

## 遺物破片の計測 -照度差ステレオ計測装置の製作と計測-

## Measurement of Pieces of Relics

## -Measuring the Figures of Pieces by

## Using the Photometric Stereo Method -

結城宏和\*、宝珍輝尚\*、都司達夫\*、河合秀夫†

Hirokazu YUUKI\*, Teruhisa HOCHIN\*, Tatsu TSUJI\*, Hideo KAWAI†

\*福井大学 工学部 情報工学科

〒910-8507 福井市文京3丁目9-1

†大阪電気通信大学短期大学部

〒572-0833 寝屋川市初町18-8

\*Department of Information Science, Faculty of Engineering, Fukui University

3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507 Japan

†Osaka Electro-Communication Junior College

18-8 Hatsu-machi, Neyagawa-shi, Osaka, 572-0833 Japan

あらまし：遺物の形状からもとの物体を推定することを考慮した遺物のデータベース化にとって重要となる遺物の3次元形状の測定について述べる。形状測定には、照度差ステレオ法を用いる。球体ならびに白磁の破片を測定した結果、大まかな形状の測定が可能であることが分かった。また、測定精度が照度に依存することが分かった。

Summary: This paper describes the method of measuring the 3 dimensional figures of relics in order to build a relic database. We use the photometric stereo method in measuring the figure. The figures of a sphere and relics of white chinas can roughly be obtained. There is the tendency that the accuracy of the measurement depends on the brightness.

キーワード：遺物、照度差ステレオ法、破片

Keywords: relic, photometric stereo method, broken piece

## 1 はじめに

一乗谷朝倉氏遺跡では、毎年多くの遺物が発掘されている。その数は約200万個にもものぼる。発掘された遺物は、完全な形で発掘されているものもあるが、多くは破片の状態が発掘されている。これらの破片をデータベース化することで、従来人手に頼っていた集計作業を自動化できることや、様々な破片から計算機を用いて新たな仮説を導出することができると考えられ、破片のデータベース化が必要となってきた。また、これらの遺物に対して形状、紋様、色、重さなどの特徴を用いて遺物の検索を行ないたいという要求や、遺物の形状からもとの物体を推定したいという要求がある。

そこで、我々は現在遺物の形状からもとの物体を推定することを考慮した遺物のデータベース化を行っている。これまでに、照度差ステレオ法を用いた遺物の3次元形状の測定を球体を用いて行ってきた[1]。測定の結果、特に高さに関しての誤差が大きくなり、改良が必要であった。また、測定には実際の遺物ではなく、球体を用いており、遺物を測定することが求められていた。

そこで、本論文では、照度差ステレオ法を用いて精度

良く遺物の形状を測定することを目的として、試験的に作成した計測装置の改良ならびに実際の遺物の形状測定を行なう。測定装置は頑強なものとし、光源の角度を精度良くしている。また、実際の遺物として白磁の陶器の破片の形状測定を試みる。

以下、2では、測定対象とする遺物について述べ、3で照度差ステレオ法について説明する。4で作成した計測装置について述べ、5で本装置を用いた測定結果について述べる。ここでは、球体と破片の測定を行なっている。最後に6でまとめを述べる。

## 2 対象とする遺物データ

本研究では、福井県にある越前一乗谷朝倉氏遺跡より発掘された遺物を対象とする。

発掘された遺物は約200万個あり、遺物のなかには発掘後すぐに茶碗や皿と識別され選別されるものもあるが、なかには破片の形状が小さすぎて識別することができないものもある。復元対象の遺物はこの識別できない破片である。

対象となる破片の例を図1に示す。図1は約43mm×41mm程度の小さな遺物である。

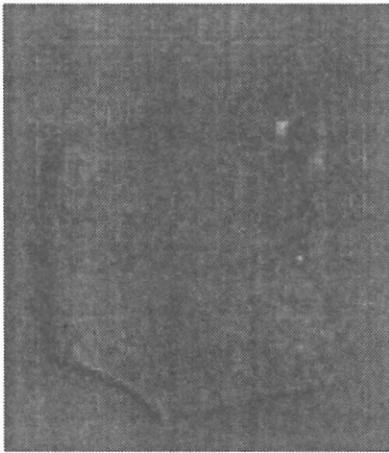


図1: 対象とする遺物

## 3 照度差ステレオ法について

### 3.1 明るさからの3次元形状の推定

一般に、物体面に照射された光エネルギーは一部吸収されるものの、大部分は反射され、これが面の明るさとして観測される。このとき、面の明るさを決定する要因として、面に照射されている光量、面の光反射特性、面の向きなどが考えられる。

