

# レーザースカナとRTK-GPSを用いた遺跡の3次元計測

門林 理恵子

本稿では、2002年8月28日から9月9日まで、トルコ南西部リキア地方に位置し、サンタの島として知られるゲミレル島の初期ビザンティン時代の聖堂跡を対象として行なった3次元計測について報告する。最終的な目標は、全域に遺跡が点在するゲミレル島の地形および主な建築遺構を詳細に3次元計測して3次元モデルを作成し、写真などのデータとともに多目的利用可能なデジタルアーカイブを作成することである。その第一歩として、第二聖堂、第三聖堂と名付けられたバシリカ様式の聖堂をレーザースカナで3次元計測するとともに、RTK-GPSを用いて地理座標を取得した。これらのデータをもとに、3次元モデルやオルソ写真などを作成したので報告する。

## 3D Scanning of Historical Site using Laser Scanner and RTK-GPS

Rieko Kadobayashi

We report our experience on 3D scanning of Byzantine Ruins that remain on Gemiler Island which is located in southwestern Turkey and is known as the "Island of St. Nicholas," the origin of our present-day Santa Claus. We started the Digital Gemiler Island project that was aimed at digitizing the terrain of the whole island and the historical sites scattered widely throughout it in 3D. We measured two churches using a laser scanner and a RTK-GPS system. The major tasks that were carried out at the site and the 3D models created from the laser data are discussed.

### 1 はじめに

近年、文化資産を対象とした3次元計測の事例の報告が急速に増えつつある(一例として文献[1])。この要因には、第一に、高精度で低価格なレーザースカナが普及してきたことが挙げられる。次に、文化資産の保存のために、従来の手法では困難であった、高精度な計測への期待が高まってきていることが挙げられる。さらに、情報系と人文科学系の共同研究の機会が増えてきていることも、このような事例の増加に貢献していると考えられる。

しかし、3次元計測に基づく3次元モデルの効率的な作成方法は、まだ確立されたものではなく、アルゴリズムの研究などが行なわれている。また、できあがったモデルの活用方法の検討も十分なさ

れているとはいいがたい状況である。

たとえば、3次元モデルをデジタルアーカイブ化し、文化財の調査研究、保存、復元、博物館などでの展示、インターネットを利用した閲覧など、異なる目的に利用するということが考えられるが、そのように多目的な利用をするためには、十分なメタデータを付与しておかねばならない。利用者個人のニーズは多様であり、それらのニーズに応えられるようにするには、どのようなデータおよびメタデータが必要かを検討した上で、デジタルアーカイブを構築する必要があると考える。このような考えに基づき、現在、高精度な3次元モデルを含み、多目的利用が可能なデジタルアーカイブ構築技術の研究を進めている。

この研究の一環として、トルコ南西部のリキア地方に残るビザンティン時代の遺跡を対象として、レーザースカナやRTK-GPSを用いて、高精度で形状や地理情報を取得し、3次元デジタル化したので報告する。



図 1: 第三聖堂の現況: 南壁と西壁の様子 (上), アプスとベーマの様子 (下)

## 2 ゲミレル島遺跡

ゲミレル島は、トルコの南西部リキア地方にある東西約 1000m、南北約 400m の小さな島である。島全体に、多数の住居、バシリカ様式の聖堂、貯水槽、城壁、廊下、港、墓など様々な種類の建築遺構が残っている。この遺跡は、美術史、考古学、建築史などの専門家からなるリキア地方ビザンティン遺跡調査団（代表：浅野和生、愛知教育大学教育学部助教授、以下、調査団と略す）が 1991 年より行ってきた調査により、5 世紀末から 6 世紀にかけての初期ビザンティン時代に栄えた港湾都市であることが明らかになってきた [2, 3]。

島内では、4 つのバシリカ様式の聖堂跡が確認されており、第一聖堂から第四聖堂まで名前がつけられている。いずれの聖堂からも床を飾る美しいモザイクが発見されているが、特に注目すべきは、1995 年より発掘調査が行われている第三聖堂である。第三聖堂の床からは、牛や山羊、樹木や



図 2: 第三聖堂から出土したモザイク

魚などのモザイクなどとともに、この聖堂の設立に関する記述のある銘文のモザイクが発掘された。これによって、この聖堂が、現代のサンタクロースの起源となった聖ニコラオスに捧げられた世界で最も古い聖堂であることが判明した [4, 5]。

