

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12606

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2014

課題番号：21226014

研究課題名(和文) 中近東・北アフリカにおけるビザンティン建築遺産の記録、保存、公開に関する研究

研究課題名(英文) Studies on the Documentation, Conservation and Utilization of Byzantine Architectural Heritage in the Middle East and North Africa

## 研究代表者

日高 健一郎 (HIDAKA, Kenichiro)

東京藝術大学・学内共同利用施設等・講師

研究者番号：30144215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 141,500,000円

研究成果の概要(和文)：中近東と北アフリカにおいて、ユスティニアヌス1世期(6世紀)の主要な教会堂建築を対象として基礎研究、考古学調査、工学、保存科学、遺産公開の5領域で研究を行う。リビアのトクラ遺跡では「西教会堂」の発掘で、アプシスが出土、ヨルダンのジェラシュ遺跡では「三連教会堂」の詳細実測を終え、アトリウムの一部発掘を実施し、先行建築を確認した。対象国の政情不安と騒乱で一部研究が未完となったが、研究期間後半ではハギア・ソフィア大聖堂(トルコ、イスタンブール)を主対象として、上部構造の形状と微動を計測し、劣化の主因となる壁体への水分浸透を解析した。構造と保存科学の視点から、同大聖堂の保存と公開への基本指針を得た。

研究成果の概要(英文)：The research is aimed at documentation, structural analysis, environmental monitoring, and heritage management of exemplary masonry structures in the age of Justinian the first in the Middle East and the North Africa. This multi-disciplinary research is composed by the five fields: basic historical study, archaeological survey, structural analysis, conservation science and heritage management coupled with museological study. At Tocra, in eastern Libya, the excavation was launched to discover the apse of the Western Church. At Jerash, in Jordan, the Triple Churches were accurately documented by 3D Laser Scanner. In the atrium of this complex excavation was conducted to reveal mosaic floor of the preceding Roman building. The research was halted due to the political turbulence in the area, while at Hagia Sophia in Istanbul, a series of accurate survey of the upper part, vibration analysis of the second cornice and hygro-thermal monitoring of water penetration have been carried out.

研究分野：ルネッサンス建築史、地中海東部を中心とするビザンティン建築史

キーワード：ビザンティン建築 ハギア・ソフィア大聖堂 リビア トクラ ヨルダン ジェラシュ

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者日高は、基盤研究Aにより、三次9年間にわたってイスタンブールのハギア・ソフィア大聖堂の総合建築調査を進め、関連してトルコ中南部、中近東の初期ビザンティン建築の比較研究を行ってきた。また、科研費・萌芽研究において北アフリカの建築遺産の現状調査に着手し、チュニジア・リビアといった北アフリカ・マグリブ地域の建築遺産について、先行研究を整理するとともに現地を訪問し、現地考古局との連携研究を進めた。リビアの考古遺跡の場合、学術的価値の高い遺跡であっても保存は不十分で、整備・公開はほとんど考慮されていないのが申請時の現状であった。

現地の遺跡保護意識の向上、人材育成への協力とともに研究を進めるという基本方針に立ち、研究代表者は、外務省の「リビア改革努力支援プログラム」で、古代遺跡の調査及び保全を目的とする研究交流を進めた。ユスティニアヌス帝期を頂点とする盛期ビザンティン帝国領の約半分は、現在イスラム圏であり、宗教的な理由もあって古代遺跡群への対応は適切とは言い難い状況にある。この地域の重要な課題は、純学術研究だけではなく、修復に先立つ遺跡の記録と修復手法の改善、遺跡の価値の認識と公開へのマネジメントの確立であると言える。

本研究の研究対象の一つ、ハギア・ソフィア大聖堂については、写真測量による実測調査と全体構造に関する基礎的構造解析を終え、公表成果は日本建築史学会賞を受賞した。この研究を、ユスティニアヌス帝期の建築史という広い視野で捉え、特に、研究が進んでいない北アフリカの初期ビザンツ建築の再評価を行うことは、学術的意義があった。申請時において、研究対象地域の政情は安定しており、リビア、シリア、ヨルダンでは、研究代表者と分担者が、現地若手研究者、遺跡管理部署の専門職員、学生に対して本研究の

