

# 古代瓦の三次元データを用いたシェーディング処理の検討

仲林篤史（京都府立大学共同研究員）

A Look at 3D Model Shading Using Data of an Ancient Roof Tile

Nakabayashi Atsushi (Collaborative Researcher, Kyoto Prefectural University)

- ・フォトグラメトリ／Photogrammetry・3Dモデル／3D models・Blender／Blender
- ・シェーダー／Shaders・法線ベクトル／Normal vectors

## 1. はじめに

我々は、三次元データを二次元で見る。3Dスキャンデータを確認する端末のディスプレイ、3DCGを用いた映画を観賞するスクリーンやテレビ、緻密にレンダリングされたイメージパースやコンセプト画像。改めて言うまでもなく、多くの三次元データは二次元平面に投影されることを前提に作られている。

三次元データを「三次元」で観察し、形状を理解するには、現実空間に投影する機器を用いるか、もしくはヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着し、バーチャルリアリティの中で閲覧するしかない。これらの機器はまだ高価で、一般に普及しているとは言えない。

考古学や埋蔵文化財保護分野でも、三次元測量・計測の導入が進み、三次元データを扱う機会も増えてきた。複数の遺構面を「記録保存」した三次元

データや出土遺物の三次元データに図やテキストを加え、HMDやコントローラーを用いて観察することも実験的に行われている（図1）。これらのデータが発掘調査報告書に代わるのはまだまだ先の話のようだ、令和の時代の文化財担当者は、紙の発掘調査報告書作成が求められている。

デバイスが何であれ、三次元データならば自由視点からの回転や拡大縮小、距離計測、任意断面の取得が可能だが、紙媒体へ印刷されるとこのような機能は失われる。地形の三次元データでは、等高線の描画や標高による色分けなどの処理が行われるよう、三次元データを用いた考古資料の報告でも、何らかの画像処理が必要といえる。

前置きが長くなったが、本稿では、紙媒体での三次元データの使用を前提とした画像処理手法を検討し、考古資料、特に古代瓦を対象にした凹凸の可視化成果を報告する。



VRで合成した現況と遺構（国史跡河内寺廃寺跡金堂跡）

図1 VRでの遺構や遺物の表示（提供 株式会社相互技研）

## 2. 報告対象資料と可視化手法の概要

### (1) 報告資料の概要

本稿の報告は、国指定史跡「河内寺廃寺跡」（大阪府東大阪市河内町）の史跡整備に伴う発掘調査報告書（東大阪市 2022。以下「報告書」という）で、出土瓦の報告に用いたシェーディング（陰影表示）処理についてである。

河内寺廃寺跡は生駒山西麓の扇状地上に位置する

古代寺院跡で、四天王寺式伽藍配置をとる伽藍の約半分が国の史跡に指定されている<sup>1)</sup>。出土瓦のうち細弁十三葉蓮華文軒丸瓦（KWM2型式。図2）と波状重弧文軒平瓦（KWH2型式。桶巻作り。図3）はセット関係にある創建期の瓦で、それぞれ7世紀第4四半期に位置づけられる（新尺2019）。報告書では、河内寺廃寺跡整備委員会委員の指導や助言のもと、軒瓦の報告、筆者が担当したKWM2の総括的な報告およびKWH2と「同布筒瓦」の平瓦（II-1-2類）。



図2 河内寺廃寺跡出土軒丸瓦（KWM2）のオルソ画像



図3 河内寺廃寺跡出土軒平瓦（KWH2）のオルソ画像

図4) の報告に三次元データを用いた（仲林2022）。

### (2) 可視化手法の概要

考古資料の三次元データからの画像作成には、フリーソフトのCloudCompareがよく用いられる。CloudCompareは、三次元モデルの位置合わせや断面取得、オルソ画像の書き出しなどに対応している。同ソフトを用いたシェーディング処理の事例では、村瀬（2019）や中村（2022）などがある。いずれもフォトグラメトリで取得した三次元データから、報告書等に掲載する画像の作成に使用されている。

本稿で報告する作業では、フォトグラメトリソフトにRealityCapture1.2を、三次元データの画像処理に3DCGソフトウェアBlender3.0（一部に2.93）を用いた。

BlenderはBlender Foundationが提供するオープンソースのフリーソフトで、3DCGコンテンツの制作などに用いられる。Blenderに搭載されたシェー

ダー（三次元データの陰影表示を行うプログラム）を用いたオルソ画像の作成と、指定したスケールでのレンダリング（画像への書き出し）を行った。



図4 河内寺廃寺跡出土平瓦（II-1-2類）のオルソ画像

図5はKWM2の瓦当陰影図、図6はKWH2と平瓦の凹面の布の重ね代を綴じた痕跡が酷似することを示すための図である。前者は三次元形状に基づく色付



図5 軒丸瓦（KWM2）の瓦当陰影図

けを行い、後者はこれに「キャビティ」と呼ばれる凹凸の強調処理を加えた。画像処理の詳細は後述する。

なお、本稿は三次元データの形状（ジオメトリ）に基づくシェーディング処理についてであって、二次元の画像データから陰影表示を行う手法とは異なる点にご注意いただきたい。

### (3) Blenderの操作

本稿で扱う主なBlenderの操作は、レンダリングエンジンの選択や関連する設定と、Shader Editorの設定である。本稿の内容を再現するために必要なものを除き、Blenderの基本的な操作説明は省略する。

