

写真測量法によるカッパドキア・ギョレメの岩窟聖堂の 3Dモデル作成とヴァーチャル修復の手法

Photogrammetric 3D Modeling of Rock-cut Churches in
Cappadocia, Turkey, and Methods of Virtual Restoration.

菅原裕文／樋口 諒
Hirofumi Sugawara, Ryo Higuchi

写真測量法によるカッパドキア・ギョレメの岩窟聖堂の 3Dモデル作成とヴァーチャル修復の手法

菅原裕文

金沢大学 歴史言語文化学系 准教授

h.suga0616@gmail.com

樋口 諒

東京工業大学／金沢大学 国際文化資源学研究センター客員研究員

higuchi.r.ab@m.titech.ac.jp

1. 導入

ギョレメ国立公園とカッパドキアの岩石遺跡群は、首都アンカラから南東に約280km、ネヴシェヒル県に位置する（地図）。奇岩の織りなす幻想的な風景とそこに残された人々の営為の痕跡ゆえに、1985年、UNESCO世界遺産（複合遺産）に登録された。登録の主たる理由として、ビザンティンにおけるポスト・イコノクラスム期の岩窟聖堂を多数擁することが挙げられる（登録基準1）。カッパドキアの岩窟、聖堂内部に残る壁画は長年にわたって放棄されていたために、現在はその多くがダメージを受けてしまっている。しかし、それでもなお現存する壁画は、全面にわたって内部を彩ったであろう往事を偲ばせるものであり、同時に他の地域ではほとんど現存しないポスト・イコノクラスム期（9～10世紀）の壁画について様々な情報を我々に与えてくれる。

カッパドキアの幻想的な風景は、浸食されやすい凝灰岩によって構成されている。言い換えるならば、聖堂が削り抜かれた岩山自体が年々浸食によって消失しているのである（Erguler, 2009）。名作との呼び声も高いトカル・キリセ（10世紀）やカランルク・キリセ（11世紀）を擁し、9世紀末から11世紀の岩窟聖堂が100以上も確認されているギョレメ屋外博物館とその周辺地域においても（Jerphanion, 1925-1942; Jolivet-Lévy, 1991; Jolivet-Lévy, 2015）、浸食による岩山の崩壊により内部が露出している聖堂が複数ある。また、カッパドキアの聖堂は長らく放置



地図 トルコ、カッパドキア、ギョレメの位置

されてきたために、自然的な要因のみならず人為的な損傷も多数みられ、壁画には落書も含めて大小多くの傷や欠損が残っている。ギョレメ屋外博のように鑑賞の妨げにならぬよう損傷が修復なされたいくつかの例外を除けば、カッパドキアの岩窟聖堂が置かれた状況は、ジェルファニオンがこの地の聖堂を初めて体系的に記録した20世紀初頭よりも悪化している。これらの要因に加えて、近年では来館者の増加に伴って保存環境は加速度的に悪化しており、2019年2月には屋外博の目玉であるカランルク・キリセも閉鎖されてしまった（落石の危険性を改善するための一時的な措置である）。

このように急速に聖堂を取り巻く保存環境は悪化している一方、膨大な数の聖堂を有するがゆえに、カッパドキアの聖堂に関するドキュメンテーションは断片的である。これらを見ると、ジェルファニオン以降美術史家によって壁画の研究が蓄積されてきたのに対し（Restle, 1969）、その建築史的特徴に関しては看過されがちであったが、近年のデジタル・ドキュメ

ンテーションの発達とともにようやく建築学的な側面にも焦点が当てられるようになってきた (Cariceci and Inglese, 2014; Colonnese *et al.*, 2016)。しかし、こうした建築学的な研究は概してレーザー・スキャナーやドローンによる空撮によって、もっぱら建物そのものの形状や地形に着目し、カッパドキア岩窟聖堂の重要な要素であるはずの壁画に対して関心を払っていない。しかしビザンティンの壁画とは、個々の図像自体が教義的な意味を持つのみならず、複数の図像の位置関係や配列によって新たに教義的連関が生成されることから (益田, 2014)、聖堂の3次元的な形態とその表面の図像とを複合的に記録する必要がある。

