

# イドゥートのマスタバにおける 修復・保全のための3次元計測に基づいた情報共有

安室 喜弘<sup>\*\*\*</sup> 吹田 浩<sup>\*\*\*\*</sup>

## Application of 3D Documentation Data for Conservation of Mastaba Idout

Yoshihiro YASUMURO<sup>\*\*\*</sup> Hiroshi SUITA<sup>\*\*\*\*</sup>

### 1 はじめに

#### 1.1 背景

文化財修復プロジェクトでは現場での調査や修復作業を行うにあたり、多様な専門分野間での連携が不可欠である。関西大学CHC (Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture: 国際文化財・文化研究センター) では古代エジプトの文化財を主な対象として、保存や修復、保全や活用の方法について研究を行っている。このプロジェクトの主要な活動の一つである日本・エジプト合同マスタバ・イドゥート調査ミッションでは、エジプトのサッカラ地方にあるイドゥートのマスタバ墓を対象現場としている。イドゥートのマスタバ墓は、歴史的遺産として著名であるだけでなく、地下の埋葬室で発見された壁画（紀元前2360年頃）は、芸術的価値においても注目を集めており、その劣化分析や修復技術開発、現場の地盤強化から保全計画、学術情報の蓄積と公開などについて、エジプト学者や現代エジプト社会の他、文化財修復、人文学、地盤・建築工学、分析化学、微生物学、高分子化学、情報工学などの研究者が、日本、エジプト、ポーランドから参加し進められている[吹田 2010]。しかしながら、専門分野や国籍を跨いだ横断的な連携を日常的に継続することは難しく、また昨今の現地および周辺での情勢不安も重なり、円滑な議論や調査・研究情報の共有の持続的な取り組み方が模索されている。また、世

界的に貴重な文化遺産が、政治不安による暴動や組織的暴力の脅威に晒されている現実もあり、政治的解決が望まれる一方で、現場保全や調査記録アーカイブの重要性が益々高まっている。

#### 1.2 文化財への3次元計測データの活用

近年では文化財の保護、復元、記録といった分野での3次元計測やモデリング技術の活用が一般化している。たとえば、Netoらによる Monserrate Palace in Sintra の没入型文化体験アプリケーション [Brutto 2012] や Ruggieroらによる Santa Maria Patirion's Church のプロジェクト [Joo Nuno and Maria Joo 2012] では、文化財の理解を助けるための仕組みとして、ユーザがガイダンスを受けながら文化財の3次元モデル内を探索することのできるインタラクティブなアプリケーションが開発されている。情報管理の面で3次元モデルを活用している例としては、バイオン寺院のデジタルアーカイブプロジェクトが挙げられ、岡本らは遺跡の劣化状況や修復状況を管理するために、3次元モデルの特徴的な形状をもつ箇所に関連情報を割付けて蓄積を図れるシステムを提案している[岡本他 2002]。3次元形状の特徴の類似性を判断する処理により、半自動的に関心領域の選択と割付を行うことができる機能を備えている。これらは、プロジェクトの成果報告としての情報公開や提示の目的が想定されており、対象物の記録、分析、整理における3次元データの活用

\* 関西大学国際文化財・文化研究センター (Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture, Kansai University, Japan)

\*\* 関西大学環境都市工学部 (Faculty of Environmental and Civil Engineering, Kansai University, Japan)

\*\*\* 関西大学文学部 (Faculty of Letters, Kansai University, Japan)

例であるが、進行中のプロジェクトにおける情報マネジメントとしての利用を狙ったシステムや方法論は稀有である。

また、アメリカの非営利団体 CyArk<sup>1)</sup> は 3 次元レーザスキャンや写真測量を用いて、世界各地で 200 か所もの遺跡を記録している (Fig. 1 左)。アメリカの Smithsonian 博物館<sup>2)</sup> や池内らよるバイヨン寺院の 3 次元デジタルアーカイブなどのように、保全修復だけでなく、3 次元計測データが教育や研究で活用されている [池内・大石 2010]。これらのシステムはプロジェクトの成果報告や、その情報公開を想定したものが多し。近年、AR (Augmented Reality: 拡張現実) と呼ばれる技術の利用が普及している。AR は現実世界に関連づけて付加情報を重ねて表示し、視覚的に情報を強化する映像提示技術で、文化財においても対象となる物体に視覚的な情報を提供するサービスが展開されている。兵庫県の姫路城では敷地内での WiFi 設備を充実させ AR ツアー用アプリケーション<sup>3)</sup> を提供して、来訪者が自分の携帯電話を用いて、城内の各地に関連する情報や再現映像などを実物を背景に確認できるサービスを提供している (Fig. 1 右)。Google はデプスカメラを搭載した新しいハードウェア構成の携帯端末を用いた AR 技術 Tango<sup>4)</sup> を用いて、博物館での展示支援を提案している。一般市民向けに 3 次元データを用いた新しいメディアの利用方法として広がりを見せている。

### 1.3 本研究の取り組み方針

筆者らはインターネットを介してアクセスできる仮想的な 3 次元の現場空間を構築し、仮想空間内の各地点やモノに関連付けて情報の蓄積を可能にし、

持続的かつ非同期な情報共有を行えるウェブアプリケーションを開発してきた [安室他 2013]。現場をそのまま複製した 3 次元仮想空間を媒体とすることにより、異分野・異文化間での取り組みや情報のやり取りを円滑化し、またウェブアプリケーションで実装することにより、ウェブブラウザだけで協働環境が整うことを目指している。本稿では、このデジタルアーカイブシステムの基本的な枠組みの構成方法と、3 次元データを介して進行中の作業や議論を支援する技術的な方法論についての検討を報告するとともに、現場志向のケーススタディを踏まえて有効性について検討する。

## 2 イドウトのマスタバにおけるデジタルアーカイブシステム

### 2.1 アーカイブシステムの構成

アーカイブとは、元来、古文書・記録文書類または公文書の保管所、公文書館の意味であり、言い換えると、公共性や文化的な価値が高く、将来にわたって保存する価値のある資料を記録し、保存することである。デジタルアーカイブとは、デジタル技術で作成されたアーカイブという意味の造語であり、有形無形の歴史・文化資産などを、デジタル方式で記録し、データベース技術を用いて保存、蓄積し、ネットワーク技術を用いて活用することである。デジタルデータは、文字、図表・画像・映像・音声などのアナログデータを統合して扱うことができ、保存や複製しても劣化しないこと、ネットワーク技術を使って、情報の発信や共有も容易になることが挙げられる。現在では、公文書館や博物館、美術館な

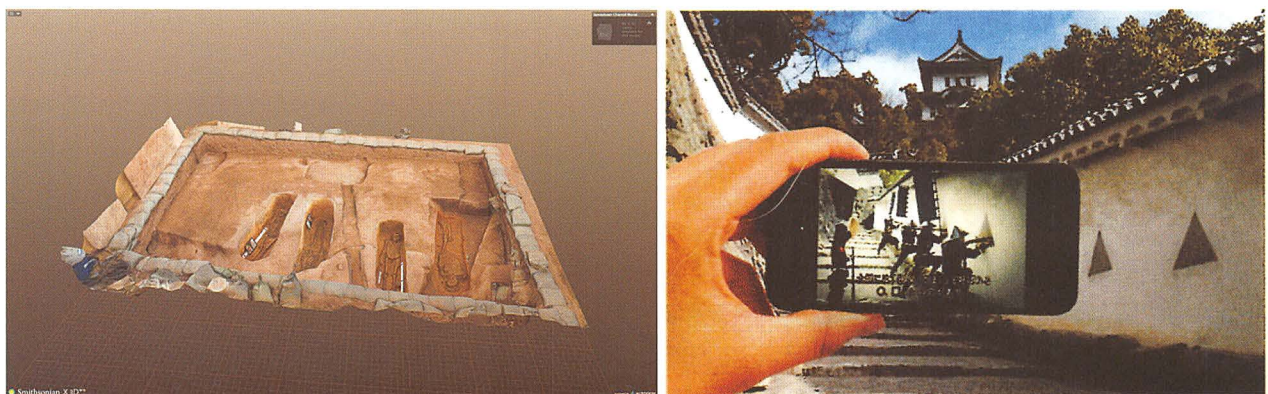


Fig. 1 CyArk により公開されている 3 次元データ (左)<sup>1)</sup> と姫路城に AR を用いたサービスの例<sup>3)</sup> :

1) CyArk : <http://www.cyark.org/>

2) Smithsonian X 3D : <http://3d.si.edu/>

3) 広報ひめじ 2015 No.1033 5. および <http://castle-himeji.com>

4) GOOGLE AR AND VR Explore museums in a new way with Tango

: <https://blog.google/products/google-vr/explore-museums-new-way-tango/>

どで、収蔵物のデジタルアーカイブが構築されることが多くなり、また地域の文化資源のデジタルアーカイブ化もすすめられている。これらのなかには、インターネットでの検索や参照ができるものも多い。画像や動画・テキスト・音声など様々な形式のデータが公開されており、先述のスミソニアン博物館のウェブサイトで公開されている収蔵品の3Dデータ<sup>2)</sup>や、池内らによるバイオン寺院の3次元デジタルアーカイブのようにでは、大型の有形文化財である遺跡全体が3Dデータ化されているものもある<sup>3)</sup>。ただし、データ共有や作業対象としてのアーカイブではなく、公開用の1つの形態として注目されているものである。

一方、CSCW (Computer Supported Cooperative Work) と呼ばれるコンピュータ支援による協同作業を研究する学術分野では、コンピュータ同士を接続したネットワーク環境をベースに、複数の人間が相互にコミュニケーション、情報共有を行い、それぞれの役割を果たすことで共通の目的を達成するための仕組みというコンセプトで、古くは1960年代から研究が進められている<sup>5)</sup>。グループウェアは、その応用と見ることができ、Computer-Supportedの部分で協調作業のコンピュータによる支援、すなわちグループウェアなどシステム自体に関する研究分野である。具体的には、継続的なミーティング支援のために記録・蓄積・検索・共有を行うシステムなどが提案されている[石戸谷他 2012]。この他にも、オンラインゲームで用いられている共有仮想空間の手法を活用して、遠隔地の多数のユーザによるコミュニケーション環境を実現するためのフレームワーク[松田他 2007]や、プロジェクトとカメラによって、現実世界にインタラクティブ可能な表示領域を構築し、協調作業に活用する研究[進来他 2011]が行われている。Cooperative Workはグループウェアを含む情報通信技術が及ぼす社会的影響、心理学的影響を分析・研究する協調作業に関する分野である。アンケート調査によるグループウェアを利用したグループ活動における態度・意識の分析[中尾他 2002]、遠隔地間でのリアルタイムによる協同編集作業場面において、顔画像を付加したインタフェースが作業に及ぼす影響についての研究例[石川 2004]がある。

また、建築・建設の産業分野においては、対象とする建造物のライフサイクルを考慮して設計から施

工、運用、管理までの情報を集中的に扱える情報モデルとしてBIM (building information modeling) やCIM (construction information modeling) が提唱されており、日本では国土交通省が建設現場の生産性向上に向けて情報化を前提とした新基準として導入している「i-Construction」においてもICT活用基盤技術の1つである<sup>6)</sup>。BIMは仮想の3次元建物データを生成し、設計・確認・施工までこれを参照する。3次元のモデルデータは可視化に優れ、施主から設計関係者、意匠関係者まで内容をスムーズに共有できることが最大のメリットとなっており、生産性の向上につながっている。従前の3次元CADなどに対してBIMは、3次元情報に加え建物を構成する部材それぞれに属性情報を付与したデータベースとなっていることが優れた点である。これにより材質やメーカー情報、床面積といった情報の閲覧性が向上し、解析ソフトの入力データとなって、構造解析やウォークスルーによる閲覧、風の流体シミュレーションなどが行えるようになった。このようにモデルデータと対象物の情報を可視化することにより、壁面や土台の材料を扱う建築の素人から設計を担当する専門家にいたるまで様々な業者が繋がり、それぞれに応じてBIMを通じて必要な情報が提供されることで、建築業における判断基準、品質、コスト、工期、安全、環境を大きく改善することが可能となった[家入 2012]。

本研究では、調査・研究情報の共有・更新を可能にし、調査現場の公開を行うために、3次元の仮想空間を用いた調査現場の再現、空間内の任意領域への情報の関連付け、利用者に合わせた情報・機能を提供するシステムを提案する。文化財に関するinformation modelingのソフトウェアシステム開発とも言える。3次元空間に視覚的に再現された対象物を介して情報を管理することで、付随する情報の直感的な検索を可能にする。また、利用目的に合わせて、閲覧できる情報、利用できる機能を切り替えることで、プロジェクトでの利用にとどまらず、遺構の紹介やプロジェクトの活動報告といった一般向けの情報公開にも利用することが可能である。Fig. 2に示すように、提案するシステムは、3次元モデル、データベース、ウェブアプリケーションという3要素を組み合わせることで実現する。具体的には、クライアントサイドのブラウザ上に3次元の仮想空間を構築し、3次元モデルを表示させる。こ

5) 電子情報通信学会：知識データベース、電子情報通信学会、2010.