#### ① レンダリングの設定

Blenderには3種類のレンダリングエンジン

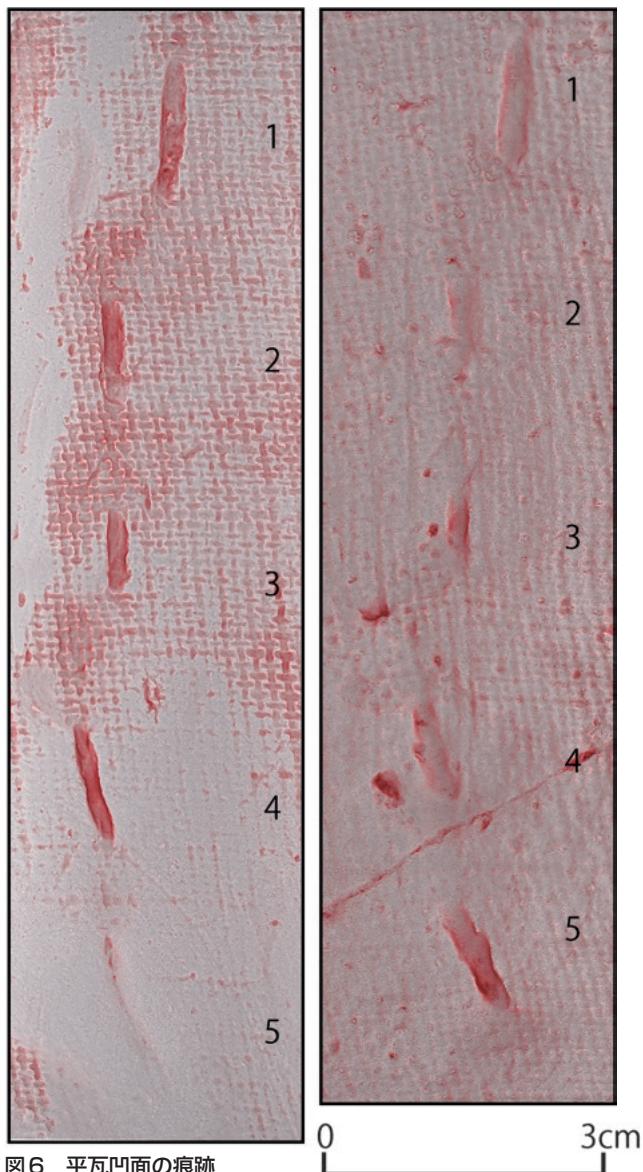


図6 平瓦凹面の痕跡

(Cycles / Eevee / Workbench) が搭載されており、それぞれ異なる計算方法で三次元データから静止画や動画を生成する。

レンダリングエンジンの選択は、レンダープロパティパネルから選択する（図7-1）。レンダリングに使用するカメラオブジェクトを+Y軸方向（奥行方向）<sup>2)</sup>に向か、プロパティタブから「平行投影」を選択し、「平行投影のスケール」をオブジェクトの大きさに合わせて調整する（図7-2）。この値が1.0のとき、カメラは幅1.0mの範囲をレンダリングする。この時、解像度を2,835px × 2,835pxにしておくと（図7-3）、書き出された画像をイラストレーターで読み込んだときの寸法も約1.0m四方になる<sup>3)</sup>。解像度が足りない場合、解像度を変えるのではなく、%で調整しておけばよい。

背景を透過してレンダリングする場合、レンダープロパティタブの「フィルム」→「透過」にチェックをしておき（図7-4）、レンダリングした画像をPNG形式で保存すればよい。シーン内のライトオブジェクトを削除し、「ワールドプロパティ」タブからカラーをRGB(1,1,1)にしておく（図7-5）。

