝Ｊ種、岡本ＩE＝Ｇ種、岡本ＩF＝Ｈ種、岡本ＩG＝Ｄ種、岡本ⅡA＝Ｂ種、岡本ⅡB＝Ｃ種と考えられる。

7）以下、『平城宮発掘調査報告ＸⅢ』とする。

8）山崎論文では紋様の「紋」に「文」の字を使用するが、他の参考文献の記述とともに、本稿では引用箇所以外は「紋」に統一する。

9）なお、この指摘を最初に行ったのは武者小路穣（武者小路 1981：168 頁）であり、森も武者小路の研究成果を引用している。

10）整理番号 607。

11）瓦又（かわらまた）は奈良市奈良阪町に所在する株式会社瓦道（がどう）の造瓦技術集団。

12）本研究の手法で再検討したところ、唐招提寺出土資料は 6235A である可能性が高いことが判明した。

13）複数資料の三次元データを比較する場合、メッシュデータよりも点群データを用いる方が、より厳密に形態を比較することができる。しかし、今回は、分析ソフトにおけるデータの扱いやすさと、比較結果の提示しやすさを考慮し、メッシュデータを使用した。なお、メッシュの素材となった高密度点群が十分な密度で存在することは確認している。

14）瓦笵の劣化の痕跡が少ないものから多いものへと順に三次元モデルの位置合わせをすると、比較データ数が多い場合、笵傷の大きさの違いや瓦笵の彫り直し等によって小さな差異が積み重なる。そのため、瓦笵の彫り直しを経るなど、同笵でも状態が大きく異なる段階の三次元モデルを比較する際には、機械的に参照点を設定し、位置合わせをおこなうことにした。

15）図４－３の紋様基準線は中房の外側の蓮子の中心を若干外れるが、当該部分は改笵後の 6235Mb のデータであるため、今後、残存状況が良好な資料のデータでも検討したい。

16）表３では、中房中央の蓮子中心から、左方向の距離を－Ｘ、右方向を＋Ｘ、上方向を＋Ｙ、下方向を－Ｙとして瓦当の半径を示した（Ａ）。改笵が進んだ段階の資料は外区外縁がなだらかに立ち上がることが多いため、紋様区の厳密な範囲を判断しにくい。そのため、表３では中央蓮子から外区外縁外端までの距離（Ａ）を１ とした場合の、中央蓮子から外区珠紋中心の距離（Ｂ）の比率を参考値（Ｃ）として示す。

17）計測した資料の中には、これまで 6235J や 6234A と判断されてきた資料が複数存在した。

18）6235M については、平城宮所用の 6235B のモデルとなっている可能性も指摘されている（岩永 2001：139 頁）。

ただし珠紋を 16 から 17 へ、蓮子を１＋６から１＋５へと改変していることから、紋様下図の共有ではなく、製品を元にした模倣と考えられる。なお、蓮子・珠紋の数が 6235A・J・M と同じである東大寺出土の 6235 E・K・F・G 種に関しては、紋様下図の共有関係がある可能性がある。今後の検討課題としたい。

19）同様の現象が想定されるのが、元興寺所用軒平瓦の 6732U である。元興寺では、奈良市第７次調査において東大寺の所用瓦である 6732Fb が１点出土しており（原田 2018：79 頁）、6732Fb がＵの創出の際のモデルとなった可能性がある。

20）製作技法から見ると、101F2・F3 型式と同じく丸瓦端部を加工していないことから、これらと同様に興福寺から東大寺へともたらされた可能性は残る。しかし 6234A の製作時期は、組み合う軒平瓦の年代等から 760 年代後半と推定され、その時期に丸瓦端部を加工する軒丸瓦がほぼ認められないことから、必ずしも造興福寺司の所産とは言えない。

21）造東大寺司は、設置された段階（748 年頃か）で、既に造興福寺司と深い関係にあった可能性が高い。かねてより指摘されていることであるが、もともと造興福寺司の荒池瓦窯は、東大寺の造営が開始されるにあたって造東大寺司の所管となった（堀池 1964 など）。これも他の造寺司間では見られない現象である。

22）この 6763 型式は 6732 型式同様、興味深い分布を示す。6763Ｂについては東大寺・薬師寺で見られるが、6763A は平城宮に、そして 6763C は興福寺に分布が集中するのである。これは、6732A・C が平城宮に、6732E が興福寺に見られるのと同様である。なお、6763 型式の中でＢが最も大型であることから、Ａ・Ｃはそこから派生して成立した可能性が高く、分布の背景とも矛盾しない。

引用文献

石田由紀子　2015「興福寺旧境内の調査―第 539 次　瓦磚類」『奈良文化財研究所紀要 2015』：206。

今井晃樹　2018「西大寺・西隆寺・興福寺の東大寺式軒瓦」『古代瓦研究Ⅷ』奈良文化財研究所、55-72 頁、奈良。

今井晃樹　2021「昭和 38 年一乗院調査出土の軒瓦―第 17-1 次」『奈良文化財研究所紀要 2021』：180-183。

岩永省三　2001「屋瓦」『史跡頭塔発掘調査報告書』奈良国立文化財研究所、126-140 頁、奈良。

岡本東三　1976「東大寺式軒瓦について―造東大寺司を背景として―」『古代研究』９、元興寺仏教民俗資料研究所考古学研究室、1-22 頁、奈良。

興福寺　　1978『興福寺防災施設工事・発掘調査報告書』、32 頁、奈良。

京都府埋蔵文化財調査研究センター　1991『上人ヶ平遺跡』、167 頁、向日。

関野　貞　1928「飛鳥時代」『考古学講座　瓦』雄山閣、43-75 頁、東京。

中村亜希子　2018「瓦当紋様の三次元計測データを用いた研究法」『文化財の壺』6　：38-41。

中村亜希子・林正憲　2018「「同笵瓦」と「異笵瓦」―東大寺式軒瓦の三次元計測と検討―」『奈良文化財研究所紀要 2018』：76-78。

奈良教育大学　2012『新薬師寺旧境内』、49-50 頁、奈良。

奈良県教育委員会　1995『唐招提寺防災施設工事・発掘調査報告書』、102 頁、奈良。

奈良県教育委員会　2000『東大寺防災施設工事・発掘調査報告書　発掘調査編』東大寺、318・320-321 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1959『興福寺食堂発掘調査報告』、17 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1962『平城宮発掘調査報告Ⅱ』、59 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1975a『奈良国立文化財研究所基準資料Ⅱ　瓦編２　解説』、15 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1975b『平城宮発掘調査報告Ⅵ』、34 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1978a『奈良国立文化財研究所年報 1978』、29-31 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1978b『平城宮出土軒瓦型式一覧』、20-21 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1980『奈良国立文化財研究所年報 19』、35 頁、奈良。

奈良国立文化財研究所　1984『平城宮出土軒瓦型式一覧＜補遺篇＞』、10-11 頁、奈良。
奈良国立文化財研究所　1987『薬師寺発掘調査報告書』、79 頁、奈良。
奈良国立文化財研究所　1996『平城京・藤原京出土軒瓦型式一覧』、35-39 頁、奈良。
奈良文化財研究所　2018『古代瓦研究Ⅷ　東大寺式軒瓦の展開　飛雲文軒瓦の展開』、1-171 頁、奈良。
原田憲二郎　2018「新薬師寺・元興寺の東大寺式軒瓦」『古代瓦研究Ⅷ』奈良文化財研究所、73-92 頁、奈良。
堀池春峯　1964「造東大寺瓦屋と興福寺瓦窯址」『日本歴史』197：14-40。
山崎信二　2003「東大寺式軒瓦について」『古代瓦と横穴式石室の研究』、161-178 頁、東京、同成社。
武者小路穣　1981『天平芸術の工房』、168 頁、東京、教育社。
森　郁夫　1976「平城京における宮の瓦と寺の瓦」『古代研究』８、元興寺仏教民俗資料研究所考古学研究室、1-19 頁、奈良。
森　郁夫　1982「瓦当文表の創作」『MUSEUM』376：4-10。
毛利光俊彦・花谷浩　1991「屋瓦」『平城宮発掘調査報告ＸⅢ』奈良国立文化財研究所、251-369 頁、奈良。
藪中五百樹　1990「奈良時代に於ける興福寺の造営と瓦」『南都佛教』64：17-51。

図版出典

図 10 は岩永（2001）の Fig.41（127 頁）を引用。他の図表は中村が作成。

２．変形忍冬唐草文軒平瓦 6647C の再検討

石田由紀子・新尺雅弘・中村亜希子

要　　旨

変形忍冬唐草文軒平瓦 6647C には 6647Ca・Cb・Cc の３段階の瓦笵の彫り直しがあり、それぞれ 6647Ca が藤原宮、6647Cb・Cc が本薬師寺所用と考えられてきた。しかしながら、6647Ca と 6647Cb・Cc は笵傷の位置が違うため、異笵ではないかという指摘があった。そこでまずは肉眼観察によって、文様、笵傷、木目痕に着目し、両者が異笵かどうかの検討をおこなった。

その結果、6647Ca と 6647Cb・Cc は文様に関しては一致度がきわめて高い一方で、唐草文の表現や、笵傷、木目痕では違いが確認でき、異笵の可能性が高いと判断できた。このことを客観的に検証するために、瓦当部の３次元モデルを作成し、同じように文様、笵傷、木目痕の検討をおこない肉眼観察の補強をおこなった。その結果、最終的に 6647Ca と 6647Cb・Cc は異笵との結論に達した。このことは、型式検討会においても追認され、今後、6647Ca を 6647C、6647Cb・Cc をそれぞれ 6647Fa・Fb とすることになった。これにより、6647C と 6647Fa・Fb が同笵であることが前提となって考えられていた、従来の藤原宮の瓦生産地と瓦の生産年代については、認識を改める必要がでてきた。ただし、いっぽうで 6647C と 6647F の文様の合致度の高さは重要な問題である。これに関しては、同じ下絵をもとに念紙などを用いて２つの笵を製作したのではないかと考えた。本稿では、6647C と 6647F が同笵か異笵かを検討するなかで、木目痕という新たな判断指標を提示することができた。加えて、同笵認定を客観的に判断する手段として、３次元計測が有効なことを改めて指摘することができた。

キーワード：藤原宮、本薬師寺、瓦当文様、笵傷、３次元計測

１．はじめに

変形忍冬唐草文軒平瓦 6647 型式Ｃ種（以下 6647C と表記）は、6647Ca が藤原宮所用、瓦笵を彫り直した 6647Cb・Cc が本薬師寺所用として認識されてきた型式である。

2019 年に資料調査のため、奈文研に来訪した当時京都大学大学院生の新尺雅弘（現大阪府教育庁）

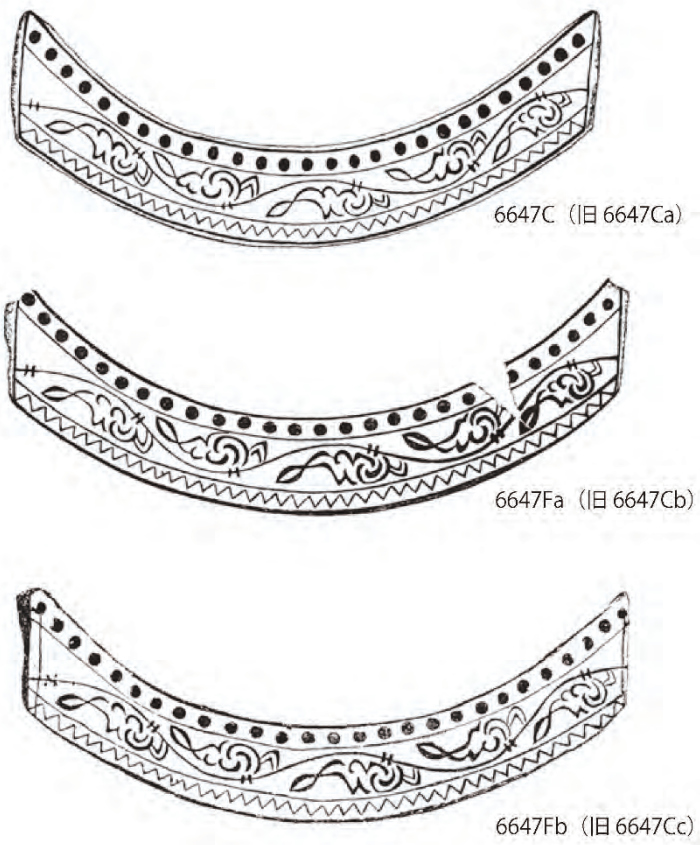


図１　6647Cと6647Fa・Fb（旧6647Ca・Cb・Cc）　１：４

より 6647Ca と Cb・Cc とは笵傷の位置が異なるため、異笵ではないかという指摘があった。これを受け、都城発掘調査部考古第三研究室で検討したのち、2021 年５月 13 日に奈文研・橿考研・奈良市教委の間で開催した型式検討会 [1] において複数の目で検証をおこなった。その結果、新尺の指摘通り、両者は異笵であると判断した。

後述するが、6647Cb・Cc は 1996 年以前は 6647 型式Ｆ種（以下 6647F と表記）と呼ばれていた。今後は以前の型式である 6647F に戻したうえで、6647Cb を 6647Fa、6647Cc を 6647Fb と呼び変えたい（図１）。

本稿では、6647C（旧 6647Ca）と 6647Fa・Fb（旧 6647Cb・Cc）が異笵か同笵かを判断するためにおこなった分析と、その成果を報告する。なお、混乱を避けるため、特に断りがないかぎり、本稿においては基本的には旧型式名の 6647Ca・Cb・Cc を用いる。