6) 国土交通省 HP：http://www.mlit.go.jp/common/001137123.pdf



の3次元仮想空間においてユーザの操作を受け付け、情報の関連付けられた領域が指定された時に、クライアントからサーバーへ情報の検索・更新といった要求を送信する。サーバー側では、受け取った要求の内容をもとにSQL (structured query language) 文を生成し、データベースの検索・更新を行い、結果を再度クライアントへ返し、ブラウザに表示させる仕組みである (Fig. 2)。

HTML5の規格に準じたAPI (application programming interface) であるWebGL<sup>7)</sup>を用いることで、ウェブブラウザさえあれば、特定のソフトウェアをインストールする必要もなく、3次元のCGを表示でき、現場の立体的な様子や風景、状況を一人称視点によって自由に閲覧可能となる。さらに、表示された現場の各領域に関連付けた情報の閲覧、追加を行う機能と、ユーザに合わせた機能・情報の切り替えを実装することにより、一般向けの情

報公開から、専門家の情報閲覧、さらに当該研究プロジェクトメンバによる情報の更新・管理を単体のシステムによって実現できる。

## 2.2 3次元計測の実施

現地での3次元計測は2010年から8年間にわたり実施された。2010年度は、マスタバ全体の外形の取得を目的とし、長距離の計測が可能な屋外用レーザスキャナを主に使用し、マスタバの外周、地上部分の内部壁面、および埋葬室の壁面を計測した。2011～2012年度は、主に屋内用レーザスキャナを使用した (Fig. 3)。屋外用構造物や地形の3次元計測に用いられるレーザスキャナは、パルスレーザによる飛行時間 (TOF; time-of-flight) 方式を用いたものが多いが、本プロジェクトにおいても同方式のスキャナLMS Z420i (リーグル社製) を用いて計測を行った。本機は、クラス1の近赤外レーザパルス (波長

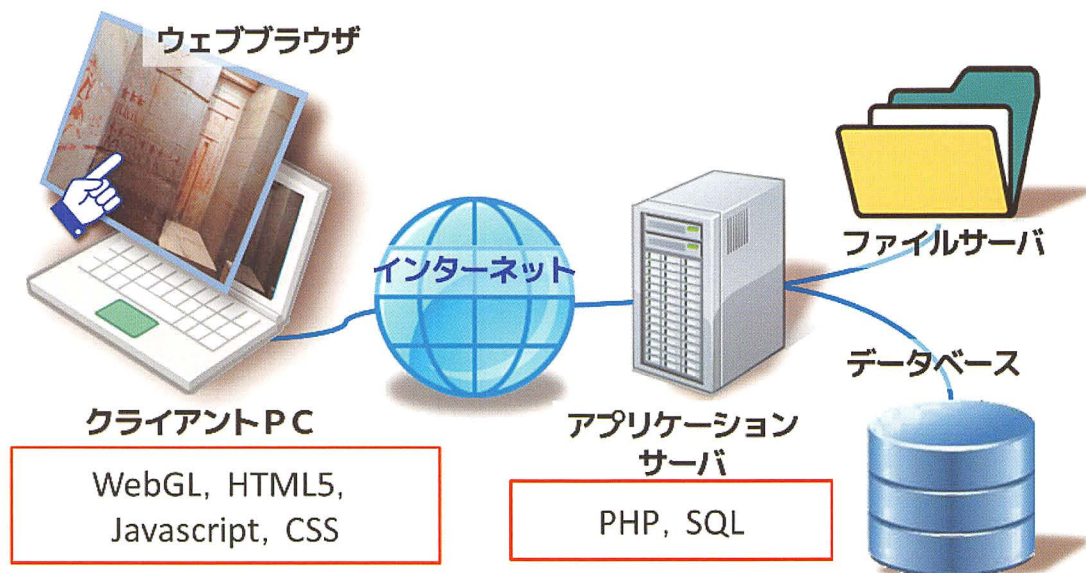


Fig. 2 システム構成の概略

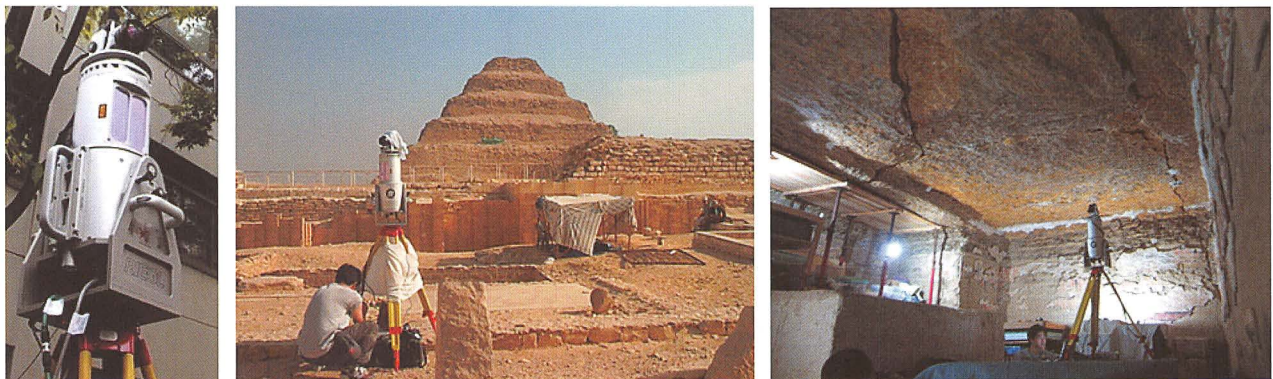


Fig. 3 屋外用レーザスキャナ (Riegl社 LMS-Z420i: 左) と外部計測 (中央) および内部の計測 (右)

7) WebGL: <http://www.khronos.org/webgl/> (2018.1.28. アクセス).



0.9 μ m) を用い、最長約1,000m (反射率80%の対象) までの計測対象までの距離に対し、測定分解能4 mm、角度ステップ幅0.008°で水平360°、垂直80°のスキヤニング性能をもつ。ホストコンピュータからスキヤナ本体を制御し、リアルタイムにスキヤンデータをコンピュータの外部記憶に格納する。スキヤナの位置決めと設置、後述のマーカ設置、マーカのスキヤンと水平分解能0.1°の詳細なスキヤン、およびデジタルカメラによるパノラマ撮影を1セットの計測とした。約5～6時間の調査において、約8回までのスキヤンが可能であった。マスタバの地上部分内壁のレリーフについては、特徴的な部分に焦点をあて、劣化やレリーフの保存状態を詳細に計測した。使用したレーザスキヤナはNextEngine HD Pro (NextEngine 製) であり、精度の仕様を Table 1 に示す (Fig.4)。地下の埋葬室へ通じる立坑 (シャフト) の内壁形状の計測については、狭隘な空間が垂直に9mほど続いたため、既存のレーザスキヤナによる3次元計測装置が奏功せず、2012年度以降、いくつかの代替機材による試行を繰り返すこととなった。結果的に2017年度に実施し小型広角カメラによる写真撮影を使った写真測量にもとづく3次元データ取得により計測を完了した。小型広角カメラ GoPro

Hero 6 (4000x3000画素、焦点距離3 mm) により撮影した1194枚の写真を使用し写真測量ソフト Pix 4 D mapper (Pix 4 D 社) により SfM (Structure from Motion) [Hartley and Zisserman 2004] 処理を実施して、3次元形状を復元した。(Fig. 5、Fig. 6)

(1) 計測結果

レーザスキヤナによる計測データは、スキヤナ本体から水平・垂直方向に角度を変えて照射されたレーザの各方向に対する物体表面の点の距離の集合として得られ、通常点群 (point cloud) データと呼ばれる。本スキヤナには、予め校正された高解像度のデジタル1眼カメラ (Canon D80) も装備しており、点群データの各点に対して、デジタル写真からカラー情報を割りつけて記録することも可能である。また、水平・垂直方向ともにスキヤン範囲の広い本機ではあるが、建造物の周囲を計測する場合や、構造上の配置により物陰になる部分は、一度には計測できない。したがって、スキヤナの位置を変えながら、未計測の部位を新たにスキヤンし、スキヤン済みの部位のデータと統合することによって、全周の形状や、入り組んだ構造をデータ化することができる。2010年度8月～9月の計測においては、イドゥート

Table 1 NextEngine HD Pro仕様 (NextEngine 製)

	Macro モード	Wide モード	Extended モード
焦点距離	241.3mm	635.0mm	635.0mm
スキヤン範囲	190.5 - 292.1mm	558.8 - 711.2mm	558.8 - 1016.0mm
スキヤンエリア	96.5×129.5mm	256.4×342.9mm	431.8×584.2mm
精 度	±0.1mm	±0.3mm	±0.3mm 以上



Fig. 4 屋内用レーザスキヤナ (NextEngine: 左) と対象壁面 (左下) および計測の様子 (右)



