

# 三次元計測データによるフゴッペ洞窟内の 自然光入射のシミュレーション

増田 智仁\*<sup>1</sup> 山田 陽介\*<sup>2</sup> 朽津 信明\*<sup>3</sup> 池内 克史\*<sup>4</sup>

Simulating Natural Light Incidence inside Fugoppe Cave by using 3D Measurement Data

Tomohito MASUDA\*<sup>1</sup> Yosuke YAMADA\*<sup>2</sup> Nobuaki KUCHITSU\*<sup>3</sup> Katsushi IKEUCHI\*<sup>4</sup>

**Abstract** – Archaeologists consider that ancient painters and sculptors worked inside the caves with an artificial light such as a torch. On the other hand, little accumulations of soot, a side effect of the use of torches, are observed in Fugoppe cave; we consider that there is a possibility of the use of natural sun light for sculpting. In order to verify enough existence of natural light from the entrance of the cave to work, we simulated how natural light illuminate inside walls of Fugoppe cave using its 3D model obtained from our modeling system, and examine the possibility that ancient sculptors work under natural illumination in Fugoppe cave.

**Keywords** : 3D modeling, lighting simulation

## 1 はじめに

近年、実世界に存在する物体や環境を、レーザーレンジセンサなどで計測することにより、三次元形状をモデリングする研究が盛んに行われている。こうして得られる三次元モデルは、表面形状の正確な記録として有用であるばかりでなく、コンピュータグラフィックス上でウォークスルーが可能な、マルチメディアコンテンツの作成などに用いられる。また、エンタテインメントのレベルに留まらず、実世界では観察し得ないことをシミュレーションして学術的な調査することにも用いることができる。その典型例として、照明位置の変化による影のつき方などを調査する光源シミュレーションが挙げられるが、今回我々はこれをフゴッペ洞窟に適用した。

フゴッペ洞窟は北海道余市町に位置し、新第三紀の凝灰質岩が浸食されてできた海蝕洞窟内に、主として線刻の壁画(図2)が描かれている続縄文時代の遺跡で、国の史跡に指定されている[1]。こうした洞窟遺跡の内部に壁画が描かれている場合には、当時の人々がどのようにしてそれを描いたのかが問題とされる場合

が多い。例えば通常の場合には、洞窟内部というのは「真っ暗な世界」と言うイメージが強くあり、その中で壁画を描くには、何らかの灯りが必要だと想像される。しかしながら、当時の人々が得られた、例えば灯明などが用いられたに於いては、一般に壁画面や天井などで煤の沈着が殆ど見られないという指摘がある[2]。フゴッペ洞窟の場合にも、炉跡の真上などには例外的に煤の沈着が認められるような部分もあるものの、それ以外の普通の壁画面には、煤の沈着はほぼ認められない。このことから、少なくとも長時間にわたって灯明が用いられ続けたとは考えにくいという指摘[2]がある。洞窟内で灯明に頼らずに光を得るとすれば、自然光からの採光が考えられる。当時から、少なくとも人間が出入りするために十分な大きさの開口部があったはずであり、そこから差し込んでくる太陽光が洞窟内部の照明となっていた可能性がある。それが具体的にどのくらいの光量であり、また実際に壁画の存在する面において、それを描くのに十分なものであったかどうかということ調査するため、シミュレーションを行った。

フゴッペ洞窟内部には、一般公開のため通常ガラス板で仕切られた観察室が入り込んでいるが(図1)、改修工事[3]に伴って一時的に解体されたため、その機会に三次元計測を行った。しかし現在は観察室が新設されたため、実際にフゴッペ洞窟内への自然光の入射を観察することは不可能である。本論文ではフゴッペ洞窟の三次元モデルを座標上に適切に配置し、その緯度における太陽軌道(黄道)による洞窟内部の見えを