今回の 3 次元計測では、発掘調査により詳細が明らかになってきた第三聖堂と、アプシスの半ドームが良く残っている第二聖堂を対象とした。第三聖堂は、図 1 に示すように、アプシスの半ドームこそ失われているものの、大理石の化粧板をはめ込んだシントロノンと呼ばれる聖職者の座席や、床全体に広がるモザイク（図 2 参照）などの保存状態がよい。また第二聖堂は、アプシスの残存状態がよく、半ドームの一部に穴が空いているものの原型をほとんど留めている（図 3 参照）。このドームの最高部は、地表から 9m 近くあること、半球状にカーブしていることから、従来の方法では詳細な測量が困難であった部分である。

## 3 現地でのデータ収集

これまで調査団は、毎年 8 月後半から 9 月後半の 1 ヶ月間に渡り、踏査や発掘などの調査を行ってきた。2002 年度の調査スケジュールは、8 月 24



図 3: 第二聖堂に残るアプスの半ドーム

日から 9 月 21 日までのおよそ一ヶ月間であった。著者を含む延べ 5 人からなる通信総合研究所の 3 次元計測メンバーは、この調査期間の前半に、レーザースカナを用いた 3 次元計測や RTK-GPS による測量などを行なった。現場にて作業を行なったのは、11 日間である。

現地では、3 次元計測を含め、次のような作業を行なった。

- 標定点の設置および記録
  - レーザースカナによる 3 次元計測
  - トータルステーションによる測量
  - GPS による測量
  - 高精度デジタルカメラによるテクスチャ用写真撮影
  - デジタルカメラによる簡易写真測量用写真撮影
- 以下、それぞれについて、実施した内容を記す。

### 3.1 標定点の設置

レーザースカナで取得できる座標値は、スカナの位置を原点とした 3 次元座標値である。しかし、考古学においては、遺跡の測量は地理座標（いわゆる公共座標）に基づいて行なっているため、スキャンした 3 次元データの座標値を、測量座標に基づく値に変換する必要が生じる。このためには、測量座標が既知の点をレーザースカナで計測しておき、スカナ位置に基づく座標系から測量の座標系へデータを変換する必要がある。今回用いたレーザースカナの制御ソフトは、反射率の高いターゲットを自動検出し、これらを標定点とし

て座標変換する機能を備えている。そこで、壁面や床面などに、測量用の反射シールを適宜貼り付けて標定点とし、一度のスキャンで標定点を最低 4ヶ所以上含むようにした。

使用した反射シールは 1cm 角のものがほとんどである。貼付した個所は、第三聖堂およびその周辺で 143ヶ所、第二聖堂では 21ヶ所に上った。これらの反射シールの座標は、トータルステーションを用いて測量を行なった。貼付した場所については、デジタルカメラで写真を撮って記録するとともに、これまでの調査で図面が作成されている部分については、図面上に記入した。

なお、後述するように、反射シールを貼った個所を標定点とした他に、RTK-GPS ではモザイクのテッセラも標定点として使用した。

### 3.2 レーザースカナによる 3 次元計測



図 4: 第二聖堂でのレーザー計測の様子

2 章で述べたように、レーザースカナによる 3 次元計測は、全体としての保存状態がよく、発掘調査によって詳細が明らかになってきた第三聖堂と、アプシスの半ドームの残存状態のよい第二聖堂を対象として行なうこととした。

計測には、LPM-25HA という Riegl 社のレーザースカナを使用した。表 1 に LPM-25HA の主な仕様を示す。この機種を選んだのは次のような理由による。ゲミレル島遺跡は無入島であり、特に今回主として対象とした第三聖堂は、海拔 99m ほどの島の頂上付近に位置するため、運搬が用意であり、バッテリーで駆動できることが必要であっ