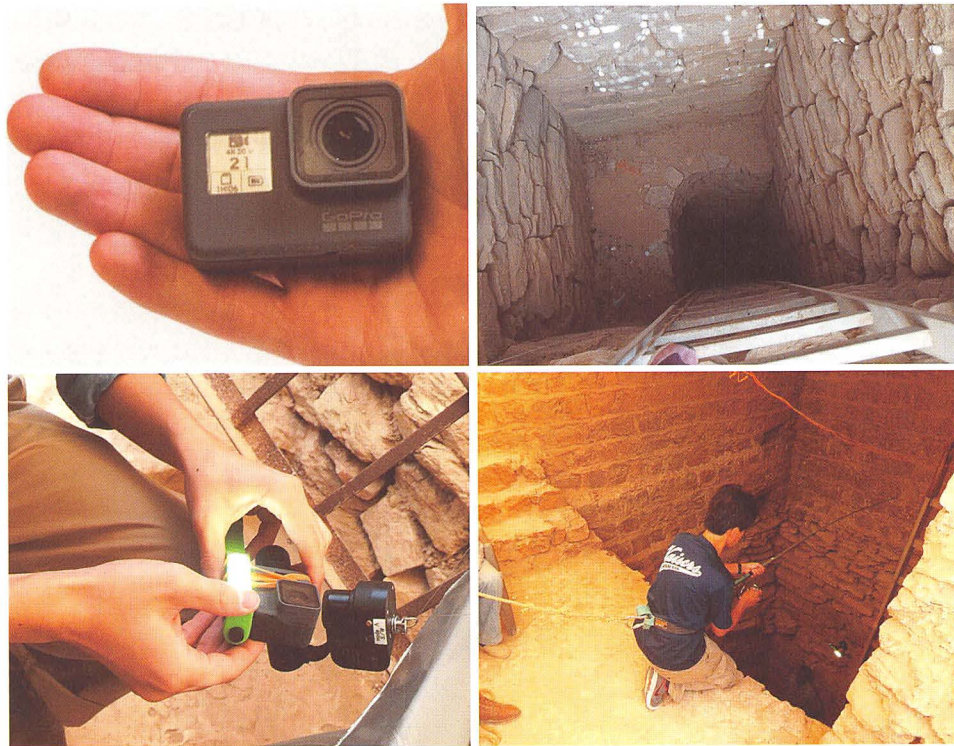


Fig. 5 立坑の計測：カメラ（GoPro Hero 6：左列）と釣竿による吊下撮影の様子（右）

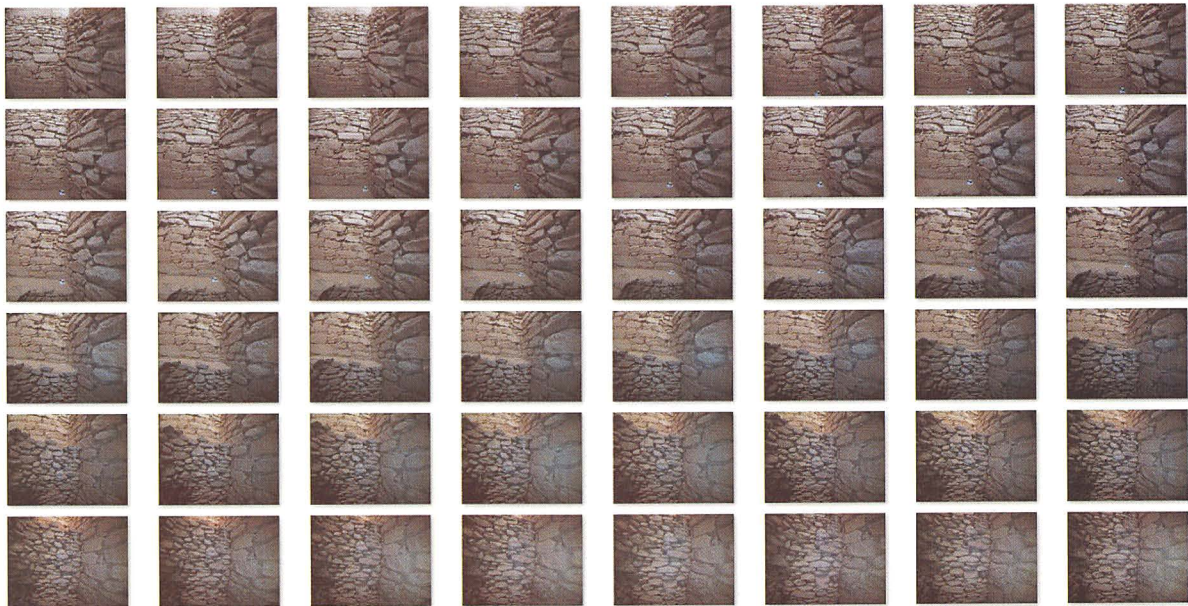


Fig. 6 撮影された立坑内壁の写真群の例

のmastabaを包含する外周の計測に28箇所、mastabaの地上部分の内壁の計測に34箇所、地下の埋葬室内部の計測に6箇所の異なる視点にスキャナを設置し、順次計測を行った。(Fig. 7) 尚、点群データ間で座標を一致させる座標変換を求めて、統一した座標系で点群を表現することが、データ統合には必要となる。本プロジェクトでは、異なる視点で共通して見通せる位置に、反射マーカ（φ50mm×長さ50mm）をランドマークとして4個以上設置し、座標変換を求めるためのリファレンスとして利用した。

## (2) 3次元モデルの作成

3次元モデルの作成には、3次元CG作成用のモデリングおよびレンダリングが可能なオープンソースのフリーウェアBlenderを用いた。Blenderはアニメーション、コンポジット機能など、商用ソフトに匹敵する機能をもつ。点群データを用いた一般的な3次元形状モデリングの手法には、ドローン三角網などを用いた自動メッシュ化の方法が種々あるが、高密度の点群データからは膨大なメッシュ数のモデルが生成されてしまうこともあり、後述するように、



ネットワークを介して軽快に表示させる用途には不向きと判断し、最初から少ない個数のポリゴンで対象物を再現するモデルを作成することとした。本研究では、図3に示すようにBlenderにインポートして表示させた点群データに合わせて手動でポリゴンを配置してモデリングを行った。この方法により、マスタバの外壁および内壁の正確なスケールの形状を、限られたポリゴン数で再現することが出来た。

作成したモデルに対する色情報の付与には、UVマップによるテクスチャマッピングの方法を利用する。精細なデジタル写真による画像を正規化された2次元U-V座標に変換し、一方、被写体の3次元モデルを同じ2次元座標平面に展開することで3次元の各頂点と画像の色情報（テクスチャ）とを対応付けする。2次元座標上に対応付けられたモデルの頂点と辺を描画した図をUVマップという。Fig.8(a)のように展開されるマスタバの1室の内壁形状（Fig.8(c)）に対して、Fig.8(a)の画像を対応付けすることで、Fig.8(d)のようにテクスチャマッピングを行うことが出来る。展開図に対応した画像を用意するためには、対象とする壁面の連続的な画像が必要になる。しかし、構造物の限られた内部空間では、デジタルカメラで壁面を一度に撮影するこ

とが難しいため、複数の写真を繋ぎ合わせるという作業が必要である。この時、画像間の明るさ・色合い・彩度の違いを整合させながら繋ぎ合わせる作業を手動で行った。このようにテクスチャ画像を作成する一連の流れをFig.9に示し、作成したマスタバ上部構造の内部と外部が一体となったモデルをFig.10に示す。

同様の処理によってモデル化された埋葬室を表示した例をFig.11に示す。筆者が計測を実施した2010年度当初は、すでに当該プロジェクトによる壁画修復作業が現地にて進行しており、当時の壁面の様子が再現され、床面はシートで保護され他の機材が置かれていたためモデルからは除外してある。

一方、立坑については、レーザスキャナではなくSfMによる写真からの3次元復元技術を使って3次元データを得た（Fig.12）。使用したソフトウェアPix 4 Dmapper（Pix 4 D社）は、SfM本来の処理である被写体の3次元点群生成とカメラ撮影位置の推定のほか、推定されたカメラ位置情報を使った高密度の点群生成と3次元メッシュデータの生成機能も備わっており、これにより、98万ポリゴン（48万頂点）の3次元メッシュデータを得た。その際に、メッシュには入力写真のカラー情報からテクスチャも

