

機関番号： 12608
 研究種目： 基盤研究(A)
 研究期間： 2007～2010
 課題番号： 19254002
 研究課題名（和文） 考古遺跡調査への情報技術導入実験-エジプト・アルザヤーン神殿遺跡
 研究課題名（英文） Introduction of Information Technology into Investigation of
 Archaeological Site - El-Zayyan Temple Site in Egypt
 研究代表者
 亀井 宏行 (KAMEI HIROYUKI)
 東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授
 研究者番号： 60143658

研究成果の概要（和文）：

制約条件の多い海外での遺跡調査の効率化を図るために、エジプトのアルザヤーン神殿遺跡を対象にして、情報技術の導入を検討した。まず IC タグ利用について検討し、遺物や文書管理だけではなく、建物や遺物の修復履歴の管理にも応用できることを示した。3次元スキャナは建物や碑文の記録ばかりでなく、遺構の発掘経過の記録にも用いた。サッカラの階段ピラミッドの3次元記録も実施した。GPS 測量や衛星画像の導入を図り、神殿周辺の水環境地図を作成し、ペルシア時代のカナート、ローマ時代の井戸や水路網跡を発見した。地中レーダ探査に基づいた発掘調査では、文字を記した土器片（オストラカ）を発掘した。遺構の保存修復計画を立てるために、3年間にわたる温湿度計測や風速・風向計測も実施した。

研究成果の概要（英文）：

We adopted some scientific approaches with new information technologies into the investigation at El-Zayyan Temple site in Egypt. RFID technique was introduced to manage the process of restoration of the mud brick buildings as well as the information of artefacts in large quantity. 3D laser scanning was used to record the building and reliefs of the temple in addition to excavation trenches. The 3D data of the Pyramid of Djoser at Saqqara was also recorded. Satellite Image Analysis was introduced to make a map of current land use and to estimate the environments in ancient times, and the existence of 'qanat' systems and water channel networks between Persian and Roman Periods have been confirmed. Successive excavation outside the temple was conducted based on the GPR survey results and ostraca were found. By cleaning the inside of the temple, previously-unknown stone pavement at the entrance for Forehall, stone floor between Forehall and Sanctuary, and another stone floor of Sanctuary were found. The long term monitoring of weather condition around the temple has given us valuable information for the future preservation of mud bricks in this area.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2007年度 | 11,100,000 | 3,330,000 | 14,430,000 |
| 2008年度 | 9,400,000 | 2,820,000 | 12,220,000 |
| 2009年度 | 9,400,000 | 2,820,000 | 12,220,000 |
| 2010年度 | 9,200,000 | 2,760,000 | 11,960,000 |
| 総計 | 39,100,000 | 11,730,000 | 50,830,000 |

研究分野： 考古情報学

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：情報技術、IC タグ、エジプト、遺跡探査、3次元形状計測、GIS、衛星画像、環境計測

1. 研究開始当初の背景

エジプトは国土の90%以上が砂漠域で、人口の90%以上がナイル河流域に住んでいる。エジプト政府は人口増加に備えナイル河西方に広がる砂漠地帯の中のアアシスの開発を進めており、その地域の考古遺跡の調査・保存が急務となっている。そのような状況で申請者は2001年から西方砂漠最南のハルガオアアシスにあるアルザヤーン神殿遺跡の調査に取りかかっており、2005年からは発掘調査も開始した。しかし、最奥のアアシスでありアクセスも悪く調査期間が限られている、外国人は地形図を手に入れることができない、出土遺物やサンプルの国外持ち出しが禁止されており科学分析ができない等、さまざまな制約が多く、調査の進展が阻害されている。またエジプト政府からは、神殿の保存修復も要求されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は次の2点である。

