



考古天文学シミュレーションソフトウェア
"arcAstro-VR" の開発

関口和寛(国立天文台)

国立天文台談話会
2023年1月20日

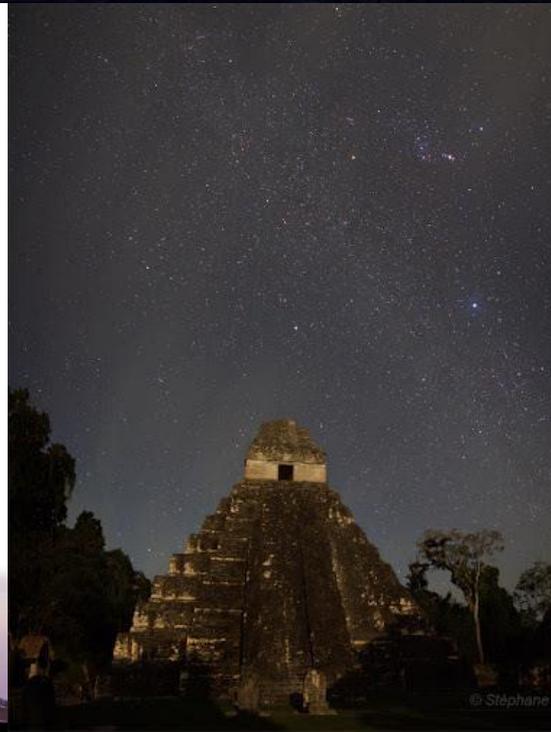


本日の報告:

新に開発した“考古学向け天体シミュレーションソフト **arcAstro-VR** の概要と、地形データおよび考古学サイトの遺跡/遺構等の建造物データを正確に表現して構築するためのデータ処理方法について報告します。

また、arcAstro-VRを使った例として、佐賀県にある吉野ヶ里遺跡の仮想再現モデルを紹介します。

*このソフトの開発は科研費新学術「人工的環境の構築と時空間認知の発達(課題番号19H05732)」の一部として、また吉野ヶ里遺跡関連の研究は科研費基盤A「天文学との連携にもとづく考古学・古代史学研究法の構築(課題番号19H00544)」の一部として行っています。



考古天文学

考古天文学では、考古資料に残る天文現象を調べるだけではなく、考古遺物の方位角と日の出/日の入り、月の出/月の入り、惑星と星の位置、星々の空間パターン、さらには太陽や月が投じる光と影等との相関を調べます。

キトラ古墳の天井に描かれた天文図



ストーンヘンジ



考古天文学

エジプトの太陽神“Ra”



古代社会においては、空に見える天体現象は日常生活の一部であり、自然と人間の関係についての概念、とりわけ時間と季節の概念と結びついて私たちの祖先によって認識されました。

そこで、天体現象と考古学的構造の位置関係を視覚化することが出来れば、そのような構造物を作った古代文明の人々が天体をどのように捉えていたかを知ることが出来、その文明の宇宙と世界についての概念を探ることができます。



古代中国の天文図

天体と地上の構造物との位置関係

・至点のような特定の日時での天体の位置や方向が、考古学的構造と関連する証拠が示されています。*1, *2, *3

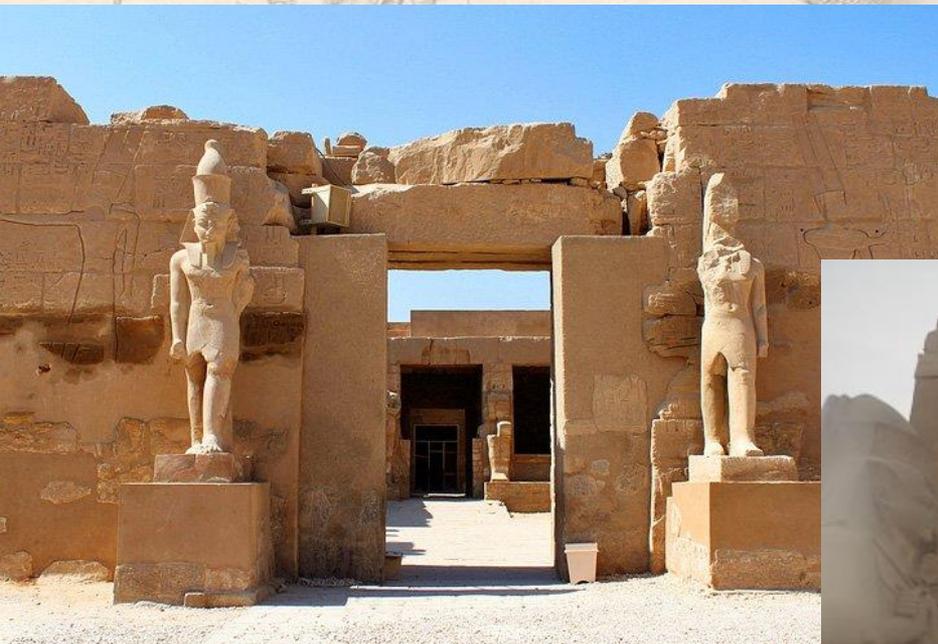
・先史時代のモニュメントの配置と向きを分析することで、それらのモニュメントを建てた人々の空間的認識を解釈することができます。

*1 Belmonte, J. A. (2015). Solar Alignments - Identification and Analysis. In *Handbook of Archaeoastronomy and Ethnoastronomy* (pp. 483-492). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6141-8_36

*2 González-García, A. C. (2015). Lunar Alignments - Identification and Analysis. In *Handbook of Archaeoastronomy and Ethnoastronomy* (pp. 493-506). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6141-8_37

*3 Ruggles, C. L. N. (2015). Stellar Alignments - Identification and Analysis. In *Handbook of Archaeoastronomy and Ethnoastronomy* (pp. 517-530). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6141-8_39

天体と地上の構造物との位置関係



エジプトのカルナック神殿

カルナックの Amen 寺院には、真冬の昇る太陽にのみ照らされる通路があります。



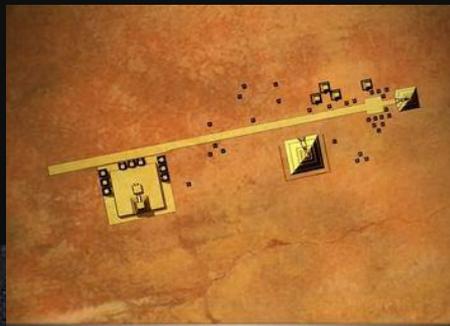
天体と地上の構造物との位置関係

クukulカンのピラミッドは年に2回、蛇のような影を作ります。

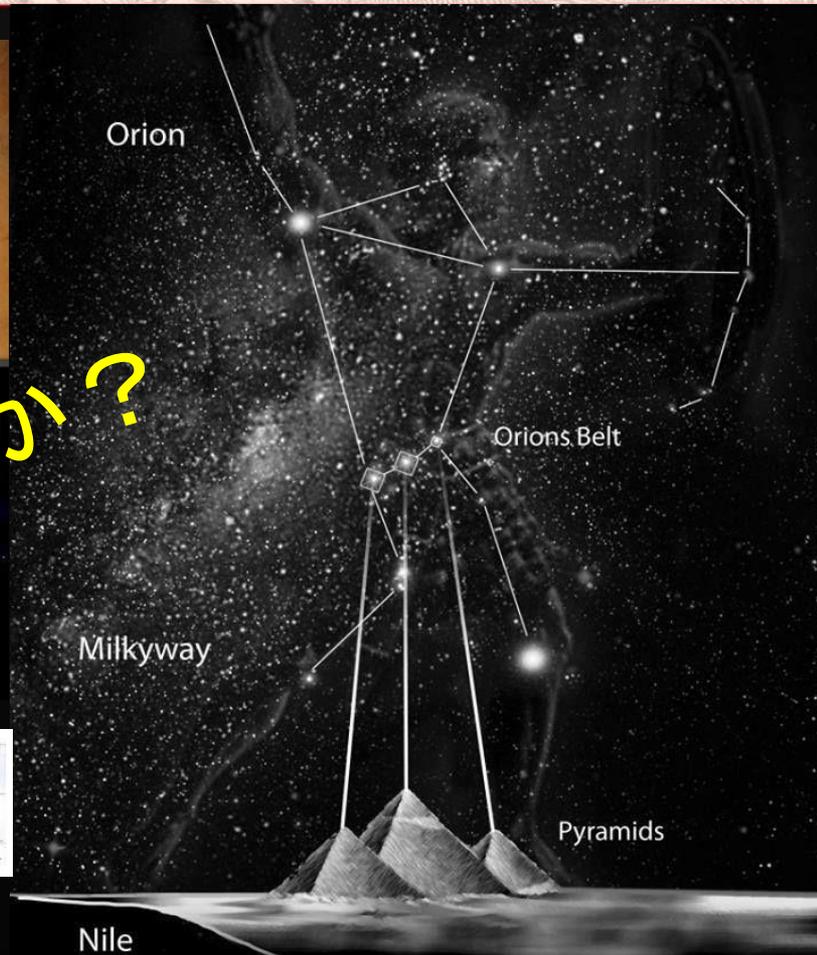
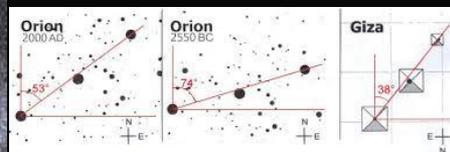
昼夜の長さが同じである場合に、それが起こります。



