

研究ノート

# ヘルレンバルスホト 1 の仏塔デジタルアーカイブと応用 Digital Archives and Applications for the Pagoda of Kherlenbars Town 1

正司哲朗

(奈良大学社会学部)

A.エンフトル

(モンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所)

SHOJI Tetsuo

(Faculty of Social Sciences, Nara University)

Altangerel ENKHTUR

(The Institute of History and Archaeology, the Mongolian Academy of Sciences)

## 目 次

- 1 はじめに
- 2 デジタルアーカイブ化方法
  - 2.1 3次元計測を用いたModel-Based Rendering表現
  - 2.2 パノラマ画像を用いたImage-Based Rendering表現
- 3 ヘルレンバルスホト 1 の仏塔デジタルアーカイブ
  - 3.1 仏塔の調査
  - 3.2 仏塔のデジタルアーカイブ結果
- 4 デジタルアーカイブ化した仏塔の利活用
  - 4.1 点群データ処理
  - 4.2 3Dプリンタの利用
  - 4.3 仮想空間の構築
- 5 まとめと今後の課題

## 1 はじめに

モンゴル国では、契丹(遼)時代を含め、数多くの遺跡が存在するが、遺跡の修復・保存が進んでおらず、あと数年のうちに消失してしまうものも多数存在している。このような歴史的文化遺産が失われていくことは、人類全体にとって大きな損失である。しかしながら、遺跡の修復・保存には、多大なコストもかかるため、デジタル化することで現状を忠実に記録しておくことは必要不可欠である。これまで、モンゴル国において、2012年には、ウイグル時代、契丹(遼)時代、16世紀から17世

紀に築かれた遺跡を中心に、ハル・バルガス城、バイバリク城、ハル・ブフ城の仏塔をデジタルアーカイブ化した(正司2012)。また、2013年には、烽火台、オランヘレム城の西門跡、ハル・ブフ城の寺院跡をデジタルアーカイブ化した(正司2013)。2014年には、東モンゴルにある契丹(遼)時代に建立されたと言われているヘルレンバルスホト1の仏塔をデジタルアーカイブ化した(正司2014)。また、モンゴル国立カラコルム博物館において、上記の3年間にデジタル化した遺跡の一部を「モンゴル国の遺跡デジタルアーカイブ」として常設展示を行っており、大型タブレットを用いて、デジタル化した遺跡を閲覧できるシステムを展示している。この展示に対して、国内外から多くの来館者があり、モンゴル国内でも高い評価を得ている。

本稿では、3年間の調査のうち、2014年に調査を行った東モンゴルドルノド県にあるヘルレンバルスホト1の仏塔の調査内容について述べる。この仏塔は、現在、モンゴルと中国の共同事業により復元作業が行われているため、復元前の現状を正確にデジタルアーカイブ化し、詳細な情報を記録しておく意義は非常に大きく、原型を留めている仏塔をデジタル化する最後の機会となった。

遺跡などをデジタルアーカイブ化し表現する方法には2種類ある。1つは、3次元計測装置を用いて形状情報を取得して行うModel-Based Rendering (MBR)と呼ばれる表現方法であり、もう1つは、画像をそのまま利用するImage-Based Rendering (IBR)と呼ばれる表現方法である(S. B. Kang 1999: 2-16)。MBRは、あらゆる視点から遺跡を見ることができ、構造を把握するには適した表現方法である。一方、IBRは、正確な構造把握は難しいが、実空間を写像しているためリアリティのある表現方法である。仏塔の構造情報と現状を正確に記録するために、この両方の手法を用いる。

また、本稿では、デジタル化した仏塔を利活用する目的で2つの方法を提示する。1つは、博物館展示などに利用する目的で、手に取って構造を理解しやすいようにするために、3Dプリンタで仏塔を印刷する方法について述べる。もう1つは、臨場感のある仮想空間の構築である。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を利用し、利用者の視野を完全に覆い、3D立体表示することで、臨場感の高い仮想空間を構築する方法について述べる。