内容に関わる講演、講義を行い、調査活動の理解と協力を求めた。この教育貢献活動は各国の文化省、考古遺跡管理省から高く評価され、各研究対象の調査許可取得にも有益であった。リビア政府文化観光省はトクラ遺跡に専門家の人材育成と遺跡保存の研究を行う総合博物館開設を計画しており、本研究の活用・公開領域の対象として最適事例であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、中近東および北アフリカに残存するビザンティン時代の主要遺跡を対象として、以下5領域の研究を行うことである。研究対象所在地は、中東と北アフリカの広域に及ぶが、ビザンティン建築の形成をみたユスティニアヌス1世時代(6世紀)の東ローマ帝国版図に対応する。

(1) 基礎研究領域：文献・史料による建築史研究を基盤として、研究対象の実測・現状記録、および行う。基本史料と関連文献の研究を進めるとともに、研究対象の現状を精査し、高精度の実測機材で現存構造を図面化する。様式、技術、空間構成の異同を比較分析して事例の系譜化を図り、古代建築の影響とビザンティン建築の固有性を明らかにする。ハギア・ソフィア大聖堂に関しては、総合建築調査を継続し、同時期の聖堂との比較研究により、列柱廊の構成的特徴を明らかにする。

(2) 考古学領域：リビア東部のトルメイト遺跡「城塞教会堂」(研究実施にあたって、リビア考古庁の強い要望でトクラ遺跡「西教会堂」に変更)、チュニジア北西部のル・ケフ「サン・ピエール聖堂」、シリアのルサファ遺跡「聖セルギオス聖堂」、ヨルダンのジェラシュ遺跡「三連教会堂」において、初期ビザンツ期の遺構実測、およびビザンツ考古学の方法論研究を進める。これらの遺構では、過去に発掘調査が行われているが十分とは言えず、特に遺構周辺の発掘を行うことで各遺跡の立地と先行構造物との関係を明らかにする。

(3) 保存修復領域：建築材料の物性・劣化調査を実施し、過去の修復の有効性評価を行う。モルタル・レンガ・石材の塩類風化を調査し、試料採取によって材料特性を測定し、残存構造を保護する保存科学的処理を決定する。一部で修復が進行中のハギア・ソフィア大聖堂に関しては、漆喰被覆を有する組積造壁体の水分移動を長期間実測し、漆喰層とレンガ層、レンガと目地モルタルでの境界面の水分移動について、数値解析を行い、内外壁の修理工事の時期、方法、手順を明示する。

(4) 工学領域：研究対象の静的、動的な力学挙動と構造的課題点を解明し、工学的対応策を提示する。材料特性実験と構造解析を行い創建時の構造特性を解明し、後世の修復・補強の有効性を解析モデルによって検証する。研究対象では、多くの例ですでにドーム架構が失われているが、支持構造からその架構の特性を推定する。大規模ドームが現存するハギア・ソフィア大聖堂では、常時微動の計測と数値解析により、力学特性を解明する。

(5) 活用・公開領域：博物館学の視点から研究対象の提示・公開手法を研究し、成果還元を図る。博物館学と公開技術の視点から遺跡の維持管理の現状を調査し、サイト・ミュージアムの整備指針と遺跡の保存公開に関する運営計画を作成し、関係部局に提示する。

また、5 領域を総合化することにより、研究終了後の上位目標として、ユスティニアヌス1世期の主要建築の総合的分析を進め、史的展開に沿った建築遺産の重層的保護の方法論を示し、保護管理・予防措置を組み込んだ保存・修復計画の作成と資源としての建築遺産の公開活用への指針作成を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 基礎研究領域：一次史料の分析、関連文献の研究およびデータベース化を行う。実測には、高精細度3次元可搬型レーザーキャナー (Riegl:VZ400) を用い、専用ソフトウェアで図化、視覚化を行う。イスラム期に

被覆されたモザイクの探査には、マルチパス・リニアアレイ・レーダー (Multi-pass Linear-Array Radar MPLA-245A) を用いる。

(2) 考古学領域：遺構の実測と発掘を行う。散乱する破損部材、崩落部材の同定には、ICタグを添付して位置管理を行う。実測・発掘作業には国内および現地の大学院生も参加し、専門教育と技術移転に配慮する。

(3) 保存修復領域：石およびレンガの物性値を測定し、水分・塩分濃度の変化についてシミュレーションを行う。実測と解析により、内壁劣化と含水率の関係を分析する。劣化測定には、TDR (Time Domain Reflectometry: 時間領域誘電率測定)法を用いる。

(4) 工学領域：構造解析では、形状測定、常時微動計測データにもとづき、弾塑性有限要素解析を進める。また、常時微動モニタリングにより動的特性の変化と構造の劣化の関係を構造解析の視点から分析する。常時微動計8台を29節点に設置し、各点3軸方向の微動を計測する。8点の微動を約1時間計測し、FDD分解し、上部構造全体の振動に合成する。