以上のような理由から2015年より筆者らは、3Dモデルとその表層の図像とを同時に構築可能であり、両者の位置関係が完全に整合する写真測量法によって聖堂内部のドキュメンテーションを行ってきた。本稿は、聖堂が集中しているがゆえに壁画の様式的な分析が可能であり、一部では工房が同定されているギョレメ渓谷の聖堂をケース・スタディーとして、岩窟聖堂の有する壁画に対するPC上でのヴァーチャルな修復・復元の可能性を提示するとともに、それらをギョレメ屋外博のコンテンツとして提案するものである。

なお、写真測量アプリケーションとしては Agisoft Photoscan を使用した。撮影に使用したカメラはニコン DF (CMOS sensor, 36 x 23.9 mm; 16.2 MP)、レンズは AF-S Nikkor 14-24mm f/2.8G ED の14mmである。超広角レンズを使用することにより、3Dモデル構築に必要な写真の枚数は大幅に減少し、作業を効率化できたことも付言しておきたい。

2. 3Dモデル作成とデジタル修復シミュレーション

2.1 ヴァーチャル・トーニング

PC上での仮想的な修復の一つの手法として、小さな傷や剥落を消すヴァーチャル・トーニングの例を紹介する。ギョレメ屋外博物館の敷地外にあるアギオス・エウスタティオス聖堂 (10世紀前半) について、Agisoft Photoscanによ



図1 アギオス・エウスタティオス聖堂の3Dモデル



図2 抽出された壁画のテクスチャ

って3Dモデルを作成した (図1)。有効枚数はおよそ120枚である。そこから画像の密度が高解像度となるように注意しつつ、テクスチャを4枚の8000 x 8000 pxlの画像として抽出した (図2)。壁画にみられる損傷箇所については大小様々なものがあるが、小さなものに関しては、図像の構図を踏まえれば、失われた部分が推測可能なものがある (図3)。これらについて、Photoshopのスポイト機能を使って損傷箇所を調色した (図4)。小さな損傷箇所が除かれただけでも図像は格段に鮮明になり、専門家以外であっても、その場面を理解し描かれた当初の状態を容易に彷彿とさせる程度にまで復元できた。

一方で調色はあくまでほかの部分を利用して色を補うだけである。したがって、筆運びによって生じる絵の具のスレや濃淡といった画家の筆触や描き癖を3Dモデルに反映させるのは困難と言わざるを得ない。必要とされるPCのス



図3 3Dモデルの現状（図2赤枠部分を拡大）



図4 ヴァーチャル・トーンング例

ペックを考えた時に現実的といえるかは疑問が残るが、もしこれらの情報も3Dモデルに含める場合には、斜光線を使った写真やクローズアップ写真などを用いるなどの対策を講じる必要があるだろう。

2.2 同一画家（工房）の類例に基づくヴァーチャル復元

もう一つのPC上でのヴァーチャルな修復方法として、壁画の大きな欠損を補うデジタル復元がある。3Dモデルより作成した聖堂のオルソ画像を用いつつ、デジタル復元によってメリエマナ・キリセシの磔刑図のオリジナルの状態を復元する（図5）。メリエマナの磔刑図では、聖母マリアが大きな亀裂とそこから浸透する水分によって消失し、右手と衣の一部しか残っていない。この復元には以下の手続きを踏んだ。

(1)移植図像の選定：屋外博物館から徒歩圏内のギョレメ村外れ、ゼミ溪谷にサルヌッチ・キリセとカラブルト・キリセの二聖堂がある。いずれもその絵画様式からメリエマナと同一の画家（工房）によって11世紀初頭に描かれたこ

とが知られて久しい（Thierry, 1996）。両者の内サルヌッチに磔刑が残るのでこちらを選択した。福音書記者ヨハネの欠損が著しいものの、幸いにもマリア像はほぼ原形をとどめている。