\*1: 東京大学大学院 情報理工学系研究科 コンピュータ科学専攻

\*2: 東京大学大学院 学際情報学府 学際情報学専攻

\*3: 東京文化財研究所

\*4: 東京大学大学院 情報学環

\*1: Department of Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

\*2: Graduate School of Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo

\*3: National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo

\*4: Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, University of Tokyo

コンピュータグラフィックス上で再現し、そこから得られた知見について述べる。

洞窟は通常、地下に潜りこんでいるため、地表上との位置関係などを正確に把握することは難しい。このような調査に代表されるように、洞窟の調査においては三次元データの優位性がしばしば提唱されている [4] [5]。そのため、洞窟内部の三次元モデリングについては、様々なサイトで行われてきた。Sellersらは超音波センサを用いてイギリスの Kitley 洞窟を三次元計測した [6]。Beraldinらはレーザーレンジセンサとカラーカメラを用いて、壁面に保存状態の良いフレスコ画が数多く残っている、イタリア・Carpignanoの Santa Cristina にある Byzantine Crypt(教会の地下室) をテクスチャ付で三次元モデル化した [7]。また、Brownらはレーザーレンジセンサを用いて、フランスの Cap Blanc を計測しており [8]、このデータを用いて、Deblinらは考古学的な考察に用いた [9]。彼らは Cap Blanc の帯状装飾の松明光のもとでの見えを再現しており、洞窟内部での松明光の揺らめきと与える装飾の影の動きと、その視覚的な効果についての考察が行われている。洞窟を含めた文化財を投影する VR システムの構築に関して、Sandinらは洞窟の内部空間の独特な雰囲気や VR として表現するために、CAVE と呼ばれる投影システムを開発した [10]。同様に、凸版印刷株式会社のトッパン小石川ビルには、デジタルコンテンツ化された文化財をインタラクティブに上映する、VR シアターが常設されている [11]。しかし、我々が知る限り、洞窟や古墳内部への自然光の入射に関して、コンピュータグラフィックスで再現し、その結果を考古学的に考察した研究は、これまでに無い。

物体の三次元的な見えを復元するためには、3つの要素が必要となる。まず対象物に関しては三次元形状を表す”幾何情報”と、色をあらわす”光学情報”が必要となる。本論文におけるシミュレーション結果の注目点は、幾何情報ももたらす情報である、描画作業を行う領域への直接光の入射だけではない。なぜならば、描画作業はそれまでの作業の文脈を把握しながら行うため、作業領域だけが明るければ描画可能というわけではないからである。それゆえ、光学情報ももたらす直接光入射のもとでの作業領域の見えも、考察の上で重要な注目点となる。以下、2章では、レーザーレンジセンサによる三次元計測データからの幾何情報の獲得手法を述べ、3章では、光学情報として得た一眼レフカメラによる二次元カラー画像の、三次元の幾何形状へのマッピング手法について述べる。また、物体の見えは対象物がどのような場所に置かれるかによって異なるので、対象物を取り巻く”環境情報”も必要となる。4章では、洞窟の方位の配置・標高・緯度・経



図1 フゴッペ洞窟の観察室の内部と外観。  
Fig.1 Inside and outside the observation room of the Fugoppe Cave.



図2 フゴッペ洞窟内の壁画。  
Fig.2 Carvings inside the Fugoppe Cave.

度などを求めることによる、環境情報の取得について述べる。以上の手法は、基本的に池内らの研究 [12] を踏襲している。5章、6章ではそれぞれ、シミュレーションの方法・結果とそれに基づく考察を述べ、7章で結論と今後の予定を述べ、本論文のまとめとする。

## 2 幾何情報の獲得

### 2.1 三次元計測

フゴッペ洞窟の三次元計測は、CYRAX2500 と VIVID900 の 2 台のレーザーレンジセンサーを用いて行われた。

CYRAX2500 は、レーザーが発射されてから対象物に反射し、反射光が再びセンサに戻ってくるまでの

飛行時間から，センサに対する対象物表面の奥行き情報を得る Time-of-Flight 方式のセンサである．また，VIVID900 は照射部から発光されたレーザーのスリット光を，受光部の CCD カメラで捕らえ，距離による反射光の見える位置の差から，これを測定する三角測量法によって三次元情報を獲得するセンサーである．

CYRAX2500 は広範囲のデータを取得できるが，フゴッペの壁面に描かれている線刻画を捕らえられるほどの精度は保証されていない．一方 VIVID900 は狭い範囲のデータしか捕らえられないが，非常に高精度に三次元情報を獲得できる．よって，フゴッペの壁面全体を CYRAX2500 で計測し，線刻画のある部分は VIVID900 で詳細に計測を行い，これを重ね合わせるという手法を用いた．

## 2.2 位置合わせ

一回の計測から得られるデータは対象物の表面形状の一部であるため，対象物全体を複数回にわたって計測し，得られる複数のデータを位置合わせする必要がある (図 3) ．

三次元計測データの位置合わせは，Iterative Closest Point (ICP) [13] と呼ばれる手法が広く用いられている．ICP に代表される従来の位置合わせ手法 [14] は，位置合わせ済みの計測データに対して，1 つずつ新たな計測データが追加される逐次位置合わせ法を取っている．物体を構成する計測データの数が少ない場合には，こういった逐次位置合わせ法でも累積誤差は比較的小さく無視することが可能であるが，大規模な対象物になるとこの誤差が非常に大きくなり，最終的に全体の位置合わせに失敗することがある．そこで，我々の研究室では，全ての部分メッシュモデルの位置合わせを同時に行うことによって，全てのペア間の位置合わせ誤差を全体的に分散できる位置合わせ法を開発した．この手法では，逐次法に比してより正確な形状復元を行うことができる [15] [16] ．また，計測データ間の距離の指標として，Chen と Medioni [17] の手法と同様に点と面との距離を用いることで精度の向上を図っている．さらに，外れ値の影響を低減するために，対応点間距離の平均値や計測誤差の値を考慮して閾値処理を行った．位置合わせの対応点探索は，通常計算コストが高いが，本手法では高速化を図るために，グラフィックスハードウェアの機能を利用した [18] ．