(1) 情報技術を中心とした科学技術の考古遺跡調査への導入

GISによる地理情報と遺跡発掘や探査情報の統合や、3次元形状デジタル記録システムを用いた発掘履歴の記録、遺構遺物の記録・図化など、今まで行ってきた情報技術の応用開発は続けていくが、今回新たに、ICタグ(RFID)による遺物・遺構管理システムの開発を目指す。エジプトでは、遺物の国外持ち出しは禁止されており、高々2ヶ月ほどの滞在期間の中で、すべてを整理記録することは難しい。そこで、発掘されたその場で、遺物にICタグを貼付け、日時・位置・層位などの情報をデータベースに記録することができれば、後日の整理のときに混乱も生じないし、散逸も防ぐことができる。また、修復過程でも、新しく作る日干レンガにICタグを埋め込んでおけば、風化して見分けがつかなくなっても修復履歴もすぐに復元できる。ICタグの考古遺跡調査への新しい応用を実験したい。

また、GPS測量ではカバーできない広範囲のマッピングには衛星画像の応用を試みる。

(2) アルザヤーン神殿遺跡の解明と保存

2005年からの発掘調査では、神殿の西側で直径2mを越える大きな窯状遺構が発見されているが、発掘が完了していないので、窯状遺構の用途についての解明を目指す。また、地中レーダ探査で捉えられている反射の強い面についても解明する。

発掘された大量の土器の整理を行い、年代の決め手となる情報を得たい。

神殿本体については全く調査が進んでいないので、神殿内の構造、碑文などの調査

に取りかかる。

神殿の保存計画をたてるための基礎データとなる、気象環境の把握を目指す。

3. 研究の方法

(1) ICタグの利用

ICタグには、遺物への影響を抑えるために日立製作所により開発された世界最小のサイズ(0.4mm角)のミューチップを採用することにし、アンテナを含めたインレットとして、日立化成製の2.5×4mmと2.5×70mmの2種(図1)と、屋外での使用を考慮しセラミックパッケージにより耐候性を高めた日立プラントメカニクス製の「スカイメタル」(32×5×3mm)(図2)を採用した。遺物への接着方法、現場での読み取り装置、データベース構築などの要素技術の開発から、プロセス管理への適用法などを検討した。

(2) 3次元形状デジタル記録

遺物などの現物の国外持ち出しができない状況では、精密なデジタルデータをとることが有効である。神殿のレリーフや碑文の記録を優先し、発掘調査の迅速化を図るために発掘結果の測量にも応用した。碑文など細かい物を記録するために、使用機材として、RIEGLE LPM-25H(記録可能距離1-200m, 最高分解能8mm)とコニカミノルタ製VIVID 910(記録可能距離0.07-5m, 最高分解能0.2mm)を用いた。

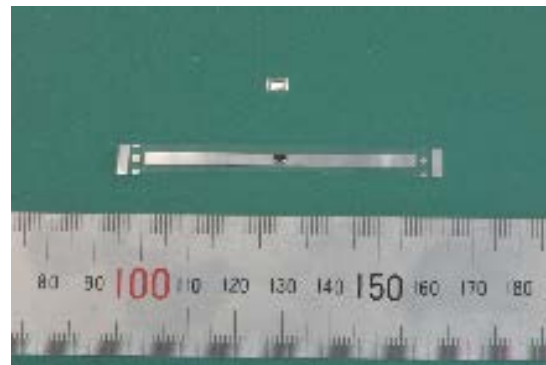


図1. 2種類のミューインレット

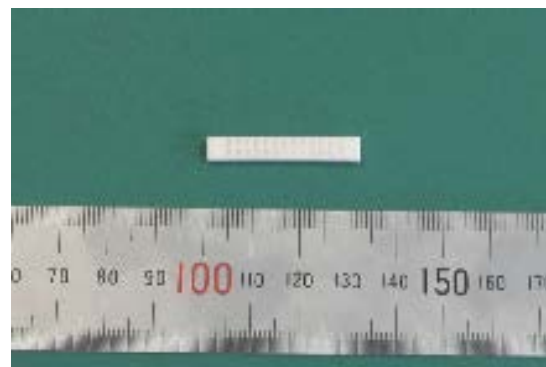


図2. スカイメタル

(3) 衛星画像の利用

今までにGPS測量で南北400m×東西300mの領域の地形測量や遺構のマッピングを実施したが、神殿周辺の水利環境や耕作地などの調査のためにはさらに広い範囲をカバーする必要がある。そこで、日本の陸域観測衛星(ALOS)「だいち」の衛星画像を用い、水利環境地図の作成を試みた。