最初に 6647Ca・Cb・Cc の設定の経緯を述べたうえで、異笵・同笵の検証の前提として 6647Cb と Cc が同笵であることを確認する。その後、まずは文様から分析をおこない、次に異笵の根拠として挙げた瓦当部の笵傷の違いについて新尺が執筆した。さらに中村亜希子が瓦当文様の３次元モデルを用いて 6647Ca と 6647Cb・Cc の比較をおこなった。最後に、6647Ca と 6647Cb・Cc とが異笵であることに対して、今後の瓦研究への影響や見通しについて述べることとする。

２．変形忍冬唐草文軒平瓦 6647C 設定の経緯

6647 型式は平城京・藤原京出土軒瓦のうち、右偏行の変形忍冬唐草文に分類される型式名である。6647C が報告されている最古の例は、『大和上代寺院志』の本薬師寺の項目においてであるが（保井 1932）、このときにはもちろん型式番号はまだ付与されていない。平城京・藤原京の軒瓦の型式番号は、奈文研において平城宮・京や藤原宮出土の軒瓦の整理を進める中で設定されたものであり [2]、型式名として 6647C の初出が確認できるのは、1975 年の藤原宮第 10 次調査の報告においてである（奈文研 1975）。

その後、翌年には本薬師寺西南隅の調査で変形忍冬唐草文軒平瓦の出土が報告される（奈文研 1976：

52 頁)。そこでは藤原宮の瓦である 6647C と同笵であること、さらにそれが藤原宮の 6647C を彫り直したものと報告された(図２－１)。彫り直しはどの部分かは述べられていないが、おそらく笵全体を彫り直したために瓦当文様の凸線が太くなったという理解と思われる。これにより、6647C に瓦笵彫り直しの段階を示す小文字のアルファベットが付与され、藤原宮所用は 6647Ca、本薬師寺所用は 6647Cb とされた。ただし、ここで 6647Cb とされた資料は、現在の 6647Cc である。この時点では 6647Cb・Cc の出土数が少なく、現在の 6647Cb の段階の資料が認識されていなかったためと考えられる。

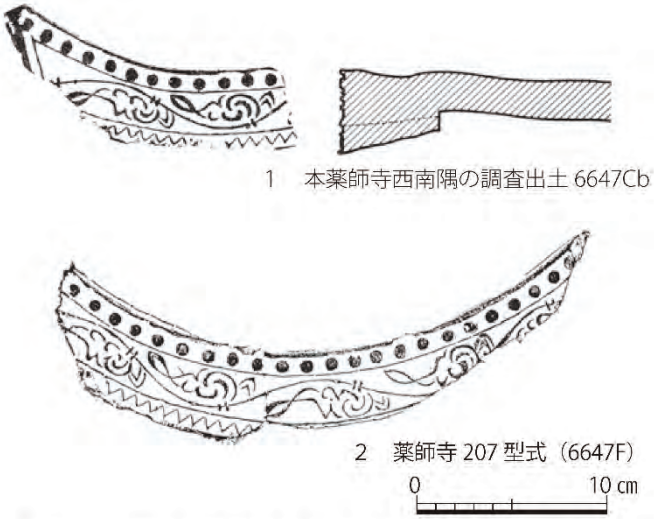


図２　本薬師寺西南隅出土6647Cbと薬師寺207型式
１：４

またこれとは別に 1978 年刊行の『平城宮出土軒瓦型式一覧』では、平城薬師寺所用瓦として 6647F が設定されている（奈文研 1978a：58 頁）[3]。6647F は現在の 6647Cb・Cc にあたる。このことから本薬師寺では 6647Ca と Cb・Cc が同笵とされる一方、平城薬師寺では 6647C と 6647F[4] とは別笵という認識がされていたことがわかる。

1989 年、『薬師寺発掘調査報告』が刊行され、瓦磚類の報告をおこなった山崎信二氏は、6647F を薬師寺 207 型式としたうえで、「藤原宮所用の 6647C に酷似するが異笵である」と明確に述べた（山崎 1987：112 頁)。同時に、薬師寺 207 型式の同笵例として、先述した本薬師寺西南隅出土資料をあげ（図２－１)、6647Cb（現在の 6647Cc）が 6647F と同笵ということを示唆した。

1990 年代以降、本薬師寺の発掘調査が進み、瓦の出土量も飛躍的に増加する。しかし、依然として本薬師寺では 6647F という型式名は用いられず、6647Ca の彫り直しとして 6647Cb が継続して使用されている（奈文研 1993：56 頁)。

大きな契機となったのが、1996 年 2 月 21 日におこなわれた型式検討会である。この場において、

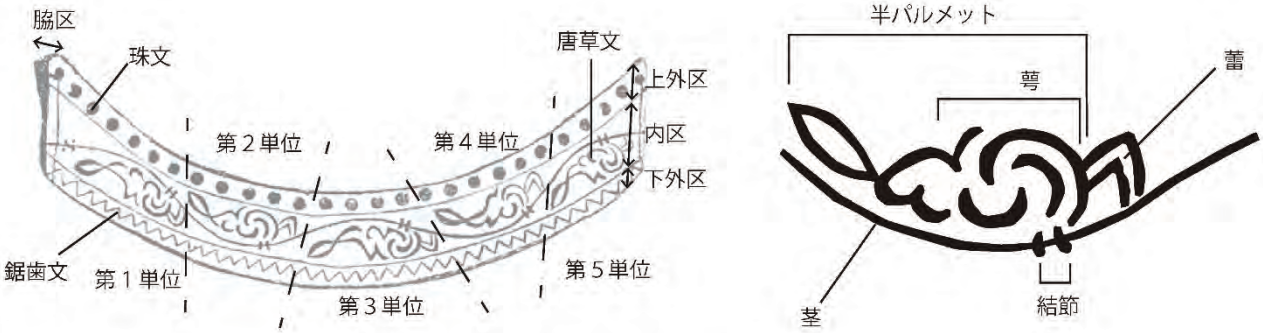


図３　文様の名称

図４　6647Ca・Cb・Cc瓦当面と笵傷の位置　１：２

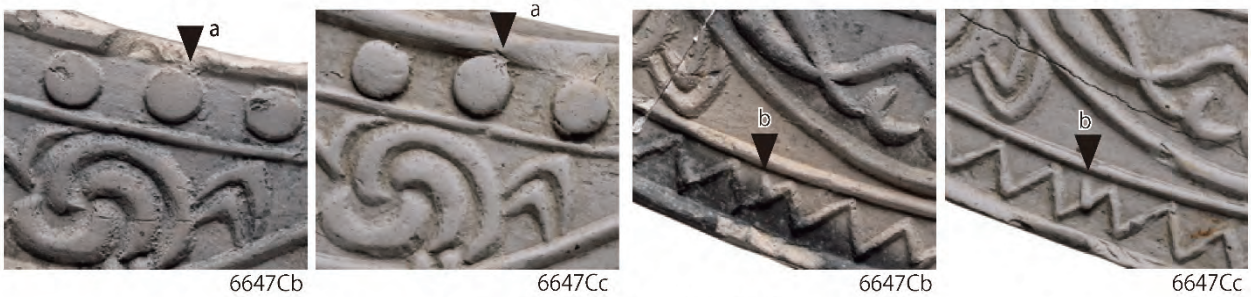


図５　6647Cb・Ccの笵傷拡大図

6647C と 6647F が同笵であることが確認され、6647C に統合された。加えて、6647C には、6647Ca→6647Cb→6647Cc の３段階の彫り直しがあることが認定されることとなった。このときの検討会の成果は、『平城京・藤原京出土軒瓦型式一覧』として刊行され、現在も平城宮・京、藤原宮・京の瓦の型式を認定する際の基礎資料として広く用いられている（奈文研 1996）。

３．6647Ca と 6647Cb・Cc の異笵・同笵分析

3-1．6647Cb と Cc について

6647Ca と 6647Cb・Cc の検討をおこなう前に、まずは 6647Cb と Cc が同笵であることを確認しておきたい。本稿で用いる軒平瓦や唐草文に関する部位名称については、図３に示した[5)]。

6647Cc は右脇区と内区とを区分する界線が上外区右端の珠文を通ることや、変形忍冬唐草文の茎部分が両脇区の界線を貫通するなど、6647Cb との視覚的なギャップが大きい（図１・４）。

しかし、6647Cb と 6647Cc を比較すると、第２単位の上外区珠文と外縁との間にできた笵傷ａと、同じく第２単位の下外区の左端部分の鋸歯文にできた笵傷ｂとの位置が合致する（図４・５）。特にｂの笵傷は、鋸歯文に直交するようにできた「、」状の笵傷で非常に特徴的であり、偶然の一致とみなすことは困難である。また、唐草文をはじめとする瓦当文様に関しても、細かい部分まで一致する。

したがって、6647Cb と Cc が同笵であることは確実である。6647Cc は 6647Cb の両端を切り縮め、両脇区の界線と左脇区の結節を彫り足したものである。このように、6647Cb と Cc は同笵のため、次節以降は主に 6647Ca と 6647Cb とで比較検討をおこなう。

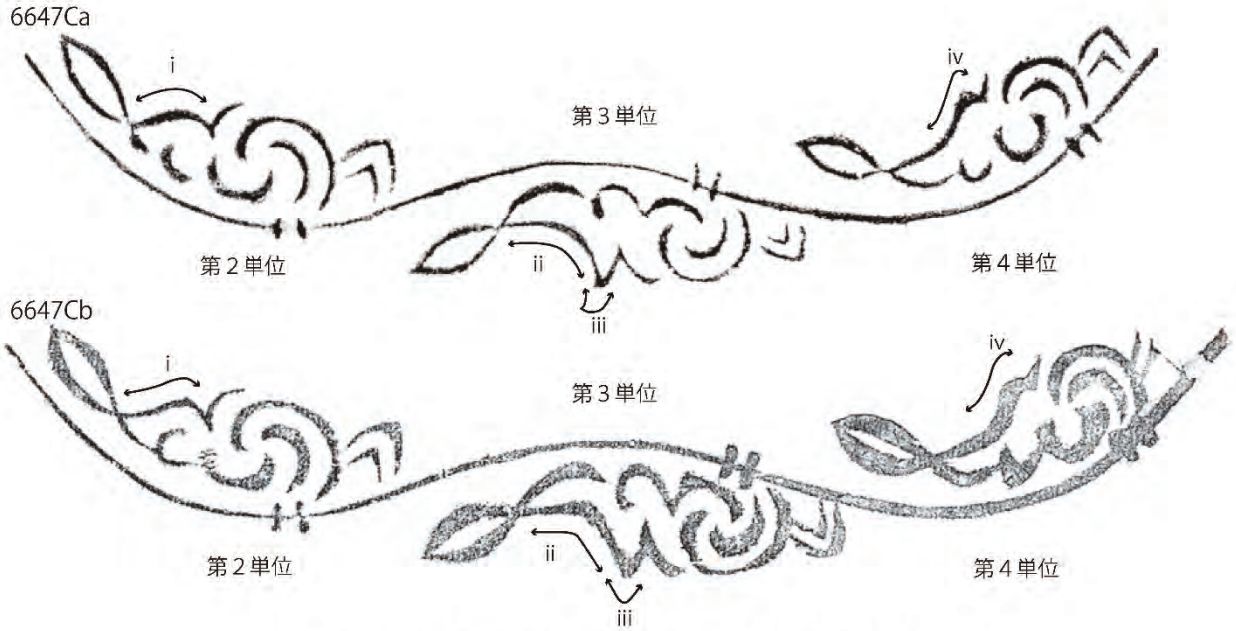


図６　6647Caと6647Cbの第２～４単位唐草文の文様比較

3-2. 肉眼観察による検討

3-2-1. 瓦当文様からの検証

まずは、瓦当文様に着目して 6647Ca と 6647Cb が異笵かどうかの検証をおこなう。なお、6647Cb の方が 6647Ca よりも文様の凸線が太いことや、第３単位のように、半パルメットと茎の間にある蕾が 6647Ca は茎と半パルメットに接していないのに対し、Cb では接している部分があるなど、瓦笵を彫り直しした場合でも起こりうる文様の違いはここでは取り上げない。

6647Ca と 6647Cb は瓦当文様が酷似している。上外区の珠文と珠文の間隔や下外区の鋸歯文の様相、そして珠文と鋸歯文と変形忍冬唐草文、それぞれの配置関係はよく合致する。とりわけ下外区は、鋸歯文の間隔やごくわずかに崩れている部分まで一致する。たとえば、図４の〇で囲った部分（A・B）は鋸歯文の間隔がわずかに異なっていたり、鋸歯の先端の長さがほかの鋸歯に比べ、わずかに短かったりする部分だが、これらは 6647Ca と 6647Cb･Cc のいずれにも確認することができる。

しかし、内区の唐草文に着目すると 6647Ca と Cb とでは若干の違いが確認できた。違いが大きいのは、第２、３、４単位の変形忍冬唐草文である。特に着目する箇所については、6647Ca、6647Cb それぞれに i ～ⅳの番号をつけた（図６）。

まず、第２単位 6647Ca の i は、凸線が上部に向かってややふくらんでいるのに対し、6647Cb の i は凸線が下部に向かって凹むようにやや反っているのがわかる。次に、第３単位の ii と iii に着目すると、6647Ca の ii は凸線が弓なりに反り、iii では先端が左方向に向かって突出する。一方、6647Cb の ii は凸線が「く」の字状に屈曲しているうえに、iii は先端が 6647Ca のように左方向に振らず、まっすぐ下部に向かって丸く収まっている。加えて第４単位については、6647Ca のⅳは凸線が角をもつ山形なのに対し、6647Cb のⅳはなめらかな山形の曲線を描く。

このように、唐草文に着目すれば、6647Ca と Cb は細やかな違いが確認できる。このうちⅳについては、瓦笵の文様線を太く彫り直せば取り込むことのできる違いである。ii・iii についても、かなりの無理があるものの、太く彫り直すことで解消できなくもない。しかし第２ 単位 i においては、