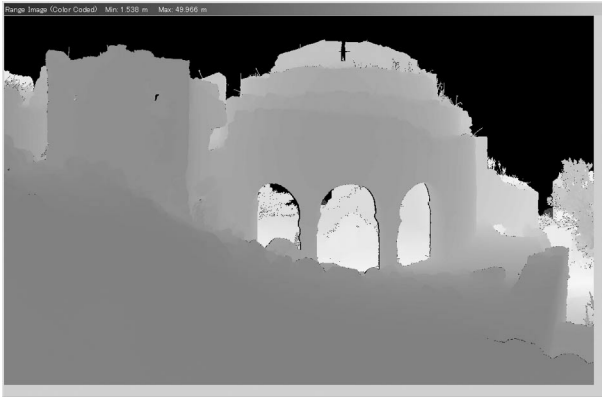


図 5: レーザー計測によって得られたデータの例

表 1: レーザースキャナ LPM-25HA の主な仕様

|            |  |
|------------|--|
| 測定距離       | 2 m - 60 m                             |
| 測定精度       | ± 8 mm                                 |
| 測定レート      | 1000 points/sec.                       |
| 測定分解能      | 1 mm                                   |
| 測定ビームサイズ   | 15 mm@10 m<br>20 mm@20 m<br>60 mm@60 m |
| レーザー波長     | 近赤外                                    |
| パン範囲 (水平)  | ±180°                                  |
| チルト範囲 (上下) | ±150°                                  |
| 位置精度       | ±0.009° (=0.01gon)                     |
| 角度位置読み取り精度 | ±0.009° (=0.01gon)                     |
| スキャン速度     | 36°/sec. (=40gon/sec.)                 |
| 寸法         | 25 cm x 30 cm x 32 cm                  |
| 重量         | 9.5 kg                                 |

た。精度に関しては、建築物全体を 3 次元モデルとして構築できるだけでなく、数センチメートル角のほぞ穴や、地震によって生じたひび割れなども計測したいとの要望が、建築史の専門家から出ている。これは、仮に成果物を縮尺 1/100 の図面とし、0.1mm の相違点を認識できると仮定すると、実物の対象物上で 1cm 間隔でスキャンする必要があることになる [6]。さらに、テクスチャ画像が取得できることも必要であった。

第三聖堂では、図 6 に示すように、計 29ヶ所にスキャナを設置した。計測した範囲は、第三聖堂全体および西側の上にある建物と東の通廊の外のチャペルである。スキャンした回数は 55 回に上る。一度のスキャンで計測した範囲は、設置場所や対象によって様々に異なる。最も大きなスキャンでは、垂直方向に約 130 度、水平方向に約 200 度くらいの範囲を 0.06gon 間隔でスキャンし、取得した点群数は 2,160,000 点、ファイルサイズは約 30MB

に上った。第三聖堂における 55 回のスキャン全体では、総点群数で 34,105,175 点、ファイルサイズにして約 47MB のデータを取得した。

スキャンのステップ数、つまり解像度は対象ごとに変えた。LPM-25HA の最大の解像度は 0.06gon 刻みである。しかし、時間の制約により、ほとんどの壁面は 0.1gon 刻みとした。なお、ステップが 0.06gon の場合、10m 先では、約 1cm 刻みとなり、ステップが 0.1gon の場合は、5m 先で約 8mm 間隔、10m 先で約 1.6cm 間隔となる。

第三聖堂のアプシスの下部のシントロノンのように残存状態のよいものについては、0.06gon のステップ間隔とした。また LPM-25HA は、5m から 7m 先でレーザービームが最も細くなるため、アプシスの場合は、アプシスの手前側とスキャナの距離がおよそ 5m になるような位置にスキャナを設置した。この場合、アプシス手前側の計測の間隔は、約 5mm 間隔となり、LPM-25HA から 7m ほど先にあたるアプシスの東端では、約 7mm 間隔となる。

第二聖堂は、島の中腹に位置するバシリカ式聖堂で、東西約 20m、南北が 10m 強の平面プランを持つ。当初は、3 次元計測の対象としていなかったが、ほぼ第 3 聖堂のデータを取得し終えたこと、第 3 聖堂での発掘調査と並行した詳細なスキャンには限界があったことから、半球状のドームがよく残る第二聖堂も 3 次元計測の対象とした。すでに調査団によって測量がなされ、平面図や立面図は作成されていたが、壁の取り付け具合いやドームのカーブの様子などが観察できるようにすることを目標とした。したがって、図 7 に示すように、アプシスの三連窓の中心に正対するような内側および外側の位置から残存状態のいい北壁、南壁、アプシスなどをスキャンするだけでなく、アプシスの南東後方の山腹より、アプシス上部や南北の壁の上部なども計測した。