(4) 神殿西側遺構の発掘調査

窯状遺構の発掘を継続するとともに、北側に10m×10m、東側に南北10m×東西3mのトレンチをあけた。土器片を中心とする遺物の整理・記録作業を実施した。その際、遺物のみならず図面類にもICタグを貼付して管理した。

(5) 神殿内部の調査

神殿内部の地中レーダ探査を実施し、現地表面下の遺構の様子を探り、床面のクリーニングを試験的に実施した。また、碑文の解読にも挑戦した。

(6) 保存環境の調査

神殿近くの民家の屋上に気象ステーションを建て、温湿度・風速・風向・日照の半年間の観測を試みた。また、神殿壁面の12カ所に温湿度計を設置して、3年間の長期のモニタリングを実施した。さらに盛夏と冬季に壁面温度の日内変動を赤外線サーモグラフィで観測した。

4. 研究成果

(1) ICタグの利用

① 2種のインレットを遺物などに貼付けの際の接着剤については、木板に、酢酸ビニル樹脂エマルジョン、セルロース系樹脂、変成シリコーン樹脂、水溶性ウレタン樹脂エマルジョン、水溶性アクリル樹脂エマルジョン、水溶性アクリル樹脂+セラミック、膠、漆+小麦粉、膠+小麦粉+木粉、ポリビニルアセテート

(PVAC)、エポキシ、メチルセルロース、パラロイド、ヒドロキシメチルセルロース、シアノアクリレート、ポリビニルアルコール(PVAL)の16種類の接着剤で接着し、屋内外に放置する実験を行った。メチルセルロース、ヒドロキシメチルセルロース、PVALはすぐにはがれたが、そのほかは1年以上剥がれないでいた。土器片に対しては、セメダインC、ガラス用セメダイン、アクアセブン、アクリルクレーパー498HV、PVAC、吸着テープ、ミューインレット用シールの7種類の接着剤を試したが、通常土器の修復に用いられるセメダインCで十分であることがわかった。5種類の有機溶剤(エタノール、アセトン、トルエン、キシレン、ブタノン)に浸ける実験では、アセトンとブタノンではタグの機能が失われた

が、接着剤の溶剤に使われる程度では問題ないことがわかった。

- ② スカイメタルを土壁に埋込む実験では、土が乾燥した状態では、50mmの深さに埋込んでも読み取り可能なことがわかった。
- ③ 砂漠での使用を考慮し、Bluetoothを介してPCと通信する防塵型ミューチップリーダーを試作した(図3)。
- ④ ミューチップIDで遺物を管理するシステムのプロトタイプを、大阪京都両府にまたがる樟葉平野山瓦窯跡から出土した瓦片1700点余りを対象に選び、考古学でよく使われているデータベースソフトFileMaker Proを使って構築した。
- ⑤ アルザヤーン神殿遺跡で出土した遺物について、遺物本体、遺物カード、実測図面などに、上記①の結果に基づきセメダインCを用いミューチップを貼り、上記④で開発したシステムに登録した。土器片については破片一つ一つにチップを貼ることにより、それらが接合されて大きな土器に修復されても、土器片毎の情報が残っているので、その接合関係や修復履歴も追跡できるようになった。
- ⑥ アルザヤーン神殿遺跡で、日干レンガの壁にスカイメタルを泥で埋込む実験を行い(図4)、3年間放置しても、スカ



図3. 試作した耐候型ミューチップリーダー



図4. 日干レンガ壁へのスカイメタル埋込み実験

イメタルが劣化しないことを確認した。その結果、日干レンガに埋込めば、レンガが風化してもその施工時期が現場でも確認でき、建物の修復履歴をいつでも追跡できるようにすることが可能となった。

- ⑦ スカイメタルは、神殿の壁面の温湿度観測用の温湿度計にも張り付け、3年間放置し、すべてが読み取り可能なことを確認した。機器の管理にも使えることは当然であるが、最高80°C、最低0°C近くになり、日較差も50°C近いという過酷な環境下でも、スカイメタルが使用できるという貴重なデータを得ることができた。