## 2.3 メッシュの統合

最後に，位置合わせされた複数の三次元計測データを単一のメッシュに統合する処理 (マージング) を行う (図 4) ．これはデータが存在する三次元空間内の各々の単位格子について物体表面までの符号付距離を計算することによって行われる．計算された符号付距離場はマーチングキューブ法 [19] の一種によって単一のメ

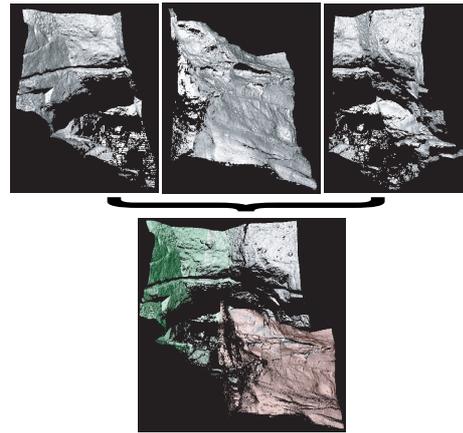


図 3 位置合わせの様子．上段に並んでいる計測データは，位置合わせによって下段の図のように各々の相対的な位置・姿勢を復元できる．

Fig. 3 Alignment. Alignment can restore the relative position and posture between each corresponding pair of range images as shown in the lower illustration.

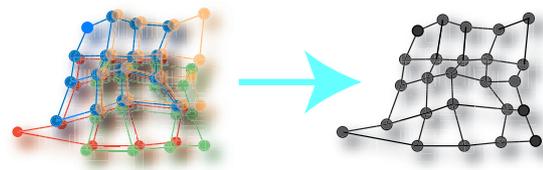


図 4 統合の様子．左図のように位置合わせされた複数のデータが，単一のメッシュモデルに統合される．

Fig. 4 Merging. Merging can integrate multiple aligned images (left side) into the single image (right side).

ッシュモデルに変換される．

位置合わせされた各々の計測データにはランダムな計測誤差が現れるため，マージングの最終結果がこの誤差に影響を与えないよう，符号付き距離を計算する際に同一の表面を構成する複数の計測データ間でコンセンサスを取ることとした [20] ．また，octree 表現を用いることによって単位格子を適応的に分割し，物体表面付近のみ高分解能な表現を効率よく行うことができる (図 5) ．

図 6 に，最終的に得られた幾何形状を示す．今回の計測では 18 の計測データが得られた．計測データの奥行き誤差は  $\pm 5\text{mm}$  程度である．位置合わせは非常に高速化されているため，さほど時間を必要としない．また，統合の処理は約 3 時間程度であった．

## 3 光学情報の獲得

物体の三次元的な見えを復元するためには，三次元形状データに加えて物体表面の色情報 (テクスチャ) も必要になる．テクスチャは通常三次元データとは別

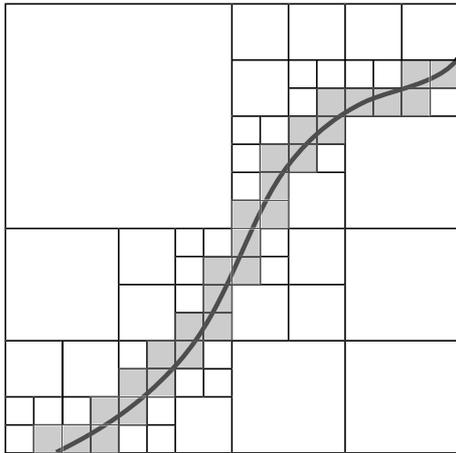


図5 Octree 表現による格子分割の様子．分割は物体表面が存在する格子のみに行うことで効率化が図られている．

Fig. 5 Voxel division by octree. Octree provides the effective merging because voxel division is adaptively performed only where the object surfaces exist.

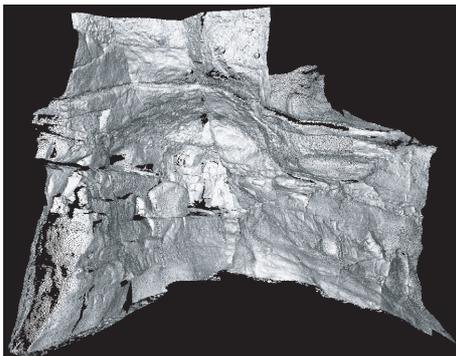


図6 最終的に得られた幾何形状．  
Fig. 6 Acquired whole shape.