(5) 活用・公開領域：現地調査では、サイト・ミュージアムの博物館機能調査を行い、整備指針の基礎データとする。リビアに関しては、政府考古学庁長官と協議を進め、将来的な遺跡の公開・活用プランの作成を進める。

研究成果の総合化：各地の現地調査では、5領域相互の関連・対応を重視し、研究成果の融合によって、基礎研究から遺跡公開に到る連続性と体系化を図る。

### 4. 研究成果

研究成果と現地政情との関係：2010年にチュニジアで政権が崩壊し、翌年リビアで反政府運動が活発化、カダフィ政権が倒れ、その後、騒乱はエジプト、シリアに拡大し、シリアではイスラム国の台頭により、入国不能となって現在に到っている。リビア、チュニジア、シリアでの研究活動は中断を余儀なくされた。2013年に研究期間延長申請をして情

勢を見守ったが、リビア、シリア、チュニジアでの研究はついに再開できなかった。アルジェリアでは、目視予備調査実施後、文化省の担当局長が移動し、研究作業実施が難航した。これら諸問題の代替研究として、ハギア・ソフィア大聖堂調査を継続した。

#### (1) ジェラシュ遺跡(ヨルダン)

「三連教会堂」の実測と発掘：2011年度は3次元レーザースキャナーにより、10日間で57か所からスキャンを実施し、南北約65m×東西約40mの範囲の実測を終えた。実測結果から、洗礼者ヨハネ聖堂の中央身廊にたつ4本の円柱の現状位置が異なること、また、それらのうち、創建時から残る西側2本は、床面の傾斜に沿うように西南西方向に傾いていることを確認した。この実測データは、失われた上部架構の推定と残存円柱の補強にとって、重要な前提となる。



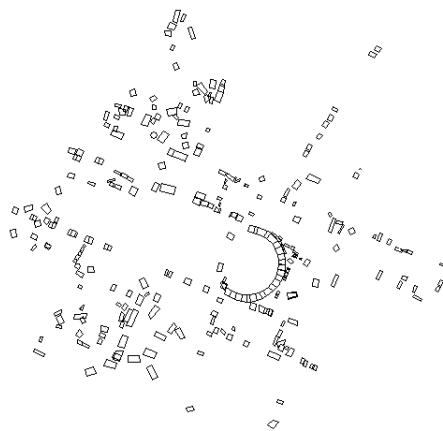
ジェラシュの三連教会堂鳥瞰図(3次元スキャナー実測による)

2012年度調査では、教会堂西側のアトリウムの散乱部材を整理し、表層堆積土を除去した。その結果、西側および南側に壁体基礎、街路舗装と明らかに異なる床面舗装、西に開く扉口跡を確認した。教会堂西側柱廊の試掘では、先行建築の舗床モザイクが出土した。2013年には、教会堂南側の土層を除去し、二種の異なる舗床を確認した。政情不安により2014年以降の活動を断念し、現在、調査結果の図面化を進めている。

「西浴場ドーム」の解析：ジェラシュ遺跡では、西浴場にこの遺跡唯一の現存石造帆型ド

ームが残る。周辺の形状から西から東に斜面流動の痕跡があり、また、北東柱脚近傍には人為的に掘削の跡が残る。構造解析の結果、北面、ドーム内面、いずれにおいても、数値解析と現状のクラックが方向と大ききさでよく一致し、変形および沈下状況を再現した解析の適正性と有効性が検証できた。推定される地盤の動きに対応した対策を講じることが、保存の最重要課題であるとの結論をヨルダン政府考古局に提示した。

(2) トクラ遺跡「西教会堂」の発掘(リビア)：通称「西教会堂」の発掘を開始、繁茂した植物の伐採と表土除去の後、トレンチを入れ、2012年よりアプシス部分の発掘を開始したが、その半円構造と確認した。しかし、



西教会堂のアプシスおよび周辺実測図

2013年に治安悪化により、発掘地を木造建屋で保護して継続研究を中断、現在に到っている。上図は、表土除去で出土したアプシスであり、同じリビアのサブラタ遺跡の教会堂(6世紀)跡と、アプシスの構成が類似する。

出土遺物の保存と公開については、現状調査を行うとともに、リビア考古庁と複数回協議を重ね(2009-2010年)、出土品等の保存と公開の観点から、文化財保存に携わる人材育成の研修施設を兼ねた展示・収蔵施設をトクラ遺跡周辺に建設することを提案し、具体化に向けて設計資料を作成し、リビア考古庁に提案した(2011年1月)。