#### ② Shader Editorの設定

シェーダー設定とは、三次元データのマテリアル（表面の色や質感）を定義するもので、Shader Editorウィンドウから行う。マテリアルはメッシュ（面）単

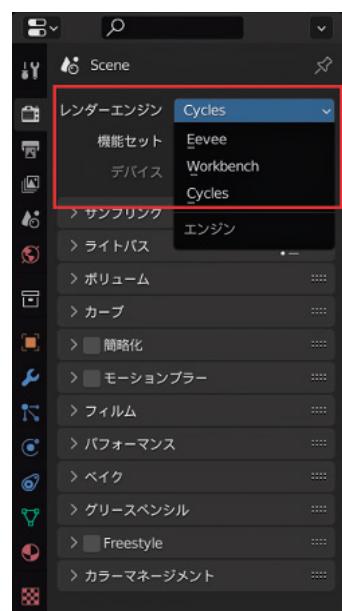


図7-1 レンダリングエンジンの設定

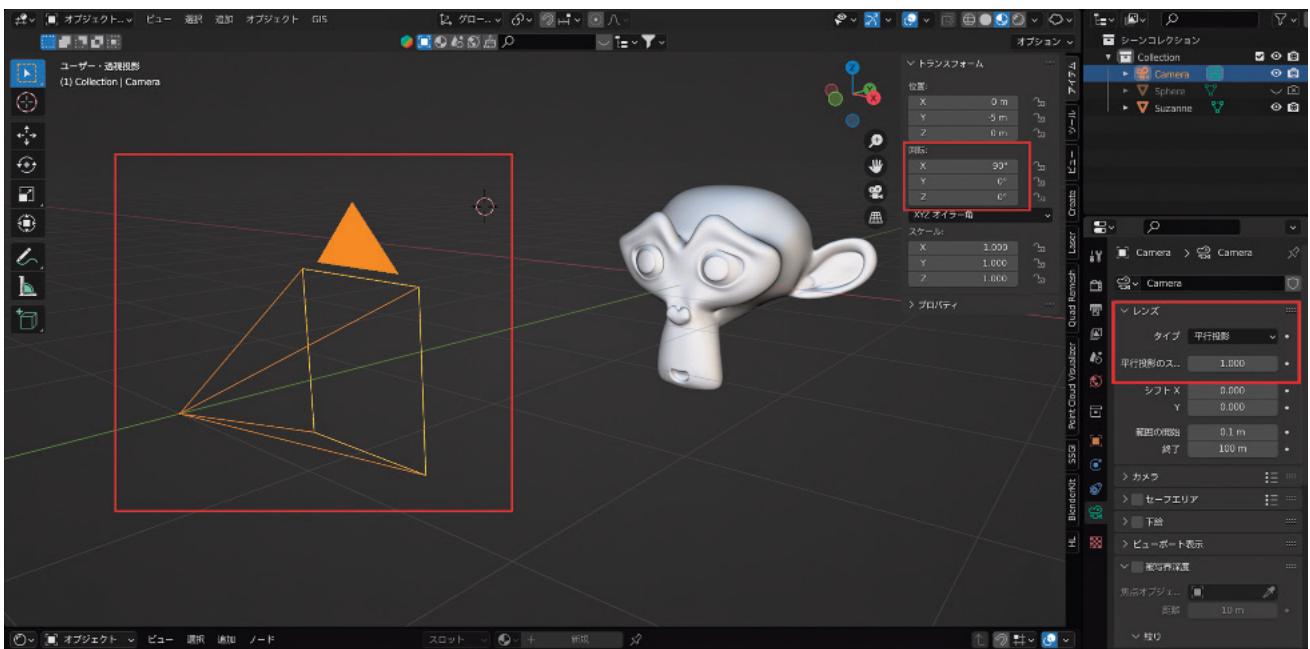


図7-2 カメラの設定

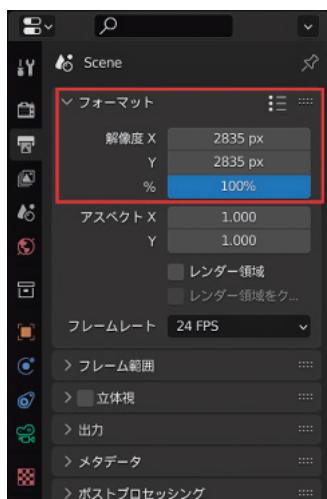


図7-3 解像度の設定

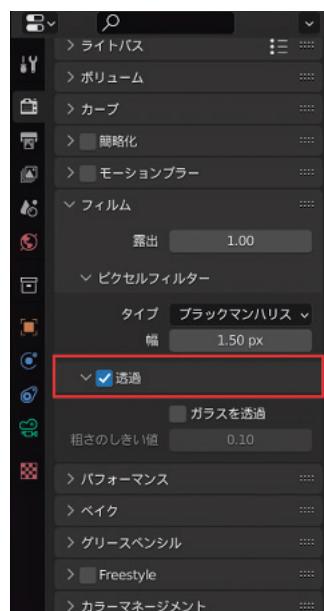


図7-4 背景の透過設定



図7-5 背景色設定

位で割り当てられるため、1つの三次元データにつき、複数のシェーダー設定も可能となる。Shader Editorでは、「ノード」と呼ばれるプログラム単位のブロックを処理する順に並べ、それぞれの入出力ソケット（ノード同士を接続する点）を接続することで、各シェーダーに基づいたシェーディング処理を行う（図8）。

ノードは、最終的に「シェーダー」ノードから「マテリアル出力」ノードに接続される。「シェーダー」

ノードは、オブジェクト表面の材質の種類に関する設定である。本稿では「プリンシプル BSDF」を使用しており、全て「メタルネス」0、「スペキュラ」0、「粗さ」1に設定している。

「シェーダー」ノードをはじめとするノード各入力ソケットには、カラー (RGB を (0,0,0) ~ (1,1,1) の範囲で表した数値) やベクトル (XYZ を (-1,-1,-1) ~ (1,1,1) の範囲で表した数値)、または単一の数値を出力するノードが接続される。