第二聖堂では、5ヶ所にスキャナを設置し、7 回のスキャンを行なった。設置回数とスキャン回数が異なるのは、同じ設置場所で複数のスキャンを行なったからである。これは、一度に広範囲のスキャンをすると計測に時間がかかりすぎ、電源が落ちるなどのトラブルが生じたときに困る、対象となる部分によってスキャンの解像度を変えたい、時間を節約するために高さが極端に違う壁面の計

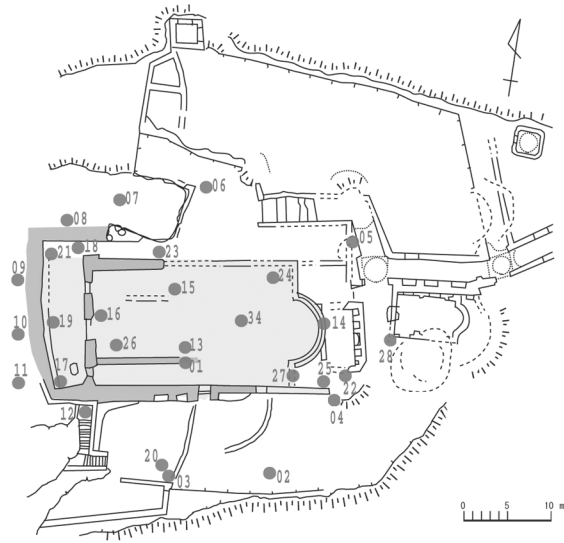


図 6: 第三聖堂でのレーザースキャナ設置場所 ([2]の図版を著者が改変)

測は分割したといった要因による。取得した点群数は 5,344,500 点，ファイルサイズは約 70MB に達した。

この他に，第三聖堂の発掘調査によって発見された建築部材のうち，アンボンと呼ばれる説教壇の部材など主なものを一カ所に集めて，3次元計測を行なった。浮彫り模様などは，今回使用したスキャナの性能および計測方法ではうまくモデル化できないことが予想されたが，このような部材の記録や活用方法についての検討資料とするために，当初の予定にはなかったものの計測を実施した。

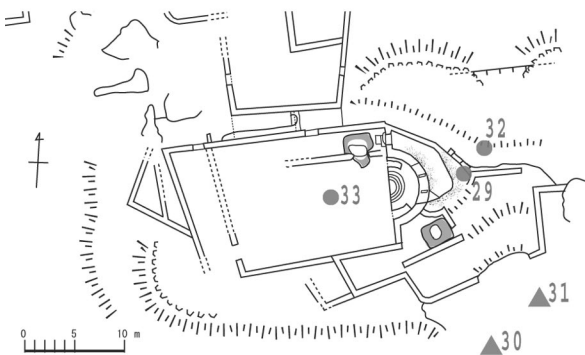


図 7: 第二聖堂でのレーザースキャナ設置場所 ([2]の図版を著者が改変)

### 3.3 トータルステーションによる測量

反射シールは，前述の通り，第二聖堂と第三聖堂周辺に合わせて 164ヶ所設置した。これらの座標をトータルステーションで測量した。座標系は，調査団が発掘調査のために各聖堂に設けた基準点を利用して設定した。すなわち，X 軸は基準点 C1 を原点とし，基準点 C2 に向かう値を正とし，Y 軸は原点において X 軸に直交する軸とし，北に向かう値を正とする。Z 軸については，島の頂上付近に設置されたポイント P29 の標高 99m から C1 の標高を求め，これを基準として測量した。

日射が強いのでうまく反射しなかったことや，現場での一日あたりの作業時間が 6 時間程度しかとれなかったため，これらの測量に 5 日間を要した。日本での一日あたりの作業量と比較すると 5 割から 7 割程度であった。その他の問題点としては，図面や簡略図に位置を記してあったが，数が多かったことと，シール設置者と測量担当者が異なっていたことなどから，同じ個所を二度測量してしまうミスがあり，全部の標定点を測量することができなかったことが挙げられる。