天体と地上の建造物との位置関係



これらは本当か？



エジプト、ギザの3大ピラミッド

● 天文シミュレーションの必要性

地球の歳差運動等のために、今日我々が見る天体の位置と古代の人々が見た天体の位置は同じではありません。



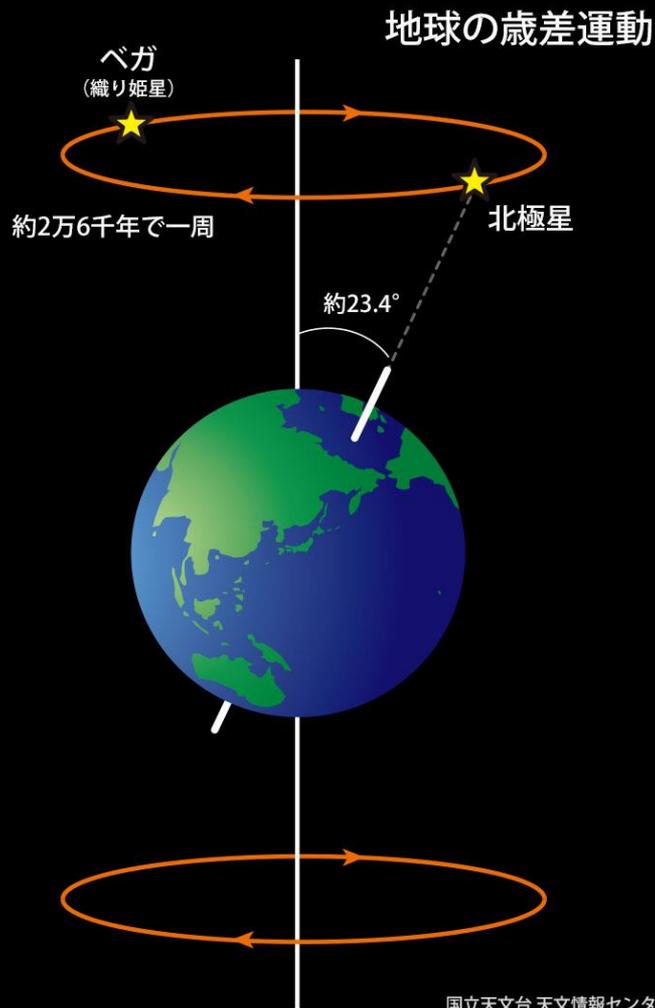
・星同士の物理的な動きは、数万年のタイムスケールでも肉眼では無視できるため、先史時代の初期から星座の特徴的なパターンは大きく変化していません。

・しかし、数十年から数世紀のタイムスケールでは、歳差と呼ばれる等軸歳差のために、星の配列全体が天球上を移動します。

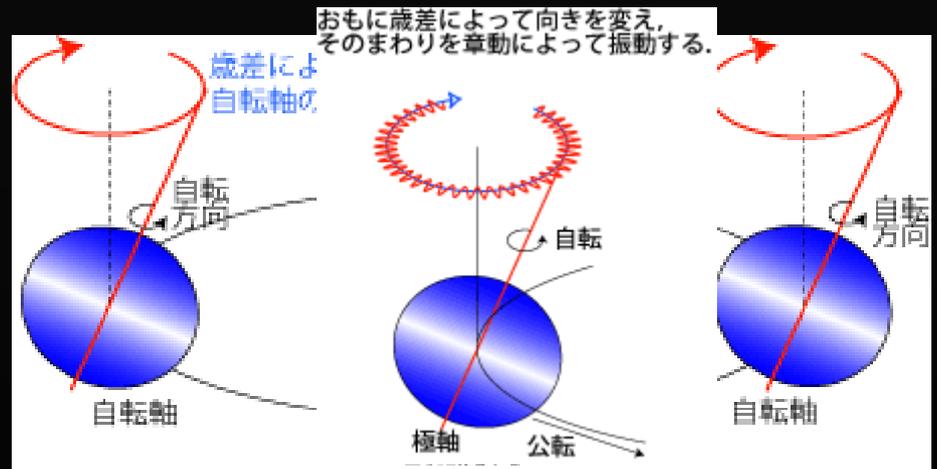
・数十年と数世紀のタイムスケールにわたって、歳差運動は任意の星の赤緯をシフトし、したがってその上昇位置をシフトします。

・周極星は周極星になるのをやめるかもしれませんが、その逆もありますが、他の星は地平線の下に完全に消えるか、初めて現れるかもしれません。

歳差・章動と地球の向きの変化

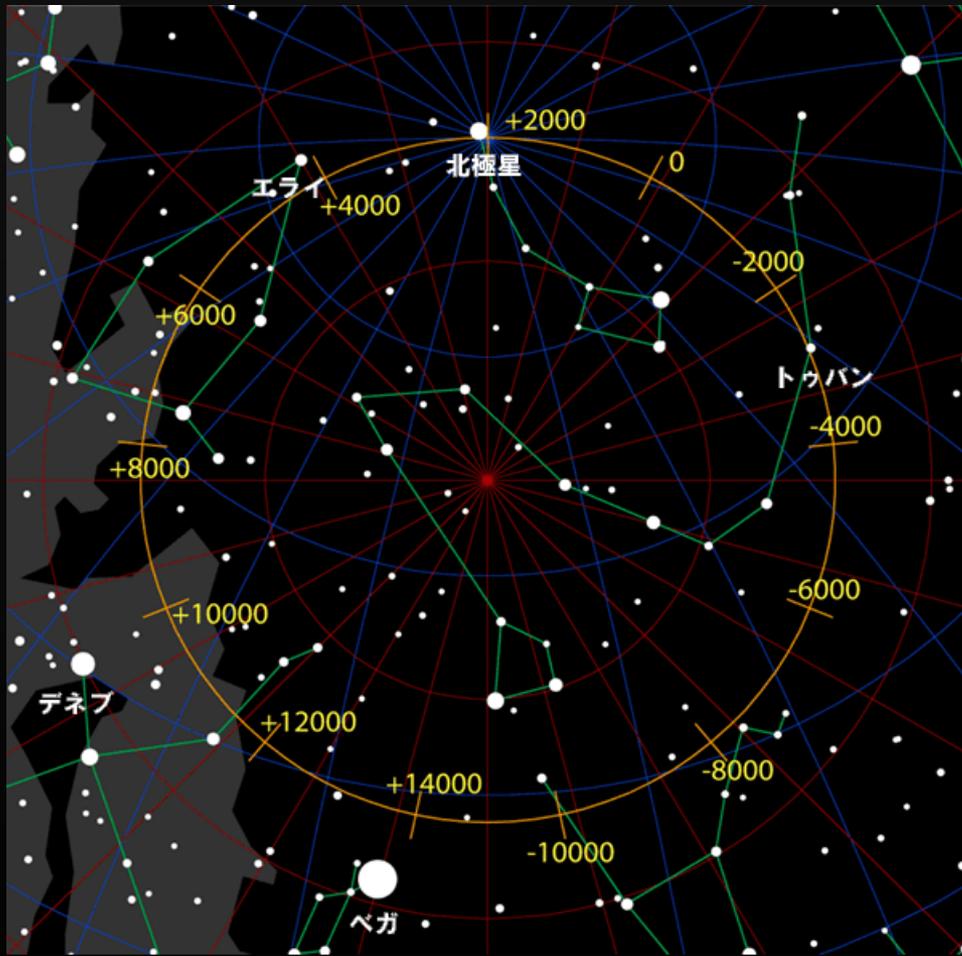


太陽の周りの年間軌道を進むにつれて、地球も1日1回、それ自体の軸を中心に回転します。これにより、宇宙で同じ方向が維持されます。歳差運動が発生するのは、遠方の星に対する地球の軸の向き(地球が太陽の周りを周回しているという事実とは無関係)が、25,800年の周期でコマのように徐々に回転するためです。