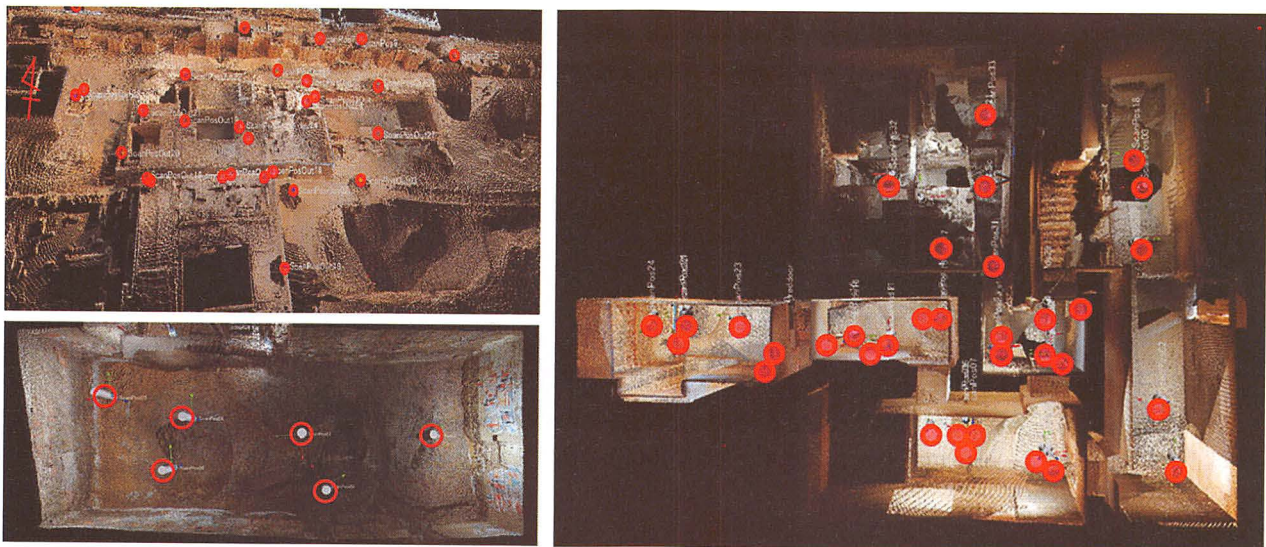


Fig. 7 形状計測の結果：マスタバ外部（左）、内部（中央）、地下石室（右）の3次元点群表示と観測点

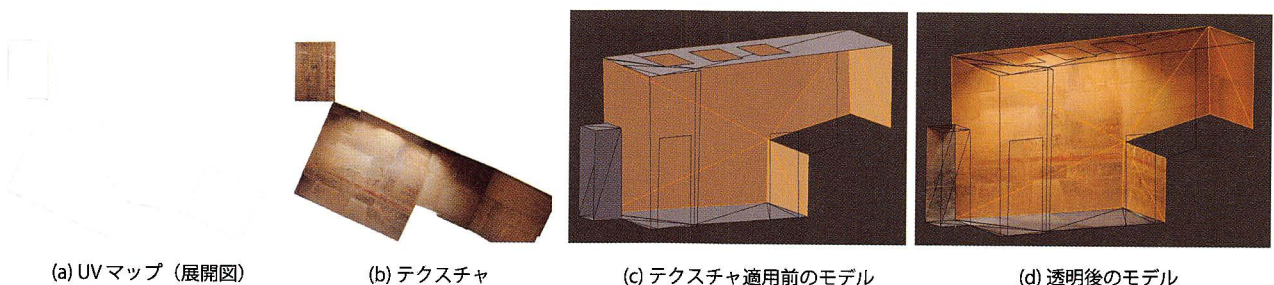


Fig. 8 UVマップとテクスチャマッピングの例



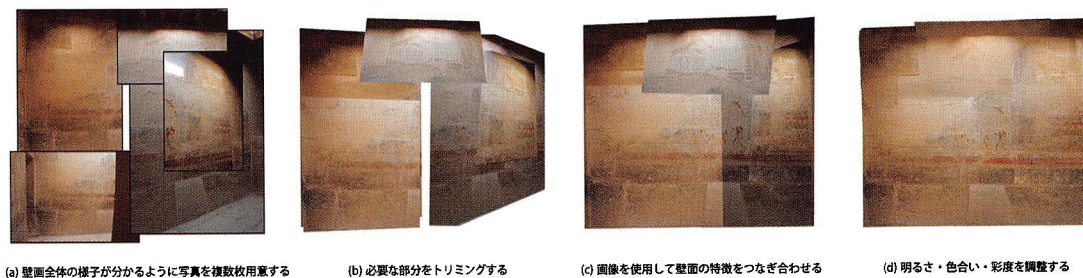


Fig. 9 1つの壁面に対して、複数の写真からテクスチャを作成する手順

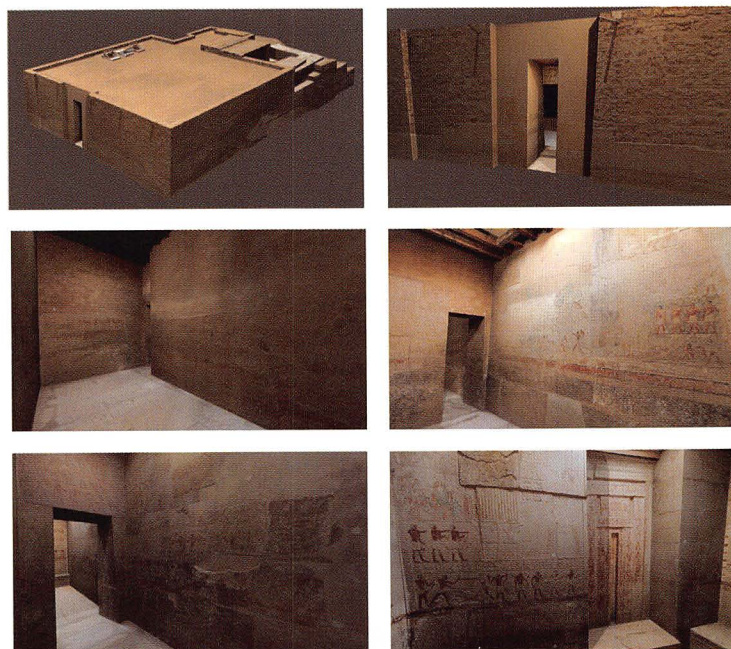


Fig. 10 作成された3次元モデルにより閲覧できるマスタバ内部の様子

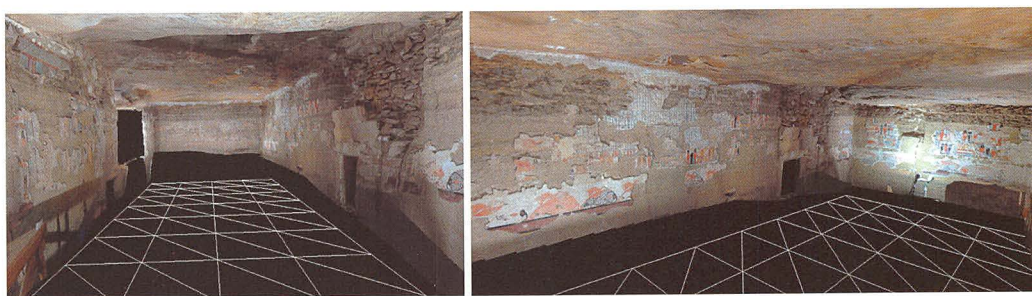


Fig. 11 作成された3次元モデルにより閲覧できる埋葬室内部の様子

マッピングされており、3次元モデルとしては申し分ないデータが得られた。

### 3 システムの実装

#### 3.1 データベースの設計

データベースには、ユーザによってアップロードされたデータファイルに関するメタ情報（投稿者氏名、投稿日時、閲覧対象とするユーザ等）を管理す

るテーブルと、ユーザが閲覧する3次元空間内に設けられた特定の領域情報を管理するテーブルを用意する（Fig. 13）。この2つのテーブル間で識別番号を共有することで、3次元空間内の特定の場所やオブジェクトを紐づけて関連する研究情報の検索やポップアップ表示を可能にする。

また、アップロードされたデータファイル自体の保存方法としては、OSのファイルシステムへ格納する他、バイナリデータに変換して、データベースに直接格納するという選択肢がある。ファイルシス



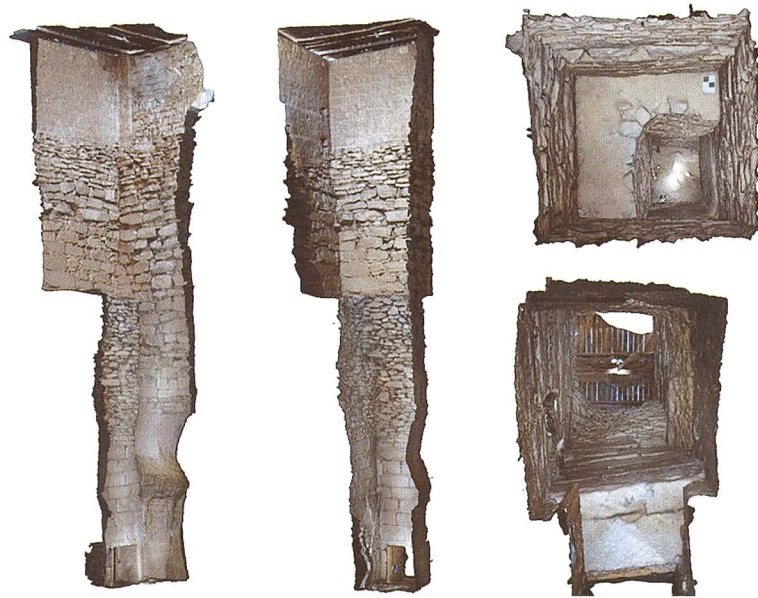


Fig. 12 SfMにより生成された立坑の内壁の3次元データ

テムへ格納する方法では、データベース自体の容量を抑えることが出来るため、格納するデータファイルの容量によらず、比較的高速なデータベースの検索が可能である。一方、バイナリデータ化してデータベースへ格納する方法には、データファイルをメタ情報と同様に管理できるため環境の移行やバックアップを楽に行えるという長所がある。本研究においては、現場での調査情報あるいは研究情報として、テキストファイルの他に画像、動画、音声といったメディアファイルを扱うことを考慮する必要があり、特に動画ファイルに関しては1MBを超えるものが多い。このような大容量のデータを扱う場合にはファイルシステムへの格納が推奨されているため [Sears *et al.* 2006]、本研究でもこれに従い、データファイルはOSのファイルシステムへ格納し、データベースのメタ情報管理テーブルでファイルの格納場所を示すパスを管理する。

### 3.2 マウスピッキング

Fig. 14 に示すように、3次元CGには、仮想カメラの視野角、アスペクト、前方クリップ面、後方クリップ面により定義される視体積の空間に含まれるものが描画される。この視体積に含まれるオブジェクトやその表面を、2次元のディスプレイ上で指し示すためには、マウスピッキングという手法を用いる。マウスピッキングは、3次元CGやそのアプリケーションの実装では一般的な技術であり多くのCG用プログラミングAPIにも実装されているが、WebGLでもThree.jsというJavascriptのラッパーライブラリでサポートされている。マウスピッキン

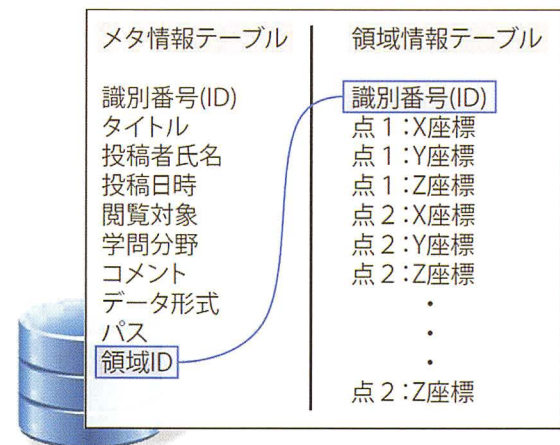


Fig. 13 データベースのリレーション構成

グはRay (光線) という概念を用いて実現されている。Fig.14 (左) に示すように、ディスプレイの2次元座標上の点を、CG描画用の仮想カメラの前方クリップ面から後方クリップ面まで伸ばしたものがRayである。Rayと3次元オブジェクトとの交点を求めることで、2次元ディスプレイ上で指示した物体やその表面の3次元座標の指定を可能にする。ウェブブラウザに表示された3次元仮想空間の中で、映し出されたシーンの物体に、マウスによって積極的に3次元操作を行うための仕組みとして重要なポイントとなる。

### 3.3 ユーザ選択

システムのユーザとして「プロジェクトメンバー」「一般利用者」「プロジェクト外の専門家」の3タイプを定義し、システム起動時にユーザに選択させるものとした。クライアントのブラウザにおいて、



HTML ファイルに記述された DOM (Document Object Model) 要素が全て読み込まれた時に呼び出される Javascript の ready () メソッドを用いて、システム起動時にユーザタイプを指定するためのダイアログをポップアップさせた。この時、ready () メソッドの記述には jQuery を利用した省略形を、ダイアログのポップアップには GitHub で公開されている複数の選択肢を選択可能な con\_rm box 21 を利用している。Fig.15 にシステム起動時のユーザ選択画面を示す。

情報の閲覧に関しては、ユーザタイプによって優先順位を設け、情報の閲覧性を制御する。これはデータベースの検索に利用者情報の属性を加えることで実現できる。また、機能の切り替えに関しては各機能を利用するためのボタン (HTML の DOM 要素) の表示・非表示を利用者タイプに合わせて切り替えることで実現する。一例として、プロジェクトメンバーに対しては新しい任意領域の追加機能や情報の投稿機能、一般利用者に対してはツアーガイド機能の提供などが考えられる。これにより、本システム単体で、観光用の仮想ツアーガイドシステムや研究公開用ポータル、プロジェクトメンバ

一間のコミュニケーションツールといった役割を併せもつことができる。

Fig. 14 (右) に示すようにモデル上の特定の領域 (ROI; region of interest) の選択により、関連付けられた情報のポップアップを表示させる。この機能を実現するために、システム開始時に、データベースの ROI 情報テーブルから、利用者タイプ別に対応した情報を持つ ROI を検索し、仮想空間上で 3 次元モデルに重ねて描画する。この ROI が選択された時に、クライアント側で ROI の持つ識別番号を取り出し、サーバーへ送信する。これを受けて、アプリケーションサーバでは、受け取った識別番号とユーザタイプを用いて動的に生成した SQL 文による、メタ情報テーブルの検索を行う。検索の結果をクライアントへ返すことで、利用者へ合った情報のポップアップを表示することが出来る。新たに情報を追加する場合にも、ROI の選択をトリガーとして、情報の入力フォームをポップアップさせる。このフォームでデータファイルのアップロード、メタ情報の入力を受け付け、選択された ROI の識別番号を加えて、サーバーへ送信する。この場合でも、アプリケーションサーバで受け取った情報を用いて動的に SQL 文

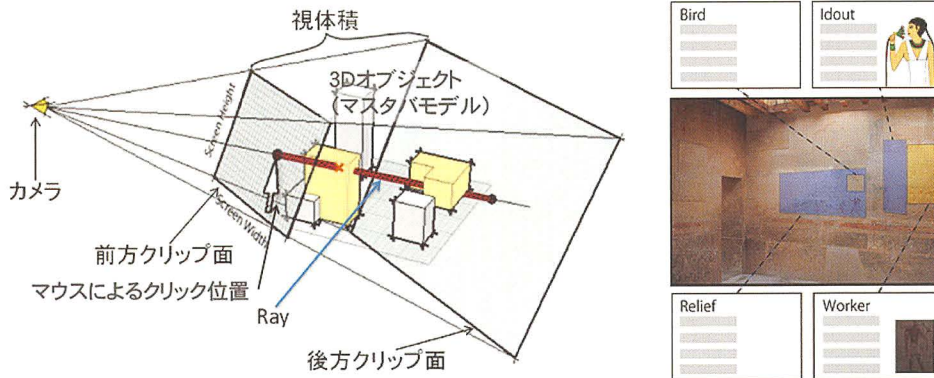


Fig. 14 マウスピッキングの仕組み (左) とマウスに反応する情報提示のイメージ (右)