## 2 デジタルアーカイブ化方法

### 2.1 3次元計測を用いたMode-Based Rendering表現

本研究では、大規模な遺跡を計測するために、広範囲に3次元計測できるFARO社の3DレーザスキャナFocus3Dを利用した。図1(a)に本研究で利用した3Dレーザスキャナを示す。Focus3Dは、対象に光を照射し、反射して返ってくる光の時間差を用いて計測を行うTOF (Time of Flight)方式の3Dレーザスキャナであり、120mまでの距離を計測でき、976,000ポイント/秒で高速スキャンが可能である。さらに、同時に画像も撮影できるため、計測したデータに色情報を付加させることができる。また、計測精度は、対象にも依存するが25m離れた場合の計測誤差は2mm程度である。図1(b)に3次元計測の様子を示す。大規模な遺跡を対象に計測する場合には、複数地点から計測し、計測データを統合させる必要がある。本研究では、一地点において水平方向360°、垂直方向305°の範囲で計測を行った。なお、水平・垂直解像度は、0.009°であり、複数地点から計測する場合には、重複部分があるように、10mから20m程度の間隔で3Dレーザスキャナを移動させ、計測データを精度良く統

合するために既知パターンを設置した。本研究で利用した既知パターンは、図1(c)に示すような1面0.295m×0.295mのチェックパターンであり、これらを複数箇所設置した。上記の方法を用いて、複数箇所で計測したデータを統合することで、あらゆる視点から遺跡を閲覧でき、構造把握できるModel-Based Rendering表現を行う。



図1 利用した3Dレーザスキャナと3次元計測の様子

## 2.2 パノラマ画像を用いたImage-Based Rendering表現

ここでは、パノラマ画像を利用したImage-Based Rendering手法を使って、遺跡をよりリアルに表現する方法について述べる。本研究では、3Dレーザスキャナを設置した位置において、全周の画像を撮影しているため、位置情報と画像を利用して、360°見渡せるパノラマ画像を用いたImage-Based Rendering表現を行う。具体的には、図2に示すように、本研究の対象となる仏塔内部は閉空間に近いため、球モデルに画像をマッピングすることで全周を見渡せるようにする。一方、仏塔の外観は、図3に示すように、視野が広範囲であるため、円筒モデルに画像をマッピングすることで広範囲を見渡せるようにする。

9箇所から撮影された多視点画像を使って生成した球モデル・円筒モデルを、図4(a)に示す仏塔の平面図に、図4(b)に示すように配置し、リアリティのあるImage-Based Rendering表現を行う。