図2は、一般によく知られた2種類の光反射特性であり、左が鏡面反射、右が拡散反射である。通常の物体面の光反射はこの2つの反射成分が混じりあっている。鏡面反射では、光の特定の方向にしか反射されないの、その方向から観測しない限り面の明るさを測定することはできない。しかし、もしその反射光が観測されたならば、観測方向と光源の向きから面の向きを推定することができる。

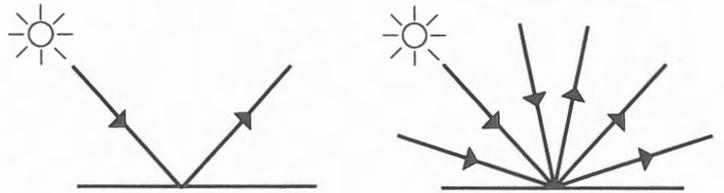


図2: 鏡面反射(左)と拡散反射(右)

完全拡散反射面の明るさは、どの方向から見ても同じ明るさとして観測される。つまり、カメラをどの方向に置いても測定した明るさは同じである。図3の右図のように面に対して低い角度から照射されている場合は、単位面積あたりの光量が少ないので暗くなる。図3の左図のように、明るさが最大となるのは、面の法線方向から照らされているときである。光源の方向と面の法線方向との角度を $\theta$ とすれば、完全拡散反射面の明るさ $I_p$ は $\cos\theta$ に比例する。すなわち、 $I$ を点 $p$ での入射光量として $I_p = I \cos\theta$ となる。

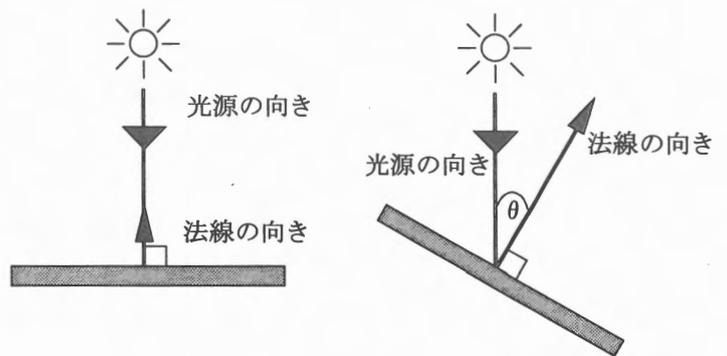


図3: 光源と平面の法線の向き

ここで、図4のようにカメラ中心の座標系を導入し、 $z = z(x, y)$ 、 $x$ 方向の勾配を $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ 、 $y$ 方向の勾配を $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ とすると面の法線ベクトルは $(p, q, 1)$ で表せる。

光源方向も勾配ベクトルを使って  $(p_s, q_s, 1)$  と表せる。このときの  $\cos \theta$  はこの2つのベクトルを使って、式(1)のように表せる。

$$\cos \theta = \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}\sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad (1)$$

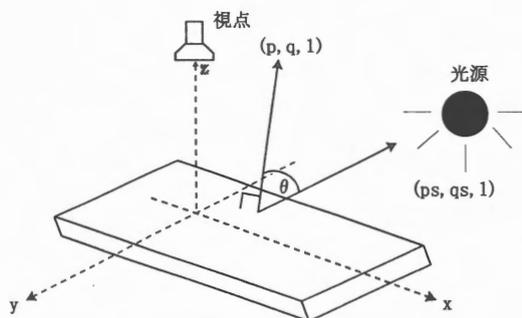


図4: 光源と面の向き

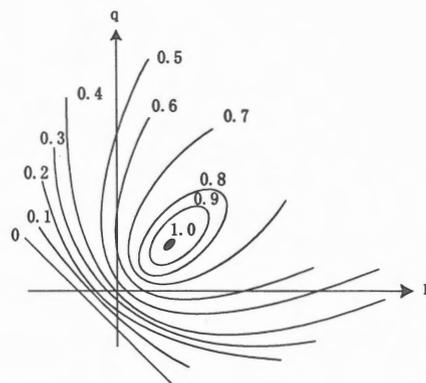


図5: 反射率分布図

すなわち、面の明るさは面の勾配  $(p, q)$  の関数として表すことができる。 $(p, q)$  平面を勾配空間と呼んでいる。明るさと面の向きとの関係は反射率分布図  $R(p, q)$  と呼ばれ、最大値が1となるように正規化する。したがって、完全拡散反射面の反射分布図は以下のように式(1)そのものである。

$$R(p, q) = \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}\sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad (2)$$