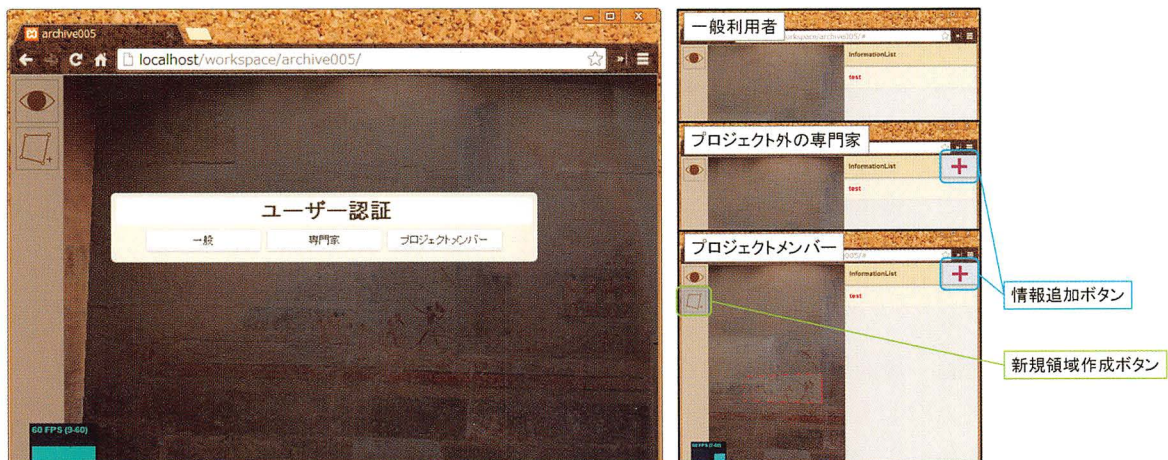


Fig. 15 ユーザ認証画面 (左) とユーザタイプ別の画面表示の違い (右)



を生成することで、データファイル、メタ情報をそれぞれファイルシステム、データベースに格納する。これにより、ROIに関連付けて情報を保存することが出来る。

### 3.4 機能の切り替え

Fig. 15 (右) にユーザタイプ別の画面表示を示す。利用できる機能の切り替えは各機能呼び出すボタンの表示・非表示を切り替えることで実現した。ユーザタイプに合わせた機能の切り替え機能はユーザ管理オブジェクトのメソッドとして定義している。メソッドの内部ではそれぞれのボタンのDOM要素をjQueryのセレクタで指定し、show() / hide()メソッドによって、styleのdisplayプロパティを切り替えている。この時、利用者タイプに対応した情報をもつROIの描画も行う。

通常時、情報の関連付けたROIは非表示状態で3次元空間内に描画されており、Fig.16 (中央) に示すようにウィンドウ内でROIにカーソルがかざされると、赤枠で表示される。この表示方法は、Fig.16 (左) の表示切り替えボタンで変更できる。このボタンが押されると、3次元空間内に描画されているROIが全て赤枠で表示され、カーソルをかざすと青色に変化する。ROIに関連付けられた情報の閲覧方法は、ROIにカーソルを重ね、ROIの表示色を変化させた状態でマウスをクリックするだけである。ROIの選択が行われるとFig.17 に示すように画面右側か

ら関連付けられた情報のリストがスライドインする。この情報リストにはROIに関連付けられた情報タイトルの一覧が表示されている。このリストはアコーディオンメニューの表示方法を採用しており、閲覧したい情報を選択することで、メタ情報が展開表示される。さらにメタ情報リストの中のdatatypeを選択するとデータファイル本体が別ウィンドウでポップアップ表示され、commentを選択すると情報の説明が展開表示される。

3次元空間内に描画されたROIの指定はマウスピッキングによって実現している。予めデータベースから取得した情報を用いて描画したROIを対象として、ピッキング処理を行うことで、選択したROIの識別番号を取得することが可能である。これにより、3次元モデル上に描画されたROIの選択によるメタ情報テーブルの検索が実現できた。さらに、クライアント側のシステムで検索の結果から動的にDOM要素を生成することで、情報リストの表示を実現した。

データファイルのポップアップにはメタ情報のデータ形式、ファイルのパスを利用する。メタ情報リストの中のdatatypeが選択されると、上述の検索によりクライアント側に保持しているメタ情報を再度サーバーへ送信し、PHPファイルにアクセスする。メタ情報のデータ形式、ファイルのパスを用いて、PHPファイルのヘッダーにMIMEタイプを指定し、ファイルシステムからデータファイルを読み込むことで、ブラウザへのデータの描画が行える。

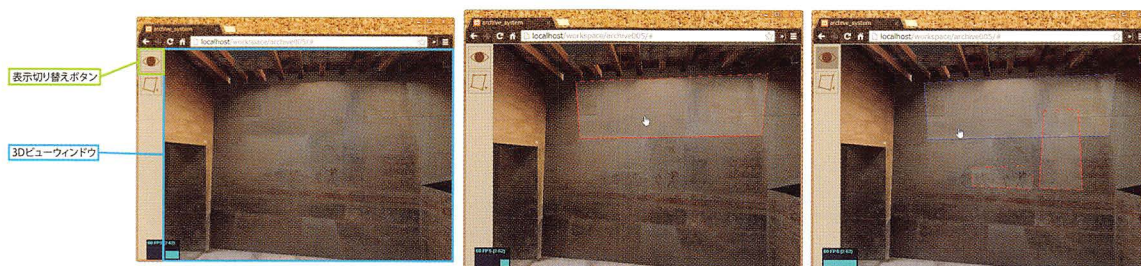


Fig. 16 画面切り替えタブ (左) とそれぞれの画面モード (中央・右)

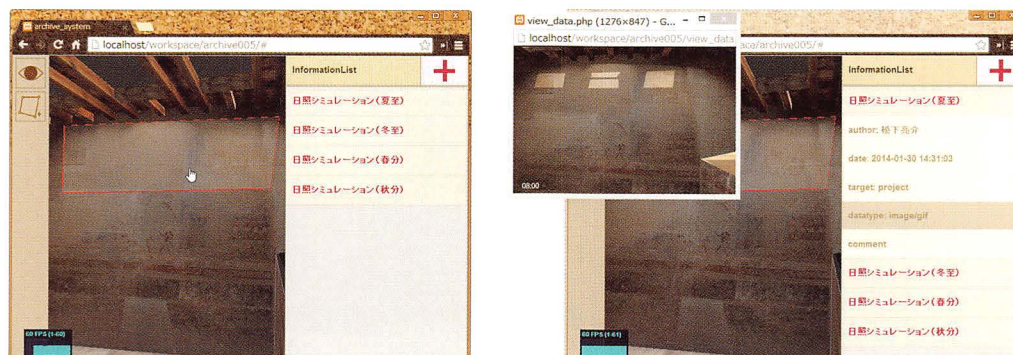


Fig. 17 機能別の画面切り替えの例



### 3.5 情報の追加

Fig.18 (a) に示すように、ROIの選択によって表示される情報リストの右上に情報追加ボタンを作成した。このボタンをクリックすると情報の入力フォームがスライドインする。全ての項目を入力し、投稿したいデータファイルを選択することで、ROIに関連付けた情報の追加を行える。新規ROIの作成は新規領域作成ボタンから行う。このボタンをクリックしておき、画面に見えている3次元モデル上で指定したい場所を囲むように、頂点を任意に4か所指定することで新しいROIを作成することが出来る。領域の作成後には、自動で情報追加機能が呼び出される。この機能はマウスピッキングの対象をモデル上のROIから構造物の3次元モデルに切り替えることで実現している。指定された4点の座標情報に識別場号を付与してデータベースの頂点情報テーブルに格納する。Fig.18 (c) では、このROIに付随した関連情報として、ローカルのPCのフォルダからPDFファイルを選択して、ポップアップする情報を追加している様子である。

### 3.6 ARインタフェースシステム

本プロジェクトでは、現場となる文化遺産の遺構の保全や運用の観点から、現場での新たなAV設備の導入やセンサーの敷設が難しいため、ユーザが持ち合わせる携帯電話やタブレットPCなどの情報端末単体でシステムを実現することが望ましい。また、石造りの遺構内部ではGPSの電波が届かないため、端末に備わっているカメラを用いてユーザ位置や対象物を特定する必要がある。モバイル端末で撮影さ

れた画像の特徴から、アーカイブシステムの仮想空間の座標系（以下システム座標系と呼ぶ）における端末の位置・姿勢（カメラパラメータ）を推定し、カメラに映っている被写体に関連した情報を重ね合わせて提示するマーカーレス型のARシステムとなる。この処理を媒介するために、対象の遺構内部を撮影した複数枚の画像を用いたSfM処理によって、新しく生成した座標系（以下SfM座標系と呼ぶ）における遺構の3次元点群とそれに対応する特徴点情報を持つ画像群を事前に作成する。加えて、作成した遺構の3次元点群とアーカイブシステムの3次元モデル間で対応点を指定した位置合わせを行うことで、システム座標系とSfM座標系の相互変換を行う行列を取得する。これらの事前処理により、モバイル端末で撮影された画像とSfMに使用した画像との特徴点对応から、撮影画像の2次元特徴点と対応する3次元点が求まるので、PnP (Perspective-n-Point) 問題を解くことでシステム座標系におけるカメラパラメータを求めることができる。Fig.19にARインタフェースを組み込んだアーカイブシステムの処理フロー図を示している。Fig.19中の(A)(C)は前節で述べたアーカイブシステムと共通している処理、(B)はARインタフェースのために新たに追加した処理である。(A)では前述の通り、選択したユーザタイプを閲覧対象とする情報の関連付いたROIをデータベースから取り出し、WebGLにおいてオブジェクトの生成を行う。(B)においては、撮影した画像の特徴抽出を行い、サーバサイドで前述の事前処理で作成したデータを利用したカメラの外部パラメータの推定を行う。Fig.20にカメラパラ

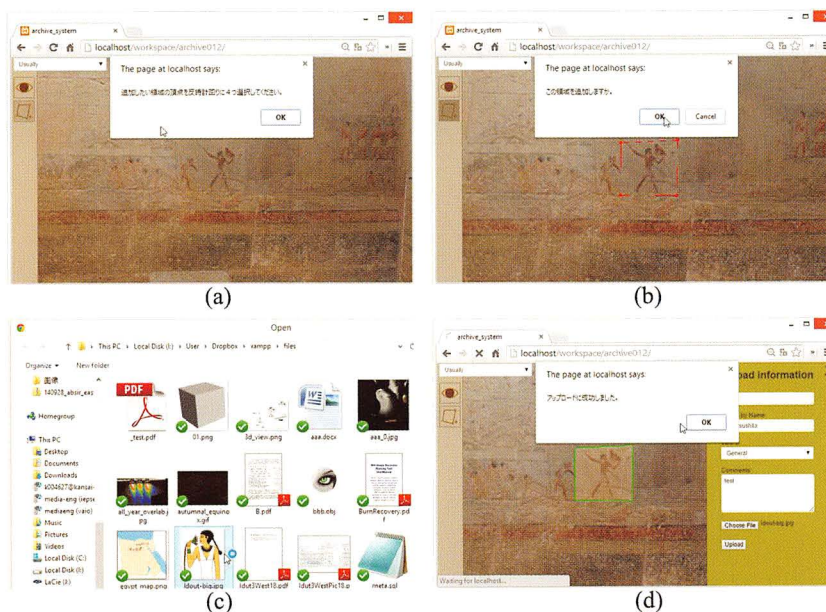


Fig. 18 シーンに対する新たな情報の付与の様子



メータ推定の処理フローを示しているが、撮影画像と事前に SfM 処理を行った画像との特徴点对応から取得できる撮影画像の特徴点と対応する 3 次元点のリストを用いて、PnP 問題を解くことでカメラパラメータを推定している (Fig.21)。次に結果として返されるカメラパラメータを用いて、(A) でセットアップした ROI を含むシーンのレンダリングを行う。この時、別途撮影画像を含むシーンでも平行投影によるレンダリングを行い、ROI を含むシーンの背景として描画することで、撮影画像上に ROI を重畳した AR 表現を実現する。(C) においても前節で述べたとおり、ROI の選択をトリガーとして、ajax 通信により選択された ROI の情報をサーバへと送信し、