のセンサ (カメラ) で計測されるため、計測後に両者の位置合わせを行うことが必要となる．ここでは、2次元カラー画像であるテクスチャの特徴量と、三次元データから副次的に得られるリフレクタンス画像によるエッジを対応させる手法 [21] を用いることにした．

リフレクタンス画像とは、各計測点におけるレーザーの反射強度を表し、距離の情報とリフレクタンスの情報は同一のレーザーによって同時に計測されるため、2つの画像は正確に一致している．フゴッペ洞窟の計測で使われた CYRAX2500 においても、このリフレクタンスは利用可能である．

リフレクタンス画像とカラー画像は、物体表面の材質・形状・色の影響を受けるといって同様の特性を有する．CYRAX2500 は緑色レーザーダイオードを使用しており、この波長においては異なる表面色もしくは異なる材質において強度が変化するため、その境界は画像上のエッジとなって現れる．また、異なる材質

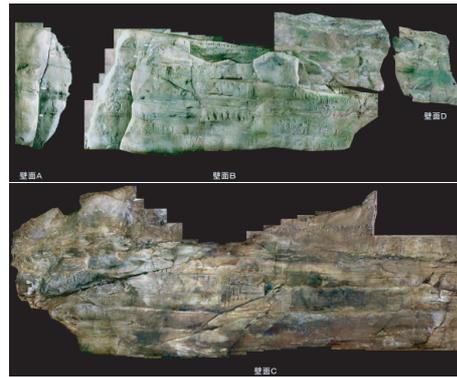


図7 テクスチャとして用いた画像．  
Fig. 7 Color images used as the texture.

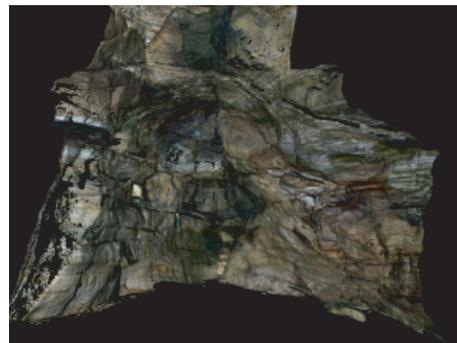


図8 幾何形状にテクスチャを合わせた結果．  
Fig. 8 Acquired whole shape with texture.

は一般に異なる表面色を持つため、カラー画像においても同様の境界が現れる．同様に、ジャンプエッジや輪郭線も双方の画像に現れる．

三次元形状データとカラー画像の位置合わせは、リフレクタンスエッジと対応するカラー画像上のエッジについて、三次元空間中での両者の距離が最小になるように繰り返し計算をすることによって行われる．この繰り返し最小化計算は共役勾配法によって行われ、外れ値の影響を軽減するために Lorentz 関数を確率分布とした M 推定法を用いている．

壁面のテクスチャは、既に余市町教育委員会によって取得された写真 (図7) を用いた．この写真は HASSELBLAD 社のカメラにより、ストロボと写真撮影用照明を使って取られたものである．図8は上述の方法で三次元形状データに色情報を付加した結果である．

#### 4 環境情報の獲得

太陽光源下での洞窟内の見えのシミュレーションを行うためには、上述の方法で得られた色情報付きの三次元形状データを地球座標上に適切に配置しなければならない．本研究ではフゴッペの地表面が  $xy$  平面に一致するようにし、それぞれ  $x$  軸が東、 $y$  軸が北に一致するような右手系の三次元座標上にデータを配置し

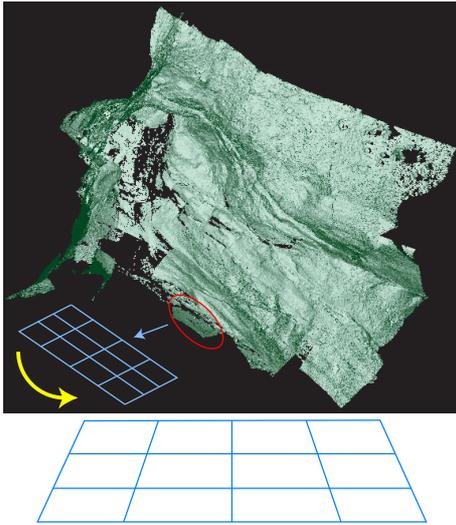


図9 地表面を  $xy$  平面に合わせる様子。  
Fig. 9 Registration of the ground surface into the  $xy$ -plane.