(2) 3次元形状デジタル記録

碑文やレリーフの記録には高分解能のVIVID 910を用いたが、この機材は本来屋内使用を前提に設計された機器であるため、直射日光のあたる壁面での計測では、日よけや傘で覆ったり、早朝や夕方という時間を選んだりしたが、十分な精度を得ることができなかった。屋外の碑文などを研究に耐える精度でデジタル計測できる機器の改良が必要であることが認識された。

クリーニングした神殿内部や発掘トレンチの記録は成功した(図5)。

サッカラにあるジュセル王の階段ピラミッドは最古のピラミッドであるが、エジプト政府が修復作業に取りかかり、外側から新しい石材で覆う工事を開始した。この工事が進めば、石積みなどの情報を研究者が得ることが不可能になるため、2007年度の現地調査の際に、急遽エジプト考古最高評議会(Supreme Council of Antiquities, SCA)から階段ピラミッドの現状をデジタル保存することを要請され、2008年度に実施した。風化や崩壊がすすむ巨大文化財のデジタル保存の有効性を世界に示すことができた。

(3) 衛星画像の利用

申請者が手に入れることができた地図は、1930年代の地図で、砂漠域では空白の部分も多い。ALOSの高解像度(2.5m)のPRISM画像と、RGB+赤外のマルチバンドのAVNIR-2の画像(分解能10m)をパンシャープン合成し、



図5. 発掘トレンチのデジタル記録(2009年発掘終了時)

それに1930年代の地図の等高線を重ね、1:25,000のフォルスカラー地図と、1:10,000のトゥルーカラー地図を作成し、基図とした。この基図の上に、アルザヤーン神殿、北のアルグウエイタ神殿、墓地、現代の井戸、古代の井戸、カナート、水路痕、現代の土地利用(畑、ナツメヤシ林など)をプロットし、環境地図を作成した。その結果、水源はアルザヤーン神殿の西にある丘陵ゲベルシーワに集中し、カナートが丘陵から2つの神殿に向かって作られているので、今日の発達を可能にした水開発の発端は、2つの神殿への導水を意図した古代の水事業であることが推論された。これまでアルザヤーン神殿はプトレマイオス時代起源とされていたが、カナートはペルシア起源であり、アルグウエイタ神殿もペルシア時代にさかのぼることが判明しているため、アルザヤーン神殿の起源も再考の余地がある。水路痕はローマ時代と思われ、アルザヤーン神殿の東にまで伸びており、その先には大規模な耕作痕が残っていることも発見した。約5000年前から始まるサハラ砂漠の乾燥化のなかで、2600年前のペルシア支配、2000年前のローマ支配の下に導入された水利技術が、この地域の発展にいかにか寄与したかを解明することが今後の課題となる。

(4) 神殿西側遺構の発掘調査

窠状遺構については、発掘により窠であることは確定できたが、土器窠か石灰窠であるかについては判明できなかった。しかし、隣のダハラオアシスでは、土器窠と石灰窠の併用例も報告されており、この窠の用途については窠内外で発見された遺物の分析が必要である。

出土土器の分析では、ハルガオアシス内の他の遺跡の出土品との比較から、年代は2-3世紀と推定された。アルザヤーン神殿を修復したローマ皇帝アントニヌス・ピウスの在位期間(138-161AD)と齟齬はない。

北側の拡張トレンチでは、地中レーダ探査結果と一致する方形住居が発掘された。このトレンチの北西端では、地中レーダ探査では面的に広がる強い反射面の存在が検出されていたが、発掘の結果、これは遺構ではなく砂質粘土の硬化層であった。この硬化層の生成には水が関与した可能性が考えられ、水がたまっていた時期があったことが想像される。また、このトレンチからはデモティックを記した土器片(オストラカ)が発見されているが、解読は出来ていない。

窠の付属施設の発見を期待して開削した東側のトレンチでは、3個の日干レンガ建物の一部が検出された。トレンチ西面に沿って出土したカーブした壁が窠を取囲む壁ではないかと推測されるが、南北に連なる他の2つの建物は窠とは直接関連の無いものと思われる。

(5) 神殿内部の調査

アルザヤーン神殿内部の調査は 1980 年代の SCA による調査以来なされていない。今回、神殿内の、アプローチ、前廊、至聖所の前面および至聖所内部の地中レーダ探査、床面のクリーニングを実施した。