歳差・章動と地球の向きの変化

過去における天体の見掛けの位置は、歳差等により変化します。

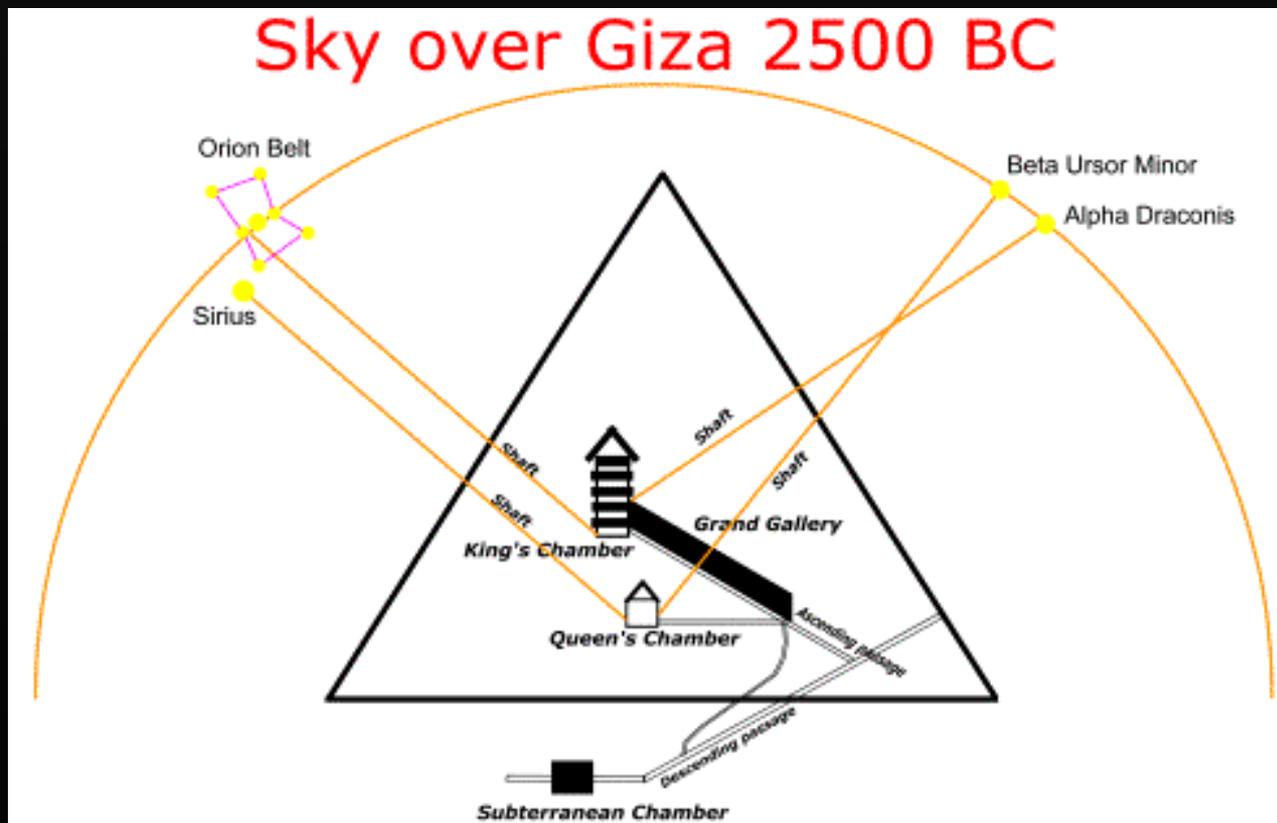


・今日の天の北極から1度以内にある北極星(ポラリス)は、西暦1600年には北極から約3度離れていました。(西暦1000年頃まで遡ると、ポラリスは極から6度離れていたもので、何時頃から「北極星」として認識されたのか?)

・一方、りゅう座アルファ星(トウバン)は、今日の極からは25度離れていますが、紀元前2800年頃には1度以内にあったため、古王国時代の初め頃の古代エジプト人にとって「北極星」でした。

歳差・章動と地球の向きの変化

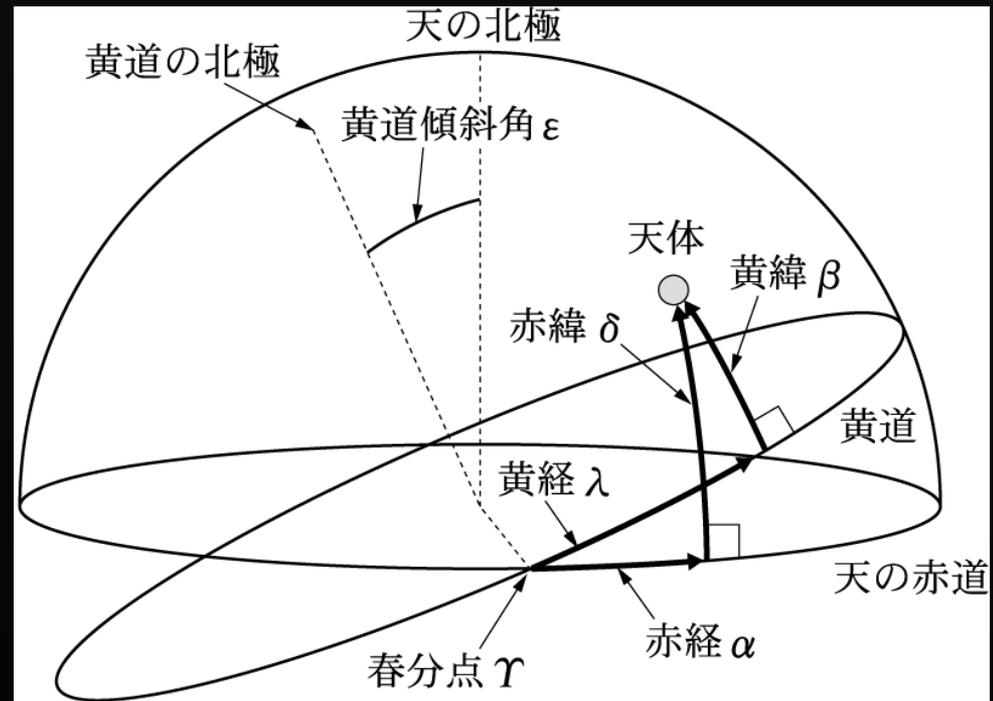
ギザのクフ王の大ピラミッド内のシャフトの1つが、意図的にその方向に配置されている可能性が指摘されています。



黄道傾斜角の変化

太陽、月、惑星の上昇位置と沈下位置は歳差運動の影響を受けませんが、黄道傾斜角が時間とともにゆっくりと変化するため、時間の経過とともにわずかに変化します。

過去数千年にわたって、それは紀元前5000年の約24.15度から現在の23.45度までゆっくりと減少していますが、より長い時間スケール（約41,000年）にわたって、それは約24.4度と22.2度の限界の間で振動します。（紀元前6,000年頃に最大値に達し、西暦14,000年頃に最小値に達します。）



過去の天空と風景を再現し、視覚化する

過去における天体の見掛けの位置変化の他にも、遺構その物の保存状態も良いとは限りません。

アンコールワット



パルミラ遺跡

過去の天空と風景を再現し、視覚化する

簡単にアクセスできない場所や、歴史的建造物が地震などの自然災害や意図的な人間の行動によって破壊された場所の調査が必要になります。

ダムに沈んだ古代遺跡（ポルトガル）

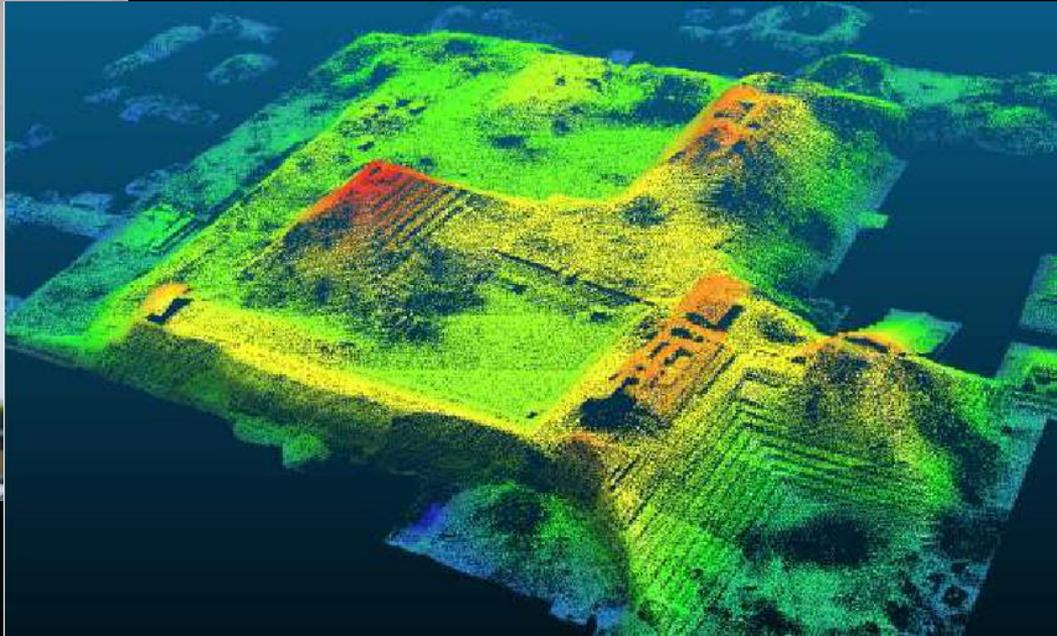


愛知県瀬戸市「大平窯跡」



過去の天空と風景を再現し、視覚化する

さらに、至点などの特定の日付での調査が必要だったり、数か月または数年にわたって観察することは困難です。そこで、興味ある遺構を実測や記録から再構築し、過去の天体現象のシミュレーションに応じた効果を仮想3D空間として体験できるコンピューターシステムの開発が望まれます。