データベースから返された関連情報を表示させる。

(1) 実装構成

AR インタフェースの実装にあたって、ここではアーカイブシステムのユーザタイプとして新たに「現地ユーザ」を定義し、ページアクセス時に選択することで利用できるものとした (Fig. 19 (A))。「現地ユーザ」で利用できる機能として、今回は一般向け情報の閲覧のみの実装を行う。Fig. 19 (B) の処理に関して、本稿では、対象をスマートフォン端末で撮影した画像をサーバに転送し、サーバで推定されたカメラパラメータを使って端末のブラウザ上で描画を行う。カメラパラメータの推定には C++ を使用し

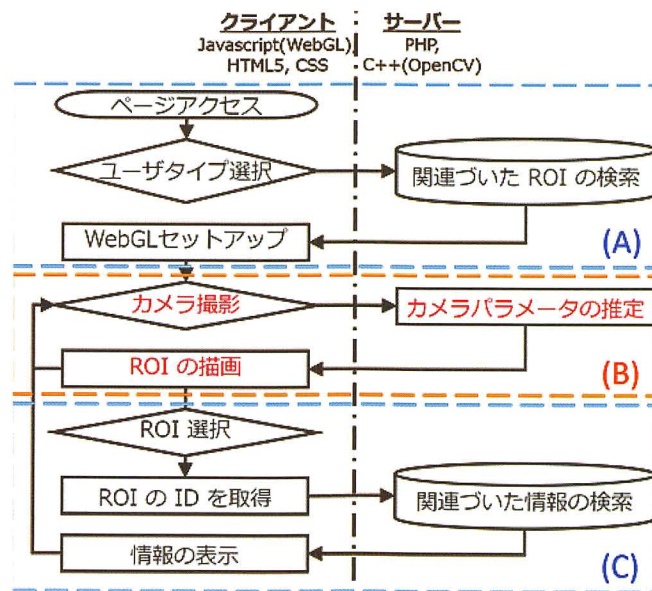


Fig. 19 システム全体の処理フロー

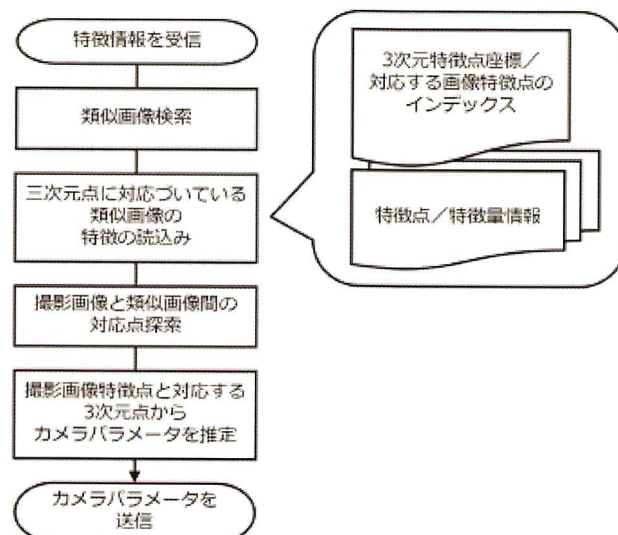


Fig. 20 カメラパラメータ推定アルゴリズム

ており、特徴抽出等の画像処理の実装には OpenCV を利用した。事前処理の SfM には Visual SFM [Wu 2013] を使用した。カメラパラメータの推定において、事前に SfM 処理を行った画像と撮影画像との特徴点对応を求めるのに、両者で同一の特徴記述方式を利用する必要があるため、Visual SfM では OpenCV で抽出した SURF 特徴を用いた SfM 処理を行った。また AR インタフェースを利用する端末のカメラ内部パラメータは事前にキャリブレーションを行い取得しているものとした。Fig. 22 にタブレット端末での AR インタフェースで実行したアーカイブシステムの様子を示している。AR インタフェースにおいて、アーカイブシステムの仮想空間で作成された ROI が撮影画像上に正確に重畳されることを確認できた。また、AR インタフェースからもデスクトップ版のアーカイブシステムと同様に ROI に関連する情報を閲覧できることも確認した。

## 4 ケーススタディ

### 4.1 現地での AR インタフェースの実働

#### (1) 実験内容

イドウトのマスタバの現場において、提案する AR システムによる ROI の表示結果とアーカイブシステムの仮想空間での ROI 表示とを比較する実験を行った。対象物との相対的な位置を変えて複数箇所からタブレット端末 (Nexus9, カメラ解像度 1280 × 720 px) を使用して AR 表示を行った。対象物との位置関係を Fig. 23 に示す。また、AR システムとアーカイブシステムのそれぞれにおける ROI の表示結果に最も差異が大きかった 2 つの例を Fig. 24、Fig. 25 に示す。Fig. 24 は、レリーフが施された壁面に対して約 2 m 離れ、最も斜めから見た場合 (Fig. 23 視点位置①) の結果であり、左側が AR 表示、右側がアーカイブシステムの仮想空間での表示である。この中で視点から最も遠く、ブレの顕著な部分を黒丸で囲い下に拡大表示している。比較するとコンテン

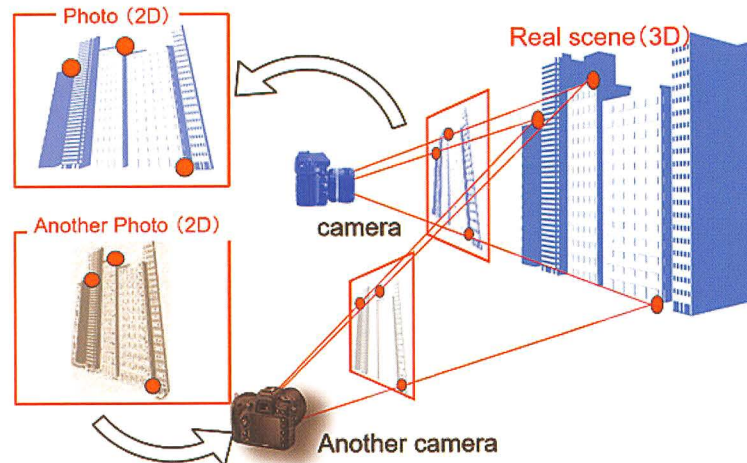


Fig. 21 PnP 問題の求解によるカメラ位置推定

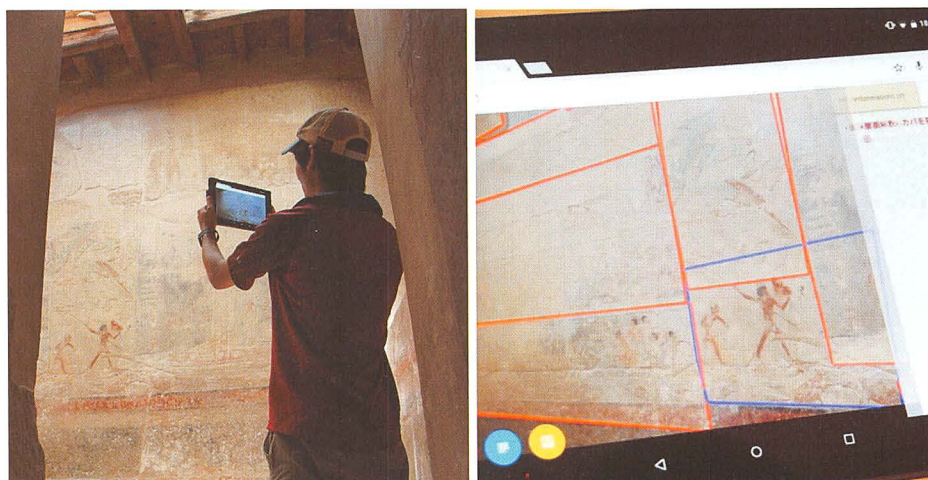


Fig. 22 実装された AR インタフェース



ツに対する領域表示にズレがあることが確認できる。このズレは、画像上で14px、3次元空間に投影し壁面上の距離を算出すると約8.4cmに相当することが分かった。Fig. 25では1.5m離れた位置から偽扉を見上げた際に最も遠い箇所を含む結果 (Fig. 23: 視点位置⑥) で、画像上の距離が15px、壁面上の距離が約5.2cmであった。

(2) 実験結果

Fig. 26は、イドゥートのマスタバにおいて一般公開されている地上構造内での象徴的なレリーフを線画に起こしたものである。本実験にて観察された位置ずれの最大値は5cm程度であり、もっとも小さなヒエログリフ程度の大きさであることがわかる。したがって、AR表示は、ヒエログリフ一文字に対する注釈情報というよりは、もっと大きな文面やレリーフの図柄などへの関連付けに向いているといえる

(Fig. 27)。しかしながら、同レリーフを対象とした実験では、2m近く離れて全体を俯瞰する場合の使用が想定され、表示位置精度の観点では、最も厳しい条件だといえる。例えば、同じ端末で近接して対象物を画面に大きく写す場合には、画面上での10画素単位程度のズレは、実寸では数mm程度と換算できるため、ヒエログリフ単体への情報を付与するような場合でも、相応のサイズのROIを設定しておくことで、運用上問題は無いと考えられる。また処理時間に関しては、画像の撮影から領域の描画までトータルの処理時間が平均で382.5秒となっていた。この内サーバサイドで実際にカメラパラメータの推定処理を行っているのは5秒という結果になり、処理時間の大半をデータの送受信に割いていることが分かった。このことから、この現場の通信インフラの性能環境下においては、実時間での動画に対するARは難しく、今回の実装のようなキャプチャ画像によ