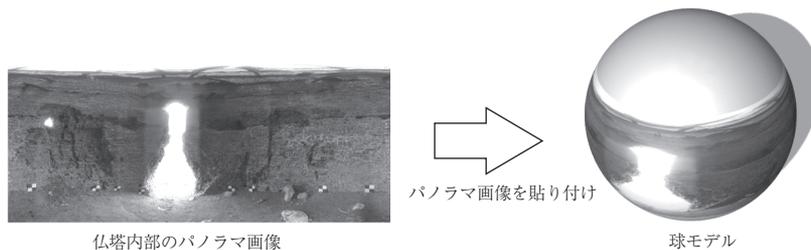


図2 球モデルを用いた仏塔の内部表現

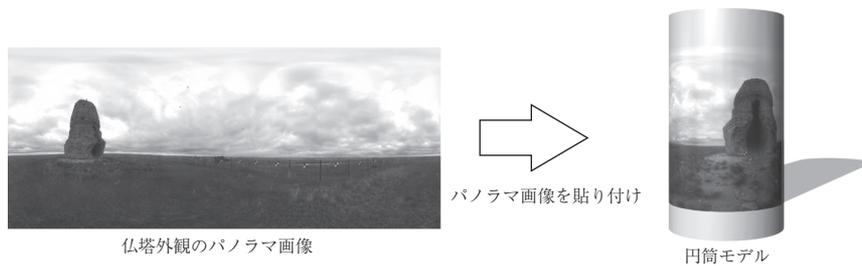


図3 円筒モデルを用いた仏塔の外観表現

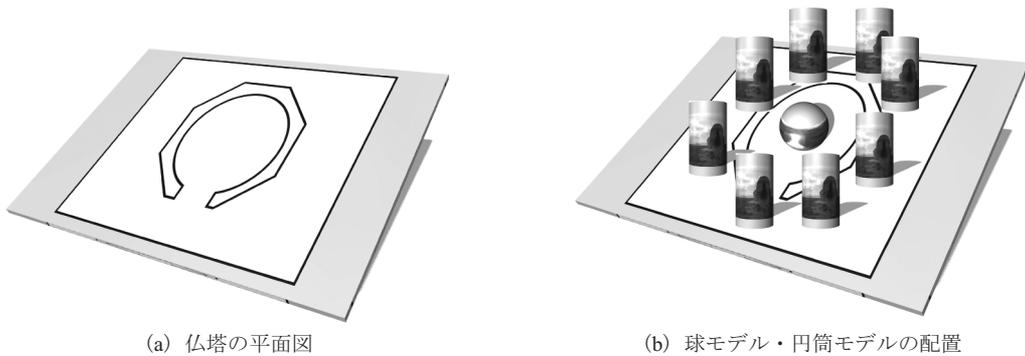


図4 パノラマ画像を利用したImage-Based Rendering表現



図5 ヘルレンバルスホト1 仏塔の位置

### 3 ヘルレンバルスホト1の仏塔デジタルアーカイブ

#### 3.1 仏塔の調査

ヘルレンバルスホト1は、契丹(遼)時代に築かれたとされる城郭都市であり、図5に示すようにウランバートルから東に約600kmの距離にあり、ドルノド県ツァガーンオボー郡に位置(北緯48.055044、東経113.363984)する。ヘルレンバルスホト1の周辺には、匈奴時代のヘルレンバルスホト2、元朝末期のヘルレンバルスホト3、契丹(遼)時代の城郭都市であるズーン城、バローン城が存在している。本研究で対象としている仏塔は、ヘルレンバルスホト1の東壁から250m外にあり、図6(a)(b)に示すような八角形の七層構造の塔である。この仏塔に関しては、『蒙古遊牧記』(台聯國風出版社1967: 2069-2070)に引く、18世紀にモンゴル国を訪れた龔之鎰の『後出塞録』によると、以下のよ

うな記述がある。

城内には非常に大きな廃寺があり、後殿には二塔ある。一つは七層、もう一つは五層である。二塔の壁間に描かれる諸佛像はともに在る。七層の塔の中には、石台の上に木箱が供えられ、長さはおよそ三尺、巻物が貯えられ、上に三世佛、及び文殊普賢ならびに四大天王像を描く。殿側に碑記があるが多くの字が剥落している。一二文字を識ることができ、遼時の物のようだ。

このことから、18世紀には、仏教を信仰していたことが推察され、遼代と思われる碑記も存在していたが、現在では、仏像や碑記も失われてしまっているため詳細は分からない。近年では、2014年にモンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所によって、小規模な発掘調査が行われ、チベット語、モンゴル語で書かれた経典の破片が出土している(A.Энхгөр, Л.Мөнхбаяр, et al. 2015: 131-135)。

次に、2014年に行った本調査について述べる。仏塔内部を観察すると、階段などが見られず上層へ上がれない構造になっている。また、内部の第3層以降から板などの建築部材が多数見られ、内部の建築部材が、一部、外壁まで達しているものがあり、図7に示すように建築部材が露出しているものも数多くある。この建築部材の表皮の一部を採取して、AAA処理、測定試料となるグラファイト調製、加速器分析法(AMS)による炭素14年代測定を(株)加速器分析研究所で行ったところ、以下のような測定結果が報告された。測定試料結果を表1に示す。炭素濃度から、土壌などの混入のない良好な木材試料と考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は同位体分別効果の補正を目的としてAMSで測定された安定炭素同位体比で、参考値であるが通常の植物の値と考えられる。炭素14年代は較正曲線 IntCal13に基づき、較正プログラムOxCal v4.2.4を用いて較正年代に修正した。較正年代の確率密度を括弧内に示す。



(a) 仏塔外観



(b) 仏塔内部

図6 ヘルレンパルスホト1の仏塔



図7 仏塔内部の建築部材

表 1 測定試料結果

試料番号 測定機関番号	種別	炭素濃度	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	炭素14年代 ( $^{14}\text{C}$ BP)	較正年代
USMBH-1 IAAA-142337	木材	50%	$-24.31 \pm 0.36$	$300 \pm 20$	AD1495-AD1602 (71.4%) AD1616-AD1649 (24.0%)