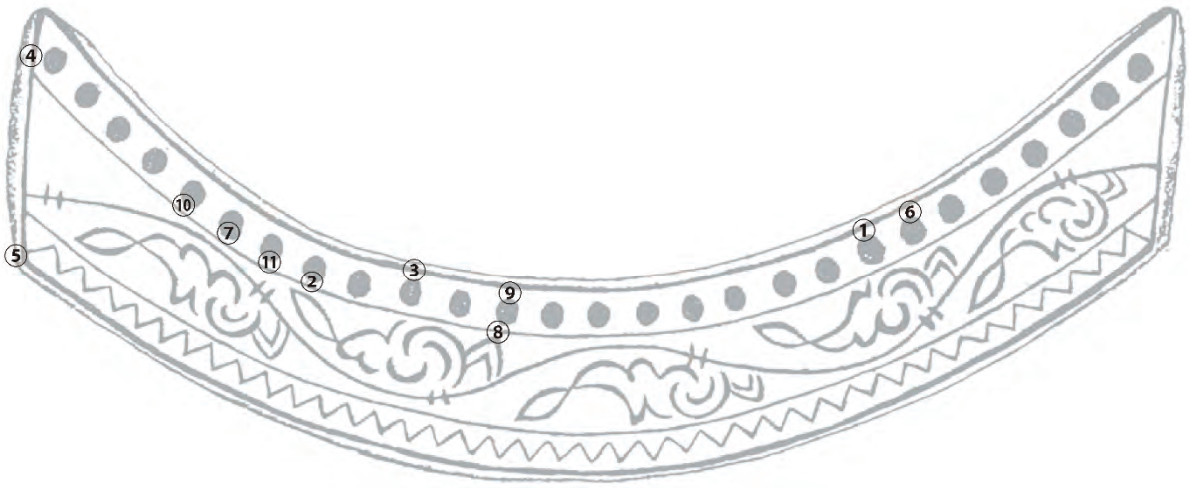


図７　6647Caとの笵傷の位置

図８　6647Caと6647Cb・Ccの笵傷拡大図

線が 6647Ca が上にふくらんでいるものが、6647Cb では下に反っているものへと変わっている。これは瓦笵を太く彫り直しただけでは解消することができない違いである。もし同笵とするのであれば、6647Ca の瓦笵に彫られた文様をほぼ消えるくらいまで削ったのちに再度彫り直さないと不可能だと思われる。ただしこのような作業はあまり現実的ではない。

以上みたように、瓦当文様のうえからも異笵の可能性が高まったといえる。ただし、文様だけでは大きく笵を彫り直した可能性も否定できない。

3-2-2. 6647C の笵傷からの検討

本節では、6647Ca と Cb・Cc が同笵であるか否かについて、笵傷の比較という方法で再検証していく。従来指摘されていた通り、6647Ca の笵に追刻がなされることで Cb となったのであれば、Ca 段階に生じた笵傷は当然 Cb や Cc にも引き継がれ、同一の傷が認められるはずである。そのため、Ca と Cb・Cc 間で同一の傷が認められればこれらを同笵と追認でき、6647Ca で認められた笵傷が Cb・Cc に認められない場合、両者の笵は異なると考えなければならない。

ただし、笵傷とはすなわち、瓦笵に不意に生じた凹みへ粘土が入り込んでしまったものであり、この凹みに埋め木を嵌めてしまえば、笵傷を消すことが可能である（花谷 1998：８頁）。また、文様の部分に隣接して生じた小さい傷であれば、追刻の際に影響を受けて変化・消滅することもあるだろう（花谷 2000b：10 頁）。したがって、6647Ca で認められた傷が Cb・Cc に認められなかった場合でも、即座に異笵と認定できないことに留意しながら慎重に検討する必要がある。

では、実際に 6647Ca の笵傷を検討していこう。対象となる資料は、奈文研に所蔵される藤原宮から出土した 77 点のうち、笵傷の検討が可能だった 30 点である。なお、ここであつかう笵傷は微細なものも含めており、笵傷のようにみえても粘土のヨレや笵から外した後に付着したゴミであった、という危険性がともなう。そこで、これを回避するため、複数個体で同位置、同一形状で確認できないものは笵傷として認定しなかった。また、きわめて微細であって表出されがたく、焼成後の摩滅によって失われやすいものに関しても、ここでは取りあつかわなかった。

以上にもとづいて 6647Ca の笵傷の位置を示すと、図７のようになる。計 11 個の笵傷を認定し、上外区の珠文と界線との間にもっとも笵傷が集中していることを読み取れる。これは、当該部分が笵型では細い突線となっており、凹みやすかったことに起因していると考えられる。紙幅の都合か

ら笵傷進行の具体的様相については省略するが、概ね図７で振り当てた番号の順に生じていくと考えてよい。

さて、Cb・Cc との比較検討をするにあたり、図７で示した笵傷の中でもっとも顕著な、右から８番目の珠文上部に生じた笵傷①を取り上げたい（図４・８）。この箇所では、珠文の 10 時方向と外縁の間に取り付くような小さな傷が認められる段階から（３点）、10 時～12 時方向まで広がる段階（７点）、さらに傷が肥大化して 10 時～２時方向まで広範に傷が認められる段階（２点）にまで進行していく。これは、瓦笵全体からみればごく小さな傷であるが、複数個体で同一箇所、同一形状で徐々に大きくなる様相をみて取れ、かつ、ある程度の数量も担保できるため、確実に笵傷と判断できる。

翻って、6647Cb・Cc における当該部分の笵傷をみてみると、6647Ca でみられたような笵傷を認めることができないいっぽう、独自の笵傷が生じていることを看取できる（図４・８）。それだけでなく、6647Ca では笵傷①によって完全に塞がれていた珠文と外縁の隙間が、6647Cb・Cc において明瞭に認められることは看過できない。6647Ca と Cb・Cc が同笵であるという前提に立つと、笵の凹みを修繕したということになるが、凹んでしまった笵を平らに直すには、もっとも凹んでいる箇所まで全体的に彫り下げるか、あるいは埋め木をするか、のいずれかでしか解決できない。前者に関しては、このような小さな笵傷のためにわざわざ笵全体を彫り下げるとはやや考えがたいうえ、6647Ca と Cb・Cc 間で外縁立ち上がり部分の笵端の痕跡（カブリ痕）の長さに大きな差を認められないことから、これを否定できる。後者に関しても、埋め木による瓦笵修復がおこなわれた場合、どれだけ巧妙に補修しようと、川原寺の軒丸瓦 601 型式Ｃ種で看取されたように、本来の瓦笵と埋め木の間に生じた隙間が細い凸線としてみえるはずである（花谷 1998）。しかし、6647Cb・Cc では、埋め木が想定される部分に新たな笵傷が明瞭に生じるほど瓦笵が傷んでいるにもかかわらず、埋め木の隙間を示すような凸線は見出せない。そもそも笵傷①ほどの小さな笵傷のために埋め木をするという蓋然性の低さも考慮すると、埋め木案も否定できよう。

なお、このような笵傷の不一致は笵傷①だけでなく他の笵傷、例えば笵傷④にも認められる（図４・８）。したがって、笵傷からみると、6647Ca と Cb・Cc は異笵であるという山崎氏の説（山崎 1987）が支持される結果となった。

3-2-3. 木目痕について

6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵かどうかを検討するなかで、考古第三研究室内の複数の人間から 6647Ca と 6647Cb・Cc の一部には木目に沿った微細な笵傷状の痕跡が確認できる資料があること、そしてそれらが入る方向が両者では異なるのではないかという指摘があった。これらの痕跡は硬質の焼成の軒瓦に確認できることが多く、基本的には微細な凸線として瓦当面に現れる。従来からこのような痕跡を木目痕と呼んでいたが、これらが本当に木目に由来するのかは不明であった。今回、6647C を再検討するにあたって、奈文研埋蔵文化財センター年代学研究室の星野安治氏に 6647Ca・Cb にみられる微細な笵傷状の痕跡について確認を依頼し、その結果木材組織に関わる可能性が高いとの見解を得た[6)]。

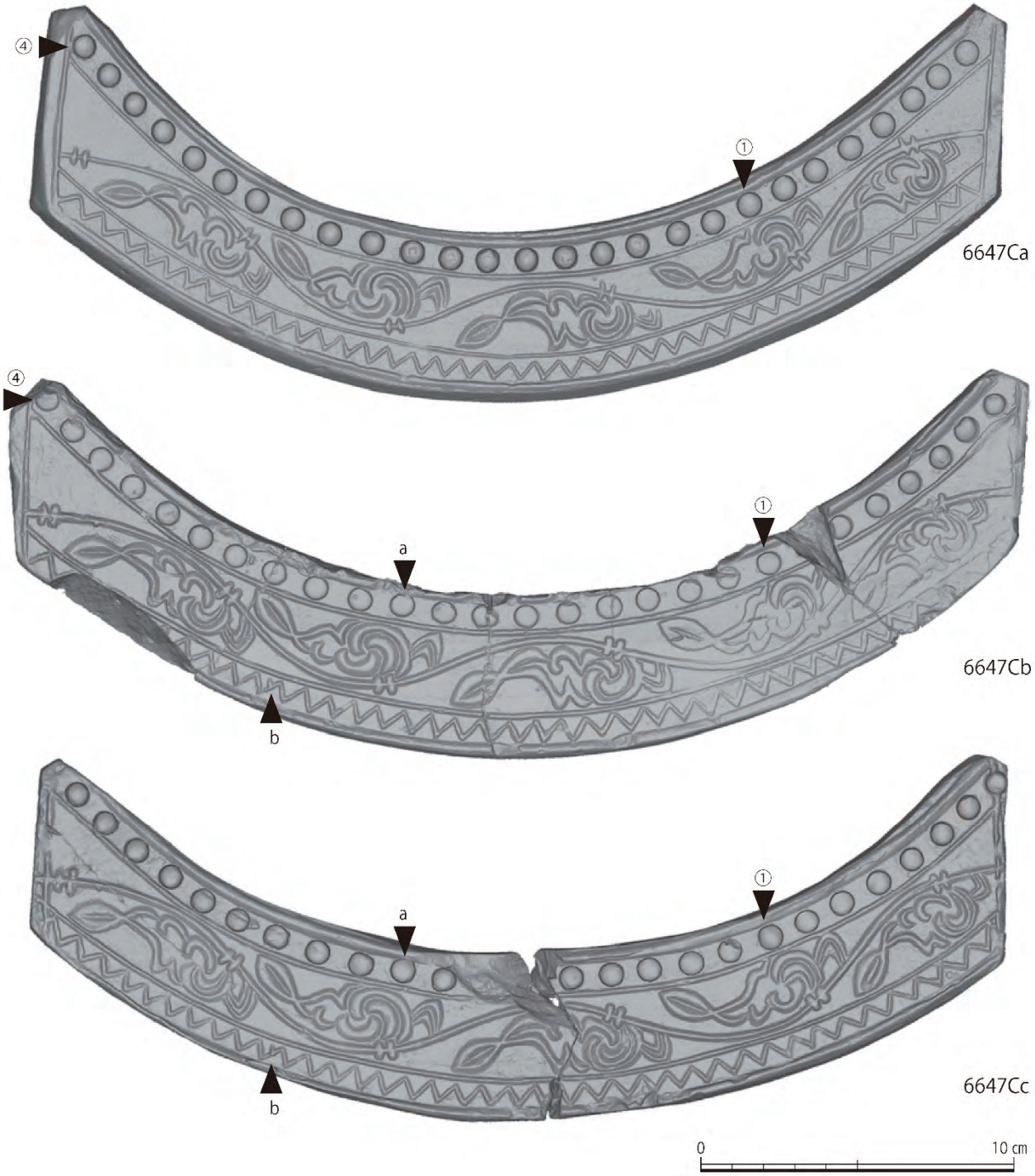


図９　6647Ca・Cb・Ccの３次元モデルのサーフェス画像　１：２

木目痕は、笵傷と同じく同笵と異笵とを検討する際に重要な役割を果たすと考えられる[7]。木目痕による検討については、よりわかりやすく客観的に示すために３次元モデルを用いて分析をおこなったので後述する。

3-3. ３次元計測（SfM-MVS）を用いた検討

3-3-1. ３次元計測の手法と取得データの比較方法

前節では、肉眼観察によって 6647Ca と 6647Cb が異笵かどうかの検証をおこない、文様や笵傷の違いからも異笵の可能性がきわめて高いという知見を得ることができた。ここでは、これらの成果について客観的な証拠を得るため、デジタル技術を用いた検討をおこなった。

今回、瓦当の３次元計測には、デジタルカメラで撮影した複数の写真画像から被写体の３次元形態情報を復元する SfM-MVS（Structure from Motion and Multi-View Stereo）の技術を用いた。以下では、画像の撮影方法と SfM-MVS の解析方法、取得した３次元データの比較方法について説明する。

①　撮　影

解析に用いる写真画像は、デジタルカメラ OM-D E-M1 MarkⅡもしくは MarkⅢ（オリンパス社）にマクロレンズ（30 ㎜/Ｆ3.5 もしくはＦ2.8）を装着して撮影した。カメラは絞り優先モードに設定、Ｆ値を 10 前後、ISO は 200 に固定し、完形の瓦当を木目痕まで記録する場合、１点につき 200 枚程度の写真を撮影した。画像の画素数は 5,184×3,888 で、RAW データのホワイトバランスを調整後、TIFF 画像として書き出した。