● 考古天文学シミュレーションソフトウェアの開発目標

- ・天文学的に正しい空のシミュレーションで、先史時代の研究にも適応できる。
- ・昼光の空、薄明の現実的なシミュレーションを提示したり、パノラマ写真で地平線を飾ったりすることができる。
- ・建物の軸に沿った建築の視線（または同様に、直立した石の列など）を調査するため、各視点から、現場で撮影した写真または3Dモデルのレンダリングから、パノラマを作成することが出来る。
- ・既知のポイント、または構造を仮想空間で調査する必要がある場合。3Dランドスケープをロードできる、またはロードするように拡張出来る。

arcAstro-VRとは？

arcAstro-VRの紹介

- 地形、3Dデータ、天文現象をパソコンでVR再現するアプリケーションです。
- LiDARやフォトグラメトリで測量したデータを3D化して可視化することができます。
- VR空間の中を自由に移動したり、設定を変更してさまざまな検証が行えます。



arcAstro-VRのPCモニター表示例

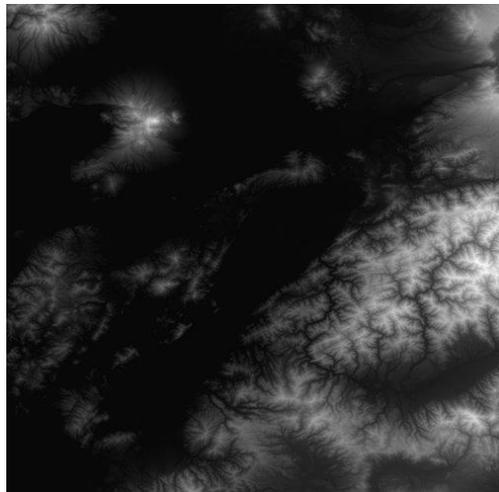
(地形、建物データは各自で用意)

Windows/Mac/Linux対応

(一般のノートパソコンでも動作可)

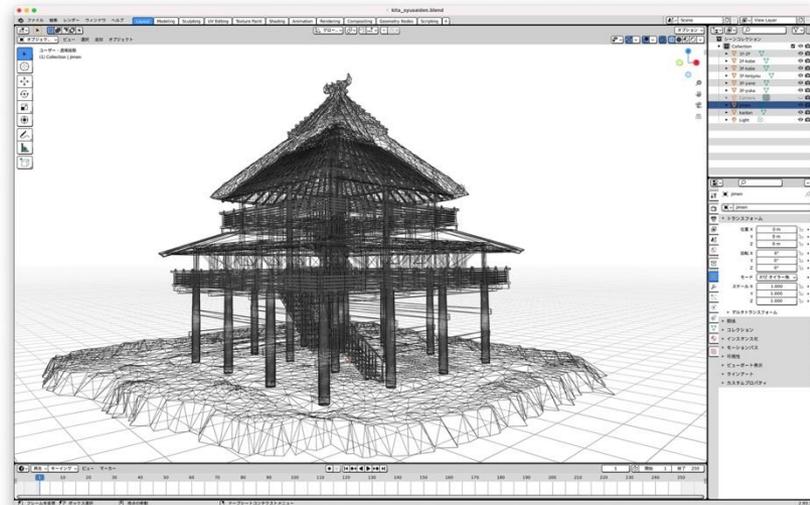
読み込める地形・建造物のデータ形式

地形データ:
geoTiffファイル形式



geoTiff: 標高をグレーで表した平面画像データ

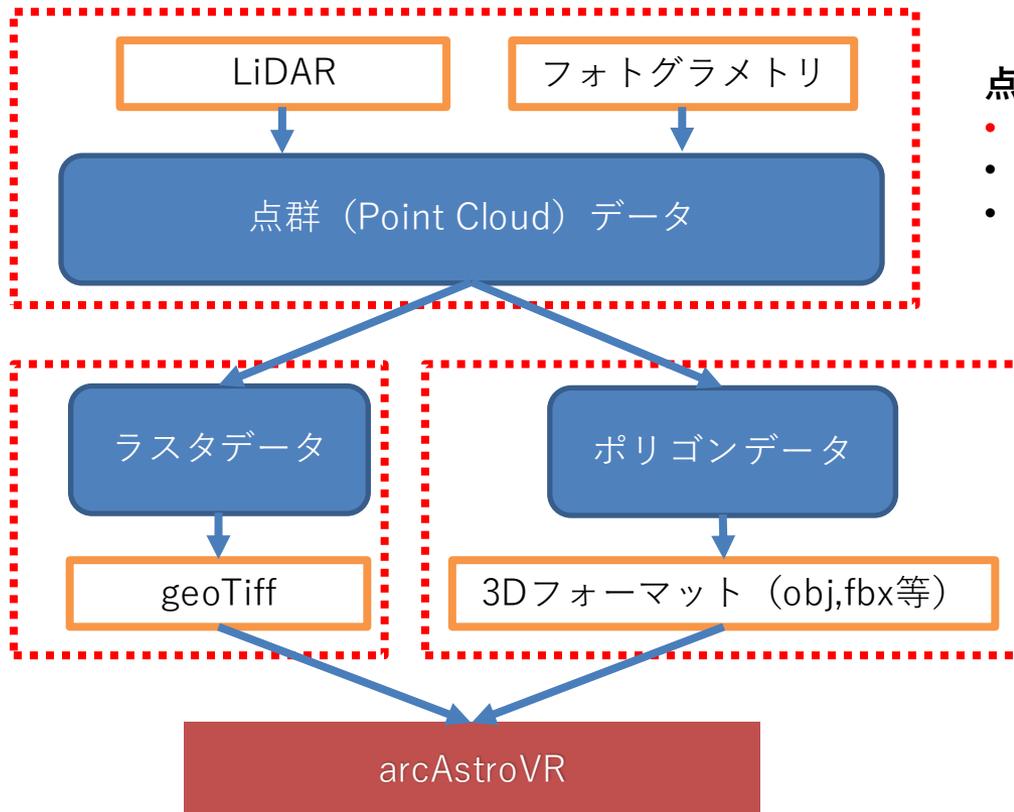
建造物データ:
3Dファイル形式 (obj、fbx、ply等)



3Dファイル: xyzの座標で点、線、面を配置した立体空間データ



各種測量からデータ作成の流れ



点群データ処理

- MetaShape(旧Photoscan)
- ScanSurvey Z
- etc...

地形データ処理

- QGIS(free)

専用プラグイン
(terrain maker for
arcAstroVR) で特
殊補正された地形
を作成

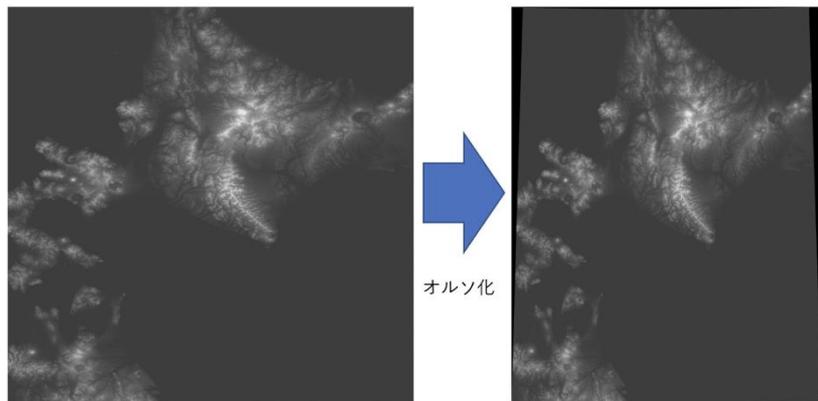
建造物等3Dデータ処理

- Blender(free)
- Maya
- AutoCAD
- FreeCAD(free)
- etc...