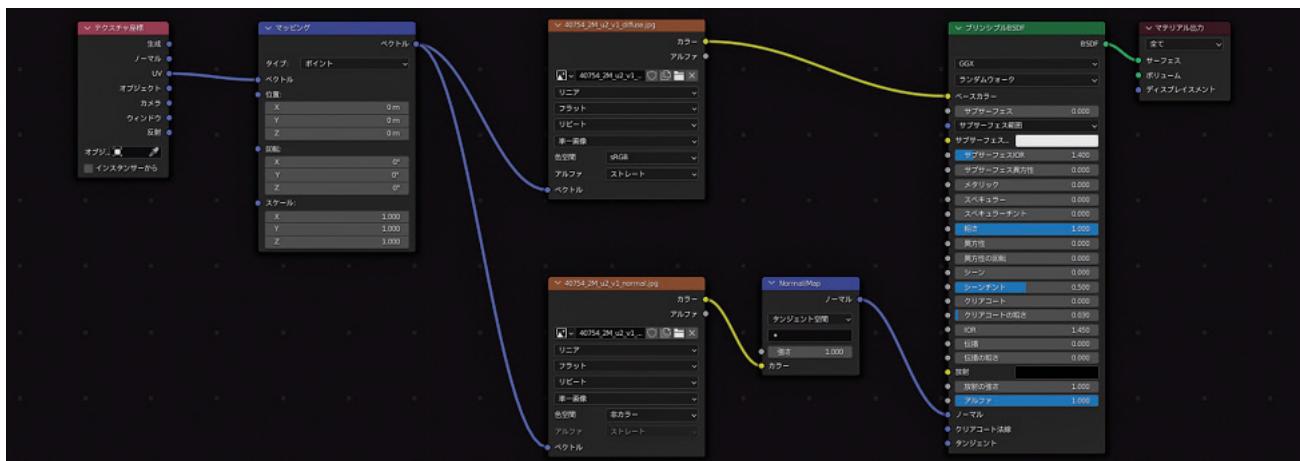


図8 Shader Editorの設定例



図9-1 AOノードの設定

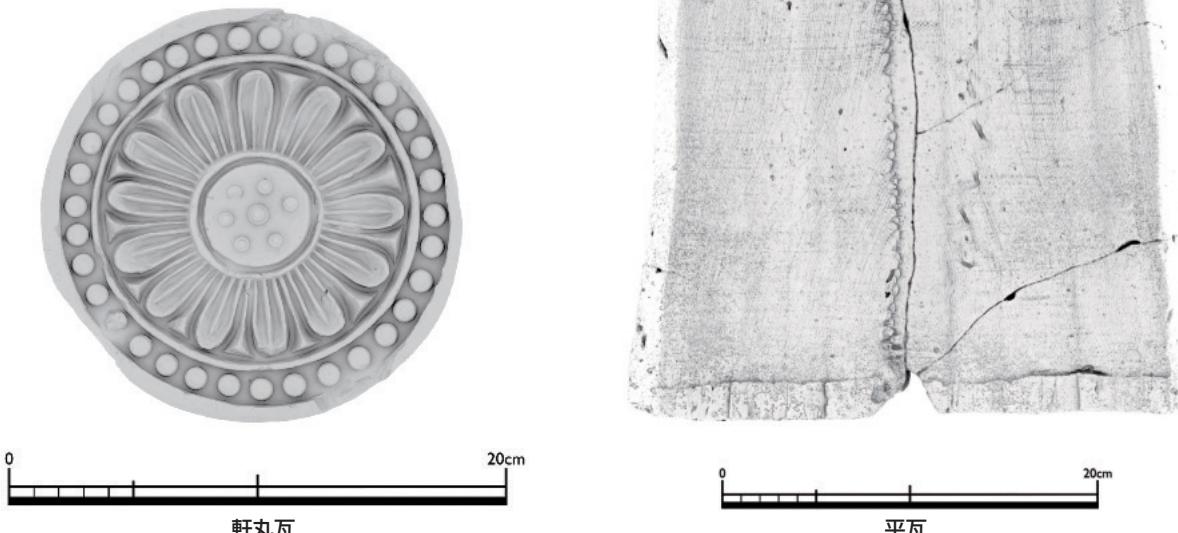


図9-2 軒丸瓦と平瓦のAOシェーディング

### 3. 可視化手法の検討

Blenderを用いた画像処理を手法ごとに検討する。以下本章では、図2を「軒丸瓦」、図4（凹面側のみ）を「平瓦」と呼び、シェーディング処理の対象とする。

#### (1) アンビエントオクルージョン

アンビエントオクルージョン（以下「AO」という）とは、三次元空間内で光が遮蔽される範囲を表現する技術である。AOをオブジェクト上に生成するには、図9-1のようなノード配置が基本となる。「カラーランプ」ノードや「ガンマ」ノードは、色の調整を行うためのものである。

このノード設定を軒丸瓦と平瓦に適用すると、図9-2のような効果が得られる。レンダリングにはCyclesを使用した。

軒丸瓦では、AOが外区の珠文や界線間など凹凸が密な部分にも発生するため、意図しない表現になる可能性がある。

平瓦では、凹面の側縁から中心にかけて湾曲するが、この湾曲に対してもAOが発生するため、これも意図しない表現になる可能性がある。

#### (2) 法線ベクトル

オブジェクトの法線ベクトル（面に垂直なベクトル）を基に凹凸を可視化する手法を検討する。

図10-1は、オブジェクトの法線ベクトルの値(X,Y,Z)を色(R,G,B)に変換して表示したものであ



図10-1 法線ベクトルの値をRGBに変換し表示した3Dモデル

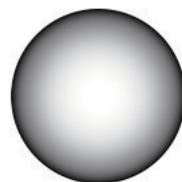


図10-3 法線のシェーディング

る。ここから「RGB分離」ノードでG(Y)の数値を抽出するノード設定を行う（図10-2）。カメラ位置は-Yから+Yを向くので図10-1とは逆になる。このため得られた数値に「数式」ノードで-1を乗算する。簡易的に理解するため球体にこのシェーディングを適用した（図10-3）。オブジェクトの形状が視点方向を向くにつれて明るく、それ以外の方向を向く部分は暗くなる。