(2)サルヌッチのマリア像にデジタル・トーンングを施す（図6-7）。

(3)サルヌッチのマリア像をメリエマナの磔刑図に移植し、サイズと色を調整する（図8）。

こうした手続きにより、メリエマナの磔刑図を学術的な観点から復元することができた。復元図において、マリアの前に槍を持ったローマ兵がいるが、メリエマナの作例では福音書記者ヨハネの前にローマ兵が描かれていないことから、オリジナルではマリアの前にもローマ兵が描かれていなかったと推察される。そのため、今後削除する必要があるだろう。

以上のようなコピー＆ペーストによるデジタル復元は、ギョレメ溪谷においては他の聖堂でも有効と考えられる。例えば、屋外博物館のエルマル・キリセ、チャルクル・キリセ、カランルク・キリセと呼ばれる11世紀中葉の三聖堂は、それぞれ内接十字式のプランを持ち、絵画の様式が互いに酷似するため（図9）、「円柱式聖堂 the Column Churches」と総称されてきた（Epistein 1980-81）。チャルクルの洗礼を例にとると、画面中央に穴が穿たれて大部分が損なわれているが、ほぼ完全な状態で保存されている他の二聖堂の洗礼をからおおよその構図の再現が可能であろう（図10）。

3. 将来的な展望としての屋外博物館への提言

10世紀から11世紀後半までのキリスト教壁画を多数擁するギョレメ屋外博物館は、カッパドキア観光におけるメインアトラクションの一つと言ってよい。トルコ文化観光省の発表によれば、2017年、ネヴシェヒルの岩窟遺跡はトルコ国内の遺跡の中でも第3位の来館者数を誇り、68万人強がカッパドキアを訪れたとされる（<http://www.kulturvarliklari.gov.tr/TR-43336/muze-istatistikleri.html>, 2019年1月閲覧）。これら全ての来館者が概して5m x 5m四方程度の岩窟聖堂を見学してきたことになるが、厳し



図5 メリエマナ・キリセの磔刑図現状



図6 サルスツチ・キリセの磔刑図現状



図7 サルスツチ・キリセの磔刑図ヴァーチャル・トーニング例



図8 メリエマナ・キリセの磔刑図におけるヴァーチャル復元例

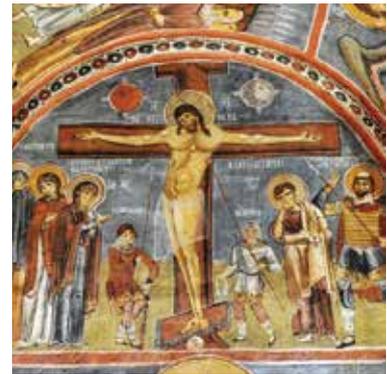
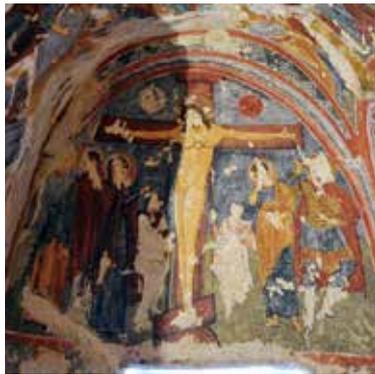


図9 円柱式聖堂の磔刑図（左からチャルクル、エルマル、カランルク）

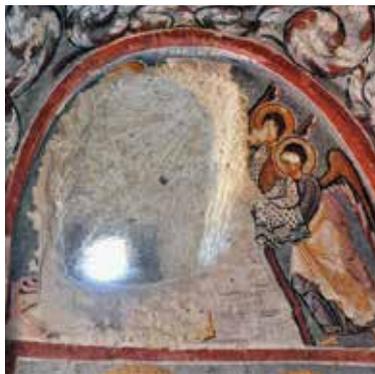


図10 円柱式聖堂の洗礼図（左からチャルクル、エルマル、カランルク）

い自然環境による風化・消失の危機に加え、来館者の発する体温や湿気が壁画の損傷を著しく加速していることは想像に難くない。確かに個々の聖堂を丹念に修復し、聖堂そのものの延命を図るのが上策だろう。しかし、同時に修復には予算、時間、労力の限界が常に付きまとう。ギョレメ屋外博物館には17棟の聖堂が存在するものの、上述のカランルク・キリセのように現在は一般公開されていない聖堂がある上に、公開中の聖堂に関して壁画の保存環境を保全するため堂内の見学時間を2分と制限している。見学時間の制限という壁画保護のための措置