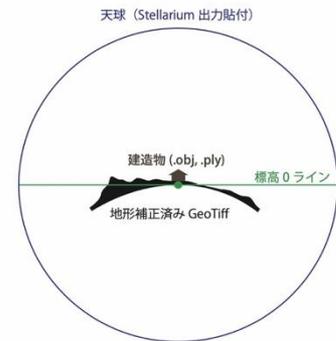
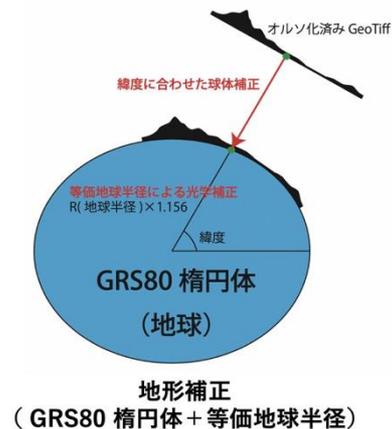
QGISプラグインでの地形補正

オルソ化(正射方位図法)
球体形状補正
ジオイドモデルの導入
光学補正(等価地球半径補正)



等緯度経度図法

正射方位図法

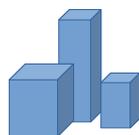


Unity空間での地形・建造物・天球配置

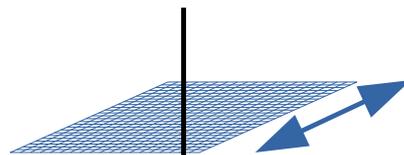


arcAstro-VR内での地形再現

3Dモデル
(総合計1000万
ポリゴン程度)

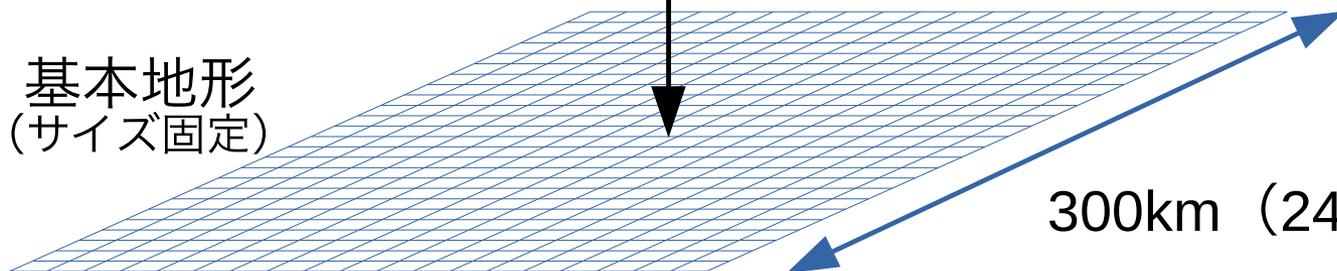


詳細地形
(解像度可変)



102.4m~10240m
(0.1m~10mメッシュ)

基本地形
(サイズ固定)



300km (24.4mメッシュ)



arcAstro-VRでの星空再現

天文シミュレータ“Stellarium”

(<http://stellarium.org>)と連携して、星空を再現

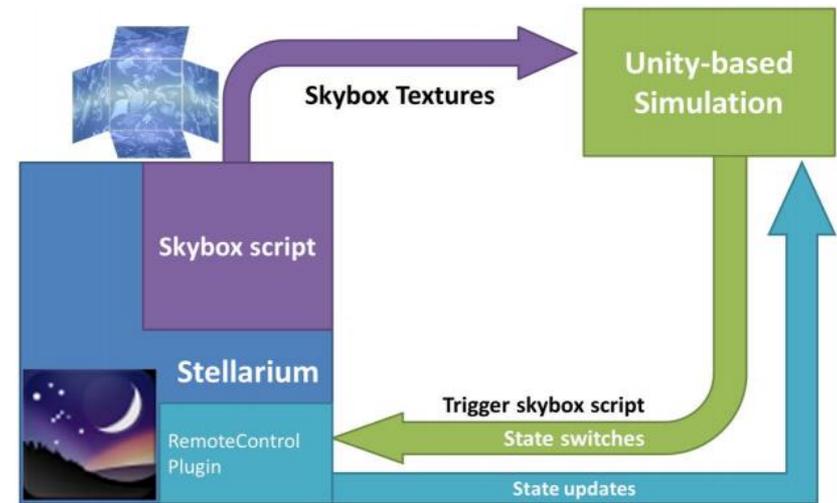
*フリーソフト

*Windows/Mac/Linux版

*標準でVSOP87 (-2000～6000年)対応

*拡張でDE430(詳細計算:1550年～2650年)、DE431
(広範囲計算:-13200年～17191年)対応

StellariumのRemote Control (Plugin) , Skybox
Tiles (Script) 機能を使用して、Stellariumの星
空画像をarcAstroVRに転送して表示



arcAstroVR (Unityプログラム) と
Stellariumの連携図



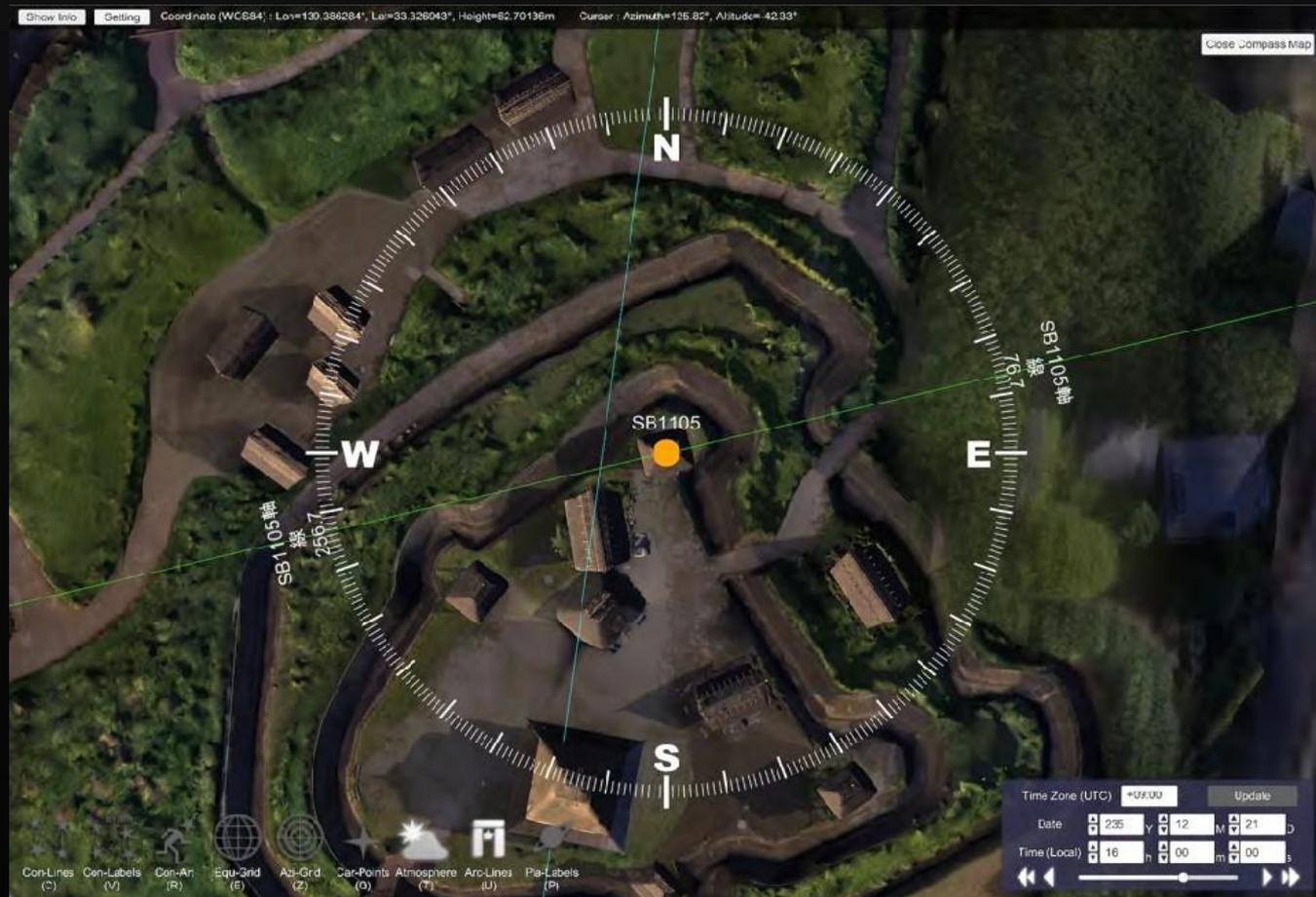


arcAstro-VRで出来ること

- 自分で用意した3Dモデルデータの取り込み
- 3Dモデルの表示・非表示や移動、マーカーの設置、補助線の設置
- VR空間の自由な移動（マウス・キーボード・ゲームコントローラ等）
- -2000年～6000年の高精度な天文現象再現
- 太陽や月を光源とした日照や影、水面反射の検証
- 詳しくは <https://arcastrovr.org/ja/> を参照ください。

コンパスマップ機能

- 補助線の始点となるマーカーを中心としたコンパスマップ（直上のオルソマップに方位を加えたもの）を表示



ドームマスター出力対応

- 魚眼レンズでドームに360度投影が可能 (ドームマスター形式)
- 画角指定可能
- 方位指定可能
(進行方向固定や
方位角度固定など)