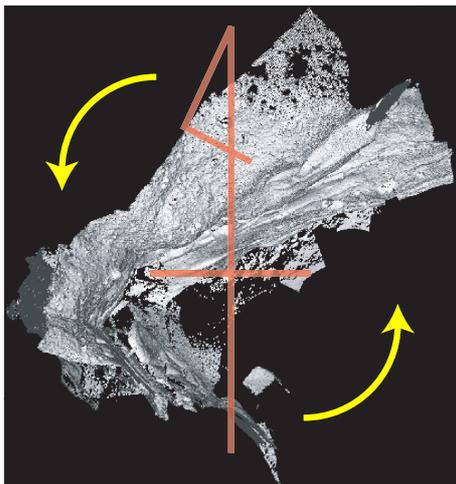


図10 方角を合わせる様子。  
Fig. 10 Registration of the direction of the cave.

た．この時  $z$  軸は，天空方向を向いている地表面の垂直軸に一致している．

地表面への位置合わせは，計測データの中から地表面データを抜き出し，これを主成分分析して平面推定することによって行われる（図9）．また，東西南北の方角はフゴッペにある複数箇所の基準点を用いて合わせた（図10）．

太陽の軌道は平均太陽時を用いて計算を簡略化して，地軸の傾きと緯度，地球の公転面における位置によって決定される回転軸回りの円軌道とした．この円軌道は公転面の位置，すなわち季節によって平行移動する（図11）．

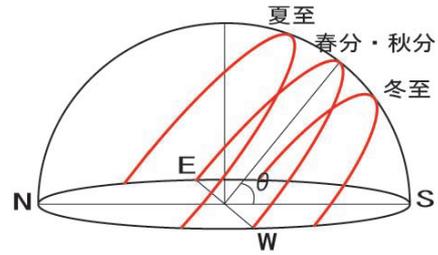


図11 太陽の軌道。  
Fig. 11 Ecliptic according to the season and the time.

## 5 太陽光源下での洞窟内の見えのシミュレーション

上述の条件によって，太陽光源の移動により洞窟内がどのように見えるかをコンピュータグラフィックスを用いて再現した．ここでは以下の検証を行った．

- 春分・秋分，夏至，冬至の太陽光源下における見えの変化
- 南側の壁と北側の壁で線刻をしている人の，影の移動

実際のフゴッペ洞窟内は，直射日光のほかに様々な物体による反射光などの間接的な光が差し込むが，本研究においては直射日光のみを考え，直射日光が当たる領域と当たらない領域を観察する．また，時間経過に伴う太陽輝度や光源スペクトルの変化も無視する．直射日光が当たる領域は，光学情報で得られたカラー値をそのまま用いて表示することとし，直射日光が当たらない領域は一律に黒で表示することとする．人の影のシミュレーションでは，CADによって作成された適当な人体の三次元データを使用した．

この条件で得られたシミュレーション結果が図12，13，14，15，16である．通常太陽光が一番届きにくいと考えられる洞窟最奥部南側の場合，まず冬至には一日中殆ど光が当たらない（図12）．次に春分秋分時には，午前6時頃には光が射し込むが，すぐに陰になる（図13）．これに対して夏至時には，午前4時頃から光が射し込み，午前9時近くまでは光が当たり続けるという結果が得られた（図14）．以上をまとめると，洞窟の最奥部であっても，一年の半分以上の日には晴天であれば壁面に直射日光が当たるタイミングがあり，特に夏至前後には一日5時間程度は光の差し込みがあり得ることになる．またその際に壁面近くに人が立っても，基本的には手暗がりのような現象は起きず，殆ど影響がないことがわかる（図15，16）．

## 6 シミュレーション結果からの考察

今回のシミュレーションにより，現在のフゴッペ洞窟において仮に保存施設が存在しないとすれば，洞窟



図 12 冬至の頃のフゴッペ洞窟内の見えのシミュレーション．図の赤丸の位置に壁画が描かれている．およそ午前 5 時から 10 時までの 1 時間おきの様子を示している．この時期、直射日光はほとんど当たらないことが分かる．

Fig. 12 Simulation result on the winter solstice.

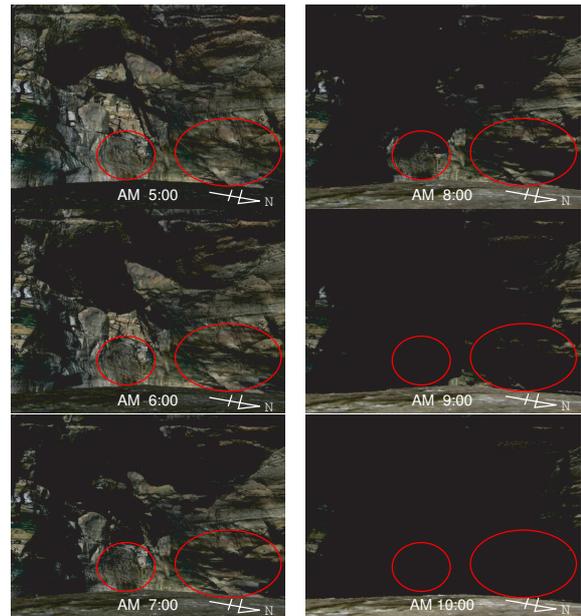


図 14 夏至のころのフゴッペ洞窟内の見えのシミュレーション．図の赤丸の位置に壁画が描かれている．およそ午前 5 時から 10 時までの 1 時間おきの様子を示している．他の時期に比べて、非常に長い間直射日光があたり続ける．