以下では、この手法を基にしたシェーディングを検討する。使用したレンダリングエンジンはCyclesである。

#### ① ベベル

ベベルとはオブジェクトの角を丸くする処理で、Blenderでは、オブジェクトを直接変形させる方法とシェーディングで表現する方法がある。後者は

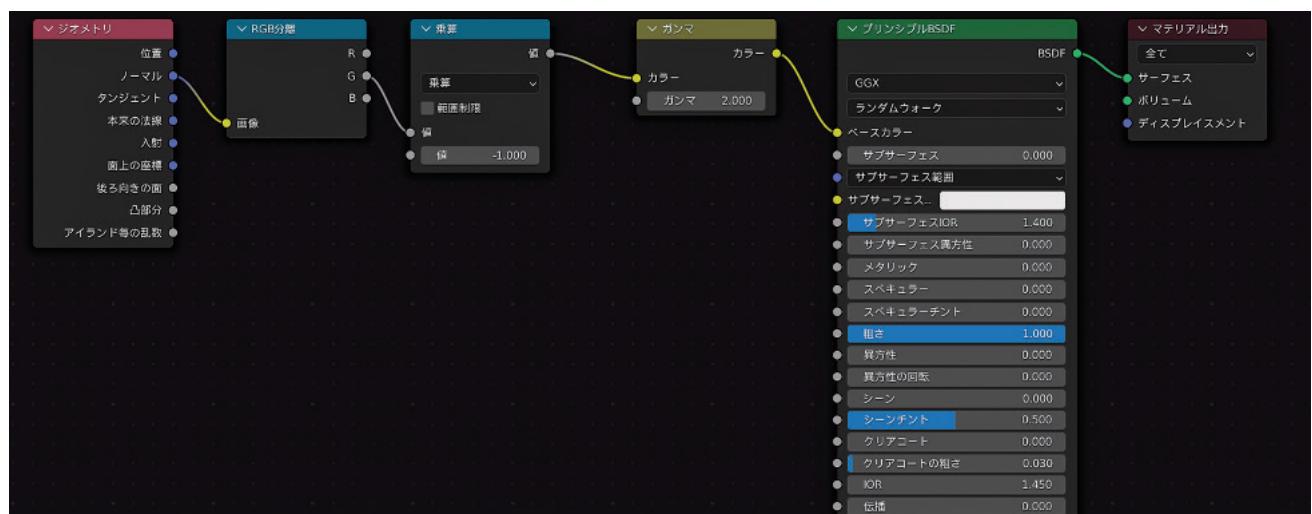


図10-2 法線のシェーディングのノード

「ベベル」ノードを用いて行う。

「ベベル」ノードでも法線ベクトルの取得が可能である。ベベルが目的のノードのため、「半径」の値を調整すればオブジェクトの角が丸みを帯びる。図11はノードの設定とシェーディングの結果である。

## ② 反射

「反射」ノードは、オブジェクトの反射ベクトルからテクスチャマッピング（テクスチャ画像をオブジェクトに投影すること）を行うためのプログラムで、こ

れを用いて鏡面反射ベクトルが取得できる。図12はオブジェクトのもつ鏡面反射ベクトルをベースにしたノード設定とシェーディング結果である。

## ③ 内積

オブジェクトの法線ベクトルと、オブジェクトから視点（カメラ）へのベクトルの内積を用いることで、視点からの形状に基づいたシェーディングを行う。内積を計算するノード（「ベクトル演算」ノードで「内積」を選択）では、入力ソケットに接続さ

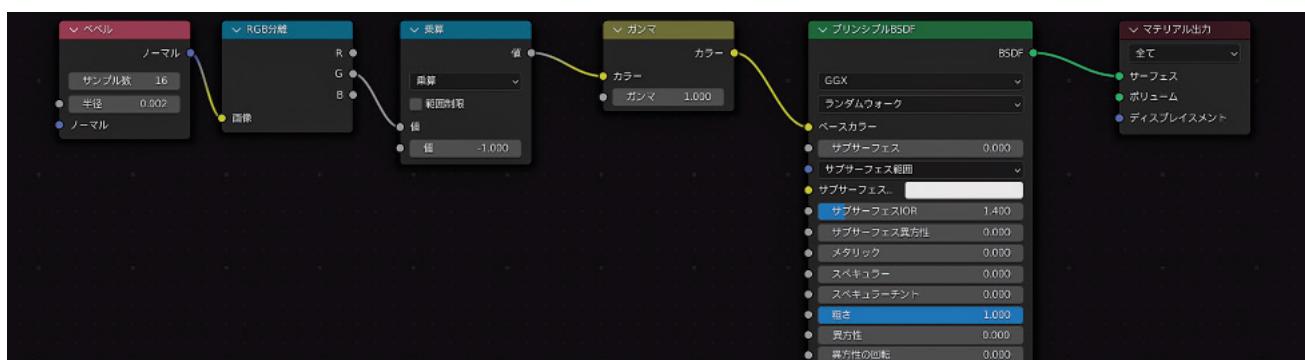


図11 ベベルのノード設定とレンダリング結果

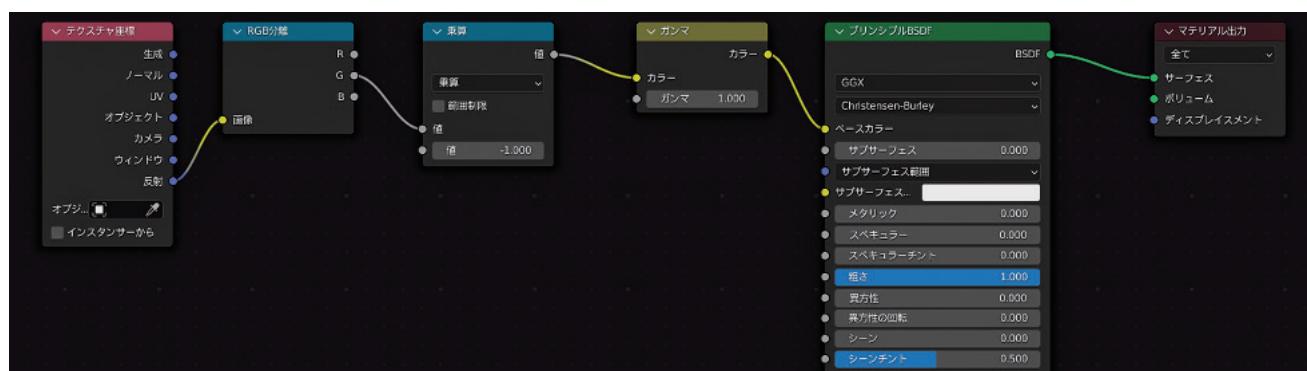
れた2つのベクトルがなす角度を0～1の单一の数値として出力する。90度の場合、出力される数値は0となり、0度の場合、出力される数値は1となる。よって、視点方向から見て急な傾斜をもつ部分は暗く、平面に近い形状（視点方向に対して垂直な面）は明るく表示される。また、シェーディング結果は固定されておらず、視点が動くことで見え方も変わることになる。このため、後述する「ベイク」処理は行えない。

図13は、オブジェクトのもつ内積ベクトルのノード

設定とシェーディング結果である。

### (3) キャビティ

Workbenchでは、プリセットで複数のライティングをシミュレートしたシェーダーや、「MatCap」と呼ばれるシェーダーが備えられている（図14-1）。また、Workbenchは「キャビティ」の設定で、テクスチャ画像に直感的に凹凸の強調を重ねることができる。図14-2はキャビティをオンにしたときの設定例で、図14-3は、キャビティのオンとオフを比



