

# 三次元計測データに基づく学術調査・シミュレーション - フゴッペ洞窟の光源環境に関して -

Simulation for Academic Investigation by using 3D Measurement Data  
-Case study of Fugoppe Cave-

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

Yosuke YAMADA<sup>5</sup> Tomohito MASUDA<sup>6</sup> Nobuaki KUCHITSU<sup>7</sup> Katsushi IKEUCHI<sup>8</sup>

1) 東京大学大学院 学際情報学府 学際情報学専攻

2) 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

3) 東京文化財研究所

4) 東京大学大学院 情報学環

**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 Fuggopp cave using its 3D model obtained from our modeling system, and examine the possibility that ancient sculptors work under natural illumination in Fuggope cave.

**Key Words:** 3D modeling, lighting simulation

## 1 はじめに

近年の計測技術や情報処理技術の発展とともに、有形の文化財をデジタルデータとして保存する、デジタルアーカイブの取り組みが活発化している。デジタル化された文化財のデータは、単なる現状保存に留まらず、マルチメディアコンテンツの作成や、学術的な調査・シミュレーションなどの応用が考えられる。シミュレーションの目的の典型例の一つとして、様々な光源下での陰影の変化や色彩を観察する光源シミュレーションが挙げられる。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1)が描かれている縄文時代の遺跡で、国の史跡に指定されている。洞窟内部は真っ暗な世界というイメージが強いため、考古学の分野ではこうした壁画を描く際の光源環境が議論されることが多い。通常は松明等の人工光源の使用が予想されるが、煤の沈着状況などからこの意見に否定的な指摘も上がっている[1]。

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、改修工事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。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おり[2]、DeblinらはCap Blancの帯状装飾の松明光のもとでの見えを再現することにより、考古学的な考察を行っている[3]。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。

以下、2章ではフゴッペ洞窟内部の三次元形状のモデリングについて述べる。3章ではデジタルカメラによるテクスチャ情報の、三次元形状モデルへのマッピング手法について述べる。また、三次元モデルと地球座標系への対応づけと、地表から観測される太陽軌道(黄道)の設定について4章で述べ、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る。7章で結論と今後の

予定を述べ、本論文のまとめとする。



図 1: フゴッペ洞窟内の壁画。

## 2 三次元形状モデルの取得

### 2.1 三次元形状の取得

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った。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、これらを重ね合わせた。

### 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。

本論文では、Iterative Closest Point(ICP)[4] と呼ばれる手法をもとに、グラフィックスハードウェアの機能を利用した、高速かつ高精度な位置合わせ手法を利用した [5]。

### 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 (マーキング) を行う。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 [6]。計算された符号付距離場はマーキングキューブ法 [7] の一種によって単一のメッシュモデルに変換される。

図 2 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。

## 3 テクスチャ情報の取得

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のセンサー (カメ

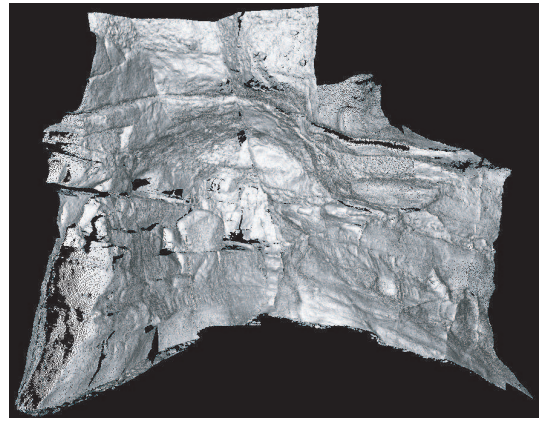


図 2: 最終的に得られた幾何形状。

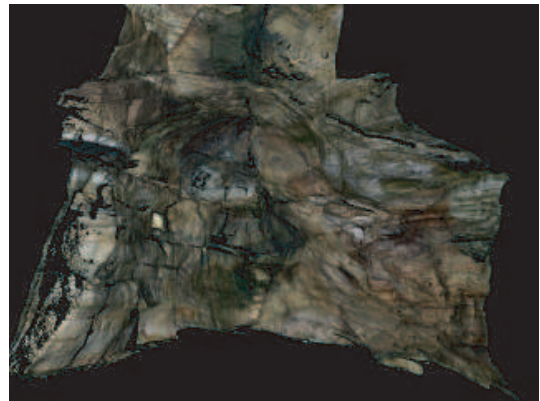


図 3: 幾何形状にテクスチャを合わせた結果。

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 [8] を用いることにした。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を用いた。図 3 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