(3) ル・ケフの「サン・ピエール聖堂」の実測(チュニジア)：2012、13年でチュニジア中部、西部の遺跡群でオプス・アフリカーヌ

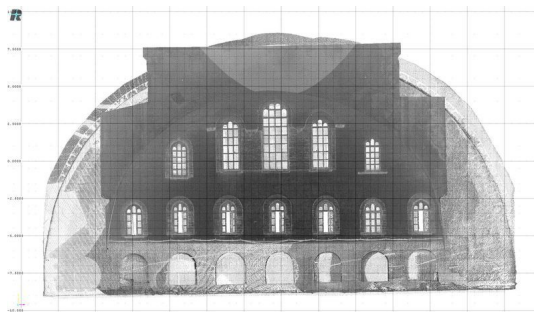
ム(アフリカ式組積構法)の調査を行った(スベイトラ遺跡他)。6世紀の教会堂建築を特徴づける構法であり、特に、北西部ル・ケフのサン・ピエール聖堂では、3次元レーザースキャナーの実測を行った。遺跡実測の実技研修、遺跡の公開整備のセミナー(5日間)を開催し、北西部の経済格差を抱えるチュニジア政府文化観光省から高い評価を得た。

(4)「ハギア・ソフィア大聖堂」の総合調査(トルコ)：

被覆モザイクの探査：2010、12年に南階上廊東ベイと南テュンパナムを中心にミリ波による探査を実施した。東ベイ南壁面では、隣接する被覆区画に関して、大小の円形と四角形を組み合わせた幾何学模様の確認および画像化に成功した。同時に堂内モザイクの詳細意匠調査を進め、(1)人物図像と植物紋は階上廊を含む上部空間に多く、十字架は地上階に多いこと、(2)キリスト教図像(人物、十字架)は平滑壁面に、植物紋はアーチのイントラドスに多いことが指摘できた。南階上廊東ベイ南壁面の探査で得られた比較的明瞭な図像は、皇帝の着替えの間(メタトリオン)の図像配置の分析に重要な情報を与える。

テュンパナムの実測：2011、15年に南テュンパナムの実測を行い、南側大アーチおよびテュンパナムの内面と外面は異なる傾斜を持つことが面的に明瞭に記録できた。大アーチの内面はおおむね垂直に立ち上がるが、第二コーニスから上方約6m付近で外側に少しセットバックしたのち、あらためて垂直方向に伸びている。それに対してテュンパナム内面は、ニッチの上部付近から外側に凹むように傾斜する。外面も同様に傾斜しているが、内面に比べて傾斜度は小さい。また第二コーニス南辺は、テュンパナム中央付近に対して両端(アーチ基部)が外側に押し出されており、北側テュンパナムは表面洗浄作業用の足場で覆われ、作業遅延から足場撤去の見通しが得られず、詳細実測は撤去後の課題

である。



南側テュンパナム内面スキャニング画像

大ドームの構造解析：チャクマックの既発表解析結果と同様のNS成分卓越周期1.85Hzと2.09Hzに加え、本解析では、新たに卓越振2.93Hzと3.06Hzの振動モードを得た。2.93Hzの振動では、南東コーニスの振動成分が大きく、南西ピアの柱脚の移動がみられる。一方、3.06Hzの振動では、北側ティンパナムが南北上下に移動するモードが見られ、この部分では構造体の分離が存在する可能性が考えられる。比較のため、石造ミナレット及び煉瓦造ミナレットの常時微動計測を実施し、1次振動数それぞれ1.18Hz、1.13Hz、2次振動数それぞれ3.50Hz、3.90Hzを得た。各ミナレットは海風に沿う東西方向の振動が卓越するが、風下の乱流による成分も含み、立体振動が確認できた。

南西エクセドラ・コーニスの構造解析：第二コーニスの南西エクセドラ上に浮石とみられる不安定な石塊があることから、コーニスの振動解析および応力解析を行った。常時微動計測では、コーニス中間部で大きく東端で中央と反対の変形モードを、振動数9.7Hzを得たが、数値解析でもコーニス中央部が浮き上がり東側が沈む変形が現れ、振動モードと同様の変形がみられた。エクセドラの東側アーチから南東方向の隅角部へ応力が大きく、注意を要する。