ノード設定

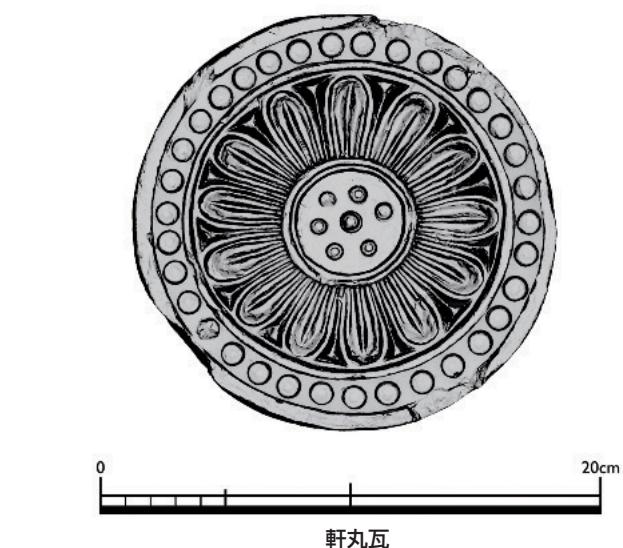
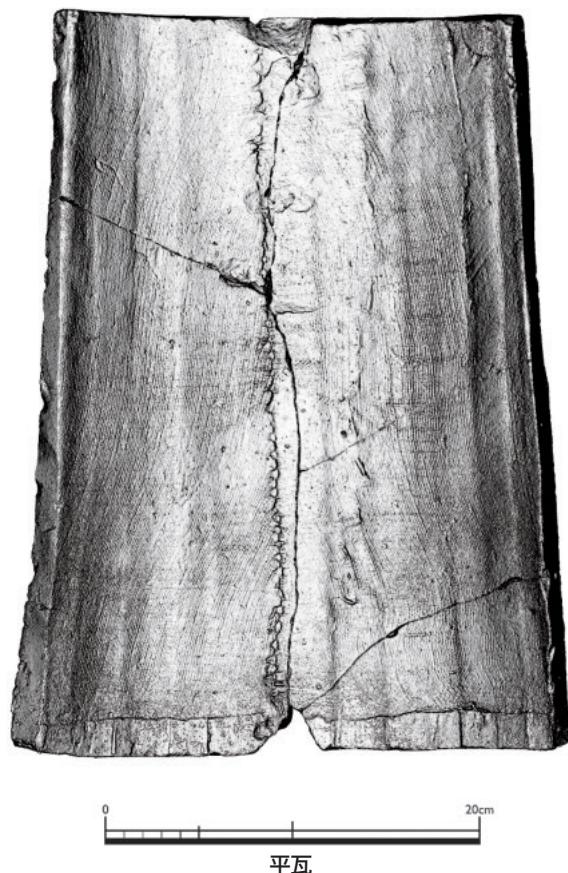


図12 鏡面反射のノード設定とレンダリング結果



較したオルソ画像である。テクスチャ付きオルソ画像に凹凸（設定項目の名称は「尾根」と「谷」）を重ねることで、色と形状の把握が容易になる。

#### (4) ミックス

以上見てきた(1)～(3)の複数のシェーディングをミックスする手法を検討する。

具体的には、法線ベクトルに基づいた色付けにAOをミックスし、さらにキャビティを重ねる。図15-1と図15-2はこの方法で作成した軒丸瓦と平

瓦の画像で、報告書で用いた図6と同じシェーディング処理である。

このシェーディングは2段階の処理が必要となる。第1段階でAOと法線をミックス<sup>4)</sup>したシェーディングを設定し、テクスチャ画像としてベイク（焼き付け）する。第2段階では、Workbenchに切り替え、ベイクしたテクスチャ画像にキャビティを重ねる。

第1段階では、「カラーランプ」ノードを用いて



ノード設定



軒丸瓦



平瓦

図13 内積を用いたシェーディングの設定とレンダリング結果

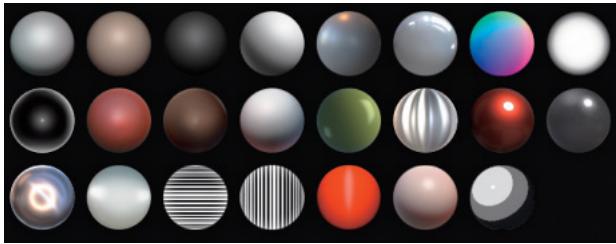


図 14-1 MatCap の種類

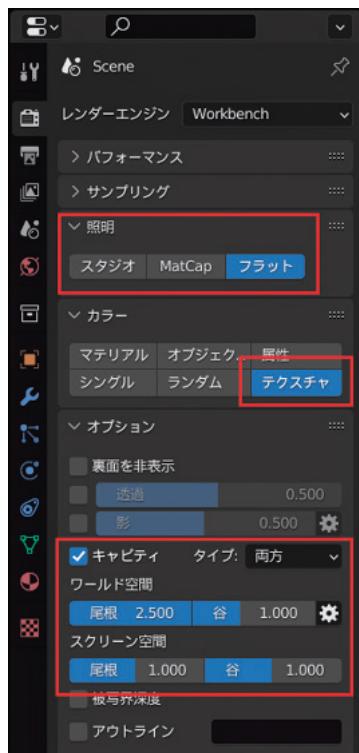


図 14-2 キャビティの設定



図 14-3 キャビティのオン（左）とオフ（右）

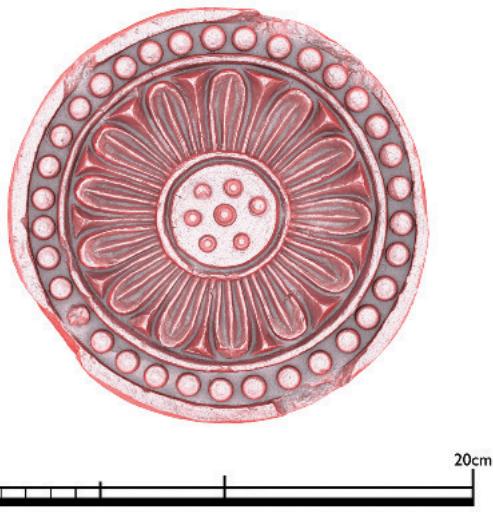


図 15-1 シェーダーをミックスした軒丸瓦



図 15-2 シェーダーをミックスした平瓦

AOをRGB (0,0,0) ~ (1,1,1) の範囲で、法線をRGB (1,0,0) ~ (1,1,1) の範囲で色づける。この結果、凹部分を黒、凸部分を赤でそれぞれ表現できる。第1段階のノード設定は、図15-3である。