### 3.4 GPS による測量

遺跡の調査の場合，記録すべき重要な情報の一つに地理座標がある。対象とする遺跡がどこに存在するのか，また遺跡の中の一部分である遺構が，その遺跡の中のどこに位置するのかといった地理関係は，当該遺跡の分析に必要なだけでなく，他の遺跡との関連を明らかにするなどより大きな視点での研究に必要不可欠である。通常，遺跡の測量は，その国の公共座標に基づいた測量が行われる。測量座標系や楕円体モデルは国ごとに異なるため，同じ場所であっても，異なる座標値を持つことになる。そのため，仮に地球を 3次元モデルで表現しても，従来の調査の成果を変換しなければ，遺跡の位置をマッピングすることはできない。

そこで RTK-GPS を利用して世界測地系に基づく地理座標を取得することにした。使用した機種は，JAVAD Navigation Systems 社の Legacy-E (二周波 GPS/GLONASS 受信機) と MarAnt (二周波 GPS/GLONASS アンテナ) である。図 8 に第三聖堂での RTK-GPS による測量風景を示す。

GPS では，WGS-84 座標系という地球の重心に



図 8: RTK-GPS 計測風景



図 9: モザイクを標定点とした RTK-GPS 測量

原点をおいた座標系 (世界測地系ともいわれる) を利用している。遺跡を測量するとき、その国に固有の座標系でデータを取得するのではなく、世界測地系でデータを取得することによって、海外の遺跡を含む 3 次元可視化もより容易にできるようになる。

ただし、GPS での測量の精度は、トータルステーションに比べて落ちる。今回使用したのは、RTK-GPS であるが、X、Y 方向で  $\pm 2\text{cm}$  程度の誤差がある。これは、3 次元計測を行なった遺跡の規模に比べると無視できない大きさである。そのため、いくつかの標定点については、RTK-GPS とトータルステーションの両方で測量を行なった。共通する点での差分を元に、残りのデータの座標変換を行うためである。

RTK-GPS による測量は、反射シールを貼ったところだけでなく、床のモザイク部分に設けた標定点についても行なった。モザイクは、テッセラと呼ばれる  $1\text{cm}$  角程度の小さな色石を敷き詰めてできている。文様に特徴のあるところを選び、テッセラのできるだけ端に GPS のアンテナポールの先端を当てるようにして測量した (図 9 参照)。モザイク部分を RTK-GPS で測量したのは、モザイクの床のオルソ写真を作成するのに必要な座標値を取得するためである。前述のようにトータルステーションで測量する方が精度が高いが、今回の調査では、必要な数の測量をトータルステーションで行なうことはできなかった。RTK-GPS では、1ヶ所の測量時間が短くてすむ上に、取得する座標が WGS-84 系であるという利点を持つ。そこで、トータルステーションではなく、RTK-GPS を利用した。

RTK-GPS によって地球重心の座標系による地理座標を取得することができたため、これを利用してテクスチャ用写真の質を高める方法を考案した [7]。今回のように屋外にある遺跡の写真撮影する場合、陰影がないように撮影することは不可能である。しかし、3 次元モデルのテクスチャとして利用するには、陰影がない写真のほうが望ましい。そこで、作成した 3 次元モデルと RTK-GPS によって得られた地理座標、写真を撮影した時刻などから光源 (太陽) の位置を推定し、写真の陰影を除去する方法を提案している。

### 3.5 テクスチャ用写真撮影

3 次元計測に利用したリーグル社の LPM-25HA は、3 次元座標の取得の他に、RGB 画像を取得することができる。しかし、レーザーによる計測点の RGB 値を同時に取得するという方法であるため、計測の間隔がまばらになると、画像データも疎らになる。また単一の CCD による画像のため、画質はあまり良くない。そこで、テクスチャ用のデータとして、高精細な画像を取得ことにした。使用した機材は、シングルショットタイプのカメラバックである Kodak 社の DCS Pro Back を Hasselblad 社の 555ELD に接続し、Distagon 50mm F4 FLE レンズを装着したものである。オルソ写真を作成するために隣り合う写真どうしの重なりを 60%程

表 2: 使用したカメラの主な仕様

|                               |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Kodak DCS ProBack             |                                |
| CCD                           | 36.86 x 36.86 mm               |
| Image size                    | 4072 x 4072 pixel              |
| Lens                          | Distagon 50mm F4 FLE           |
| Body                          | Hasselblad 555ELD              |
| Nikon Coolpix885 & Coolpix995 |                                |
| CCD                           | 1/1.8-in. CCD                  |
| Image size                    | 2048 x 1536 pixels             |
| Lens                          | 3 or 4 x Zoom Nikkor; f=8-24mm |