②　解　析

SfM-MVS の解析に使用したソフトは Metashape professional（Agisoft 社）であり、解析時のバージョンは 1.7.1 である。写真のアラインメントは最高でおこない、２枚の写真から生成されたタイポイントを削除後、高密度クラウド構築を最高精度でおこなった。その後、信頼度が低い高密度点群をフィルタリングして削除し、残った高密度点群をソースとしてポリゴン数が高のメッシュ（3 次元モデル）を構築、最後に 4,096pixel のテクスチャーを貼り付けた。スケール（大きさ情報）は自動検出したターゲット４点間の距離を入力することによって与え、取得メッシュデータを.obj 形式で書き出した。

③　データの比較

書き出した３次元のメッシュデータは、オープンソースソフトウェアである CloudCompare で比較した。比較時のバージョンは 2.11 である。読み込んだ複数のメッシュデータは、傾きを調整後、正射投影表示（Orthographic projection）し、表面情報が観察しやすいようにサーフェス表示（図９）にする。そして、6647Ca の完形資料の３次元モデルを基準（リファレンス）に、6647Cb および 6647Cc の３次元モデルの位置を合わせた。位置合わせには CloudComapre の位置合わせ機能（Aligns two clouds by picking (at least 4) equivalent point pairs）を用いた。

なお､軒平瓦の瓦当文様は､同笵品であっても平瓦の曲率の違いによって歪みが生じやすいため、図 10 で提示したように変形忍冬唐草文の単位によって文様を５分割し、単位ごとに比較した[8)]。２つの３次元モデルの位置合わせの際は、それぞれに４点以上の任意の参照点を設置する必要があるが、今回は上外区の珠文の中心および下外区の鋸歯文の外側頂点と外縁の間に参照点を置いた。また、個体による収縮率の差を考慮し、スケールはリファレンスとする 6647Ca の大きさを基準とし、位置を移動させる 6647Cb･Cc の３次元モデルの大きさを変えて合わせる設定(adjust scale)にした。

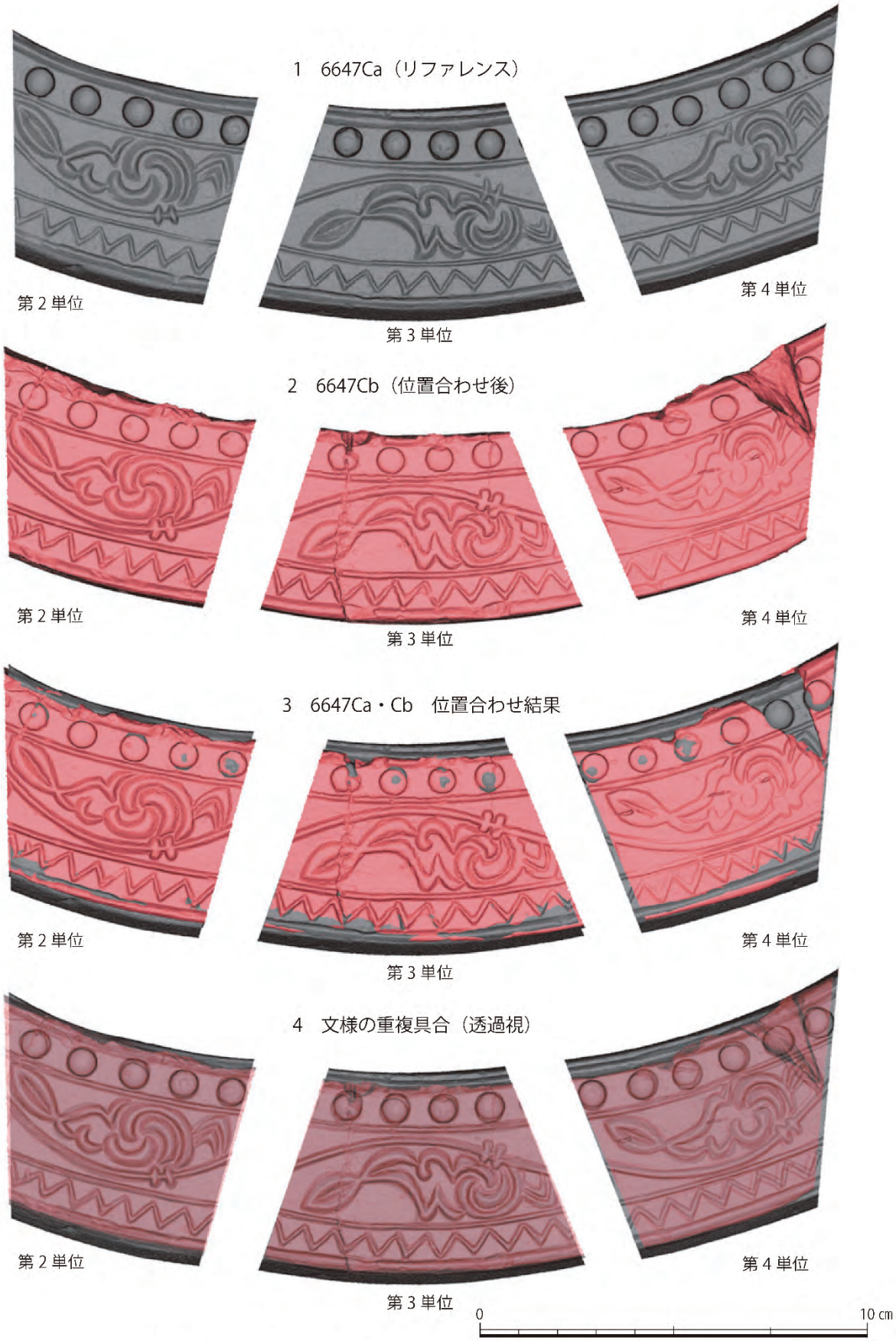


図10　6647Ca・Cbの第２～４単位の３次元モデルでの比較　２：３

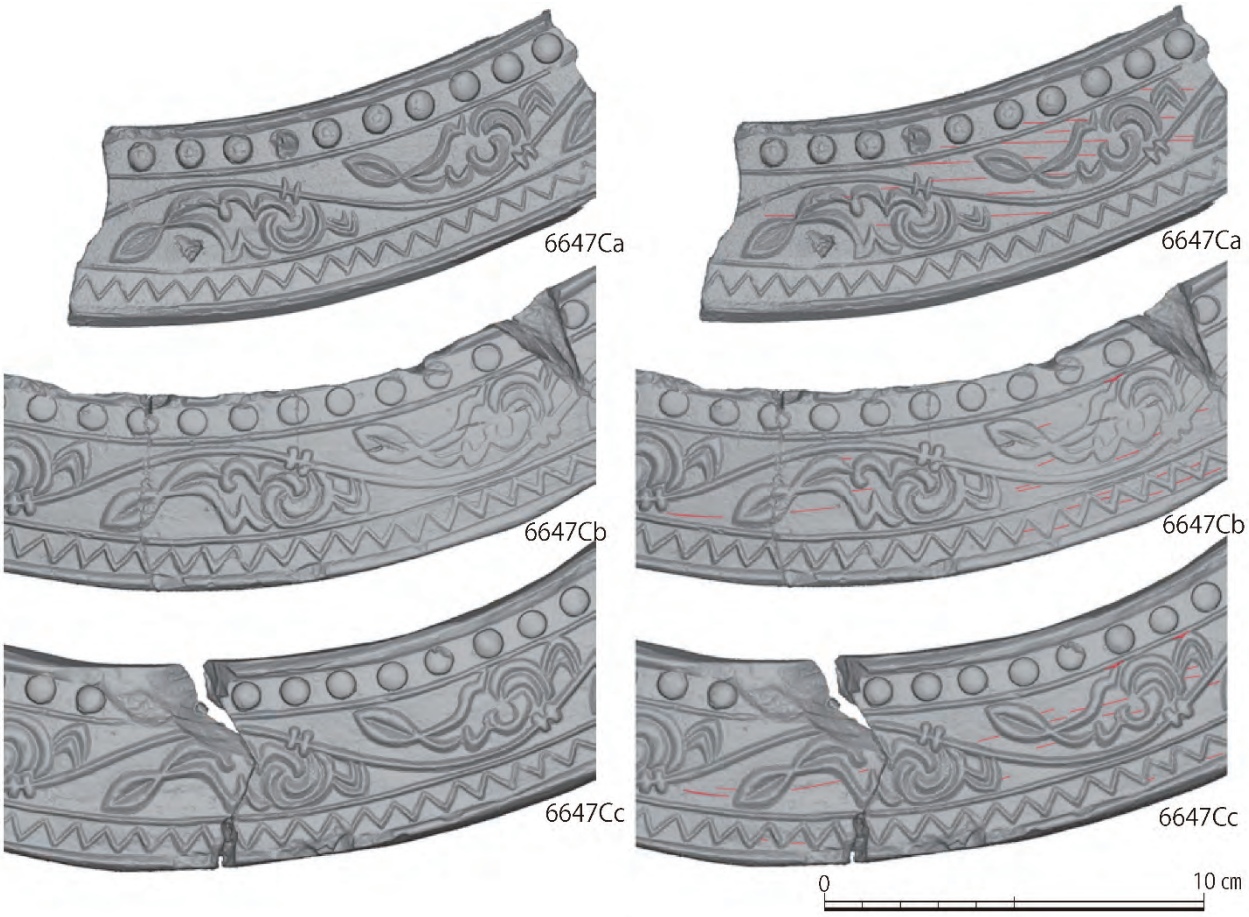


図11　6647Ca・Cb・Ccの瓦当面に現れた木目痕の比較　１：２

3-3-2. 分　析

ここでは３次元モデルのサーフェス画像を用いて、肉眼観察でおこなった①瓦当文様の検討、②瓦当の笵傷、③木目に沿った微細な笵傷について分析をおこなう。

まずは、①瓦当文様の合致具合についてみていく。軒平瓦に関してはその形状ゆえに、円形の軒丸瓦と比べて施文時や調整、乾燥の段階で瓦当面に大きな歪みが生じることが多い。したがって、完形の軒平瓦の３次元モデルをそのまま位置合わせしても、歪みの影響で大きなずれが生じ、うまく重ね合わせられないことが多い。こういった歪みを最小限にするため、瓦当文様を文様単位で５分割し、第２～４単位それぞれで位置合わせをおこなった。図 10 では、6647Ca の 3 次元モデル（図 10－１）を基準として、6647Cb の位置合わせをおこない（図 10－２）、両者を重ね合わせた画像（図 10－３）と、赤で図示した 6647Cb の画像の透過度を下げることで文様の重複具合を可視的に表した画像（図 10－４）を示す。

その結果、6647Ca と 6647Cb・Cc は文様の近似性が非常に高いことが 3 次元モデルでも確認できた。特に下外区の鋸歯文は一致度が高く、とりわけ第２・３単位に関しては、鋸歯文同士の間隔や、鋸歯文先端と界線との距離など非常に細かい部分まで合致する（図 10－３・４）[9]。上外区の珠文に関しては、珠文と珠文、つまり横方向の間隔は 6647Ca・Cb とでほぼ一致する。ただし、珠文と界線、

つまり縦方向の間隔は、6647Ca と 6647Cb とを重ね合わせるとわずかにずれが生じていることが確認できた。ただし、珠文と界線の間隔のずれは、笵の出具合や笵を粘土から外す際の角度や力具合により、それが歪みとして生じる場合も多く、瓦笵の違いとまで断定することは困難である。

また、唐草文に着目すると、6647Cb が 6647Ca よりも文様の凸線が太くなっていることもあり、6647Ca の文様は 6647Cb の凸線の中に取り込まれて、大きなずれは確認できない。しかし、前節で指摘した第２・３単位の半パルメット部分の違いは透過視した画像で確認すると、わずかではあるが重なっていないことがわかる。特に、第２単位の図６－ｉの 6647Ca のふくらみと 6647Cb の凹み、第３単位の図６－ⅲの 6647Ca の左方向への飛び出しは、位置合わせした画像でも重なり合わないことが確認できた（図 10－４）。

次に②瓦当の笵傷に関しては、図９で示した通り、新尺が示した笵傷を 3 次元モデルのサーフェス画像でも確認し、実物資料の観察で得られた成果を３次元計測でも追認した。

最後に③木材組織に由来する微細な笵傷状の痕跡＝木目痕についてである。6647Ca および Cb・Cc の焼成が良好なものには、瓦当面に木目痕が微細な凸線となって確認できる場合がある。これが笵傷と同じく同笵と異笵とを検討する際に重要な役割を果たすと考えられた。これら木目痕は肉眼でも確認できるが、より客観的に確認するためにサーフェス表示した３次元モデルにカスタムライトを当てて、この痕跡を浮かび上がらせることによって図示した（図 11 左）。

木目痕は、6647Ca・Cb・Cc の瓦当全面に確認できるが、特に顕著なのは、第３単位から第４単位にかけてである。図 11 右 は 3 次元モデルのサーフェス画像のうち、木目痕が確認できる場所に線を描き加えたものである。

これをみると、6647Ca の木目痕は、瓦当面（唐草文第４単位）に対して左上がりに入っていることがわかる。いっぽう、6647Cb と Cc も木目痕が確認できるが、瓦当面（唐草文第４単位）に対して平行、もしくはやや右上がりに確認できる。したがって、6647Ca と 6647Cb・Cc とでは、木目痕が入る向きや位置が異なることがわかる。これは木製の瓦笵の木取りの違いを表していると考えられ、6647Ca と 6647Cb・Cc の瓦笵が異なる決定的な証拠といえる[10)]。