第2段階でのベイクとは「焼き付ける」の意味で、ここではシェーディング結果をテクスチャ画像に書き出す作業をいう。ベイクもレンダリングの一種で、Cyclesのみが対応する。

手順は、以下のとおりである（図15-4）。

- ①Shader Editorに新規のテクスチャ画像のノードを追加し、アクティブにしておく。
- ②「レンダリングプロパティ」タブの「ベイク」設定で「ディフューズ」を選択し、「直接照明」と

「間接照明」のチェックを外す。

- ③「ベイク」をクリックする。

ベイク後、Workbenchに切り替え、MatCapとテクスチャ画像を選択し、キャビティを設定すれば完了となる。

なお、ベイクされる3DモデルはUV展開（ポリゴンが二次元平面へ展開されていること）が必要である。Metashapeなどのフォトグラメトリソフトでテクスチャ画像を作成した場合、基本的にはソフトが自動的にUV展開を行うため、問題はない。

さらに、3Dモデルが複数の画像テクスチャを持つ場合も注意が必要である。テクスチャ枚数は3Dモデルのマテリアル数でもあるため、枚数分のノード

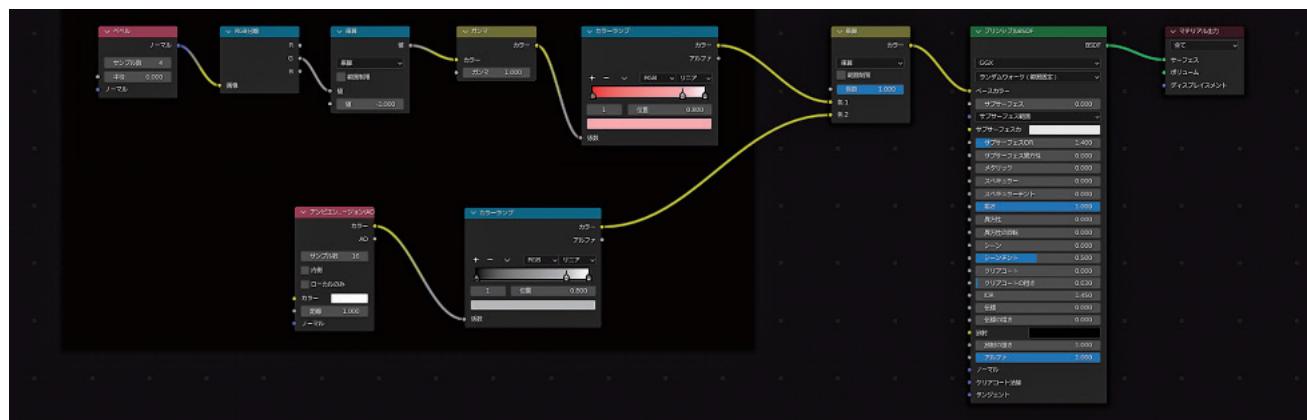


図15-3 シェーダーをミックスするノード設定

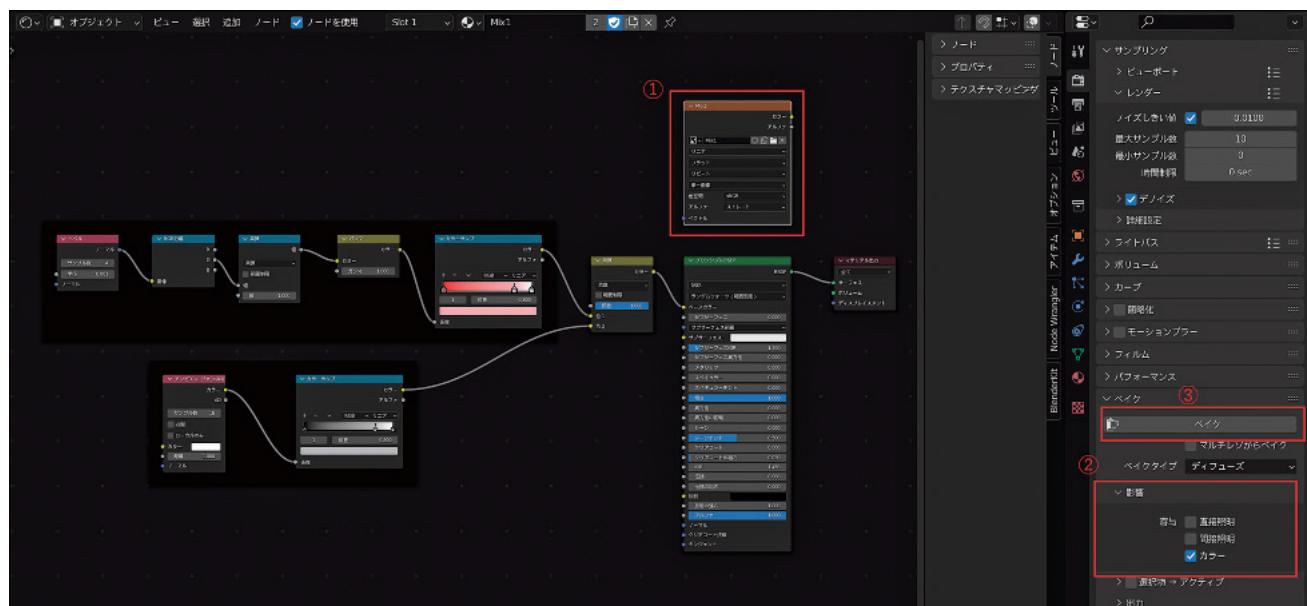


図15-4 ベイクの設定

ド設定とペイクが必要となる。この作業は煩雑なため、フォトグラメトリソフトで、テクスチャ枚数を1枚に変更し、別途3Dモデルを書き出した方が処理は容易である。

フォトグラメトリソフトが使えない場合、オリジナルの三次元データを複製し、マテリアル数を1つに減らしたうえで、改めてUV展開を行うことで対応できる。オリジナルモデルから別のモデルへのテクスチャ画像のペイク方法は、仲林（2021）にある。

### （5）ボリュームレンダリング

報告書では使用しなかったが、ボリュームレンダリングと呼ばれる技術もあるので紹介しておく。

ボリュームレンダリングとは、ソリッドモデル（メッシュが閉じたモデル）のボリューム（体積）をレンダリングする技術で、3DCG分野では雲や煙、気体の表現に用いられる。本稿のような用途でボリュームレンダリングを行うには、ボリュームの密度設定を高めればよい。

図16-1はボリュームレンダリングのためのノード設定で、「ボリュームの散乱」ノードの「密度」に値を入力し、出力ノードの「ボリューム」ソケットに接続するだけのシンプルなものである。ボリュームレンダリングにはCyclesのみが対応している。



図16-1 ボリュームレンダリングのノード設定



図16-2 密度別ボリュームレンダリング結果（軒丸瓦）

図16-2は、軒丸瓦に対し「密度」の値を「10」「50」「1,000」「2,500」ごとにレンダリングしたものである。

図16-3は平瓦の凹面をレンダリングしたものである。後述するように、レンダリング前に凹面の湾曲を平面に展開する処理を行った。

軒丸瓦の場合、密度を上げるにつれてノイズが減少するものの、蓮子の形状がやや認識しづらくなる。またAOと同じく、珠文が密になる部分も暗く表現される。

平瓦では、布の綴合せ痕と布目の揺れ、桶の側板圧痕が明瞭に表現されている。重ね代の綴合せ痕が布目の揺れに沿っている点も理解しやすい。