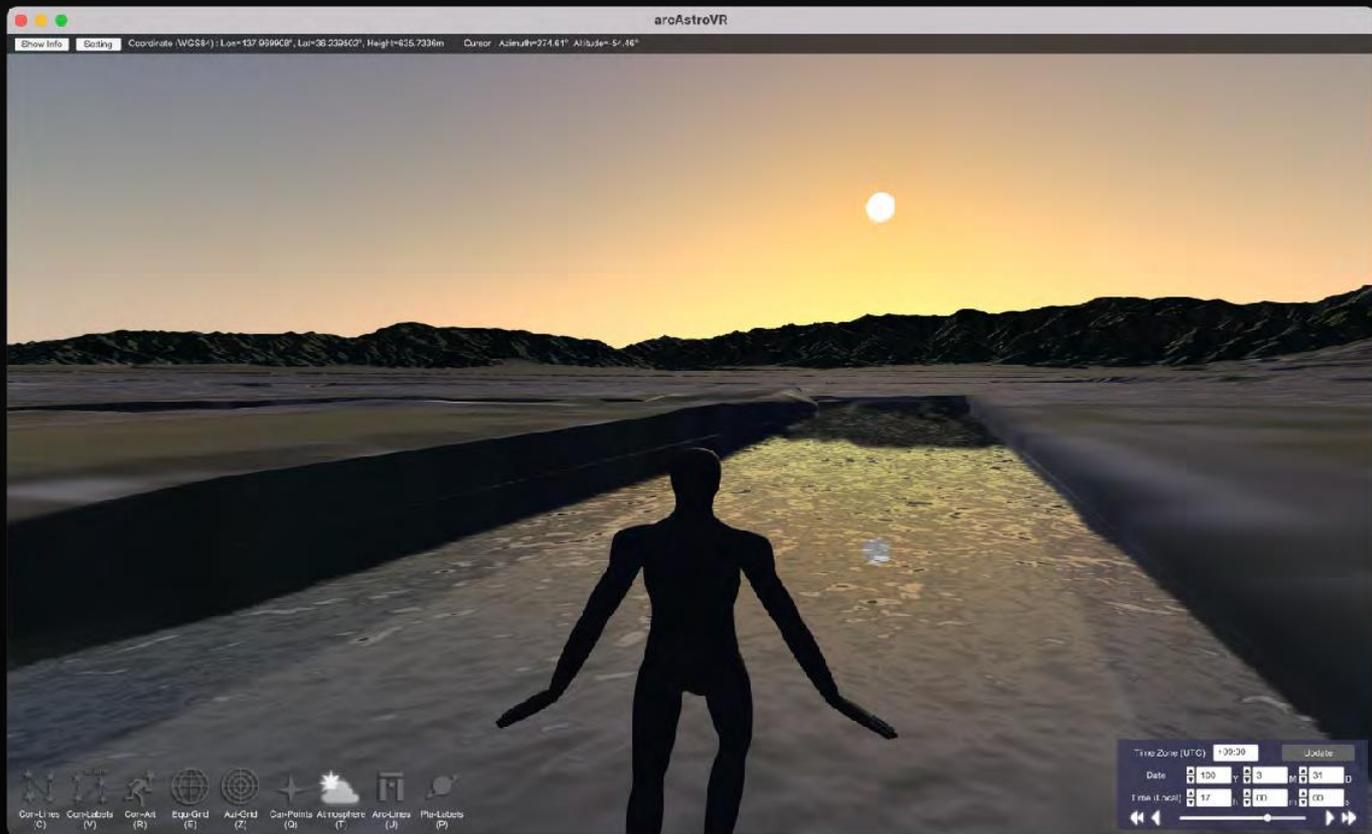
HMD対応

- Meta Quest (Oculus Quest) に対応
MetaLinkでPCと接続することにより、
HMDを通してVR空間を体験できます。
※Windowsのみ対応



水表現

- 任意の場所に水面の設置が可能
- 水面の反射をシミュレート





吉野ヶ里遺跡の3Dモデル化

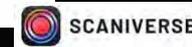
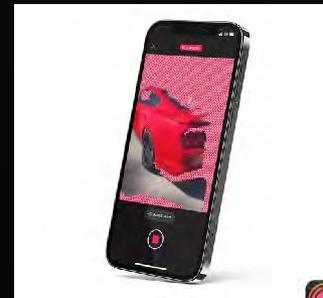
3Dモデル作成について

2021年～2022年にかけて吉野ヶ里遺跡の3D測量を実施し、arcAstroVR用の3Dモデル化を行った。

1. 測量データから点群を作成
2. 点群を地形や樹木、建物等に分類し、ノイズ処理
3. 分類した点群を基に、地形の低ポリゴンモデルを自動生成
4. 分類した点群を参考に、建物の低ポリゴンモデルを手動作成
5. 低ポリゴンモデルに対し、ノーマルマップを作成し、詳細モデルを作成
6. 低ポリゴンモデルに対し、テクスチャマップを作成
7. 3Dモデルを出力

吉野ヶ里遺跡の測量方法 3Dモデル作成について

- ドローンによる空中撮影からフォトグラメトリで3D化
- 360度カメラによるビデオ撮影からフォトグラメトリで3D化
- iPhone/iPad搭載のLiDARスキャナによる測量から3D化





吉野ヶ里遺跡の空撮測量 3Dモデル作成について

- 使用したドローンはDJI Phantom3、搭載カメラはFC300C、撮影高度は約30m
- ドローンによる空中撮影から、フォトグラメトリ処理により点群を作成
- フォトグラメトリによる点群化はAgisoft社のMetashapeを使用
- エリアが広いため、北エリア・中エリア・南エリアの3回に分けて測量を実施
- 昨年度は北エリアの撮影（京都大学 宮原俊一先生）を実施し北内郭を3D化、本年度は中エリア・南エリアの撮影（株式会社とっぺん）を実施し南内郭・市と 蔵・南の村を3D化

吉野ヶ里遺跡の空撮測量：北エリア

- 写真撮影数：775地点



- 生成点群数：1,588,823,836点

吉野ヶ里遺跡の空撮測量：中エリア

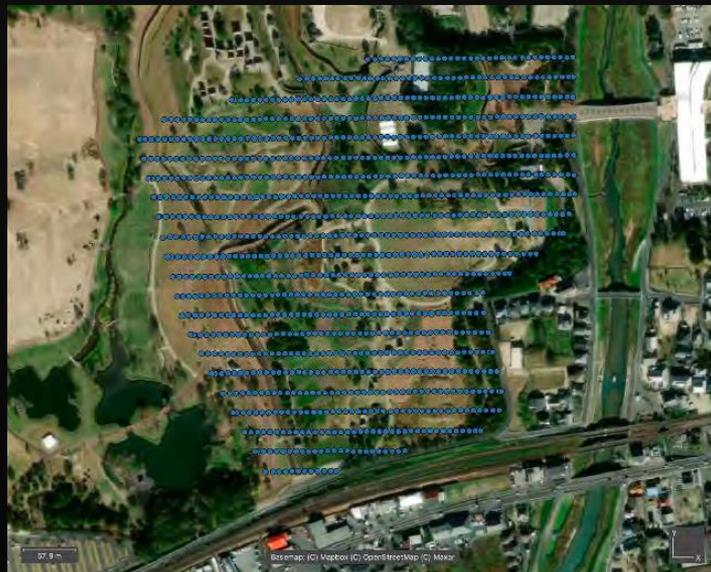
- 写真撮影数：660地点



- 生成点群数：2,100,216,098点

吉野ヶ里遺跡の空撮測量：南エリア

- 写真撮影数：1131地点



- 生成点群数：2,645,988,574点



空撮測量の問題点

- ドローンのGPS情報と連動できる場合、写真位置特定の精度が高く、地形も高精度に再現できる。
(今回の点群間隔は数mm~1cm)
- 一方、空撮は空中から下向きの撮影になるので、建造物は影になる部分のデータが得にくく、屋根のみとなりがち。建造物については、別手段の測量が必要。