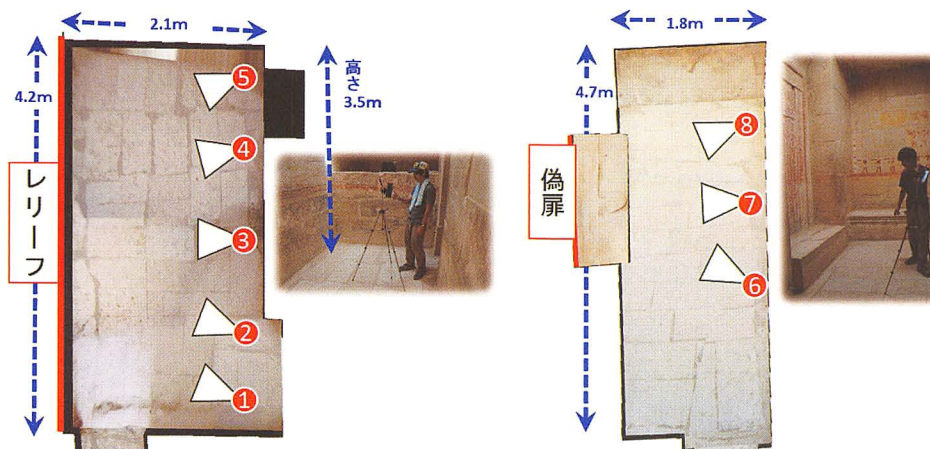


Fig. 23 現場でのAR表示実験の視点位置

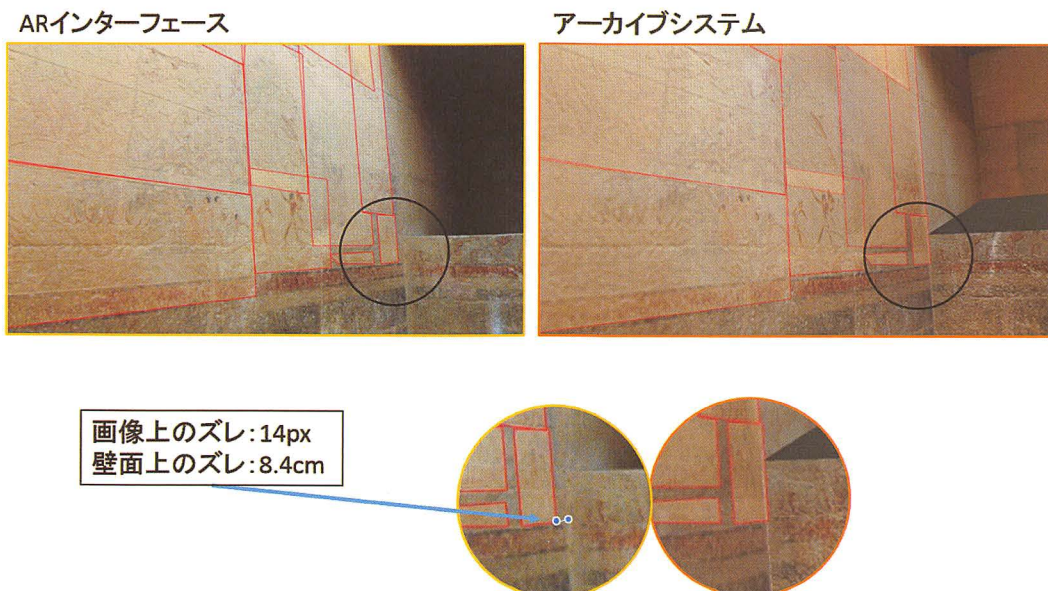


Fig. 24 AR表示例：大きなレリーフを俯瞰した画面



る AR の方がむしろ実用的である。

#### 4.2 現地環境の分析

考古学分野のプロジェクトでは多様な分野の連携により成立していることに鑑みて、ここでは、本システムの専門分野での横断的な利用方法について述べる。近年のように、現地の政情などにより調査の自由度が制限された状況においても、過去の調査によって蓄積されたデータや知見によって現場の状況が再現され、学術的な検討や研究活動が可能になる場合が考えられる。例えば、マスタバの地上構造は一般に公開されており、現場の保全という観点では、遺物そのものには厳しい環境となっている可能性がある。本稿でのシステムにおいては、過去に、長期にわたる気温と湿度のデータが保存されている。屋

外のスキャンに基づいて構造物外形の精緻な3次元モデルが構築され、また屋内用レーザスキャナによりレリーフが施された壁面の詳細な3次元計測も行われ (Fig. 27)、包括的な現場再現が出来ている。一方、このような3次元モデルと立地条件から、現場の日照条件をシミュレーションすることができる。写真とレーザ測量による情報から、Fig. 28に示すような、現在のマスタバ上部の構造が内外から参照できるようにになっている。この地点の高度、緯度および軽度から、太陽の軌道と明り取りの窓の幾何関係を再現することができ、最も大きなレリーフが存在する壁面に対する日照状況を時系列的として計算して表示したものが Fig. 29である。これにより、Fig.30のように、この壁面に対する年間の日照量の積算見積もりを可視化することも可能であり、顔料

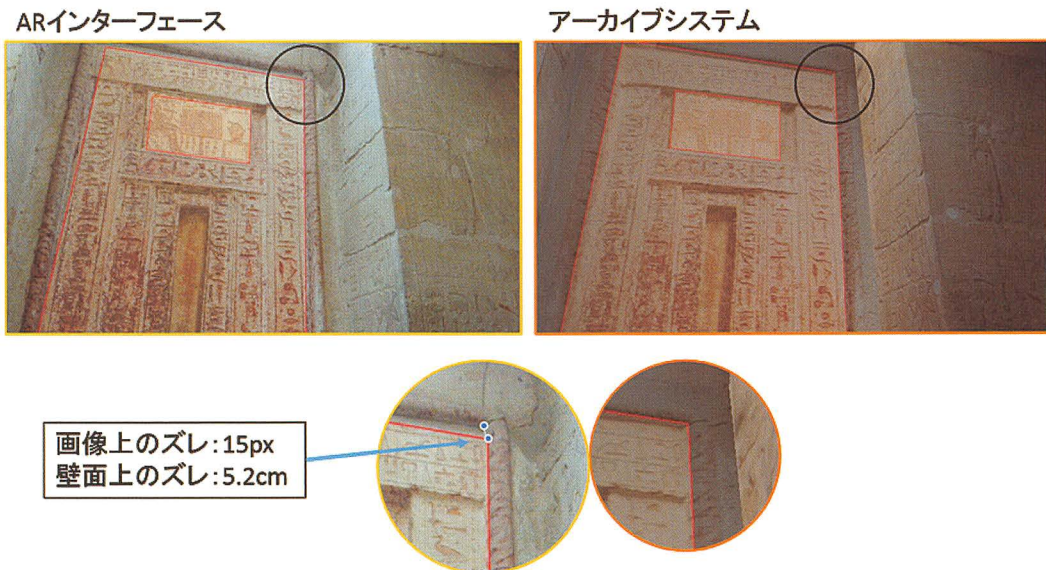


Fig. 25 AR 表示例：偽扉を見上げた画面

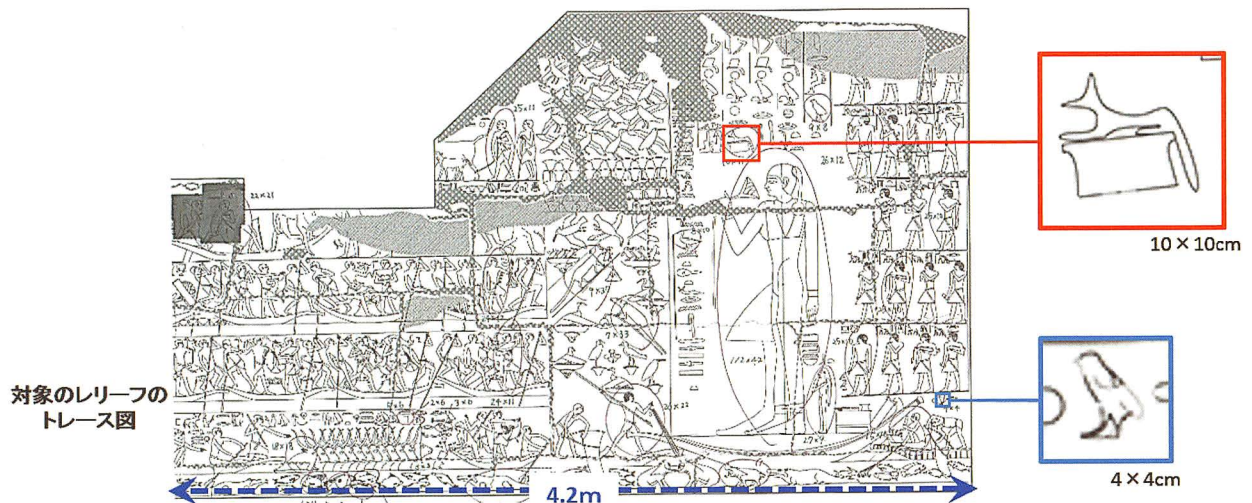


Fig. 26 イドウトのマスタバのレリーフの例



の変色、レリーフ表面の劣化との相関を分析する資料となる。

同じプロジェクト内でも、調査チームの人員や調査時期が異なっていることにより、狭義の目的と調査結果データとが1対1にしか結びつかず、かつ各々の専門分担者に分散管理されていたものが、当該システムの仕組みが媒体となり、しかも、実地調査から導かれ新たに生成される情報も含めて、調査対象の実体を様々な側面から再現して見せる可能性を示唆している。このような利便性は調査データの記録方式や蓄積媒体としてのデジタル化のみならず、知的作業における「気づき」や知識の融合を誘発する媒体としての機能を潜在的にもっているものと考えられる。

#### 4.3 地下埋葬室での変容の可視化

PnP問題の求解によって、現場におけるアーカイブシステムへのアクセスのためのユーザインタフェースとして、AR表示機能をした実装を4.1節で示した。同じ技術的な枠組みにより、過去の写真撮像視点を推定する技術として、現代における調査記録の履歴において、写真データを詳細に重ね合わせて可視化することにも利用できる。例えば、埋葬室においては壁画の剥落が当初より喫緊の問題であり、本プロジェクト開始当時からも劣化が進行している。Macramallahによる1935年発見当時の状況ともす

に変容が激しいことは、当時の記録との比較でも明らかである [Macramallah 1935]。この80余年の変容の分布を、壁面上で同定することも、復元作業にとって貴重な情報となりうる。埋葬室の内壁では、過去の写真記録と照合してみても、写真記録そのものの質の違いや経年変化等により詳細な位置決めが難しい箇所も多いが、母岩の色彩や、地層、クラックなど、経年変化を受け難い画像的特徴も多く存在する。そのような位置が不変な画像特徴によってPnP問題を解くことによって、過去の写真の撮像位置を、現在の3次元モデルとの相対的な関係として求め、3次元モデルに投影変換をすることで、時代の異なる写真記録を3次元モデル上で重畳表示できる。その処理の例をFig.31に示す。この図では、1935年、2003年、2010年の各写真記録を、順次埋葬室の3次元モデルに投影表示したものである。これらは、選択的に表示させるだけでなく、透過処理によって視覚的な照合を助けることも可能である。また、実写データだけでなく、任意の視覚的な情報を画像ファイルとしてアップロードして、同じキャンバスに表示することがアーカイブシステムの機能として可能である。Fig.31 (右下) では、日本の研究室において、この北側壁面に描かれた供物リストの復元予想を進めている様子を、仮想的に埋葬室に復元したものである。