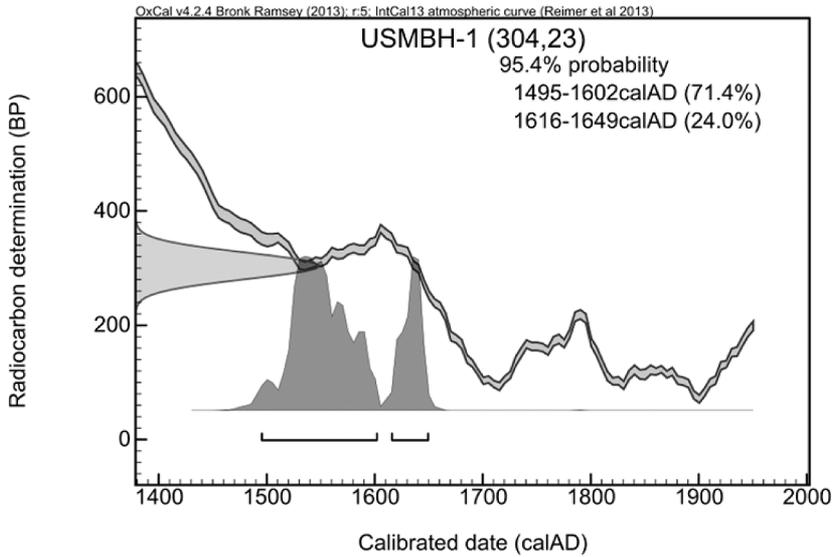
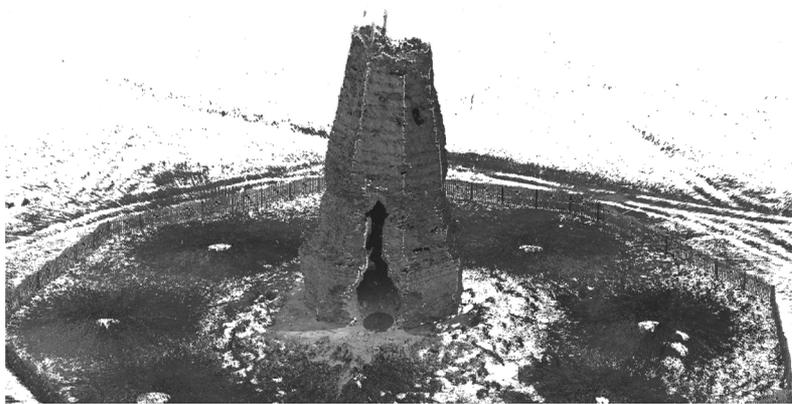


図 8 OxCalによる較正年代の導出(計算には下一桁を丸めない値を用いた)

較正年代の確率密度分布を図 8 に示す。上記の結果から、較正年代は、16世紀から17世紀前半である可能性があることが判明した。ただし、採取した建築部材(図 7 (左))が、建立当初のものなのか、建立後に補修されたものなのかは定かではないため、さらなる調査が必要である。

### 3.2 仏塔のデジタルアーカイブ結果

2.1節で述べたFARO社の3Dレーザスキャナを利用して仏塔の外観と内部を計測し、それぞれ得られた計測データを統合して、Model-Based Rendering表現を行った結果を図 9 に示す。図 9 (a)は外観と内部を統合したもので、図 9 (b)は、内部構造のみを表している。また、計測結果をもとに作成した計測図面を図10に示す。仏塔の高さは16.56m、直径9.32m、内径が5.56mであることが分かった。さらに、パノラマ画像を利用して、仏塔のImage-Based Rendering表現を行ったものを図11に示す。右上の撮影箇所を選択すると、その場所を360度見渡すことができるものである。図11(a)は、仏塔の外観を、円筒モデルを利用して表現したものであり、図11(b)は、仏塔の内部を、球モデルを利用して表現したものである。構造情報は持っていないが、現時点の様子がよく分かる表現方法である。



(a)



(b)