度にしたため、撮影枚数は 1300 枚に達した。

### 3.6 簡易写真測量用写真撮影

2 章で述べたように、ゲミレル島は、島全体が遺跡になっている。また、今回 3 次元計測の対象とした第二聖堂と第三聖堂自体も他の建築遺構と連続性が認められる。これらをすべてレーザースキャナで 3 次元計測することは、現実的ではない。このように大規模な対象の場合、レーザースキャナによる 3 次元計測と写真測量を組み合わせ、3 次元モデルを作成する手法が提案されている [8]。そのための写真撮影は、Nikon 社の Coolpix885 および Coolpix995 を用いて行なった。今回は、レーザースキャナのバックアップとして位置づけ、レーザースキャナで計測したのと同じ、第二聖堂と第三聖堂を対象として写真撮影を行なった。写真撮影に使用したカメラの仕様を表 2 にまとめた。

## 4 3 次元モデルの作成

第二聖堂ならびに第三聖堂の 3 次元モデルは、レーザースキャナのデータのみから作成したものと、レーザースキャナから作成したポリゴンモデルに、写真から作成したテクスチャを貼り付けたモデルの二種類を作成した。

レーザースキャナのデータのみで作成した第二聖堂のモデルは、ポリゴン数が約 2,560,000、ファイルサイズが約 70MB である (pol 形式)。VRML 形式の場合、ファイルサイズはさらに大きくなる。第三聖堂のモデルは、点群データの量が多く、PC の性能を越えたため、取得した点群データをそのまま使用した部分と、点群データを 1/2 に間引いた部分がある。その結果、全体のモデルのポリゴン数

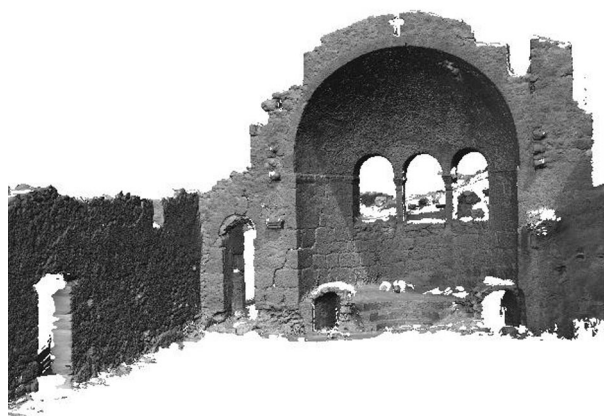


図 10: 第二聖堂の三次元モデル

は、約 6,300,000、ファイルサイズは約 174MB となった。それぞれ作成したモデルのスナップショットを図 10, 11 に示す。

図 12 は、図 11 に示す 3 次元モデルに、写真から作成したテクスチャデータを加えたものである。スキャナの RGB 画像を使用するよりも、質感が向上しているのがわかる。

## 5 おわりに

レーザースキャナを使用して、ビザンティン時代の聖堂跡の 3 次元計測を行なった事例について報告した。RTK-GPS による測量も行ない、世界測地系の一つである WGS-84 座標系に基づく地理座標の取得も行なった。形状データだけでなく、地理データも取得することで、作成した 3 次元モデルを利用するときに、3 次元 GIS へ応用したり、検索や情報提供を地理データに基づいて行なうことが可能となり、デジタルアーカイブの有効な利用方法の一つとなる可能性を秘めている。

多目的利用可能なデジタルアーカイブの構築方法の研究は緒についたばかりである。今回の 3 次元計測ならびにモデル作成を通して、できあがった 3 次元モデルだけをアーカイブしていたのでは、研究や保存、展示や学習教材といった異なる目的に使用するのは困難であることがわかってきた。たとえば、3 次元モデルを作成するマシンやそれを閲覧、操作するマシンの性能によっては、収集した