Fig. 14 Simulation result on the summer solstice.



図 13 春分・秋分時のフゴッペ洞窟内の見えのシミュレーション．図の赤丸の位置に壁画が描かれている．およそ午前 5 時から 10 時までの 1 時間おきの様子を示している．この時期は 6 時頃から光が当たりはじめるが、最奥部はすぐに陰ってくる．

Fig. 13 Simulation result on the spring/fall equinox.

た．しかし、このシミュレーションは、現在の入り口の形状に基づいて行われたものであり、当時の状況とは異なっていた可能性が考えられる．

当時の入り口を正確に推定することは現時点では極めて困難であるが、出土遺物などの状況から人間が頻繁に出入りしていたと想定され、洞窟は当時も何らかの形状を持つ開口部を、現在の入り口と近接した方角に向かって持っていたことは確実であろうと思われる．その中で、まず床面については、今回計測を行った現在の床面近くにも線刻画が豊富に残されていることから、当時の床面は今よりも低い位置にあったと考えられ、今回のシミュレーションよりも光が差し込みにくかった状況は考えにくい．両側壁の広さに関しては、入り口近くまで線刻画が残されていることから、当時の側壁面は現在とほぼ変わらないと考えられる．天井については、崩落などの影響で当時に比べて現在の天井の方が高い可能性も考えられる．しかし、今回のシミュレーションにおいて、洞窟最奥部に直射日光が当たる前後の時刻にできる陰は、いずれも側壁面に起因するものであり、天井の高さが余程大きく異ならない限りは、当時の光の入射状況は今回のシミュレーション結果と大差ないと考えられる．

次に地形や植生などの、太陽光を遮る可能性のある洞窟外部の障害について考える．フゴッペ洞窟の東側

最奥部まで直射日光が届く場合があることが確認され

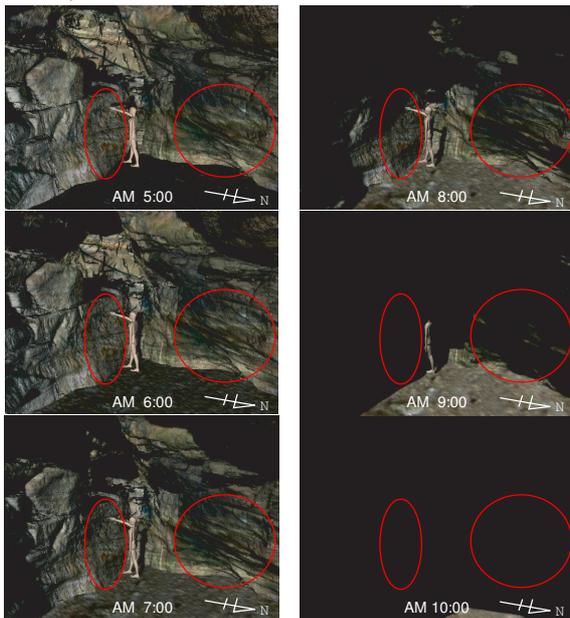
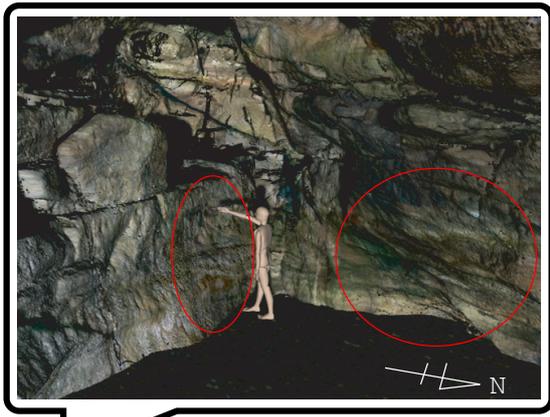


図 15 夏至の頃のフゴッペ洞窟内に、南壁に向かって人が立ったときの影のでき方のシミュレーション。図の赤丸の位置に壁画が描かれている。およそ午前5時から10時までの1時間おきの様子を示している。

Fig. 15 Simulation result on the summer solstice with a man standing against the south wall.