図9 3次元計測を利用したModel-Based Rendering表現結果

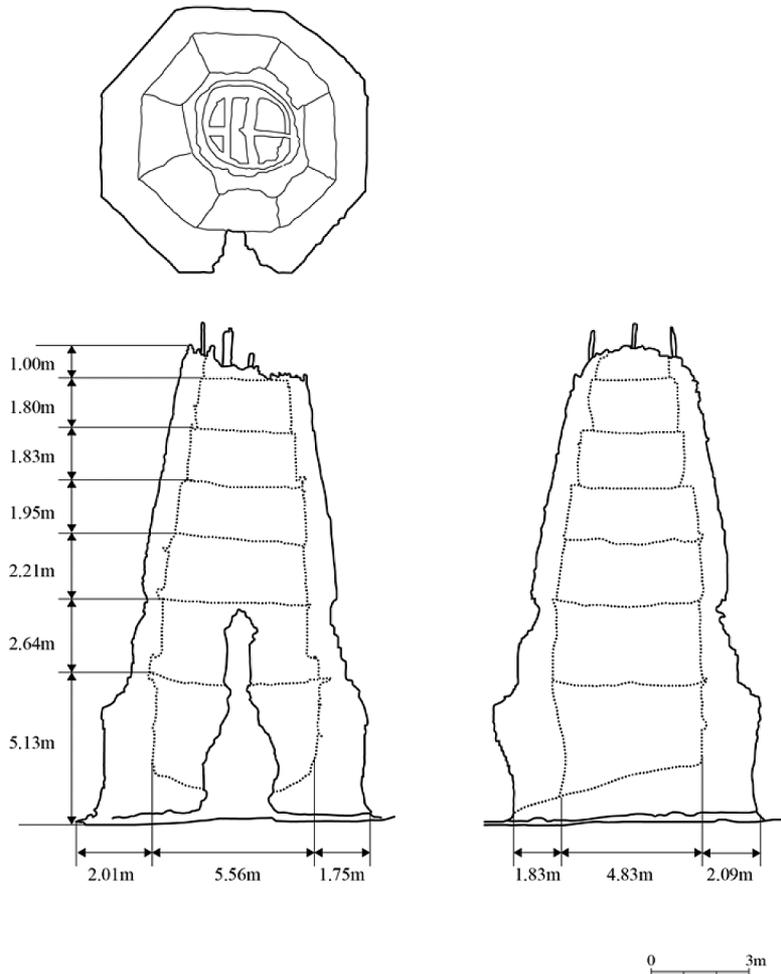
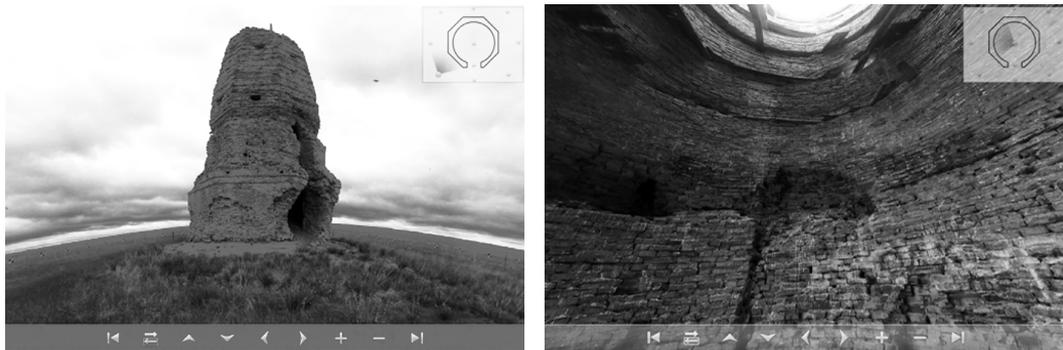


図10 ヘルレンバルスホト1の仏塔計測図面



(a) 円筒モデルによる外観表現

(b) 球モデルによる内部表現

図 11 パノラマ画像を利用したImage-Based Rendering表現結果

## 4 デジタルアーカイブ化した仏塔の利活用

### 4.1 点群データ処理

一般的に、3Dレーザースキャナで得られた計測データは、膨大な点群データである。点群データは、3次元座標位置、および色情報を持っているが、2次利用するときには扱いづらいデータである。ここでは、これらの膨大な点群データから2次利用が容易に行えるように、ポリゴンメッシュ化する方法について述べる。点群データからポリゴンメッシュ化する方法は、一般的には以下の流れで行う。

- (1) 点群データから法線を計算する。
- (2) 点群データからポリゴンメッシュ化する。
- (3) 余分なポリゴンメッシュを編集・削減する。
- (4) 点群データの色情報から画像を生成する。
- (5) ポリゴンメッシュと画像の対応付けを行う。

ただし、点群データが膨大な場合には、(1)の法線を計算する前に、あらかじめ、点群データを間引く必要がある。(2)のポリゴンメッシュ化するアルゴリズムは様々あり、代表的なものは、Ball Pivotingアルゴリズム(Bernardini F., Mittleman J., et al. 1999: 349-359)、Poissonアルゴリズム(Michael Kazhdan, Matthew Bolitho, et al. 2006: 61-70)がある。閉じている形状に関しては、Poissonが比較的有効である。