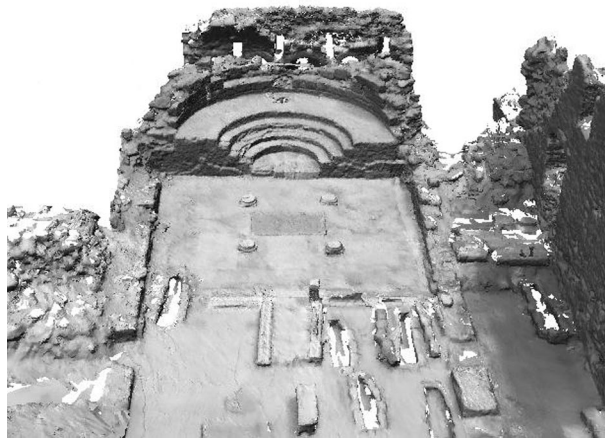


図 11: 第三聖堂の3次元モデル: 西壁(上), アプスとベーマ(下)

データあるいは作成したデータそのままを扱うことができない。利用者の環境および目的に応じた情報提供のありかたを考える必要がある。そのためには、計測した生データもデジタルアーカイブに含め、そのデータから必要に応じて詳細度の異なる3次元モデルが作成できるような仕組みを考えなければならない。そのためには、どのようなメタデータが付与されるべきか。どのようなデータがアーカイブされるべきか。今後このような課題にも取り組んでいきたい。

また、作成した3次元モデルを閲覧するシステムも開発中である。このシステムの特徴は、3次元モデルだけでなく、画像データベースも備えており、ゲミレル島遺跡に関する写真を検索することができる点である。このシステムについても、機

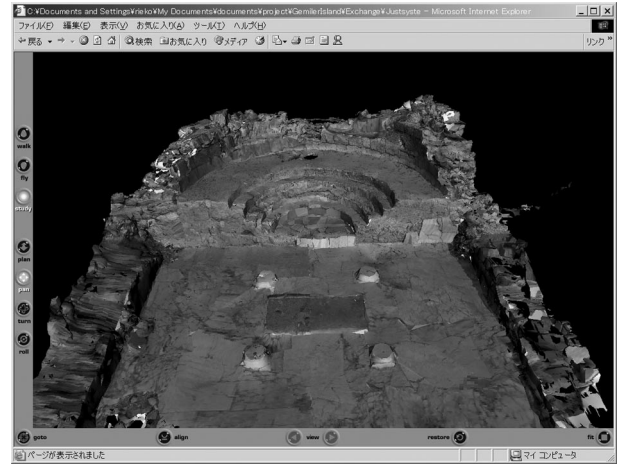


図 12: 第三聖堂の三次元モデル: 写真をテクスチャとして使用したもの

能やデータを充実させ、機会を改めて報告したい。

## 謝辞

リキア地方ビザンティン遺跡調査団には、本研究を行なうにあたり、ゲミレル島での計測作業も含め全般にわたる多大な支援を頂き、数々の資料を提供して頂いた。ここに深謝の意を表す。また、現地でのデータ収集などに協力して頂いた通信総合研究所の河合由起子研究員、官上大輔研究員、古川亮研究員、善本淳研究員に感謝する。

## 参考文献

- [1] Proc. of International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording - Complementing or Replacing Photogrammetry, ISPRS (2002).
- [2] 辻 成史編: The Survey of Early Byzantine Sites in ölüdeniz Area (Lycia, Turkey), 大阪大学文学部紀要, 第 35 巻 (1995).
- [3] リキア地方ビザンティン遺跡調査団編: 聖ニコラオスの島—ゲミレル島(トルコ地中海岸)の発掘調査—(1998).
- [4] 浅野 和生編: 東地中海の港湾都市遺跡の総合的研究, 平成 11 年度～平成 13 年度科学研究費補助金 基盤研究 (A)(2) 研究成果報告書, 課題番号 11691017 (2002).
- [5] <http://www.jttk.zaq.ne.jp/sfuku239/lycia/>
- [6] 福永 伸哉編: 文化財のデジタルコンテンツ化とその応用に関する研究, 平成 14 年度受託研究報告書 (2003).
- [7] Furukawa, R., Kikuchi, Y., and Kadobayashi, R.: Removal of Shadows and Shadings from Texture Images for Archiving Historical Ruins, Proc. of International Workshop on Vision Techniques For Digital Architectural And Archaeological Archives, ISPRS WG V/4 and IC WG III/V (to appear).
- [8] El-Hakim, S.: 3D modeling of complex environments, SPIE Proc. vol. 4309, Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement (2001).