3-4. 小　結

以上、6647Ca と 6647Cb・Cc に対し、肉眼観察および３次元計測データによって検証をおこなった結果、異笵であるとの結論に達した。

今回 6647C を再検証するなかで、改めて認識したことは、6647Ca と 6647Cb・Cc の文様の類似性の高さである。実際にそのことは、6647Ca と 6647Cb・Cc それぞれの３次元モデルを重ね合わせた際にも追認できた。特に下外区の鋸歯文の類似性は高く、非常に細かい部分まで一致している。ただし、文様を細かく観察する中で 6647Ca と 6647Cb・Cc とでは、彫り直して線を太くするだけでは解消できない違いがあることも認識できた。この違いは、両者の３次元モデルを重ね合わせることでもずれを確認できた。ただし、これだけでは笵の出の違いや大幅な彫り直しの可能性も捨てきれず、異笵を判断する動かぬ証拠とまではいたらなかった。

異笵が決定的となったのは、笵傷の違いと木目痕の違いである。新尺が指摘したように、6647Caの瓦当面には同じ位置に笵傷が確認でき、かつそれが進行していく状況が確認できる。いっぽうで、6647Cb・Cc の瓦当面には 6647Ca では笵傷が確認できる位置に、笵傷は確認できなかった。さらに瓦当面および笵傷の観察から大規模な彫り直しや埋め木などの補修の可能性も低いため、6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵である可能性はきわめて高くなった。

また、笵傷の違いに加えて、瓦当に現れた木目痕の違いによって、6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵であることをさらに補強することができた。木目痕は、肉眼でも確認できるものの、良好な資料でのみ観察できる痕跡であるため、客観的に提示ししつつ、瓦当同士を比較することが難しい。本稿では３次元モデルを用いて、木目痕を明瞭にし検証をおこなった。その結果、6647Cb・Cc では木目の方向が一致する反面、6647Ca は異なることが判明した。このことは、木製の瓦笵の木取りの違いに起因すると考えられ、6647Ca と 6647Cb・Cc とでは笵が異なるという明確な証拠である。

以上をもって、6647Ca と 6647Cb・Cc は異笵と判断するにいたった。

４．6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵であることで生じる瓦研究への影響と今後の見通し

6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵であることがあきらかとなった。先述したように、6647Ca が藤原宮所用、6647Cb・Cc が本薬師寺所用であり、藤原宮所用から本薬師寺所用へと瓦笵が移動したと考えられていた。このことが前提となる学説が２つあり、これらについては、認識を改める必要が出てきたので言及しておく。

ひとつは 6647Ca と 6647Cb・Cc の生産地に関してである。6647Ca は藤原宮の生産地グループとして、Ｅグループ＝牧代瓦窯に分類されている（大脇 1978；花谷 1993；石田 2010 など）。牧代瓦窯は奈良県五條市に所在し、奈良時代後半の平窯２基が検出されている（関川 1979）。また、周辺の牧代北本瓦窯、牧代西尾瓦窯でも窖窯などを確認している（岸 1959）。そのうち 1978 年の調査では、１号窯から単弁八弁蓮華文軒丸瓦、偏行唐草文軒平瓦 6641H・Ｋ・Ｍ、変形忍冬唐草文軒平瓦 6647Cb あるいは Cc・Ｇ、三重弧文軒平瓦、均整唐草文軒平瓦が出土した（図 12；関川 1979）。このうち、単弁八弁蓮華文軒丸瓦と、均整唐草文軒平瓦は奈良時代後半の平窯（１号窯）にともなうものである。そのほかの軒瓦は、１号窯の廃絶後に窯体内に廃棄された、付近の瓦窯の瓦と考えられている。加えて牧代北本窯跡では薬師寺６型式と思しき軒丸瓦も出土している（岸 1959；山崎 1987）。つまり、先述した奈良時代後期とされる軒丸瓦と軒平瓦以外は、6647Cb あるいは Cc も含めすべて本薬師寺、あるいは平城薬師寺で出土する軒瓦である。それに対し、藤原宮所用軒瓦は 6647Ca をはじめ、胎土・焼成の特徴から同じＥグループとされる軒丸瓦 6276C も牧代瓦窯からは出土していない。

Ｅグループはこれまで牧代瓦窯での出土例がないものの、6647Ca が 6647Cb・Cc と同笵と考えられてきたことや、胎土・焼成が類似することを根拠に牧代瓦窯産とされてきた。しかし、6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵である以上、牧代瓦窯は本薬師寺の瓦窯であって、藤原宮の瓦窯ではない。山崎信二氏は 6647Ca が牧代瓦窯から出土していない点を重視し、Ｅグループと牧代瓦窯は区分するべ

きとすでに指摘している（山崎 2011：238 頁）。

山崎氏は、Ｅグループと牧代瓦窯とでは胎土にわずかな違いがあるとしながらも、胎土・焼成の特徴から牧代瓦窯に近接する五條市内の瓦窯と推定し、Ｅグループを「牧代瓦窯近接窯」と呼称した。今後、Ｅグループを牧代瓦窯近接窯とするかは検討が必要だが、少なくとも藤原宮のＥグループの産地を牧代瓦窯とする直接の根拠は失われたことになる。

なお、製作技法に関しては、6647Ca と 6647Cb・Cc とでは異なることが指摘されている（山崎 1987；花谷 1993）。6647Ca は平瓦凸面の調整が平行刻線タタキで、顎部を貼り付ける際に、焼成後に顎部が剥がれないよう平瓦凸面に重弧文風のキザミを付ける。それに対し、6647Cb・Cc は平瓦凸面の調整が縦縄タタキで、顎部を貼り付ける際には、平瓦凸面に指で横方向のくぼみをつける。つまり、従来から指摘されていた製作技法の違いが、生産地グループの違いに起因していたことになる。ただし、少数ながら 6647Cb にも重弧文風のキザミを入れるものがある（高田 2010：243 頁）。したがって、牧代瓦窯とＥグループは、胎土・焼成だけでなく、製作技法でも一部共通する部分があることは重要である。

２点目は、藤原宮の瓦生産の年代についてである。6647Ca は藤原宮でも初期の瓦であることが判明しており（花谷 1993；石田 2012b）、6647Ca の生産年代は藤原宮の瓦生産の開始年代を知る重要な手がかりになると考えられる。いっぽう 6647Cb・Cc は本薬師寺金堂所用軒平瓦の１つである（花谷 1997, 2000a）。本薬師寺金堂の完成年代は不明なものの、持統天皇２年（688）には天武天皇死去にともなう無遮大会がおこなわれており、この時点で金堂は法要がおこなえるまで体裁が整ったものと考える説が現在は有力である（大橋 1986）。したがって、6647Ca と 6647Cb・Cc が同笵という前提に立てば、6647Ca の生産年代は金堂が完成する持統天皇２年（688）以前という推定が成り立つ（石田 2012b）。藤原宮の瓦生産開始の年代は、藤原宮運河 SD1901A 最下層出土の瓦から天武末年には生産が開始されたことは確実だが、SD1901A からは丸瓦・平瓦が出土しているのみで、軒瓦は出土していない[11]

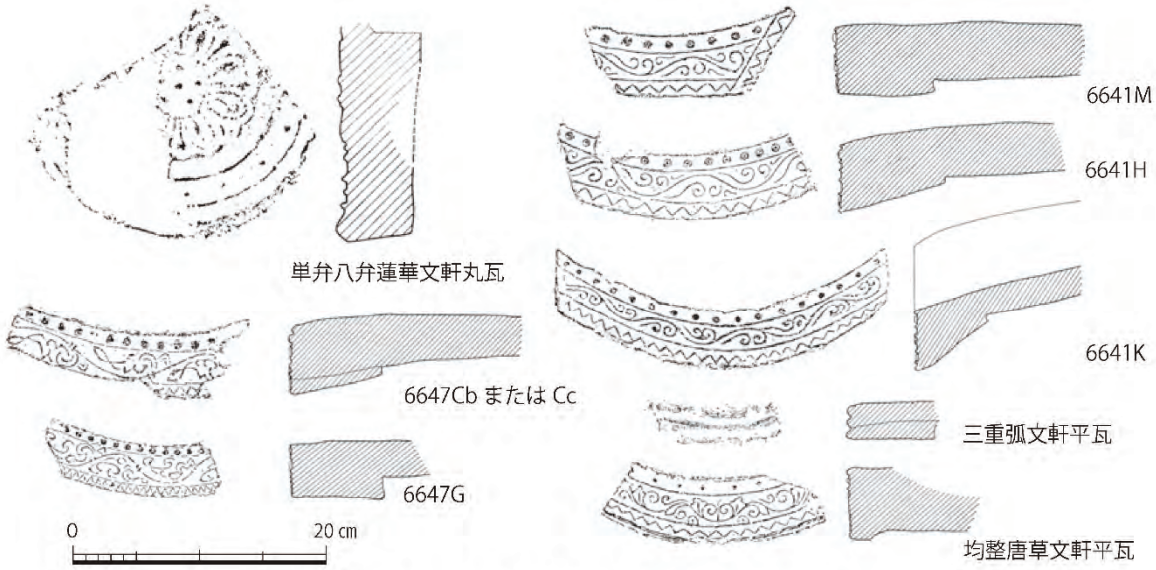


図12　奈良県五條市牧代瓦窯出土軒瓦　１：６

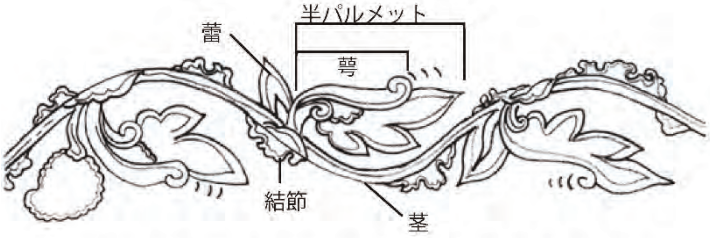


図 13 伝橘夫人念持仏厨子須弥座上框のパルメット唐草文

（石田 2012a;奈文研 2012）。加えて、6647Ca は出土状況から藤原宮東面大垣で使用されたとみられることから（石田 2012b）、筆者は 6647Ca の生産年代は藤原宮大垣の造営年代にも関わると考えていた。しかしながら、6647Ca と 6647Cb・Cc が別笵である以上、6647Ca の生産年代をうかがえる根拠はなくなったといえる。

6647Ca と 6647Cb・Cc が異笵であることが判明し、これまで同笵を前提としていた説が成立しなくなったことを指摘した。しかしいっぽうで 6647Ca と 6647Cb・Cc とがなぜここまで酷似した瓦当文様なのかは重要な問題である。とくに下外区の鋸歯文は細かな様相まで一致する。ここまで一致するのは瓦笵を製作する際の下絵が同じであった可能性がきわめて高い。１つの下絵から２つの瓦笵を作ったとすれば、念紙のようなものを用いて素材となる木材に下絵を転写して彫ったと想定できる。念紙を用いた転写技法は、法隆寺金堂壁画やキトラ古墳壁画などにも確認でき（有賀 2006）、古代からある技法である。おそらくはこういった方法を使って、同じ文様の笵を複数製作したと考えられる。

ただし、鋸歯文の合致性が高い反面、唐草文の部分は細やかな違いもみることができる。これはおそらく鋸歯文のような単純な文様は、転写図どおり彫ることができるが、唐草文は複雑な文様ゆえに、彫り手の個性がでたのではないかと思われる。6647Ca は線が細く、曲線がなめらかで繊細な印象を受けるのに対し、6647Cb はパルメットが肉厚で曲線も若干角ばっており、全体的に力強い印象を受ける。したがって、印象ではあるが、6647Ca と 6647Cb とでは瓦笵を彫る人間が異なっているように思える。しかし、6647Ca と Cb は下絵が同じだったとしても、下絵はどこでどのような人が作ったのか、あるいは下絵を製作した人と瓦笵を製作した人は同じなのかなど、そこから先の疑問について知ることは困難である。ただし、6647Ca、6647Cb・Cc の祖型は、従来から指摘があるように、伝橘夫人念持仏厨子須弥座上框下段下面に描かれているようなパルメット唐草文である（八賀・田辺 1976）。瓦当文様用に図案化されてはいるが、半パルメットの花弁、渦を巻いた萼、茎とパルメットの間の蕾などが的確に表現されている。したがって、下絵を書いた人間は、もとのパルメット唐草文の意味を理解したうえで、大胆に文様を省略し、図案化したと考えられる。それには、これまで指摘されているように（森 1982；上原 1996）、文様に関する知識は必須であり、画工や仏師など瓦を生産する瓦工とは異なる工人が下絵や瓦笵を作ったのではないかと考えられる。

このように同じ下絵から瓦笵が２つ製作され、その後、瓦笵は藤原宮の瓦を生産するＥグループと本薬師寺の瓦窯である牧代瓦窯にそれぞれ配布され、瓦が生産された。Ｅグループと牧代瓦窯は別の生産グループではあるが、顎部の貼り付け技法など、一部共通する部分も確認できる。したがって、瓦工同士の交流があるような、比較的近い関係にあった瓦窯であることは想定できる。今後、胎土分析などを通して、Ｅグループと牧代瓦窯との関連性に関して検討する必要がある。

５．まとめにかえて

本稿では、6647Ca と 6647Cb・Cc を別の瓦笵であると認定し、それぞれ 6647C と 6647Fa・Fb とするまでの検証の過程を報告した。

瓦研究において、軒瓦を分類し、同笵、異笵かを認定することは、瓦を通して当時の社会を復元するうえでの基本的な作業である。この部分を誤るとその先の研究が成立しなくなるため、従来から同笵とされる軒瓦であっても、常にそれに対し疑問をもち、きちんと再検証する必要がある。6647C については、新尺が指摘したように、笵傷という明確な証拠があった。これに関しては、従来の研究成果に対する再検証が不足していたという指摘はまぬがれない。ただこれを機に、文様や木目痕、さらに３次元計測など、新たな視点から再検証ができたことは、今後、同笵・異笵の認定作業を進めるうえで意義のあることだったと考える。特に木目痕に関しては、これまで目視では確認しながら、取り上げる機会が少なかった。今回、改めて木目痕が木材組織に由来することを確認し、笵傷と同じく異笵と判断する根拠にできたことも大きな成果といえる。