### （6）補足－湾曲した3Dモデルの展開方法－

湾曲した形状を平面に展開するには、別途3Dデータ編集用ソフトウェアが必要だが（仲林ほか2019）、このようなソフトウェアは高価なことと、1つのソフトウェアで完結する作業を検討するため、Blenderの機能を試した。Blenderでの作業は以下である。

- ①オブジェクトを選択し、プロパティウィンドウ「モディファイアー<sup>5)</sup>」タブの「モディファイナーを追加」から「シンプル変形」を2つ追加する。
- ②両方の変形の種類を「曲げ」に設定し、片方の座標軸をZ、もう片方にXを選択し、角度を入力する（図17-1）。

図17-2は変形前と変形後の形状である。凹面の周長の比較など、まだ検討の余地はある。また、丸瓦やその他湾曲した形状の三次元データに応用できるかは、今後の課題としたい。



図16-3 平瓦のレンダリング結果（密度5000）



図17-1 湾曲を展開するモディファイアーの設定例

#### 4. おわりに

三次元データを紙媒体に用いるためのシェーディング処理について見てきた。作業はBlenderを用いたが、同ソフト以外でも可能な処理である。三次元

データを編集するソフトは有料無料問わず他にもある。高性能のソフトウェアを用いることで、さらに理解しやすい画像処理が可能かもしれない。三次元データの形状をどのような属性に基づいて可視化するか、また、どのような意図をもって処理を行ったかを言及できる点が重要であると指摘しておきたい。

#### 【引用・参考文献】

- 東大阪市 2022『第1期史跡整備事業に伴う国指定史跡河内寺廃寺跡発掘調査報告書』
- 新尺雅弘 2019「久米寺式軒瓦の成立と展開－藤原京期における久米寺の性格－」『考古学研究』第66巻第2号
- 仲林篤史 2022「軒丸瓦 KWM2の範傷と瓦製作の様相」「軒平瓦 KWH2と平瓦II-1-2類の検討－同布筒瓦の発見－」『第1期史跡整備事業に伴う国指定史跡河内寺廃寺跡発掘調査報告書』東大阪市
- 村瀬 陸 2019『刀装具鋲型の三次元分析からみた近世鋳造技術の研究』2018年度科学研究費（奨励研究）研究成果報告書』
- 中村亜希子 2022「第2章 SfM-MVSによる計測方法に



図17-2 変形前（左）と変形後（右）の比較



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』『3 次元データによる瓦の同範認識技術の基礎的研究』独立行政法人国立文化財機構 奈良文化財研究所  
仲林篤史 2021「公開を目的とした3D モデルのデータ量削減方法」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用 3』奈良文化財研究所研究報告 27 独立行政法人国立文化財機構 奈良文化財研究所

仲林篤史・渡邊俊佑 2019「3DCG ソフトを用いた刻銘の視認性向上手法の検討－ラジオ塔と文字瓦の実践例－」『文化財の壺 第 7 号 特集: 文化財研究を進める技術を考える』文化財方法論研究会

### 【註】

- 1) 史跡指定範囲には、金堂、講堂及び東西回廊の一部の遺構が残る。
- 2) Blender の座標系は右方向が +X、上方向が +Z、奥方向が +Y、いわゆる右手座標系である。
- 3) 正確には 1000.125m となる。
- 4) 法線の表示に AO を「乗算」している。
- 5) メッシュの形状を変えずに、変形させる Blender の機能。