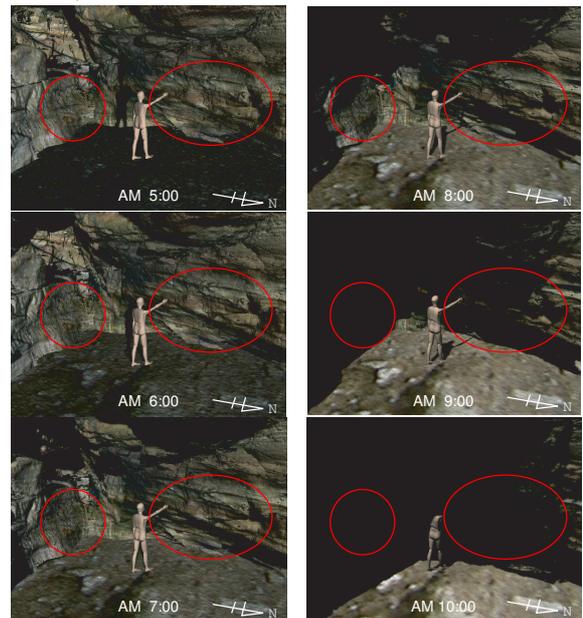


図 16 夏至の頃のフゴッペ洞窟内に、西壁に向かって人が立ったときの影のでき方のシミュレーション。図の赤丸の位置に壁画が描かれている。およそ午前5時から10時までの1時間おきの様子を示している。

Fig. 16 Simulation result on the summer solstice with a man standing against the west wall.

には障害になる高い山は存在せず、標高 50m 程度の丘陵の存在は、計算上シミュレーションには殆ど影響を与えないことが確認される。植生についてははっきりとしたことはわからないが、現在の現地の植生からは入り口全体が植物に覆われてしまう状況は考えられず、発掘結果から当時の植生も現在と類似した状況だったと考えられている [2]。すなわち、何らかの例外的な木などの存在によって、今回のシミュレーションには反映されていない陰が一部に生じる可能性はあるものの、洞窟最奥部まで直射日光が当たる場合があるという結論を揺るがすようなものではないと判断される。

つまり細かな状況の相違から、今回のシミュレーションでは、具体的な季節や時刻、あるいは時間が厳密で

ない可能性は考えられるものの、季節と時刻さえ選ばれば、当時から洞窟内には豊富な太陽光が当たる場合があったものと考えられる。また今回の場合には直射日光しか考えなかったが、フゴッペ洞窟の岩体は比較的明るい色を呈していることから、入り口付近の壁面などに反射することによって間接的に当たる光も無視できない程大きいものと予想される。季節と時刻によっては当時の洞窟内は、今回のシミュレーションよりもさらに明るかった可能性が十分に考えられる。

灯明を用いて壁画が描かれていたという考古学上の通説に対し、以上の考察から言及できることは、季節と時刻を意識的に選んで当時の人々が入り口から差

し込む自然光の下で、洞窟内で壁画を刻み込む作業を行った可能性があるということである。よって、少なくともフゴッペ洞窟は常に「真っ暗闇の世界」と言うわけではなく、洞窟内がかなり明るくなるタイミングがあったであろうことは十分に推定される。

最後に、人影の影響と線刻画の分布について考察する。図 15 に示されているように、南壁に向かって立つと、人の影は壁に向かって大きく右側にずれて投影され、仮に右利きの人が線刻を施したとすると、この位置での作業に対して有利な照明条件となる。一方、図 16 に見られるように、西壁に向かって立つと、南壁の場合に比べて影がより正面に投影されてしまい、作業に支障をきたすことになる。実際フゴッペ洞窟内部の線刻画は、西壁よりも南壁に多く描かれており、この考察と一致する。

なお、作成したシミュレーションムービーは、余市町フゴッペ洞窟博物館において上映されている。

## 7 まとめ

本論文では、レーザーレンジセンサの三次元計測によって得られたフゴッペ洞窟の三次元モデルを用いて、実際には観察不可能な季節や時間の変化における洞窟内への直接光入射のシミュレーションを行った。灯明などの人工的な光に頼らずに古代人が季節や時間を選ぶことによって線刻画を描いていたのではないかという我々の仮説は、シミュレーションによってその可能性を科学的に裏付けることができた。

本論文では太陽光源の直接光のみによるシミュレーションであったが、今後の課題として、間接光による照度の数値的な評価等を行うつもりである。これにより、暗順応等によっても作業可能時間が大幅に伸びる可能性を指摘でき、灯明を用いない(自然光による)描画の可能性を示したという我々の結論は、さらに強化されるものと考えられる。