瓦の同笵認定に際しては、笵傷をみつけることがまず第一だが、明確な笵傷がない場合は、文様の類似性で同笵を認定せざるをえない場合もある。もちろん、文様の特徴的な部分や突出具合、文様同士の間隔、唐草文や蓮華文といった主文様と外区の珠文や鋸歯文との位置関係など、様々な要素を総合的に判断して同笵認定をおこなう。しかし、異笵であっても 6647C と 6647F のようにきわめて類似した瓦当文様をもつものがあることを念頭に置く必要がある。

今回は笵傷に加え、木目痕によって木笵の木取りの違いを確認し、異笵を補強することができた。しかしながら、こういった痕跡を確認できる資料自体が稀である。同笵・異笵の認定は、ときに危うい部分があること認識し、その判断は真に慎重におこなう必要がある。できるだけ複数の人間による確認も大事であり、同笵を認定する際には、従来の成果であってもそれが正しいかきちんと再検証をする。それでも間違っていた場合は、迅速に訂正するという姿勢も重要である。基本的なことだが、自戒を込めてここに記しておきたい。

謝　辞

本研究に掲載した画像に関して、写真は栗山雅夫氏に撮影いただき、３次元計測では北野智子・三好佑佳両氏の協力を賜った。また木目痕の観察には、星野安治氏・前田仁暉氏にご助言いただいた。加えて、執筆に際しては、都城発掘調査部考古第三研究室室員、2021 年５月 13 日に開催した奈文研・橿考研・奈良市教委からなる型式検討会の参加者をはじめとして、下記の方々に多大なご教示やご助力を賜った。記して感謝の意を表します。

上原眞人、大脇　潔、清野孝之、清野陽一、花谷　浩、濱村美緒、菱田哲郎、松島隆介、吉岡孝紘

（五十音順、敬称略）

なお、本研究は JSPS 科研費 18K01084「藤原宮造営に伴う造瓦の新技術とその導入経路に関する総合的研究」、および 19H01355「３次元データによる瓦の同笵認識技術の基礎的研究」の成果の一

部を含む。

註

1）平城宮・京および藤原宮内で出土した軒瓦について、情報や認識を共有するために、奈文研・奈良市教委・橿考研間で必要に応じておこなっている検討会のことである。平城宮・京、および藤原宮の軒瓦の同笵認定や新型式・種を設定するには、基本的にこの型式検討会の承認を経ることとしている。

2）6647C がいつ設定されたのかは不明であるが、奈文研調査のなかでもっとも古い 6647C の出土例は 1964 年に調査された平城第 16 次朱雀門周辺出土のものである（奈文研 1978b）。

3）1976 年に刊行された『飛鳥・藤原宮発掘調査報告Ⅰ』では、変形忍冬唐草文の文様の祖型や変遷について詳細な検討がおこなわれている（八賀・田辺 1976）。そのなかで現在の本薬師寺所用軒平瓦 6647G が 6647F として取り上げられていた。ただし、6647G が 6647F となっているのはこれのみで、『平城京出土軒瓦型式一覧』では、現在と同じ 6647G として掲載されている（奈文研 1978a）。

図14　軒平瓦6647Cb瓦当部右端部分の木目痕

4）薬師寺の報告書に掲載されている 6647F は 6647Cc にあたる。しかし、薬師寺でも 6647Cb は出土しており、これについても 6647F として処理されていたことを拓本カードや整理台帳で確認している。

5）軒平瓦の部分名称については、奈文研 1974、変形忍冬唐草文の部分名称については、八賀・田辺 1976 に依る。

6）特に 6647Cb は、瓦当部右端部分に繊維状の圧痕が確認できる（図 14〇部分）。これは広葉樹のうち、クリやナラなど環孔材に分類される樹種の道管部分に粘土が入り、瓦当部に反転して写しだされたものの可能性がある。なお、「木目」とは『広辞苑』（第四版）によると、「材木の断面に、年輪、繊維、導管、髄線等の配列が種々の模様をなしてあらわれているもの」とあり、その理解によれば、6647Ca および 6647Cb・Cc に確認できる木材組織に由来するこれらの痕跡も「木目痕」と呼んで差支えないと考える。

7）ただし瓦当面には、文様を施文する前に粘土素材をナデ調整した痕跡など、木目痕ではない痕跡も確認できる。そのため、瓦当面に木目痕に類似した痕跡を確認しても、それらが本当に木材組織に由来するものかは慎重に検討する必要がある。

8）なお、軒平瓦の３次元モデルを文様単位で区切り、位置合わせをおこなうアイデアは三好佑佳・松島隆介の両氏によって提示された。

9）第４単位の鋸歯文は位置にずれが生じているが、これは 6647Ca の資料自体に大きな歪みがあることにも起因する可能性がある。

10）なお、この木目痕は、図示した資料以外にも複数の 6647Ca・Cb 資料において確認された。

11）ただし藤原宮運河 SD1901A 最下層からは、Ｅグループもしくは牧代瓦窯産と思われる丸瓦は出土している（奈文研 2012）。したがってＥグループの瓦生産が天武末年に遡る可能性は残っている。

引用文献

有賀祥隆　2006「キトラ古墳壁画の白虎をみるために―あるいは高松塚古墳壁画比較論―」『キトラ古墳と発掘された壁画たち』飛鳥資料館、9-22 頁、奈良。

石田由紀子　2010「藤原宮の出土の瓦」『古代瓦研究Ⅴ』奈良文化財研究所、169-203 頁、奈良。

石田由紀子　2012a「藤原宮運河 SD1901A 出土の瓦－第 20 次調査から－」『奈良文化財研究所紀要 2012』: 107-108。
石田由紀子　2012b「藤原宮における瓦生産とその年代」『文化財論叢Ⅳ』奈良文化財研究所、317-344 頁、奈良。
上原真人　1996「蓮華紋を描いた工人たちの交流」『日本の美術 359　蓮華紋』、61-78 頁、東京、至文堂。
大橋一章　1986「天武崩御と薬師寺の無遮大会」『薬師寺』日本の古寺美術 4 、18-22 頁、大阪、保育社。
大脇　潔　1978「屋瓦と生産地」『飛鳥・藤原宮発掘調査報告 II』奈良国立文化財研究所、86-92 頁、奈良。
岸　熊吉　1959　「大和に於ける古代窯跡」『奈良県史跡天然記念物調査抄報 11』奈良県教育委員会、45-56 頁、奈良。
関川尚功　1979「五條市牧代瓦窯群発掘調査概報」『奈良県遺跡調査概報　1978 年度』、227-236 頁、橿原。
高田貫太　2010「本薬師寺の創建軒平瓦」『古代瓦研究Ⅴ』奈良文化財研究所、238-258 頁、奈良。
保井芳太郎　1932「本薬師寺」『大和上代寺院志』大和史学会、73-74 頁、図版 28、奈良。
奈良国立文化財研究所　1974『奈良国立文化財研究所基準資料Ⅰ　瓦編Ⅰ』、奈良。
奈良国立文化財研究所　1975「藤原宮第 10・11・15・16 次の調査」『飛鳥・藤原宮発掘調査概報 5 』: 3-20。
奈良国立文化財研究所　1976「本薬師寺西南隅の調査」『飛鳥・藤原宮発掘調査概報 6 』: 49-54。
奈良国立文化財研究所　1978a『平城宮出土軒瓦型式一覧』、96 頁、奈良。
奈良国立文化財研究所　1978b『平城宮発掘調査報告書Ⅸ』、134 頁、奈良。
奈良国立文化財研究所　1993「本薬師寺の調査（1991-1 次）」『飛鳥・藤原宮発掘調査概報 23』: 53-57。
奈良国立文化財研究所　1996『平城京・藤原京出土軒瓦型式一覧』、169 頁、奈良。
奈良文化財研究所　2012「朝堂院朝廷の調査－第 169 次」『奈良文化財研究所紀要 2012』: 84-93。
八賀　晋・田辺征夫　1976「瓦の検討」『飛鳥・藤原宮発掘調査報告Ⅰ』奈良国立文化財研究所、64-67 頁、奈良。
花谷　浩　1993「寺の瓦作りと宮の瓦作り」『考古学研究』40-2：72-93。
花谷　浩　1997「本薬師寺の発掘調査」『佛教芸術』235、毎日新聞社、57-80。
花谷　浩　1998「異笵・同笵あれこれ」『奈良国立文化財研究所年報 1998－１』: 8-9。
花谷　浩　2000a「京内廿四寺について」『研究論集Ⅺ』奈良国立文化財研究所、79-202 頁、奈良。
花谷　浩　2000b「大和と河内を股にかけた瓦　飛鳥時代における同范瓦三兄弟の新例」『奈良文化財研究所年報 2000－１』: 10-11。
森　郁夫　1982「瓦当文様の創作」『MUSEUM』368：4-10。
山崎信二　1987「瓦　磚」『薬師寺発掘調査報告』奈良国立文化財研究所、77-148 頁、奈良。
山崎信二　2011「初めての宮殿瓦多量生産に対する造瓦体制―藤原宮造瓦とその後―」『古代造瓦史―東アジアと日本―』219-264 頁、東京、雄山閣。

図版出典

図１　奈文研 1996　98 頁 6647Ca　99 頁 6647Cb、6647Cc。
図２　奈文研 1976　52 頁　本薬師寺西南隅出土軒瓦　6647-Cb、　山崎信二 1987　Fig.51　207（6647F）。
図３　奈文研 1996　99 頁 6647Cc をもとに石田作成。
図４・５　栗山雅夫氏撮影の写真をもとに石田作成。
図６　石田作成。
図７　奈文研 1996　98 頁 6647Ca をもとに新尺・石田作成。
図８　栗山雅夫氏撮影の写真をもとに石田作成。
図９～11　中村作成の図に石田追記。
図 12　関川 1979　図４・５を石田改変。
図 13　八賀・田辺 1976　fig.23 をもとに石田改変・追記。

第４章　三次元計測データの公開活用に向けて

１．現状の課題

本研究では、三次元データの主な計測対象として、奈良文化財研究所が所蔵する平城京・藤原京出土軒瓦の基準資料を取り扱っている。これらの基準資料は『平城京・藤原京出土軒瓦型式一覧』（奈文研 1996）の基礎となるものであり、出土した軒瓦の型式認定あるいは同笵認定における基準でもあるため、奈良時代の軒瓦を研究する上で重要な資料群といえる。したがって、現在でも近隣の自治体や研究者が奈文研を訪れ、出土した軒瓦を持ち寄った上で型式や同笵の認定を行うことがある。

しかしながら、現在の主観的な認定方法に限界があり、その欠点を補う上で三次元計測データが有用であることは、本書でも繰り返し述べてきたところである。そのため、これらの基準資料を所蔵する奈文研が主体的に三次元計測を行い、そのデータを公開することは重要な責務であるとともに、奈良時代の瓦研究に大きく寄与するものである。

三次元計測データを公開することの利点は大きく２点に集約できる。まず１点目は、奈文研外部の研究者が三次元計測データを入手することによって、実際に奈文研に足を運ばずとも軒瓦の型式認定及び同笵認定が可能となることである。当然のことながら、判定すべき個体の状況（摩耗が激しい、残存率が悪い等）によっては実物による比較が必要となるであろうが、基本的には認定の重要な判断材料として利用することが可能となろう。

２点目は、第３章で行ったような三次元計測データ間の比較研究の素材として、基準資料の三次元計測データを研究者間で共有することが可能となる点である。この三次元計測データ間の比較研究についてはまだ端緒についたばかりであり、今後様々な研究方法が開発されるべき分野である。そのためには、広く三次元計測データを公開し、各研究者によって方法論的な検討が行われることが理想的である。

そこで、本研究の過程で計測した三次元計測データの一部について、２種類の方式で公開することとした。以下ではその詳細について解説する。

２．奈文研ホームページ上での公開

現在、奈文財ではホームページ（https://www.nabunken.go.jp/publication/）上に「奈良文化財研究所収蔵品データベース」（https://jmapps.ne.jp/nabunken/index.html）として、画像データの公開を行っている。これは、（株）早稲田システム開発が提供する収蔵品管理システムである「I.B.MUSEUM」を利用したものであり、そのシステムに登録した画像データと、関連情報を表示するものである。

本研究の進行に際しては、取得した三次元計測データを「I.B.MUSEUM」上でも登録・管理していたことから、このシステムを用いてデータ公開を行うこととし、新たに「軒瓦三次元計測データベース」を作成した（https://jmapps.ne.jp/nabunken/list.html?keywords=&kwd_and_or=and&hlvl=1&bunrui=18&

data_id=&list_type=LLA001&list_count=10&title_query=yes、図１)。公開データの内容は、①瓦当面のオルソ画像と②三次元モデル、③関連情報（テキスト）の３種類である（図２)。

①瓦当面のオルソ画像は、東大寺式軒瓦である 6235 型式と 6732 型式のうち、三次元データを取得した 78 点について、それぞれ Texture と Surface の２種類のデータを 400dpi 程度の JPG 形式で公開する。なお、各型式の主だった個体については、本書巻末の図版にも掲載しているので、合わせて御参照いただきたい。

②三次元モデルについては Metashape（Agisoft 社）で作成した OBJ 形式のデータを 30 点公開した（図３)。オルソ画像に比べて点数が少ないのは、本研究では瓦当面のデータを取得することを主な目的としていたため、軒瓦全形の三次元モデルの作成については副次的に行わざるを得なかったことによる。オルソ画像では Texture と Surface の２種類のデータを公開しているが、三次元モデルについては Surface のみの公開とした。これは、データの閲覧を簡便なものとするためにデータ容量を 10MB 以下に抑えたことと、製作技法などの痕跡に関しては Texture よりも Surface の方がより鮮明に表現できるためである。なお、いくつかの型式については、数個の破片をデータ上で接合