エジプトの神殿は至聖所に向かって段々床面が高くなるのが普通であるのに、この神殿ではアプローチから至聖所に至るまで低くなっており異例である。地中レーダ探査の結果、アプローチの現在の床面下約 60cm に反射層が認められ、これが元々の床面である可能性がある。

クリーニングの結果、前廊の入り口に石畳が残っていることが発見された(図 6)。また、前廊と至聖所の間や至聖所内にも新たな石敷の床面が発見された。

壁面に残された碑文やレリーフの解読に挑戦したが、この神殿の年代を確定するような情報は未だ得られていない。

(6) 保存環境の調査

気象ステーションでは、気温・湿度・風向・風速・日照量を 2008 年 12 月から 6 ヶ月間、15 分間隔で記録した。冬季の日照は 600~700 w/m²であったが、4 月以降 1000 w/m²を超える非常に強い日照を受けることがわかった。遺跡周辺の風は、主に北風であり、平均風速は、2.2 m/s であったが、主に午後 10 m/s を超える突風がたびたび発生していた。砂嵐(ハムシーン)の時期である 3-5 月には 15 m/s を超える突風が発生した。また、突風は砂嵐時期以外でも常時発生することが明らかとなった。強風の風向は、主



図 6. 新発見の神殿内前廊の石畳

に北から東北であり、遺跡周辺の木が南側に傾いている事象と整合性を得た。遺跡周辺の環境の特徴は、砂漠特有の強い日照による大きな温湿度変動と強風である。

2007 年 12 月に神殿壁の 12 カ所に設置した温湿度計で、温度と湿度を 1 時間ごと、3 年間にわたり記録した。記録された最高温度は 77.5^o、最低温度は 2.5^oC、平均では 26~31^oC という値になった。湿度は、最高 91%RH、最低 5.5%RH、平均 20~32%RH となった。直射日光を受けるか受けないかという日照条件の違いにより温度の日較差は場所によって大きく異なるが、平均温度はそれほど大きな開きは無い。湿度については、日較差は年間を通じて非常に大きい、高湿度になる時期は少なく、高湿度状態は最も寒い 1 月頃に発生した。一方、露点はその日の最低温度を下回る日は年に数回で、他の砂漠地帯の遺跡環境調査で報告される結露が毎日発生している状況とはやや異なる。この傾向は水分供給の豊富な河川流域の遺跡環境と異なるオアシス特有の遺跡環境に由来する可能性もあり、一言で砂漠地帯といっても、河川流域とオアシスでは、異なる遺跡環境に対応した保存処理を構築する必要性を示唆している。

赤外線サーモグラフィによる壁の表面温度の計測は、直射日光を受ける神殿塔門南正面の日干レンガ壁と石材壁で行った。観測日は、盛夏(2010 年 9 月 6 日)と冬期(2009 年 12 月 10 日)で、日の出から日没まで 1 時間間隔で撮影した。

夏季の最高気温になる 13 時前後では日干レンガ部の最高表面温度は約 71^oC、石材部で約 46^oC と約 25^oC の較差を生じていた。日没後の 19 時前後では日干レンガと石材はほぼ 40^oC 前後では較差がなくなっており、日没後は日干レンガと石材は較差が少なく徐々に温度が下がっていく傾向である。最低気温に達する 5 時前後では日干レンガの最高で 30.5^oC、石材部で 24.5^oC と 6^oC の較差を生じていたが、場所により日干レンガが石材部より低い値を示し逆転している箇所もあった。

冬季の最高気温に達する 12 時前後では日干レンガの最高表面温度は約 60^oC、石材部で約 32^oC と約 30^oC の較差を生じていた。最低気温に達する 7 時前後では日干レンガと石材部では約 15^oC の較差を生じていた。