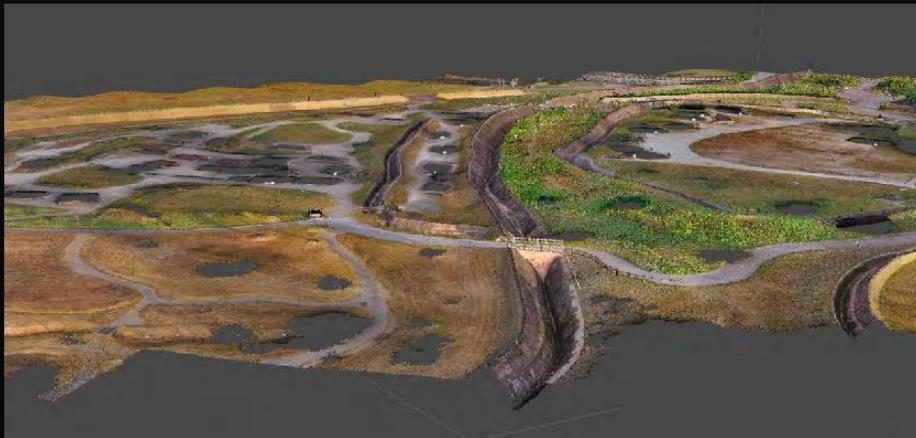
空撮測量データの処理

- Agisoft社Metashapeにより、点群を地形と建物に分離。
- 地形の点群については、Metashapeのポリゴン化機能で最高精度(ノーマルマップ作成用)と10万ポリゴン指定カスタム精度(実際に使用するポリゴン用)の両出力を行う。
- 建物の点群については、最高精度(ノーマルマップ作成用)ポリゴンのみ出力。実際に使用する用の低ポリゴンはCGソフトのBlenderで別途手動作成するので、ここでは出力しない。

空撮測量データの地形・建物 点群分離 3Dモデル作成について

- 北エリア地形点群数 : 1,368,609,112
中エリア地形点群数 : 1,777,257,482
南エリア地形点群数 : 2,226,905,427

- 北エリア建物点群数 : 83,539,175
中エリア建物点群数 : 162,476,620
南エリア建物点群数 : 81,886,892



地形点群のモデリング処理

- Metashapeの「メッシュ構築」で点群から作成した最高品質ポリゴンはポリゴン数が非常に大きい
- 3D Game等ではポリゴン数は数千～数万程度に抑えるべきとされているので、Metashapeの「ポリゴン数削減」機能で、10万ポリゴン程度まで減らしてみる。

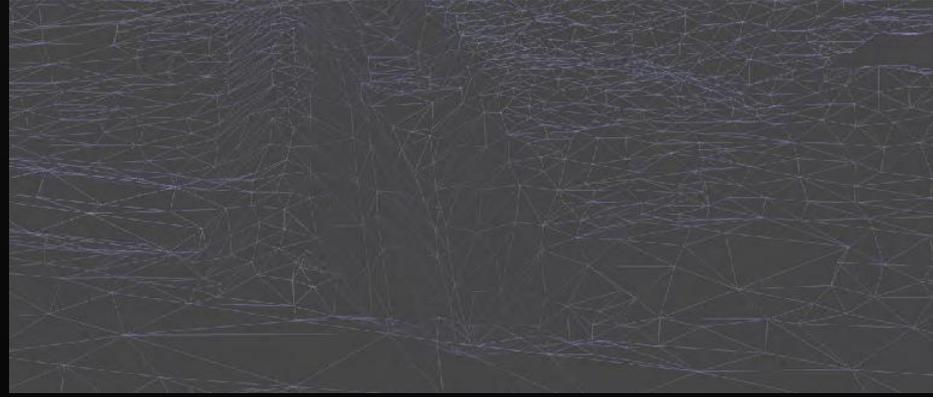


高ポリゴン (最高品質)

北エリア地形ポリゴン数 : 440,346,287

中エリア地形ポリゴン数 : 475,227,291

南エリア地形ポリゴン数 : 574,302,980



低ポリゴン (10万ポリゴン指定)

北エリア建物ポリゴン数 : 99,999

中エリア建物ポリゴン数 : 99,999

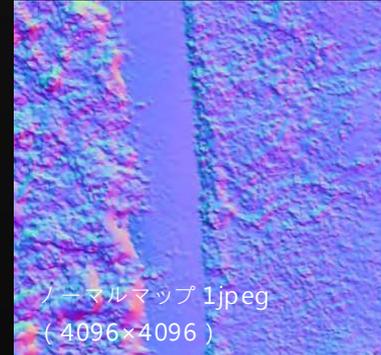
南エリア建物ポリゴン数 : 99,999



低ポリゴン化とノーマルマップ

- ポリゴン数が削減されると微細構造が失われる。それを補完するためにノーマルマップを作成する。
- ノーマルマップとは、ポリゴンに貼り付ける画像ファイル（テクスチャ）の一種で、ポリゴン表面の凹凸を画像にしたもの。細かい凹凸のポリゴンを画像化することで、ポリゴン数の削減ができると共に、ポリゴン表面の凹凸をノーマルマップから擬似再現することができる。
- 遠くに小さく見えるObjectでも、ポリゴンは全データを構築しないといけないが、テクスチャは見かけの大きさに応じて画像の圧縮が可能で、精度にも影響を出さない。

ノーマルマップを使った場合の効果



低ポリゴンは高ポリゴンよりも微細構造はかなり失われるが、ノーマルマップを加えることで、低ポリゴンでもかなりの微細構造を表現できるようになる。



ノーマルマップの作成

3Dモデル作成について

- Metashapeには、高ポリゴンと低ポリゴンのデータを比較し、高ポリゴンを基にした低ポリゴン用のノーマルマップ作成の機能がある。
- 地形は、点群データから高ポリゴンと低ポリゴンを生成し、両データからノーマルマップを作成することで、低ポリゴン + ノーマルマップの3Dを作成する。
- 建物は、点群データから高ポリゴンを作成する一方で、CGソフトで低ポリゴンデータを別途作成し、低ポリゴン + ノーマルマップの3Dを作成する。
(建築物の低ポリゴンは手動で作成した方が、圧倒的にポリゴン数を少なくすることができる：後述)

建物の360度カメラ測量

- ドローンによるフォトグラメトリを補完するために、360度カメラの動画撮影からフォトグラメトリで点群を作成
- 360度カメラはRICOH THETA Vを使用
- フォトグラメトリにはAgisoft社Metashapeを使用
- GPSと連動しないので、ドローンのデータで位置合わせをする必要がある



建物の360度カメラ測量のコツ

3Dモデル作成について

- 伸ばし棒等を使い、動画撮影をする
- 建物の周囲は必ず一周するようにする
- 戻ったりせず、滑らかな一筆書きになるような撮影をする
- 普段の歩く速度 (4 ~ 5 km/h) 程度の速さで十分



建物の360度カメラの点群データ

3Dモデル作成について

- 建物のデータ作成が目的なので、建物単位でデータを分割
- 生成点群数：数千万点/1棟
(右の齋堂の場合、点群数は17,165,392点)
- 数mの距離から撮った写真を基に作成しているので、テクスチャ（モデル表面の画像データ）作成にも適している





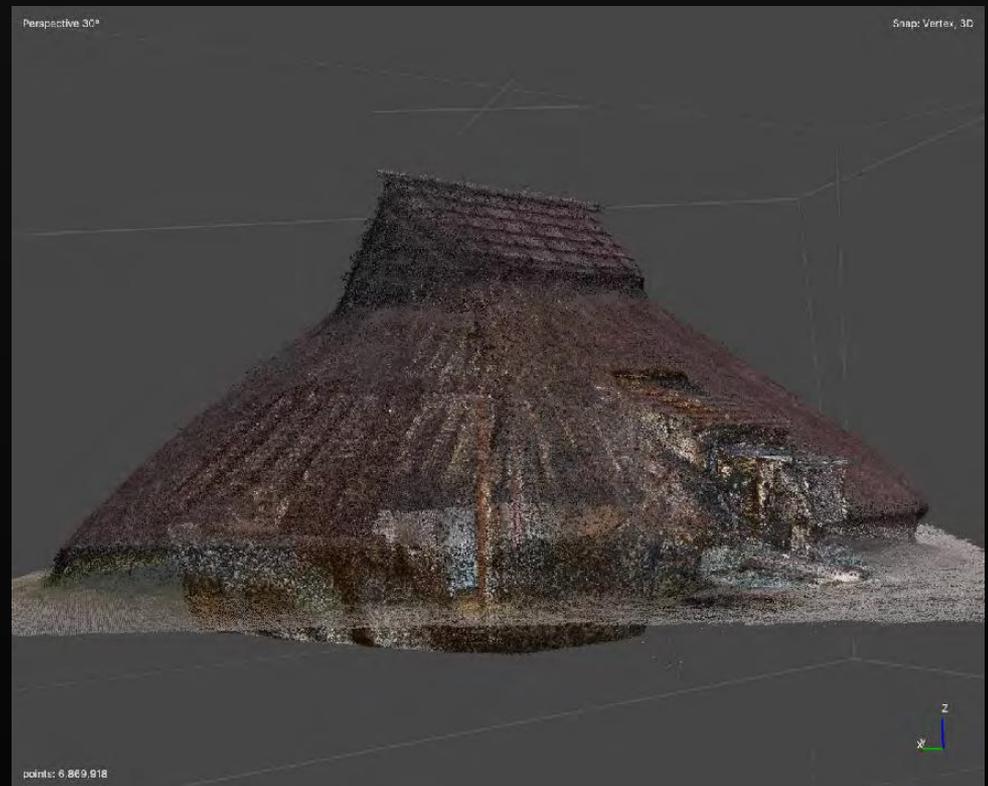
建物のLiDAR測量

- フォトグラメトリは写真からデータを生成する為、暗所に弱く、また被写体の周囲に十分な距離が必要なため、暗部や狭い場所（室内等）の補完測量として、LiDAR撮影を実施
- LiDAR機材には、LiDARスキャナを搭載するiPhone12ProおよびiPad Proを使用
- LiDARソフトにはScaniverse (<https://apps.apple.com/jp/app/scaniverse-3d-scanner/id1541433223>) を使用