3章で得られたデジタルアーカイブ化した仏塔の点群データは、約5.37億点あるため、法線を計算する前にデータを間引き、約1,340,000点まで削減した。削減したデータに対して、法線を計算し、Poissonアルゴリズムを利用してポリゴンメッシュ化を行った。

次に、3Dプリンタの利用や仮想空間を構築するためには、ポリゴンメッシュのデータ量が大きすぎるため、ポリゴンメッシュ数を削減した。さらに、点群データから画像を生成し、ポリゴンメッシュに対応付けた結果を図12に示す。図12(a)は、点群データからポリゴンメッシュ化したものであり、図12(b)は、生成した画像をポリゴンメッシュに貼り付けた(テクスチャマッピング)ものである。この結果から、形状を維持しながら、ポリゴンメッシュ化ができたことを確認することができる。

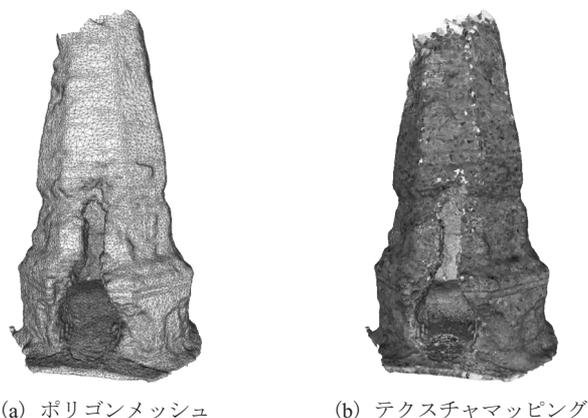


図 12 ポリゴンメッシュ化処理結果

## 4.2 3Dプリンタの利用

ここでは、仏塔を手にとって容易に構造を調べたり、博物館などで展示できるようにするために、近年、急速に普及してきた3Dプリンタを使って印刷する方法について述べる。3Dプリンタの方式には、熱で溶解する樹脂を1層ずつ積層していく熱溶解積層方式や、紫外線を照射すると硬化する液体樹脂を用いる光造形方式などがある。そのうち、安価なもので一般的に利用されているものが、熱溶解積層方式の3Dプリンタである。本研究では、熱溶解積層方式であるFLASHHORGE社 Dreamerを利用した。この3Dプリンタの出力できる最大サイズは、225mm×145mm×140mmであり、造形精度は0.05mmから0.3mm、使用できる樹脂は、主にABS、PLAの2つである。PLA樹脂は、ABSに比べて収縮せず、歪みが少ない反面、表面加工や塗装しにくいという特徴がある。

この3Dプリンタを利用して出力するためには、4.1節で述べたポリゴンメッシュ化したデータをSTL形式に変換する必要があるが、点群データからポリゴンメッシュ化した場合、面に欠落部分が生じやすく、出力に失敗することがあるため、ポリゴンメッシュを修正する必要がある。

4.1節で得られたポリゴンメッシュを修正しSTL形式で出力したものを、収縮が少ない樹脂であるPLAを使って印刷を行った。積層間隔は0.05mmで、印刷時間は約17時間である。印刷した仏塔は、外観と内部の構造がわかるように、あらかじめデータを分離して、図13に示すように、外観と内部を個別に印刷した。印刷した仏塔は、高さが0.1m、実際の仏塔の約1/165スケールであり、形状を直感的に把握しやすいものとなった。次に、ポリゴンメッシュ化した仏塔を使った仮想空間の構築方法について述べる。

## 4.3 仮想空間の構築

ここでは、契丹(遼)時代に築かれたと言われるヘルレンバルスホト1の城壁を3次元CGで再現し、ポリゴンメッシュ化した仏塔を配置することで、位置関係を把握でき、仮想的に遺跡を体験できる空間(仮想空間)を構築する方法について述べる。以下に本研究で利用した環境を示す。

- ・仮想空間構築用ゲームエンジン：Epic Games社 Unreal Engine 4.6.7
- ・ヘッドマウントディスプレイ (HMD)：Oculus社 Rift DK2
- ・表示用PC：OS Windows7 Professional 64bit、メモリ8GB、グラフィックス  
NVIDIA®GeForce®GT540M VRAM1024MB
- ・モバイル端末：Apple社iPhone 6 plus