図１　軒瓦三次元計測データベース

図２　6235A の場合

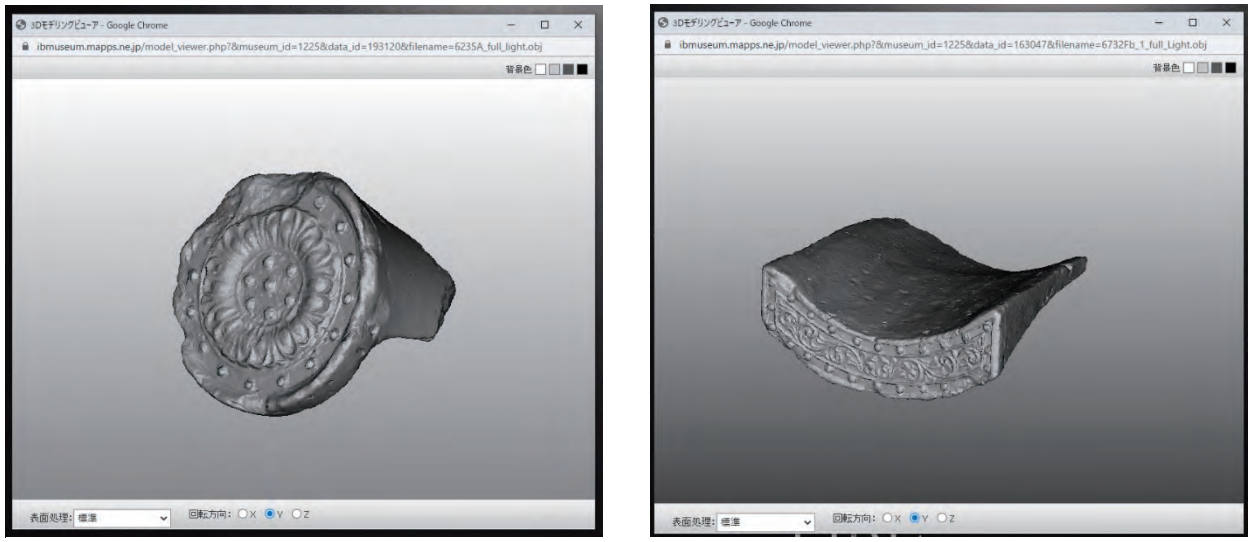


図３　軒瓦の三次元モデル（左：6235A、右：6732Fb）

するとともに、欠損部を復元しながらモデルを構築している。

③関連情報については、閲覧者には軒瓦の型式と、それらの出土遺跡のみを表示しているが、詳細な情報に関しては奈文研内部での管理用として、非表示としている。

以上の公開データは、いずれも閲覧のみとなっていることと、データ容量も低いことから、第３章で行ったような考古学的研究に応用しうる水準には達していない。これは、奈文研ホームページでの公開を一般の閲覧者を主な対象として設定し、従来は展示の機会でしか確認できない軒瓦の詳細について、ＰＣ画面上で容易に御覧いただくことを目的としたためである。しかしながらオルソ画像については、遠隔地の研究者が軒瓦の同笵認定の手がかりとするには充分なデータとなっているので、ぜひとも御活用いただきたい。

現状では東大寺式軒瓦に限定した公開となっているが、本研究に関連して取得した三次元計測データは約 700 点に及ぶ。これらについても、時機を見計らって随時公開していく予定である。

３．Sketchfab での公開

先述の奈文研ホームページでの公開は閲覧のみであるため、公開した三次元計測データを各研究者が考古学的に応用することは難しい。そこで、その問題に対処するためにもう１つの方式でデータ公開を行うこととした。それが、Sketchfab での公開である。

Sketchfab（https://sketchfab.com）は、世界最大の三次元モデルの公開・共有プラットフォームである。利用者は、アカウントを取得（登録・利用に関しては無料）するだけで、三次元計測データをアップロードして公開することができるため、非常に利便性が高い。

最大の利点は、公開されている三次元計測データを、他のユーザーがダウンロードすることが可能な点にあり、三次元計測データを研究者間で共有し、考古学的研究への応用することも可能となるなど、今後の研究の発展に大きく資する可能性を秘めている。ただし、ダウンロードの際にはクリエイティブ・コモンズ・ライセンス[1)]に則って、著作権の明示や利用目的の制限が課されており、それらを承諾した上で利用する必要がある。また、ユーザーがアップロード時にダウンロードの許可・非許可を選択することも可能となっている。

Sketchfab はあらゆる種類の三次元計測データを共有していることから、その内容も非常に多岐に渡っているが、文化財においても多数の三次元計測データが公開されており、特に海外では大英博物館やスミソニアン博物館など、多くの機関がデータを公開している。国内での利用は未だ低調ながらも、熊本県教育庁や東大阪市教育委員会、大阪市歴史博物館、大手前大学、國學院大學などがデータ公開を行っている。

今回、本研究で取得した三次元計測データを Sketchfab にて公開するにあたって、研究代表者個人としてアカウントを取得するのではなく、奈良文化財研究所の公式アカウントを取得し、それを用いてデータ公開を行った（https://sketchfab.com/nabunken、図４）。

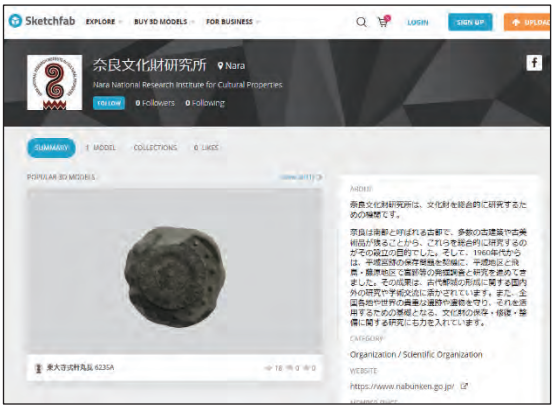


図４　Sketchfab（奈良文化財研究所公式アカウント）

図５　Sketchfab での三次元モデル（6235A）

公開したデータの内容は、奈文研ホームページ上で公開した三次元モデルと同一のデータだが、こちらでは Surface ではなく Texture として色情報を追加している。ただし、データ容量を 10MB 前後に抑えていることもあり、解像度は低いと言わざるを得ない（図５）。そのため、例えダウンロードできたとしても、考古学的研究への応用が可能かどうかについては、未知数な部分がある。しかしながら、データの可搬性という利点と、データの二次利用について、研究目的以外の利用がどの程度行われるのかが現段階で不明な点を考慮に入れ、まずは低容量のデータ公開を行うこととして、今後の利活用の状況を見守ることとしたい。それを踏まえた上で、大容量データの高解像度三次元モデルの公開等については、これからも検討を進めていく所存である。

なお、いずれのモデルもダウンロード可能とし、クリエイティブ・コモンズ・ライセンスについては CC-BY（Creative Commons Attribution、著作権者の表示）を標記している。令和４年３月末段階でのデータ公開数は 10 点程度であるが、これについても、随時データ数を増やしていく予定である。

（林　正憲）

註

１）クリエイティブ・コモンズ（Creative Commons、略称：CC）とは、著作物の適正な再利用の促進を目的として、著作者がみずからの著作物の再利用を許可するという意思表示を手軽に行えるようにするため、様々なレベルのライセンスを策定し普及を図る国際的プロジェクト及びその運営主体である国際的非営利団体の名称である。クリエイティブ・コモンズが策定した一連のライセンスはクリエイティブ・コモンズ・ライセンスと呼ばれる。

第５章　総括と展望

本書の第１章第１節で掲げた本研究の目的は、①先学における「同笵」認定の検証と改善、②「同笵」認定の利便性・客観性の向上、③瓦の記録法としての SfM-MVS による三次元計測の普及と研究法の開発の３点であった。この目的を達成するために、第２章で掲げたような三次元計測の手法の確立に努め、それらを基盤としながら第３章で論じたような考古学的研究への応用を図った。それらの論考において、三次元計測データを比較検討することで従来の同笵認定を再検証し、その結果、新たに異笵のものが存在することを明らかにした。また、これまで異笵とされてきた軒瓦の間にデザイン上の共通点を見出すなど、新たな知見を得ることができた。そして第４章で述べたように、本研究で得られた三次元計測データを奈文研ホームページ及び Sketchfab などの場で公開することによって、今後の研究に素材を提供することができた。したがって冒頭の３点の研究目的については、程度の差こそあれど、概ね目標の半ばまでは達成することができたのではないか、と考える。しかしそれは、未だ検討しきれていない課題が半分も残っているということでもある。以下では先述の研究目的ごとに残された課題を整理し、今後の展望を明らかにすることで、本書の総括としたい。

まず①「同笵」認定の検証と改善であるが、本研究では平城京・藤原京出土軒瓦の全型式の半数以上について、三次元計測データを取得することができた。そのため、研究の基礎データとなる資料は多く獲得できたといえるが、同一瓦笵からなる個体群に関する三次元計測データの取得については、まだ充分には成し遂げていない。第３章で取り上げた 6234A や 6235A・J・M、6647C については集中的にデータを取得したため、同笵・異笵に関する分析が可能であったが、他の型式ではそのような作業が不十分であり、考古学的な研究にまで結実させることができなかった。したがって、今後のデータの蓄積に応じて、個々の瓦笵の笵傷進行や木目痕などの微細な痕跡の抽出を図ることによって、新たな型式認定や瓦笵の製作と流通などの研究が進展していくものと考えられる。

また、本研究では軒瓦の瓦当部に焦点を当てて計測を行ってきたため、軒瓦全体の形状や、鬼瓦や鴟尾などの大型瓦製品に関しては、まだ三次元フルモデルの構築数が少ない。これらの三次元フルモデルについても、瓦笵の検討と同じような三次元計測データ間の比較が可能だが、本研究において検討するまでには至らなかった。これも今後の課題と言えよう。

次に②同笵認定の利便性・客観性の向上であるが、その鍵を握る三次元計測データベースの公開については、まだ端緒についたばかりである。数多い平城京・藤原京出土軒瓦のうち、今回公開にいたったのは東大寺式軒瓦である 6235・6732 型式のみであり、未公開のものが大半である。また、先に触れた軒瓦全形及び大型瓦製品の三次元フルモデルについても同様である。ただし、今回奈文研ホームページ上にデータベースを構築することは達成できたので、今後、公開数を増やしていきたい。

大きな課題として残されているのは Sketchfab での公開である。Sketchfab における公開の最大の利点は、三次元モデルをダウンロードすることによって研究者間におけるデータ共有を可能にす

る点であるが、本研究の段階では低解像度の三次元モデルの公開に留まらざるを得なかった。これは、奈文研全体としてSketchfabをどのように利用するか、という問題にも関わっているため、今後所内でも検討を行い、軒瓦に限らず、奈文研の各研究者が作成した三次元モデルを自由に公開できるよう、議論を進めていきたい。

最後の③三次元計測の研究開発であるが、第３章に象徴されるように、SfM－MVSを用いた考古学的研究の方向性については、ある程度の道筋を導き出せたものと考えている。すなわち三次元計測データを蓄積した上で、データ間の比較検討を行うことが、今後の研究においては必須になってくるであろう。

そこで重要な鍵を握っているのがAIによる画像診断である。今回、第３章で行った三次元データの重ね合わせについては、ある程度をソフトウェアに任せたものの、根本的な部分では研究者が判断して行う必要があった。そのため、比較検討のデータ数が多くなれば、それだけ研究者個人の作業量が増え、結果として検討の遅れにつながっていく。しかしAIを導入し、大量のデータを深層学習させることによって、瓦笵の微妙な差異までをAIが判断できるようになれば、軒瓦研究は飛躍的に進むことになる。しかしながら、本研究ではその導入までにはいたらなかった。これも、残された大きな課題として、今後取り組んでいきたい。

本研究にあたっては、研究分担者及び研究協力者の諸氏の協力なくして遂行することはできなかった。特に、本書でもかなりの部分を執筆していただいた中村亜希子氏と山口欧志氏には、研究の全期間にわたって計画立案から計測機器の選定、それらを用いた研究指導について、多大なる援助を得た。そして何より、実際の計測作業から図版の作成、データベースの公開まで様々な実務を担当していただいた北野智子氏（奈良文化財研究所有期雇用職員）には、文字通り最後まで御尽力いただいた。末筆ながら、研究代表者として皆様に感謝申し上げます。　（林　正憲）

東大寺式軒瓦・計測図一覧

6235A …… 92・93
6235B …… 94・95
6235C …… 96・97
6235D …… 98・99
6235E …… 100・101
6235F …… 102・103
6235G …… 104・105
6235I …… 106・107
6235J …… 108・109
6235K …… 110・111
6235Ma …… 112・113
6235Mb …… 114・115
6235Q …… 116・117

6732A …… 118
6732C …… 119
6732D …… 120
6732E …… 121
6732Fa …… 122
6732Fb …… 123
6732G …… 124
6732H …… 125
6732K …… 126
6732L …… 127
6732M …… 128
6732N …… 129
6732O …… 130
6732P …… 131
6732Q …… 132
6732R …… 133
6732V …… 134
6732X …… 135
6732W …… 136
6732Za …… 137
6732Zb …… 138

・軒丸瓦は実物大、軒平瓦は70％に縮小して掲載した。
・いずれの型式もTextureとSurfaceの２種類を掲載している。
・軒丸瓦の上下は、丸瓦の取り付け位置を基準としている。
・6732R・V・Zaについては、異なる個体を相互に補完して表示している。