建物のLiDAR測量の点群データ

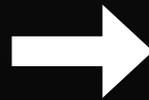
3Dモデル作成について

- 建物のデータ作成が目的なので、建物単位で測量を実施
- 生成点群数：数千万点/1棟
(右の竪穴住居の場合、点群数は6,869,918点)
- 暗く狭い居室内でも、それなりに構造を測定可能。ただし、離散点の色情報になっているため、テクスチャ作成には不向き

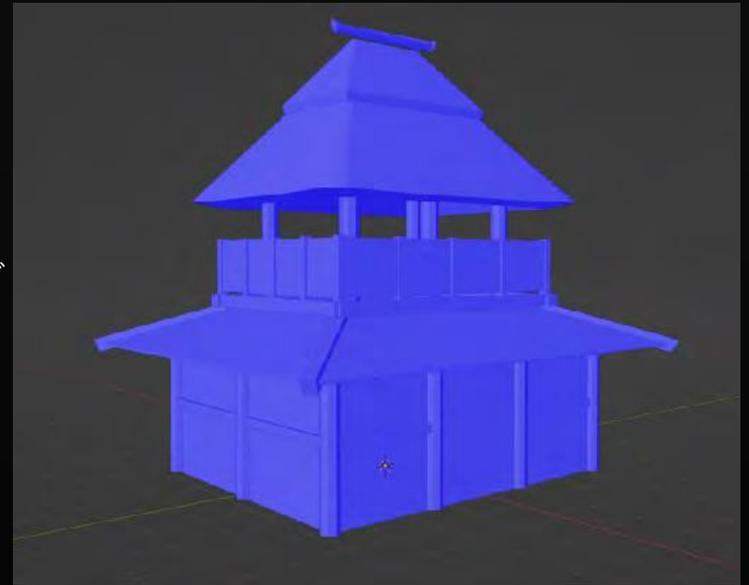


建物のモデリング処理

- 360度カメラとiPhone/iPadのLiDARスキャナで作成した建物の点群を位置合わせ・統合したのち、CGソフト（Blenderを使用）に読み込んで、参考にしながらモデリングを行う。



手作業でモデリング





建物のテクスチャ処理

- CGソフトで作成した建物の3DモデルをMetashapeに読み込み、この3Dモデルをベースにしたテクスチャとノーマルマップを作成することで、高精度モデルとして対応させる。





完成した吉野ヶ里遺跡のデータ概要

- 高ポリゴンを低ポリゴン+ノーマルマップのモデルに置き換えることで、精度をさほど落とすことなく、以下のように軽量化出来た。
- 北エリア地形：440,346,287ポリゴン→99,999ポリゴン+4ノーマルマップ
中エリア地形：475,227,291ポリゴン→99,999ポリゴン+4ノーマルマップ
南エリア地形：574,302,980ポリゴン→99,999ポリゴン+4ノーマルマップ
- 北エリア建物：28,169,047ポリゴン→13,697ポリゴン+4ノーマルマップ
中エリア建物：49,235,942ポリゴン→32,832ポリゴン+4ノーマルマップ
南エリア建物：24,083,858ポリゴン→15,813ポリゴン+4ノーマルマップ
- 合計：1,591,365,405ポリゴン→362,339ポリゴン+24ノーマルマップ



arcAstro-VRの3Dデータの限界点

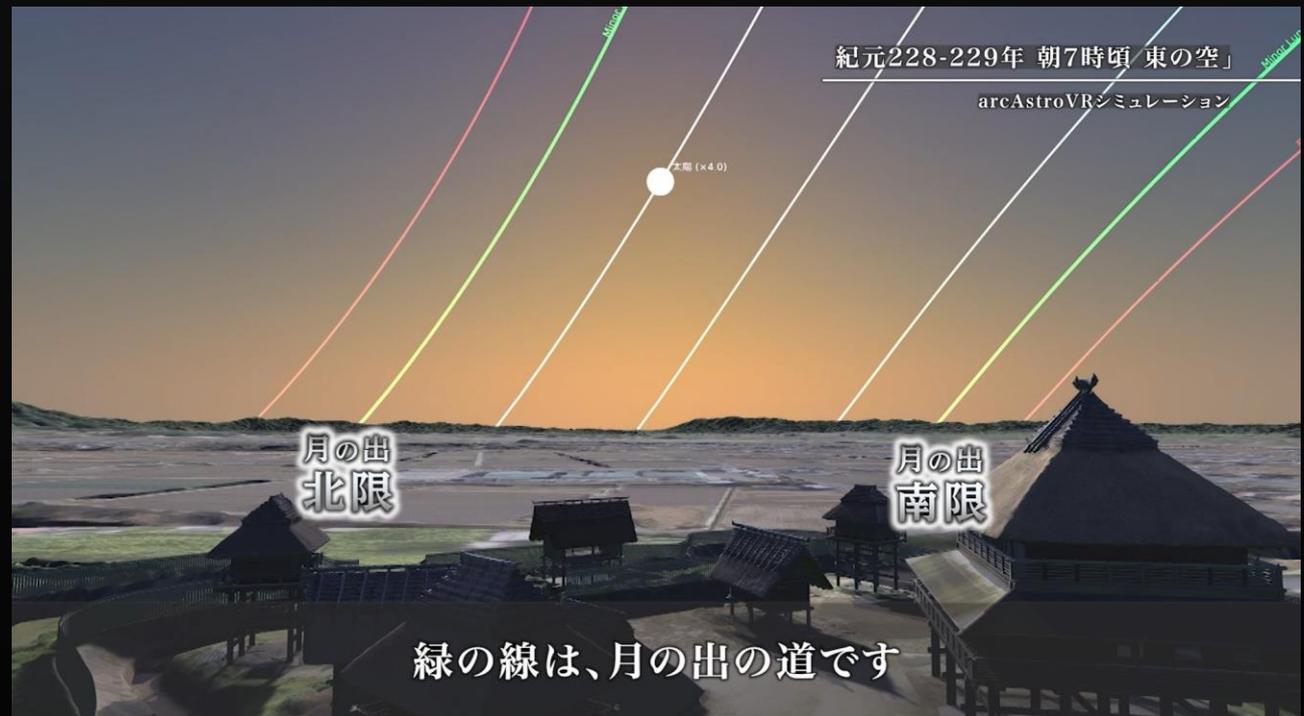
- 吉野ヶ里全域の3D化の際、最高ポリゴンの出力のままでは、重すぎでほぼ動かず、3D Game同様の低ポリゴン化の工夫は必須であった。
- 軽さの指標
低ポリゴン、高分割、低容量
- GPU:Radeon Pro 580、CPU: Intel Core i7、メモリ:20GBのスペックを持つデスクトップPC(2017年製iMac)において、arcAstroVRにおいて動作するモデルとしては、総数200万ポリゴン以内を目安にするのが妥当と感じた。

卑弥呼が見た星空

- 高く登る満月の謎に迫る -

2021年12月に開催された佐賀県吉野ヶ里歴史公園イベント「吉野ヶ里 光の響」で上映された映像です。吉野ヶ里遺跡と天体運行との関わりをarcAstro-VRによって検証しています。この映像は、上記イベント期間に開催された「第4回 考古天文学会議」で発表されました。

- 映像時間：8分47秒
- シナリオ
東海大学 北條芳隆
- ナレーション
園田有由美
- BGM
H/MIX GALLERY
- 製作
scienceNODE
株式会社とっぺん
- 協力
吉野ヶ里公園管理センター
- 監修
国立天文台・東海大学・南山大学



卑弥呼が見た星空

-建物から見た日の出・月の出暦-

前作「卑弥呼が見た星空 - 高く登る満月の謎に迫る -」に南内郭の3Dデータを加え、吉野ヶ里遺跡の建造物と日の出・月の出暦との関係性を検証した映像です。2022年12月に開催された佐賀県吉野ヶ里歴史公園イベント「吉野ヶ里 光の響」で上映されました。この映像は、上記イベント期間に開催された第6回考古天文学会議で発表されました。

- 映像時間：7分55秒
- シナリオ
東海大学 北條芳隆
- ナレーション
東海大学 白川美冬
- BGM
H/MIX GALLERY
- 製作
scienceNODE
- 協力
吉野ヶ里公園管理センター・佐賀県
糸島市立伊都国歴史博物館
- 監修
国立天文台・東海大学・南山大学