### 4.1 地球座標系との関連付け

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。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った。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。

### 4.2 太陽の軌道と光源

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．

通常のグラフィックスでの太陽光源は，平行光源として設定する．しかし，大気中を突き進む光線は，大気中の浮遊物により乱反射するので，厳密には地表を照射する光源は，太陽の位置によって輝度分布が変化する，面光源の集合体である半球状の光源，すなわち天空光としなければならない．天空光の輝度分布は，半球を分割した各微小面に対して与えられ，各々の太陽との相対的な位置によって決定する．Perezらは，全ての天候に対応した輝度分布モデルを提案している [9]．

実際には天空光は，季節・時刻・大気中の状態等により変化するが，国際照明委員会 (CIE) は，典型的な天空光の輝度分布パターンを”CIE Standard Sky Luminance Distribution”として定義している．この輝度分布は，太陽からの直接光の照度である直射水平照度と，間接光による全天空水平照度によって設定される．

#### 4.3 洞窟内部の照射光

洞窟内部を照射する光は，光源からの直接光と，周囲の物体に複数回反射して届く間接光の二つに大別できる．コンピュータグラフィックスにおいて，間接光は物体間の光の相互反射を考慮するラジオシティ法により再現可能である．ラジオシティ法では物体表面を Lambert 面と仮定し，物体表面の放射輝度を，直接光による輝度値と，他の表面からの間接光による輝度値の和として計算する．

コンピュータの物理的・時間的要因により，テクスチャ付きの三次元モデルを，天空光のもとでラジオシティ法を用いてシミュレーションすることはできなかったので，本研究ではまず最初に，太陽光を平行光源と仮定したときの，直接光のみのシミュレーションを行い，次に間接光も含めたシミュレーションを示す．間接光も含めたシミュレーションには，Radiance[12]を用いた．実際の間接光は物体の形状や環境により，何度も反射を繰り返している．一方 Radiance では，漸進的ラジオシティ法を用いて，光の相互反射回数を指定することができる．一般に陰影の判断には 1~2 回，照度の数値的な把握には 4 回以上の反射を考慮することが必要とされており，今回は 4 回の相互反射を考慮してシミュレーションを行った．

#### 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

本研究においてはまず，天空光による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

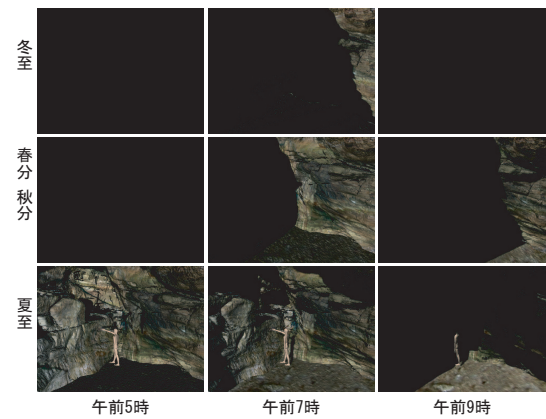


図 4: 各季節の陰影の遷移．



図 5: 反射光を考慮した洞窟内部の陰影．

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 4 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で見ると，まず冬至には一日中殆ど光が当たらない．次に春分秋分時には，午前 6 時頃には光が差し込むが，すぐに陰になってしまう．これに対して夏至時には，午前 4 時頃から光が差し込み，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．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得，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わかる．

間接光も含めたシミュレーション結果を図 5 に示す．間接光まで含めると，洞窟内は壁画を描くのに十分明るかったことが分かる．

## 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、洞窟最奥部まで直射日光が届く場合があることが確認された。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。

当時の入り口に関して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ることから、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。また、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かったと考えられ、シミュレーション結果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、当時の側壁面は現状とさほど異なっていないと考えられる。天井については崩落が考えられるものの、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シミュレーションに影響を及ぼすとは考えにくい。

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、フゴッペ洞窟の東側に障害になるような高い山は存在せず、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。植生についても、現在のフゴッペ洞窟で入り口全体が植物に覆われてしまうような状況は考えられず、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 [1]。

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、季節と時刻さえ選べば、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 4 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。実際フゴッペ洞窟内部の線刻画は、南壁に多く描かれており、この考察と一致する。

## 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。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Perez R., Seals R., and Michalsky J. All-weather model for sky luminance distribution - preliminary cofiguration and validation. *Solar Energy*, Vol. 50, No. 3, pp. 235–245, 1993.