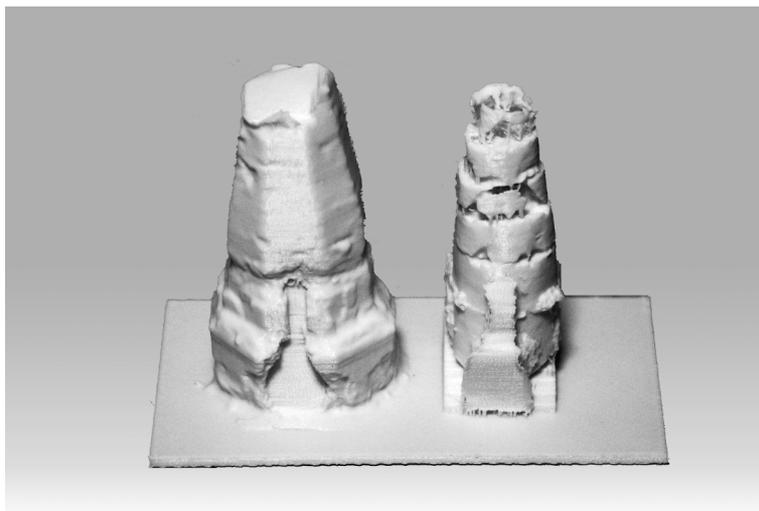


図13 3Dプリンタの印刷結果

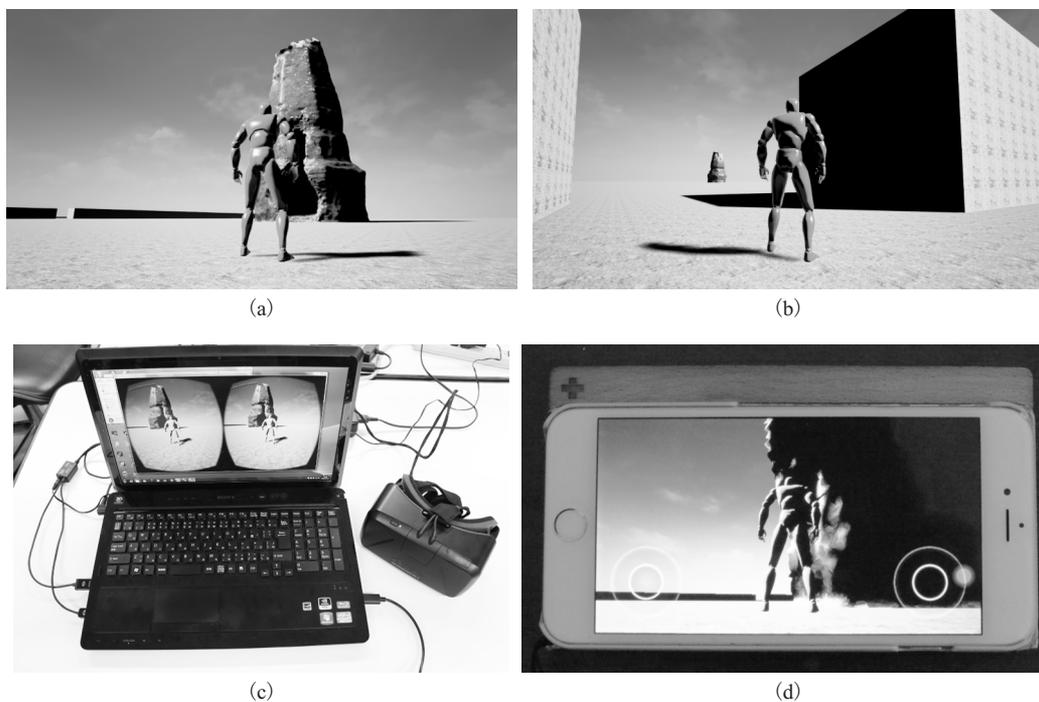


図14 ヘルレンバルスホト1の城壁と仏塔を再現

仮想空間を構築するにあたり利用したゲームエンジンUnreal Engineは、物理演算機能をもち、素材(ここでは、ヘルレンバルスホト1の仏塔、城壁、画像データ)を入力するだけで、図14(a)(b)のように、仮想空間を構築できるものである。さらに、図14(c)(d)に示すようにOculus社のヘッドマウントディスプレイ(HMD)やモバイル端末にも対応している。このHMDは、3D立体表示が可能で、ジャイロセンサーが搭載されているため、利用者の頭部の動きに合わせて、リアルタイムに視点を変更することが可能である。そのため、臨場感の高い仮想空間を表示させることが可能であるため、遺跡の細部まで確認することができる。さらに、図14(d)に示すようにモバイル端末用に出力することで、特別な機器がなくても、手軽に仮想空間を閲覧することが可能である。