本プロジェクトにおける経時変化だけでなく、過

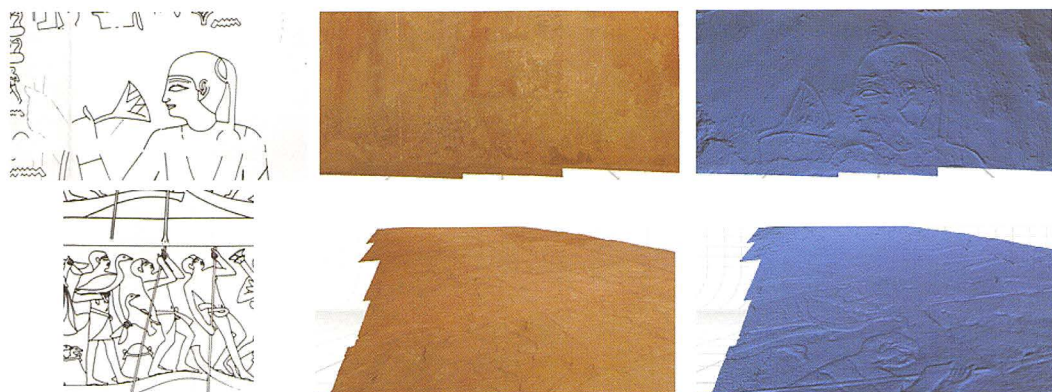


Fig. 27 融合的な利用の例：レリーフの線画（左列）とレーザスキャンによる色情報（中央）と表面形状情報（右列）

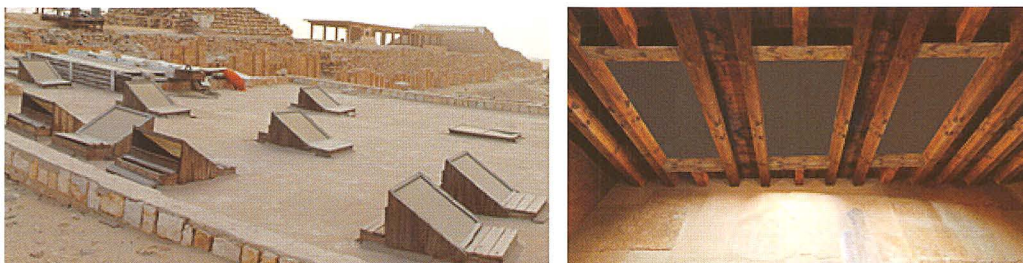


Fig. 28 マスタバ上部の明り取り窓の外観写真（左）と内部の再現CG（右）



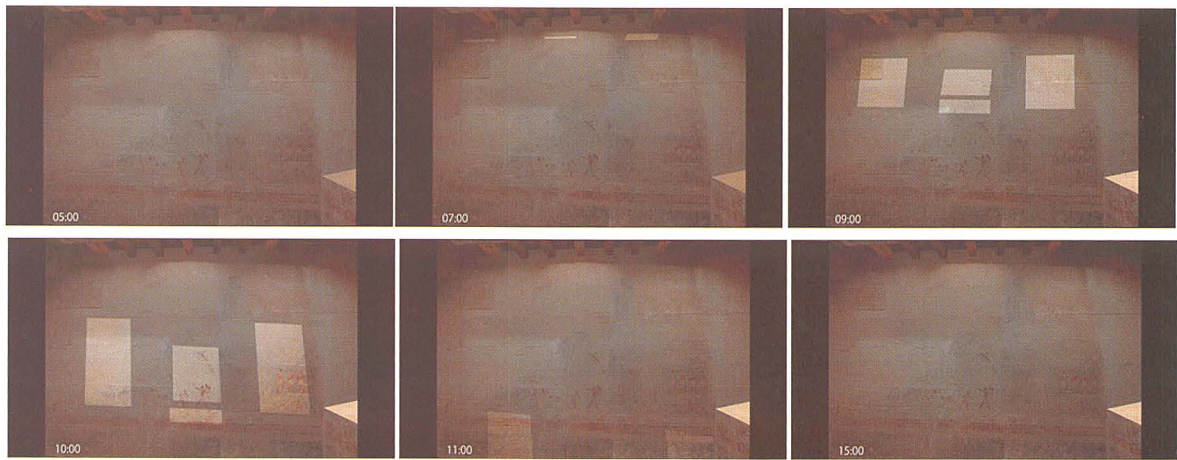


Fig. 29 日照条件のシミュレーションの時系列の例

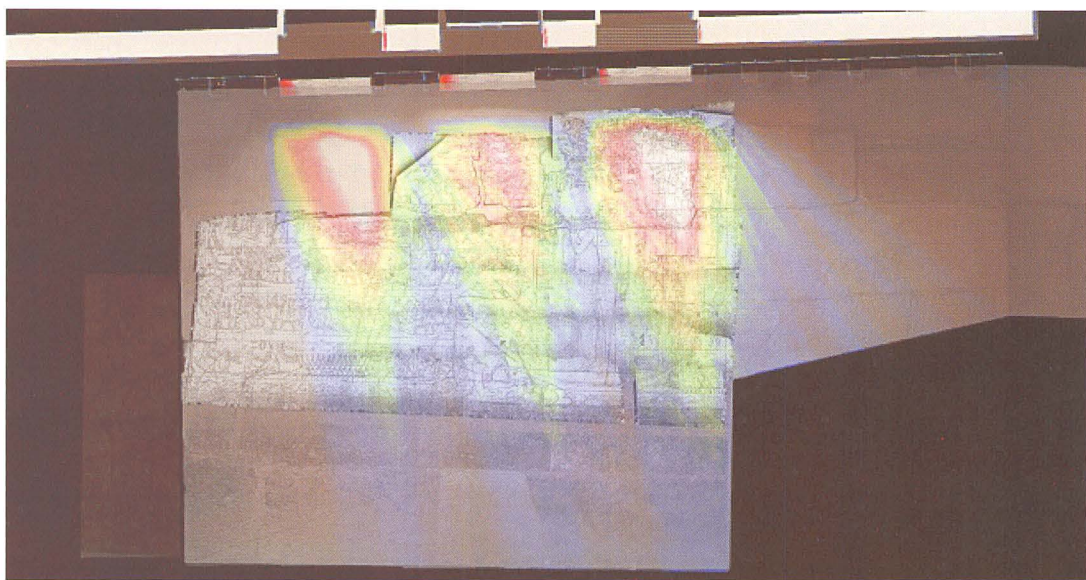


Fig. 30 日照条件のシミュレーションによる年間日照積算量の推定例

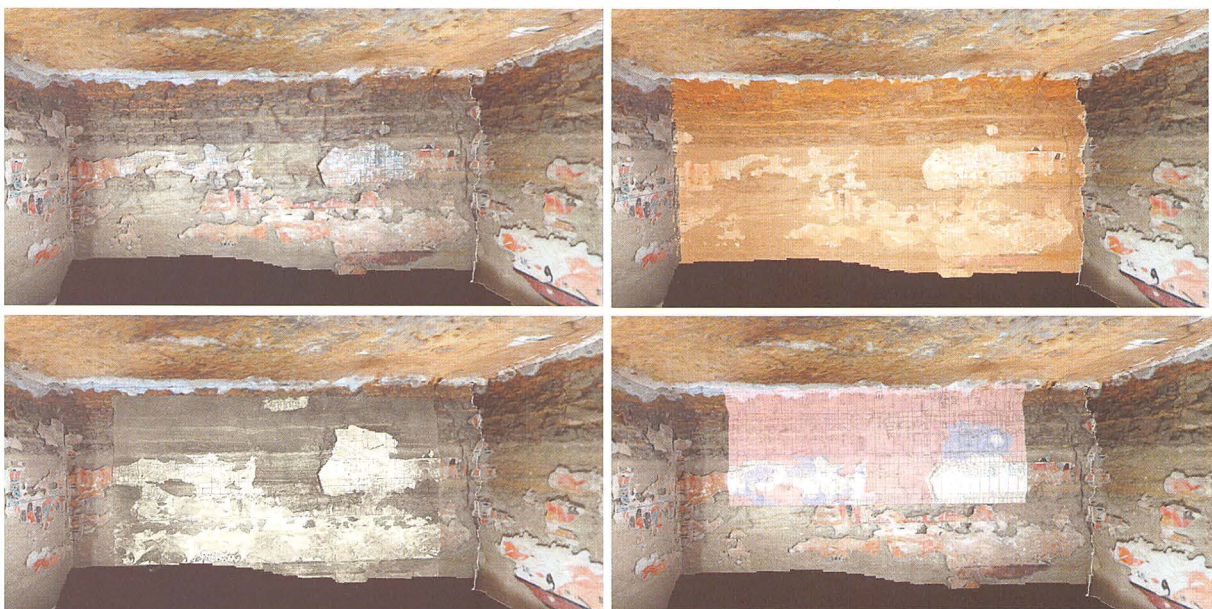


Fig. 31 3次元仮想空間での埋葬室壁面（北側）の変容表示：  
2010年時点（左上）、2003年プロジェクト開始当時（右上）、1935年当時23（左下）、供物リストの補完予想図（右下）



去の調査記録に遡って、情報を一元的に扱うことで復元におけるランドマークとなり、これらを踏まえて、当初より欠損している壁画の内容や今後の保全計画などの、議論や実作業を進めるための媒体となりうる事が分かる。

## 5 おわりに

本稿では、多様な専門家からなる活動における情報共有の枠組みとして、対象となる遺物の3次元モデルを活用したデジタルアーカイブの積極的な利用方法を提案した。3次元計測に基づいた精細なモデルにより、ネットワーク上に現地環境を仮想的に再現し、現地のモノにタグ付けされた情報の共有と、意見交換の新たな仕組みとしてデジタルアーカイブシステムを構築した。また、情報の整理や保存手段のデジタル化という意味合いだけではなく、ネットワーク越しにアクセス可能な持続的なシステムの枠組みとして、遠隔地と現場の機能要件を区別してユーザインタフェースを提案したほか、継続的かつ横断的な議論や気づきを与えるような研究素材を提供できるように、シミュレーションなどの組合せによる演繹的な分析アプローチや、経時的な隔たりを超えたデータの一元的な可視化方法における3次元データの活用方法を見出した。

今後は、プロジェクト内での更なるデータの蓄積と再利用を推進して、現場ニーズへのマッチングについての評価を行うとともに、一般への公開や、現地のコミュニティとの情報共有について継続的な取り組みに繋げる予定である。

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金(15H02983)の助成による。

## 参考文献

- Brutto, M. L. 2012. "Computer Vision Tools for 3D Modeling in Archaeology," *International Journal of Heritage in the Digital Era*, Vol. 1, Supplement 1, pp. 1-6.
- Hartley, R. and A. Zisserman. 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press.
- Macramallah, R. 1935. *Le Mastaba d'Idout*, Cairo.
- Nuno, N. J. and N. Maria, J. 2012. "Immersive Cultural Experience through Innovative Multimedia Applications," *International Journal of Heritage in the Digital Era* Vol. 1, Supplement 1, pp. 101-106.
- Sears, R., C. van Ingen, J. Gray 2006. "To BLOB or Not To BLOB," *Microsoft Research Report*, TR-2006-45.
- Wu, C. C. 2013. "Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion," *International Conference on 3D Vision*, pp. 127-134.
- 家入龍太 2012『図解入門よくわかる最新BIMの基本と仕組み』、株式会社秀和システム。
- 池内克史、大石岳史 2010『3次元デジタルアーカイブ』、東京大学出版会。
- 石川真 2004「協同編集作業場面における顔画像付加インタフェースの及ぼす影響」、『上智教育大学研究紀要』第23巻、第2号。
- 石戸谷顕太郎、大平茂輝、長尾確 2012「継続的ミーティング支援システム」、『情報処理学会論文誌』Vol.53、No.8、pp.2044-2048。
- 岡本篤志、牧野隆夫、長島茂、上野恵士 2002「文化財の保全修復における三次元デジタルアーカイブの可能性」、『情処研報』Vol.107、pp.39-45。
- 吹田浩 2010「エジプト国イドゥートの地下埋葬室の修復 2005年～2009年」、住友財団報告書。
- 中尾茂子、安達一寿、綿井雅康 2002「グループウェアを利用したグループ活動における態度・意識の分析」、『教育情報研究』第18巻、第2号。
- 松田智、柴田直樹、安本慶一、伊藤実 2007「仮想空間で実世界のアウェアネス情報を取り込んだ効率よいコミュニケーションを実現するためのフレームワーク提案」、第130回マルチメディア通信と分散処理研究会(情報処理学会)。
- 安室喜弘、伊藤大地、西形達明、吹田浩 2013「異種計測技術の統合によるイドゥートのマスタバの3次元形状計測」、『Semawy Menu(関西大学文化財保存修復研究拠点紀要)』第4巻、pp.235-244。



## **Abstract**

This report addresses management issues in a multifaceted archaeological project, by using a web-based archival system with a 3 D user interface. The diverse specialties needed for driving the surveys and restoration work at the archaeological site and the fact that the team is composed of people of different nations means work may progress asynchronously, which may result in a failure to maintain the communications needed to ensure that everyone and everything is kept up to date. Especially for maintenance and restoration of the historical ruins and cultural heritages like wall reliefs and paintings, CHC (The Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture) in Kansai University organizes the research members from fields of civil, architectural, chemical, material engineering, informatics and computer science. This report describes a new type of digital archival system to achieve the transversal studies in such organization for sharing the live and accumulated information. The system provides a realistic virtual space on web-browsers that allows sharing the on-site information rooted from the environments of the field and discussing over the common target in a cross-sectional manner via the internet. Here we present the detailed technical implementation scheme of the proposed system framework, and also shows the possibility of spontaneously arising bridges between different specialized areas and their on-going works based on several case studies.