今後は福岡県嘉穂郡桂川町にある王塚古墳をはじめとする代表的な古墳に対して、同様のシミュレーションを行い、古墳の内部の見えについて考察を重ねていく予定である。

## 謝辞

本研究は科学技術振興機構・池内 CREST プロジェクトによりサポートされている。また、本研究に関する余市町教育委員会のご協力に、心から感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] 峰山巖・掛川源一郎. 謎の刻画フゴッペ洞窟. 六興出版, 1983.
- [2] 小樽市教育委員会. 手宮洞窟シンポジウム 波濤を越えた交流-手宮洞窟と北東アジア-記録集. 小樽市教育委員会, 1997.
- [3] 余市町教育委員会. フゴッペ洞窟保存工事報告書. 余市町教育委員会, 2004.
- [4] W. I. Sellers, R. Orton, and A. T. Chamberlain. Computer-aided visualisation of archaeological caves. <http://www.shef.ac.uk/~capra/3/sellers.html>, 2001.
- [5] M. Roe. The brighter the light the darker the shadows: how we perceive and represent underground spaces. <http://www.shef.ac.uk/~capra/2/roe.html>, 2000.
- [6] W. I. Sellers and A. T. Chamberlain. Ultrasonic cave mapping. In *Journal of Archaeological Science*, pp. 283–289, March 2001.
- [7] J-A. Beraldin, M. Picard, S. F. El-Hakim, G. Godin, V. Valzano, A. Bandiera, and C. Latouche. Virtualizing a byzantine crypt by combining high-resolution textures with laser scanner 3d data. In *Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2002)*, pp. 3–14, September 2002.
- [8] K. A. Robson Brown, A. Chalmers, T. Saigol, C. Green, and F. d'Errico. An automated laser scan survey of the upper palaeolithic rock shelter of cap blanc. In *Journal of Archaeological Science*, pp. 867–873, September 1998.
- [9] K. Devlin, A. Chalmers, and D. Brown. Predictive lighting and perception in archaeological representations. In *UNESCO World Heritage in the Digital Age 30th Anniversary Digital Congress*, October 2002.
- [10] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the cave. In *Proceedings of SIGGRAPH 1993*, pp. 135–142, August 1993.
- [11] 凸版印刷株式会社メディア表現センター・インタラクティブメディアラボ (IML). トップラン小石川ビル VR シアター. <http://www.toppan.co.jp/products+service/vr/>.
- [12] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕. The great buddha project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (VRSJ), Vol. 7, No. 1, pp. 103–113, January 2002.
- [13] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, February 1992.
- [14] G. Turk and M. Levoy. Zipped polygon meshes from range images. In *ACM SIGGRAPH Proceedings*, pp. 311–318, July 1994.
- [15] P. Neugebauer. Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range images. In *Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Application*, pp. 130–139, March 1997.
- [16] K. Nishino and K. Ikeuchi. Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proceedings of the 5th Asian Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 455–461, January 2002.
- [17] Y. Chen and G.G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 145–155,

- 1992.
- [18] インデックス画像を用いた複数距離画像の高速同時位置合わせ. 大石 岳史, 中澤 篤志, 池内 克史. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)2004, July 2004.
  - [19] B. Curless and M. Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 96*, pp. 303–312, August 1996.
  - [20] R. Sagawa K. Nishino, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi. Parallel processing of range data merging. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 577–583, October 2001.
  - [21] R. Kurazume, Z. Zhang K. Nishino, and K. Ikeuchi. Simultaneous 2d images and 3d geometric model registration for texture mappint utilizing reflectance attribute. In *Proceedings of Fifth Asian Conference on Computer Vision*, pp. 99–106, January 2002.

(2004年7月2日受付)

[ 著者紹介 ]

増田 智仁



2003年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程終了。同年同大学院博士課程入学，現在に至る。物体の三次元形状の表現・認識・復元に関する研究，及びこれを応用した文化財の解析に関する研究に従事。

山田 陽介



2003年早稲田大学理工学部建築学科卒業。同年東京大学大学院学際情報学府修士課程入学，現在に至る。文化財のデジタルアーカイブ化，及びこれを用いた文化財の解析に関する研究に従事。

朽津 信明



1990年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。同年東京国立文化財研究所研究員。2001年独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所主任研究官，現在に至る。文化財の保存に関する科学的研究に従事。修士(理学)。

池内 克史 (正会員)



1978年東京大学大学院情報工学博士課程終了。MIT人工知能研究所，電総研，CMU 計算機科学部を経て，1996年より東京大学大学院情報学環教授。人間の視覚機能，明るさ解析，物体認識，人間による組立作業の自動認識，仮想現実感モデルの自動生成などの研究に従事。論文賞 ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, 日本ロボット学会誌-97, IEEE R&A-98, 受賞。情報処理学会，人工知能学会，OSA, IEEE(Fellow) 各会員。