6235A　Texture

0　5　10cm

6235A　Surface

0　5　10cm

6235B　Texture

0　5　10cm

6235B　Surface

0　5　10cm

6235C　Texture

0　5　10cm

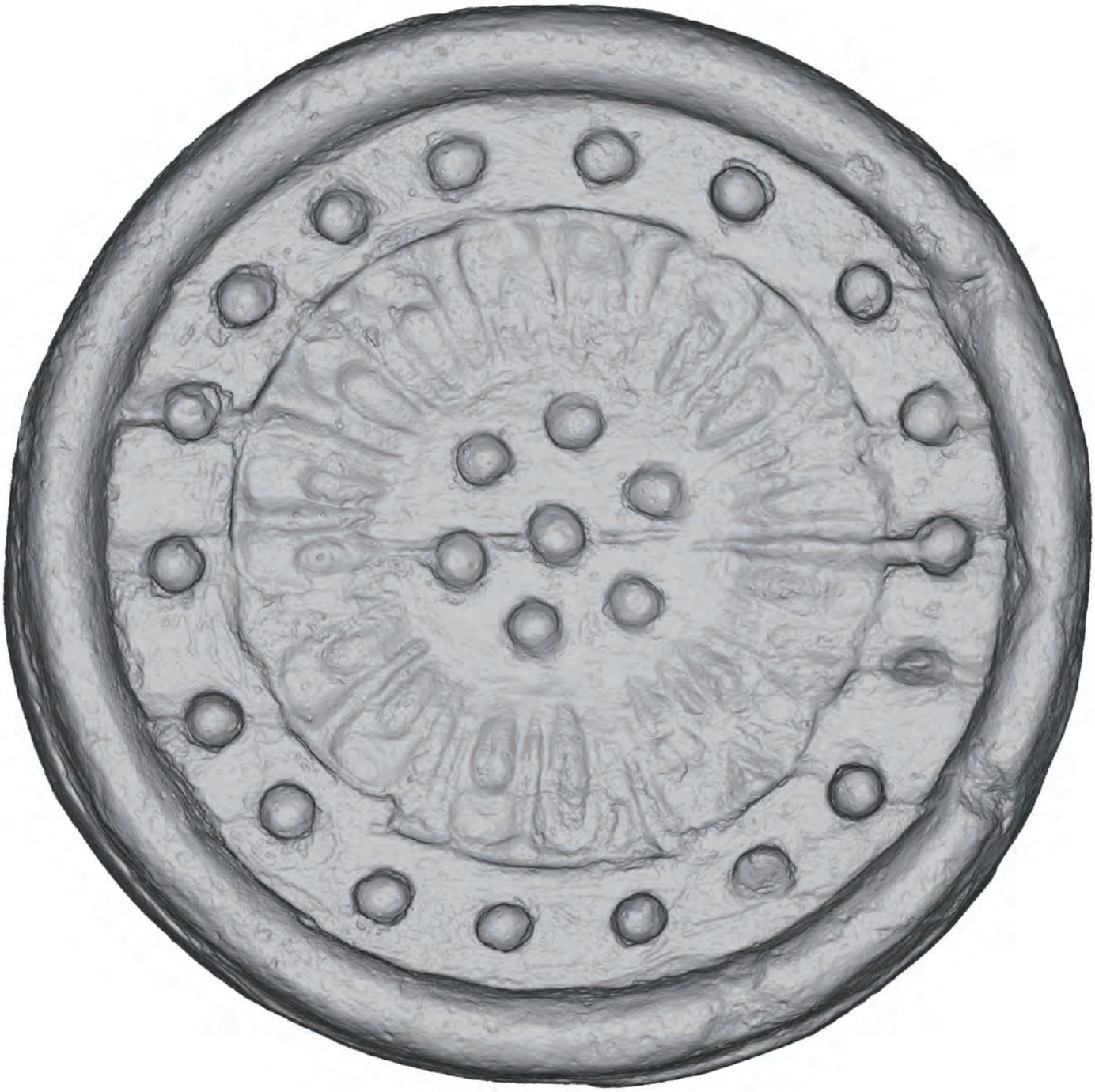
6235C　Surface

0　5　10cm

6235D　Texture

0　5　10cm

6235D　Surface



0　5　10cm

6235E　Texture

0　5　10cm

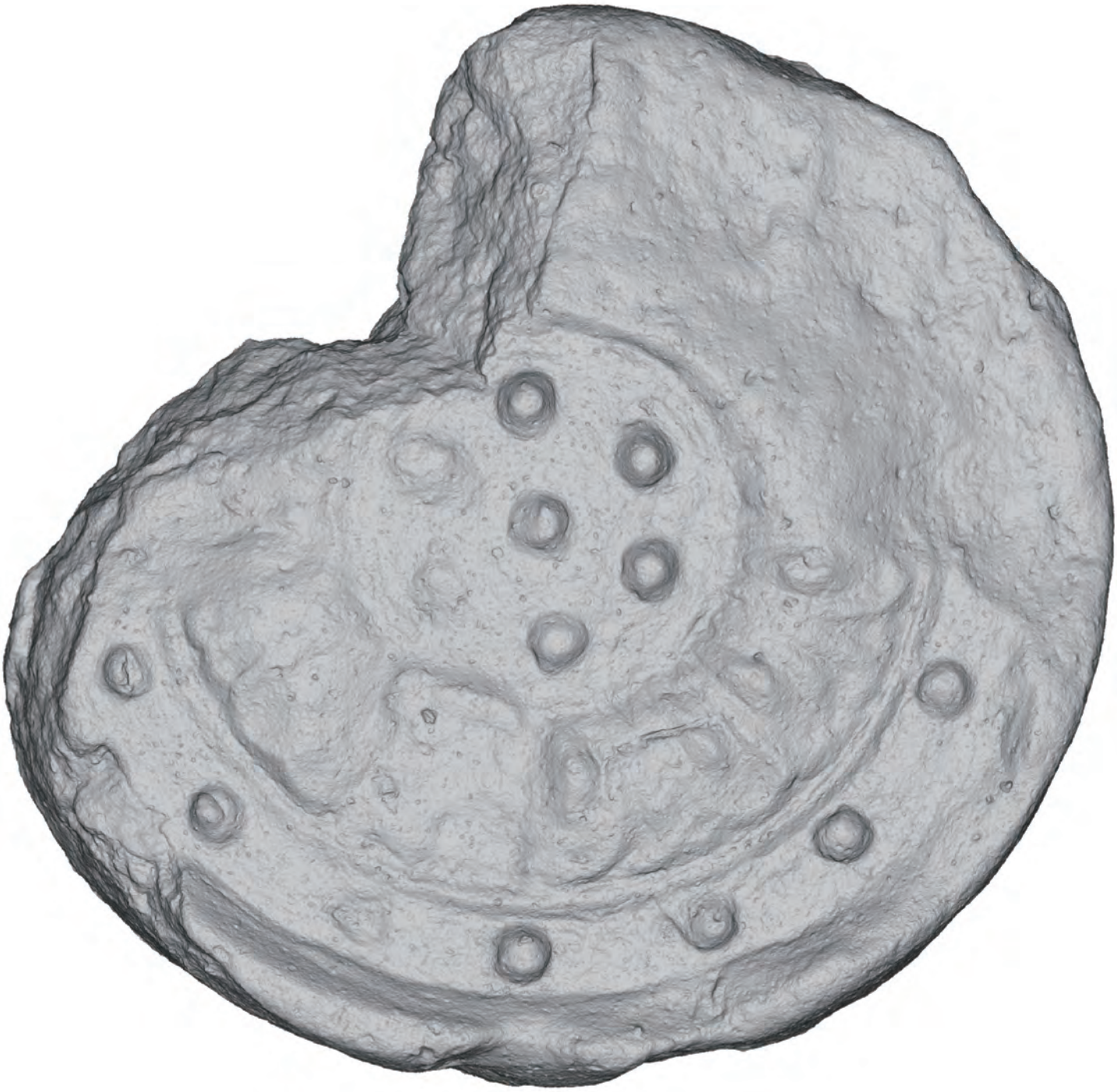
6235E　Surface

0　5　10cm

6235F　Texture

0　5　10cm

6235F　Surface



0　5　10cm

6235G　Texture

0　5　10cm

※取り付け位置不明

6235G　Surface

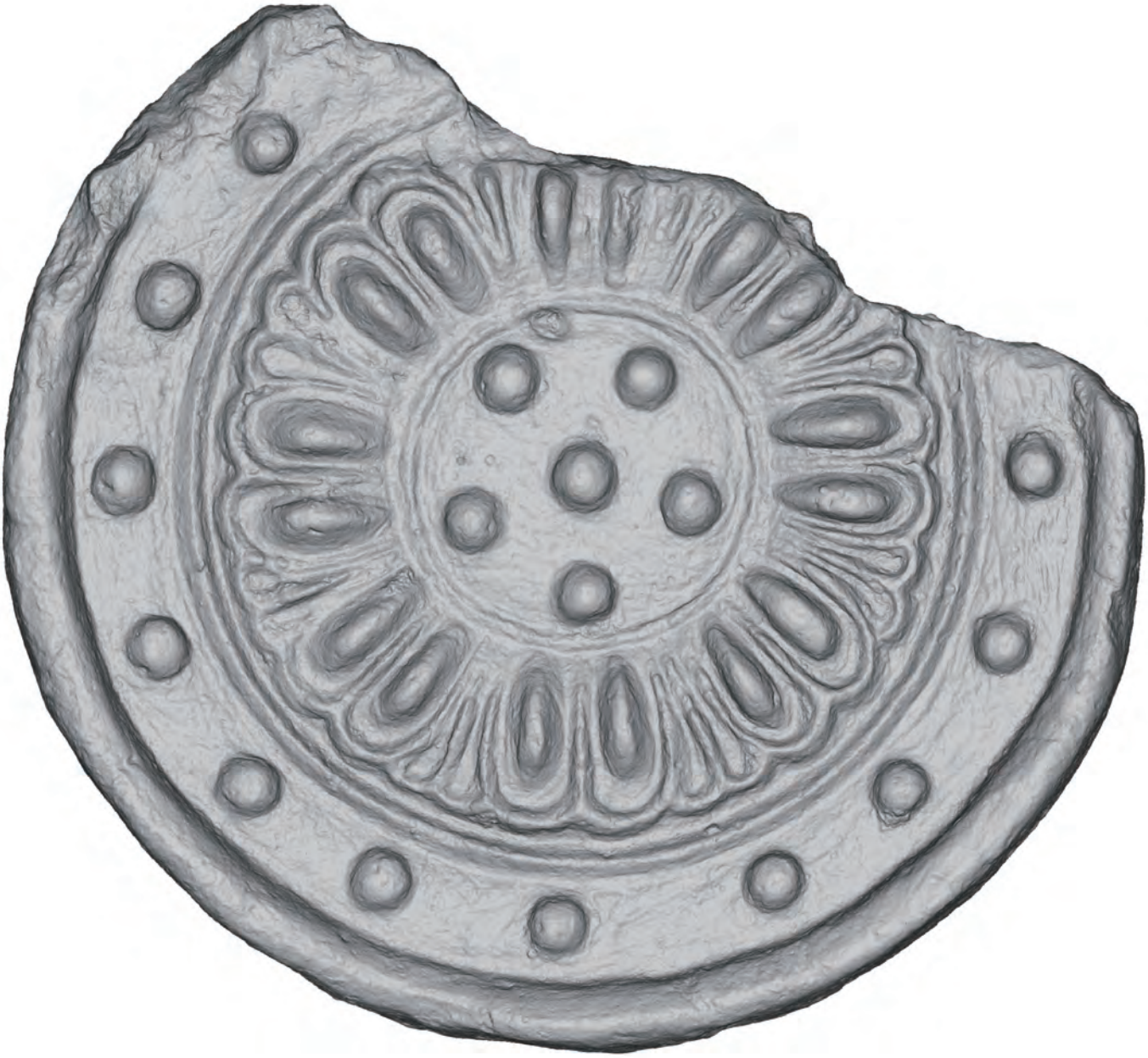
0　5　10cm

※取り付け位置不明

6235l　Texture

0　5　10cm

6235I　Surface



0　5　10cm

6235J　Texture

0　5　10cm

6235J　Surface

0　5　10cm

6235K　Texture

0　5　10cm

※取り付け位置不明

6235K　Surface

0　5　10cm

※取り付け位置不明

6235Ma　Texture

0　5　10cm

6235Ma　Surface

0　5　10cm

6235Mb　Texture

0　5　10cm

6235Mb　Surface

0　5　10cm

6235Q　Texture

0　5　10cm

6235Q　Surface

0　5　10cm

6732A

Texture

Surface

0 5 10cm

6732C

6732D

Texture

Surface

0 5 10cm

6732E

Texture

Surface

6732Fa

Texture

Surface

0 5 10cm

Texture

Surface

0 5 10cm

6732Fb

6732G

Texture

Surface

0 5 10cm

6732H

Texture

Surface

0 5 10cm

6732K

Texture

Surface

0 5 10cm

Texture

Surface

0 5 10cm

6732L

6732M

Texture

Surface

0 5 10cm

6732N

67320

Texture

Surface

0 5 10cm

Texture

Surface

0 5 10cm

6732P

6732Q

Texture

Surface

0 5 10cm

6732R

6732V

Texture

Surface

0 5 10cm

Texture

Surface

0 5 10cm

6732X

6732W

Texture

Surface

0 5 10cm

6732Za

6732Zb

Texture

Surface

0 5 10cm

2022 年３月 30 日発行

３次元データによる瓦の同笵認識技術の基礎的研究

平成 31 年度～令和３年度　科学研究費
（学術研究助成基金助成金（基盤研究Ｂ））
研究成果報告書（課題番号：19H01355）

編集　　林　正憲（独立行政法人国立文化財機構　奈良文化財研究所）
印刷　　株式会社 天理時報社