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、契丹(遼)時代に建立されたとされるヘルレンバルスホト1の仏塔の調査内容について述べた。仏塔内部で露出した建築部材の一部を採取し、炭素14年代測定した結果、校正年代は、16世紀から17世紀前半である可能性が判明した。このような年代測定結果が出たことは非常に興味深い。採取した建築部材が補修用に使われた可能性もある。また、年代測定が必ずしも実年代を表している訳でもない。このため、仏塔がいつ建立されたのかを特定するためには、内モンゴルなどに現存する仏塔などを比較し、さらなる調査が必要である。

仏塔のデジタルアーカイブに関しては、2種類の方法を適用した。1つは、3Dレーザスキャナから得られた計測データを利用したModel-Based Rendering方法、もう1つは、画像データを利用したImage-Based Rendering方法である。この両方を利用することにより、構造情報と現状を把握することが容易なデジタルデータを蓄積することができた。

さらに、計測したデジタルデータを利活用する目的で、3Dプリンタへの印刷、および仮想空間の構築を行った。3Dプリンタに印刷することで、仏塔の形状を手にとって把握することができ、博物館展示などにも活用することができる。また、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を利用し、臨場感の高い仮想空間を構築することで、遺跡構造や隣接する遺跡の位置関係を容易に把握することができ、さらにモバイル端末上でも動作させることが可能であるため、デジタルアーカイブ化した成果を、より分かりやすく、一般市民にも公開することが可能である。

今後は、モンゴル国にある仏教寺院の遺跡を中心にデジタルアーカイブ化を進めていくとともに、契丹(遼)以降の仏教遺跡が変遷していく過程を、デジタル化した遺跡の構造情報をもとに考察していく。また、デジタルアーカイブ方式の検討を行い、規模が大きい遺跡に関しては、3Dレーザスキャナを利用した場合、時間が非常にかかるため、簡易な方法の1つとして、無人航空機(ドローン)を用いた空撮と画像計測技術を組み合わせて、広範囲を短時間でデジタルアーカイブ化できる手法を開発する予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、JSPS科研費25870970の助成を受けたものである。

[参考文献]

- А. Энхтөр, Л. Мөнхбаяр, Г. Батболд, Ц. Буянхишиг, Т. Хантагс (2015) Дорнод аймгийн Цагаан-Овоо сумын нутагт орших Хэрлэн Барс 1 хотын суварганд хийсэн археологийн малтлага судалгааны урьдчилсан үр дүн, *Монголын археологи-2014, ШУА-ийн археологийн хүрээлэнгийн 2014 оны хээрийн судалгааны үр дүн*, pp. 131-135.
- Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva C. and Taubin G. (1999) The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol. 5 No. 4*, pp. 349-359.
- S. B. Kang (1999) A survey of image-based rendering techniques, *VideoMetrics, SPIE Vol. 3641*, p.2-16.
- 台聯國風出版社(1967)『蒙古遊牧記』16卷、清朝藩屬輿地叢書第4冊、pp.2069-2070.
- 正司哲朗、A.エンフトル(2013) モンゴル国における大型城郭都市のデジタルアーカイブ2012、2012年調査報告書、奈良大学総合研究所・モンゴル科学アカデミー考古学研究所.
- 正司哲朗、A.エンフトル(2014) モンゴル国における大型城郭都市のデジタルアーカイブ2013、2013年調査報告書、奈良大学総合研究所・モンゴル科学アカデミー考古学研究所.
- 正司哲朗、A.エンフトル(2015) モンゴル国における大型城郭都市のデジタルアーカイブ2014、2014年調査報告書、奈良大学総合研究所・モンゴル科学アカデミー考古学研究所.
- Michael Kazhdan, Matthew Bolitho , and Hugues Hoppe (2006) Poisson surface reconstruction, *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, pp.61-70.