は、諸手を挙げて受け入れられたわけではない。トルコ政府公認のガイドといえども堂内で壁画の説明をすることは認められておらず、堂内を見学する前に設置されたキャプションの前で、あるいは手製の資料を片手に来館者に説明した後、ごく僅かな時間で壁画を見せ、次の聖堂に移動するというのが現状である。観光客にとってカッパドキア観光の一番の目玉は気球による遊覧であり、必ずしもその全てがビザンティン時代の壁画を主たる目的にこの地を訪れるわけではない。しかし、見学時間の制限は来館者が文化遺産に関心を抱く機会や可能性をも制

限し、来館者に新たな発見と体験をもたらすという博物館の本来的な役割は十全に機能しているとは言いがたい。

また近年ではギョレメ屋外博物館の敷地内に残る聖堂の内、複数の聖堂、例えばパントクラトール・キリセ（11世紀後半）などでは格子戸が閉じられ、来館者は格子越しにしか壁画を鑑賞することはできない。さらに、監視員を配置できないため、アギア・エカテリニ聖堂（11世紀後半）は、2019年1月現在、完全に閉鎖されている。10数年前には屋外博物館内のほとんどの聖堂を見学することができたが、近年では来館者が鑑賞するコンテンツそのものが減少しているのである。

現地では壁画保護のため、ギョレメ屋外博物館をパドヴァのカペッラ・スクロヴェーニのように予約制にして入場者数そのものを制限する、あるいは聖堂のほとんどを閉鎖して壁画に休息を取らせる方がよいという声を聞くこともしばしばである。しかし、ギョレメの屋外博物館が今なおカッパドキア観光のメインアトラクションの一つであること、それを裏付ける年間入館者数に鑑みれば、これらのアイデアは必ずしも現実的とは言えないだろう。文化遺産の寿命を延ばすためには公開を制限して、元々の保存環境を保全するのが好ましいが、同時に文化遺産の長期的な保存の機運を高めるには、まず国内外から集まる観光客に公開してその価値を知らしめる必要がある。これは文化遺産が抱える拭いがたいジレンマであり、文化遺産の保存・継承とその観光資源としての活用は本来的には両立し難いものなのである。

このジレンマを部分的なりとも解消するために筆者らが提案したいのは、ギョレメ屋外博物館の聖堂をフォトグラメトリにより3Dモデル化し、それらを博物館のコンテンツとして来館者に提供することである。もしギョレメ屋外博物館が岩窟聖堂の3Dモデルを作成したならば、次のメリットが得られ、喫緊の課題は解消とは言わずとも大幅に軽減されるだろう。すなわち(1)実際の修復よりも安価かつ容易に複数のコンテンツを製作する。(2)モニュメントを損なうことなく詳細な情報を提供する。(3)正確な3次元

情報により将来的な修復作業への検討材料、あるいは指針を得る。(4)代替的な公開手段として聖堂の定期的なメンテナンスを可能にすることである。

さらにギョレメ溪谷の最大の幸運は、同一画家（工房）による作例が残されていることである。例えば、トカル旧聖堂とギュリュ・デレのアイヴァル・キリセはともに913～920年に描かれたとされる（Thierry, 1973）。さらに敷地外のサクル・キリセも含め、屋外博物館内の6聖堂（サクル、ユランル、アギオス・バシリオス、アギア・バルバラ、アギア・エカテリニ、クズラル）は11世紀後半に同一画家（工房）によって手がけられたと目され、現在ではユランル・グループと総称されている（Epstein, 1975; Rodley, 1985）。3つの円柱式聖堂が同一画家（工房）によることも踏まえると、屋外博物館で公開されている聖堂の大半が同一画家（工房）による類例を持つことになる（表1）。このような歴史的な幸運が重なるのはカッパドキア全域を見渡しても、修道院コミュニティの中心地として栄えたギョレメにおいて他になく、屋外博物館としてもこのアドヴァンテージを活かさない手はないだろう。つまりギョレメ屋外博物館の聖堂においては、壁画の失われた部分に関してものが仮想的な復元が可能であり、その結果を展示コンテンツとしうるポテンシャルを有するのである。