この結果から夏季も冬季も石材部に比べ日干レンガ部の方が温度較差が大きく、劣化し易いことが判明した。砂漠地帯においては建築材料としては日干レンガより石材の方が非常に優れていることが測定結果から見て取れる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① B. Souri & M. Watanabe: Contribution of Ca0/Zr02 and Parker Indexes to Evaluate Leaching Intensity of Calcareous Soils in Western Iran, Journal of Arid Land Studies, Vol.21, pp. 81-88(2011), 査読有
- ② 古川桂, 千島史彦, 阿児雄之, 亀井宏行: エジプト・アルザヤーン神殿の地中レーダ探査, 文化財と探査, Vo. 11, No. 2, pp. 50-55(2010), 査読有
- ③ 渡邊真紀子, 古川桂, 杉村俊郎, 中野智章, 塚本敏夫, 亀井宏行: エジプト西方砂漠ハルガオアシスのアル・ザヤーン神殿周辺の水環境—ALOSパンシャープン画像を用いた環境地図の試作—, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 30, No. 1, pp. 11-18(2010), 査読有
- ④ 亀井宏行, 河江肖剰, 塚本敏夫, 金谷一郎, 岡本篤志: 2006 年度ギザ・レーザー・スキヤニング調査報告—ギザのケントカウエス女王墓の再考察と 3 次元計測による記録作業—, 西アジア考古学, Vol. 10, pp. 51-63(2009), 査読有
- ⑤ 亀井宏行, 長瀬智, 安藤涼介: 考古遺跡調査への RFID 技術の導入, 東北芸術工科大学平成 19 年度文化財保存修復センター研究成果報告書, pp. 231-232(2008), 査読無

[学会発表] (計 22 件)

- ① M. Watanabe, K. Kogawa, H. Kamei, T. Sugimura, T. Nakano: Water Environment Map around El-Zayyan Temple in Kharga Oasis, Western Desert, Egypt Based on ALOS Pan-sharpened Imagery, The 9th International Conference on Archaeological Prospection, 21st Sep. 2011, Izmir, Turkey
- ② 山田卓司, 塚本敏夫, 亀井宏行: エジプト西方砂漠 (オアシス) 地域における環境調査-発掘遺構の気候変動について-, 日本文化財科学会第27回大会, 2010年6月26-27日, 吹田市
- ③ Y. Kawae, H. Kamei, K. Sato: Aiming to Go beyond Archaeological Horizons-3D Data of Pyramids and Their Interpretations, CIPA 2009 XXII International Symposium, 13th Oct. 2009, Kyoto
- ④ K. Kogawa, H. Kamei, T. Ako, T. Tsukamoto: GPR Survey at El-Zayyan Temple in Kharga Oasis, Egypt, The 8th International Conference on Archaeological

- Prospection, 10th-11th Sep. 2009, Paris
- ⑤ 安藤涼介, 亀井宏行, 古川桂, 岡本篤志, 山田卓司, 塚本敏夫: 文化財へのRFID技術応用のためのICタグの耐候性試験, 日本文化財科学会第26回大会, 2009年7月11日, 名古屋
 - ⑥ 菱田哲郎, 橋本英将, 亀井宏行: エジプト西方砂漠ハルガオアシス・アルザヤーン神殿遺跡の発掘調査, 平成19年度考古学が語る古代オリエント, 第15回西アジア発掘調査報告会, 2008年3月15日, 東京

[図書] (計 1 件)

- ① H. Kamei and T. Nakano edit.: El-Zayyan, Kharga Oasis, 2007-2010, Tokyo Institute of Technology, Kamei Lab., 194 pages (2012) ISBN 978-4-9903776-1-8

[その他]

アウトリーチ活動
サイエンスカフェ「オアシスへのいざない—エジプト西方砂漠—」開催, 東京工業大学百年記念館, 2008年5月28日, 参加者数57名 (小中学生含む)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀井 宏行 (KAMEI HIROYUKI)
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授
研究者番号: 60143658

(2) 研究分担者

渡邊 真紀子 (WATANABE MAKIKO)
首都大学東京・大学院都市環境科学研究科・教授
研究者番号: 10175119
菱田 哲郎 (HISHIDA TETSUO)
京都府立大学・文学部・教授
研究者番号: 20183577
塚本 敏夫 (TSUKAMOTO TOSHIO)
元興寺文化財研究所・研究部・保存科学研究室長
研究者番号: 30241269
金谷 一郎 (KANAYA ICHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50314555
大城 道則 (OSHIRO MICHINORI)
駒沢大学・文学部・准教授
研究者番号: 00365529
(2007 年度限り)