水分移動の実測と解析：2000年以降、トルコ政府文化省では外装モルタル除去を進めた。この結果、第二コーニス西側部分では塩の析出などにより、特に内壁の劣化が深刻となった。保存科学領域の研究では、2012年調査により、第二コーニスの内壁の劣化程

度と内壁表面含水率の相関性が高いこと、数値解析によりレンガと目地モルタルでは後者が水分移動に支配的であることを明らかにした。2013 年も継続して含水率分布と内外壁状態の現地調査を行い、内壁の仕上げ材の違いが、壁体の水分移動や壁画の劣化に及ぼす影響を熱水分移動解析により検討した。以下の結論を得ている。1) 内壁表面の含水率分布は、北東部一部で含水率の上昇が見られた以外、経年変化は小さい。2) 含水率の上昇箇所は外壁面の植被やクラックに対応するので、間隙の充填が保存対策として有効である。3) 塩析出が壁体内の蒸発位置で生ずると考え、熱水分移動解析を行った結果、内装の構成によって蒸発位置が異なり、内装の剥落層が増えるほど蒸発量が多く、内装が剥落した状態で放置されると劣化が促進される。4) 外壁面にあたる降水量が少ないほど室内側表面に近い位置の蒸発量が少なくなるので、内壁の保存には、外壁面にあたる降水量を減少が効果的である。5) 第二コーニス北西で多く確認される漆喰の剥落は中間モルタルでの蒸発に伴う塩の析出が原因である可能性が高い。

## 5. 主な発表論文等

### 雑誌論文

- 1) T. Hara, K. Hidaka, "Estimation of the Dynamic Behavior of Hagia Sophia", *Annual of Hagia Sophia Museum*, 2014, 203-27.
- 2) H. Takanezawa, S. Baba, K. Hidaka, "Preliminary Report of Non-destructive Investigation of Plaster-covered Mosaics of Hagia Sophia", *Annual of Hagia Sophia Museum*, 2014, 228-56.
- 3) T. Ishizaki, D. Ogura, K. Koizumi, J. Sasaki, K. Hidaka, "Environmental Monitoring for Conservation of Hagia Sophia", *Annual of Hagia Sophia Museum*, 2014, 257-80.
- 4) 佐々木淑美、日高健一郎、「ハギア・ソフィア大聖堂モザイクの現状記録と材料・技術考察 現地調査報告(その1 ドーム・モザイク)」、『日本建築学会計画系論文集』、2011年3月 第76巻 第661号、pp.703-709。  
(以上すべて、査読有)

### 学会発表

- 1) 高根沢均、日高健一郎、「ハギア・ソフィ

ア大聖堂の南階上廊東ベイ南壁面に描かれたモザイクに関する考察」、日本建築学会2014年度大会(近畿)学術講演梗概集、2014年9月、pp.797-798.

- 2) Hitoshi TAKANEZAWA, Kenichiro HIDAKA, Takashi HARA, "Report of Three-dimensional Laser Scanning of the Triple Church Complex in Jerash", *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 8-12 September 2013 Jeju, Korea, p.122.(査読有)
- 3) Takashi HARA, Kenichiro HIDAKA, Reiko SETA, "Structural characteristics of ancient dome in Jerash", *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 8-12 September 2013 Jeju, Korea, p.123.(査読有)
- 4) Takashi HARA, Kenichiro HIDAKA, "Estimation of the dynamic behaviour of a heritage structure" *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 8-12 September 2013 Jeju, Korea, p.124.(査読有)
- 5) Kota YAMAOKA, Takashi HARA, Kenichiro HIDAKA, "Study on structural dynamic behaviors of Hagia Sophia through micro-tremor measurement", *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 8-12 September 2013 Jeju, Korea, p.125.(査読有)

[雑誌論文](計 10件)

[学会発表](計 10件)

[図書](計 0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者:

日高健一郎(東京藝術大学 講師)

研究者番号: 30144215

### (2) 研究分担者:

石崎武志(東北芸術工科大学 教授)

研究者番号: 80212877

井上浩一(大阪市立大学 名誉教授)

研究者番号: 80106335

川西宏幸(筑波大学 名誉教授)

研究者番号: 70132800

高根沢均(神戸山手大学 准教授)

研究者番号: 10454779

田村幸雄(東京工芸大学 名誉教授)

研究者番号: 70163699

原 隆(徳山工業高等専門学校 教授)

研究者番号: 50124102

堀 賀貴(九州大学 教授)

研究者番号: 20294655

水嶋英治(筑波大学 教授)

研究者番号: 70372886

吉田昭仁(東京工芸大学 教授)

研究者番号: 90329219