言うまでもなく、フォトグラメトリによる聖堂の3Dモデルには、その建築学的な構造と各部の形状、壁画の図様、図像の配置、色彩が正確に再現される。こうした聖堂の3Dモデルにビデオゲームのようなウォーク・スルー機能を搭載して、鑑賞者が3Dモデルの内部を自由に動き回れるようにし、これらのモデルをギョレメ屋外博物館の一隅、あるいは現在アヴァノスに建設中の博物館の一室で公開するとしよう。来館者は3Dモデルを通じてオリジナルを見学に出かけるモチベーションを高めることが予測され、実際に屋外博物館で壁画を見る前にヴァーチャル・リアリティーにより鑑賞のポイントを学ぶことができる。他方、屋外博物館で時間制限により十分に鑑賞できなかった来館者は、

Place	No	Name	Church by the Same Painter/Workshop	In/out-side of the Museum
Güllü Dere	4	Ayvalı	Old Tokalı	Outside
Göreme village	13	Sarnıç	Karabulut, Meryemana	Outside
Göreme village	14	Karabulut	Sarnıç, Meryemana	Outside
Göreme	2a	Saklı	Yılanlı, Basil, Barbara, Aikaterine, Kızlar	Outside
Göreme	7	Old Tokalı	Ayvalı	Inside
Göreme	7	New Tokalı		Inside
Göreme	9	Theotokos		Outside
Göreme	10	Ag. Daniel		Outside
Göreme	11	Ag. Eustathios		Outside
Göreme	17	Kızlar	Saklı, Yılanlı, Basil, Barbara, Aikaterine	Inside
Göreme	18	Ag. Basileios	Saklı, Yılanlı, Barbara, Aikaterine, Kızlar	Inside
Göreme	19	Elmalı	Çarıklı, Karanlık	Inside
Göreme	20	Ag. Barbara		Inside
Göreme	21	Ag. Ekaterine	Saklı, Yılanlı, Basil, Barbara, Kızlar	Inside
Göreme	22	Çarıklı	Elmalı, Karanlık	Inside
Göreme	23	Karanlık	Elmalı, Çarıklı	Inside
Göreme	28	Yılanlı	Saklı, Basil, Barbara, Aikaterine, Kızlar	Inside
Göreme	29	Kılıçlar		Outside
Göreme	33	Meryemana	Karabulut, Sarnıç	Outside

表1 ギョレメ屋外博物館が管理する同一画家（工房）による聖堂一覧

疑似体験とはいえ、自身の鑑賞体験を振り返り、学びを深めることも可能である。また3Dモデルはデータを視覚化したものであるから、ガイドは保存環境に気兼ねすることなく十分に壁画の説明をすることができ、来館者の関心を高めることも可能になるだろう。

メンテナンスや修復により聖堂を一時的に閉鎖したとしても、こうしたコンテンツさえあれば、来館者は堂内の情報を得られるだけでなく、堂内でどのような作業が進行しているか、その閉鎖の理由にも納得できるだろう。あるいは修復が完了した後もこれを現在から過去の姿へと遡及的に上映すれば、来館者はその聖堂がどのような作業を経て現状に至ったのかを理解することができる。つまり、博物館がいかに文化遺産と向き合っているのか、来館者を啓発するという教育的な効果も見込まれる。

近年では、復元は修復理念に反するので避けるのが昨今の世界的な潮流であり、落書などもモニュメントの被った「ライフ・ヒストリー」の一部とみなし、これを消すことを批判する声すらある。こうした批判も我々のデジタル復元を採用すれば回避することができる。それは壁

画の修復を最低限の応急処置に止め、タブレットなどのデバイスを通して壁画を見るとデジタル上での復元予想図が見られるというものである。このアイデアを採用すれば、聖堂を実際に修復する期間とコストは当座のところ大幅に削減が可能であり、こうしたアトラクションを通じた利益を実際の修復に費やすこともできるだろう。さらに聖堂を開削する工匠たちの姿やそこで暮らす修道士たちの姿をデバイスを通じてヴァーチャルに見ることができれば、来館者にとって極めて魅力的なコンテンツとなるに相違ない。

博物館の使命は資料の保存・修復にのみあるのではない。利用者に新たな発見や学びを提供するという教育的な側面も担っている。ギョレメ屋外博物館は来館者の増加と壁画の保存環境の保全というジレンマに長らく苦しんできたが、フォトグラメトリによる3Dモデルとヴァーチャル復元技術を活用すれば、世界に類を見ない魅力的な屋外博物館となるだろう。

4. 結論

以上本稿では、カッパドキア、ギョレメ渓谷

の聖堂について写真測量法に基づく3Dモデルを作成すると共にふたつの仮想的な壁画の修復手法として、ヴァーチャル・トーニングとヴァーチャル・リコンストラクションの手法を提示した。その上で、ギョレメ屋外博物館が直面している、観光客の増加と聖堂を取り巻く保存環境の悪化という問題を緩和し、さらに博物館利用者への新たな発見や学びを提供するという教育的な側面を促進するコンテンツとしてのヴァーチャルな3Dモデルとそれに基づく仮想的な修復の可能性を提示した。

[後記] 本研究は JSPS 科研費 17K18461 の助成を受けた研究成果の一部である。

M. Cariceci and C. Inglese, "Laser scanning and Automated Photogrammetry for Knowledge and Representation of the Rupestrian Architecture in Cappadocia: Sahinefendi and the Open Air Museum of Goreme," *CAA 2014 21st Century Archaeology, Concepts, methods and tools Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 2014, pp. 87-94.

益田朋幸『ビザンティン聖堂装飾プログラム論』中央公論美術出版、2014年。

F. Colonnese, Marco Carpiceci, C. Inglese, "Conveying Cappadocia. A new representation model for rock-cave architecture by contour lines and chromatic codes," *Virtual Archaeology Review* 7 (2016), pp. 13-19.

Z. A. Erguler, "Field-based Experimental Determination of the Weathering Rates of the Cappadocian Tuffs," *Engineering Geology* 105 (2009), 186-199.

C. Jolivet-Lévy, *Les églises byzantines de Cappadoce: le programme iconographique de l'abside et de ses abords*, Paris, 1991.

C. Jolivet-Lévy, *La Cappadoce: un siècle après G. de Jerphanion*, 2 vols., Paris, 2015.

A. W. Epstein, "The Fresco Decoration of the

Column Churches, Göreme Valley, Cappadocia: Consideration of Their Chronology and Their Models," *Cahiers archéologiques* 29 (1980-1981), pp. 27-45.

A. Wharton Epstein, "Rock-cut Chapels in Göreme Valley, Cappadocia: The Yılanlı Group and the Column Churches," *Cahiers archéologiques* 24 (1975), pp. 115-135.

M. Restle, *Byzantine Wall Painting in Asia Minor*, 3 vols., Greenwich, 1969.

L. Rodley, *Cave Monasteries of Byzantine Cappadocia*, Cambridge, 1985.

N. Thierry, "Un atelier de peinture du début du Xe siècle en Cappadoce : l'atelier de l'ancienne église de Tokali," *Bulletin de la Société nationale des Antiquaires de France* 1971 (1973), pp. 170-178.

N. Thierry, "Un atelier cappadocien du XI^e siècle à Maçan-Göreme," *Cahiers archéologiques* 44 (1996), pp. 117-140.

G. de Jerphanion, *Une nouvelle province de l'art byzantin: les églises rupestres de Cappadoce*, 4 vols., Paris, 1925-1942.

【図版出典】

地図：樋口諒作成

図 6, 7, 9, 10; 菅原裕文撮影