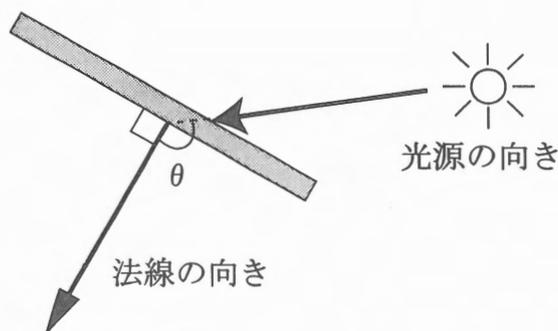


図6: 光源と平面の向き (光があたらず)

この反射率分布図を勾配空間上に明るさを高さとし、等高線を描くと図5のようになる。もし、光源がカメラの方向と一致していると  $(p_s, q_s) = (0, 0)$  であり、反射率分布図は同心円を描く。

明るさが最大となるのは、面の法線方向と光源の方向が一致しているところであり、逆に一番暗い0となるのは勾配空間上の直線である。(式3)

$$0 = pp_s + qq_s + 1 \quad (3)$$

この直線の外側は光が届かず反射率分布図が定義されない。これは図6のように求める点が物体の影になるところである。

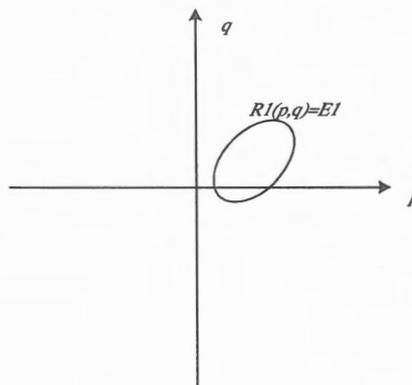


図7:  $R_1$  のグラフ

### 3.2 照度差ステレオ法

カメラと対象物体の位置は固定しておき、最初に置かれた光源下の明るさを  $E_1$  とすると照度方程式  $R_1(p, q) = E_1(x_0, y_0)$  の解は図7のような楕円になる。次に光源の位置を変えて得られた照度方程式を  $R_2(p, q) = E_2(x_0, y_0)$  とすると2つのグラフは2点で交わる。交わったところの  $(p, q)$  の値が求める面の傾きある。さらに光源の位置を変えて得られた照度方程式をたてると2つの解のうちどちらが正しいか求めることができる。(図8)

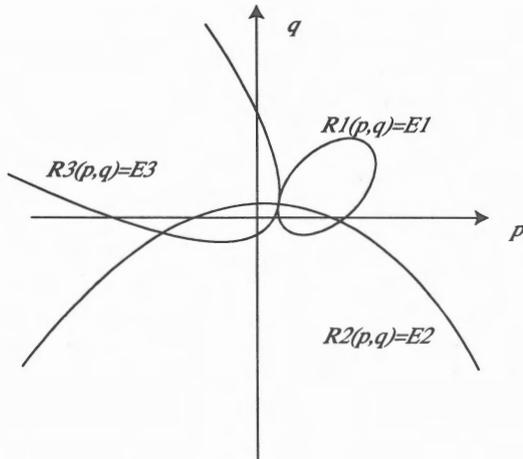


図8:  $R_1, R_2, R_3$  による面の傾きの決定

3つの光源を用いて、1つ1つの画素に対して求めた  $p, q$  の値は、X-Z軸、Y-Z軸の傾きであり、それを利用してZ軸の値を求めることによって立体を表すことができる。

#### 3.2.1 特徴

照度差ステレオ法は、物体とカメラの位置は固定し、異なる複数の光源を利用して画像を撮る方法である。したがって、カメラは一台しか使用しなくてもよく、ステレオ画像処理である両眼ステレオ法等で起こる探索点の問題が起こらない。カメラを1台しか使用しないのでコストが安いという利点もある。

しかし、照度差ステレオ法は、物体の面の勾配を求めるのに使用されるものであり、3次元形状を推定する用途には用いられないのが一般である。

#### 3.2.2 座標の求め方

3枚の画像の同一点から得られた傾き  $p$  または  $q$  (図9) から、X, Y, Z座標を求める。

求めた傾きは、1ピクセルごとの変化なので、1ピクセル

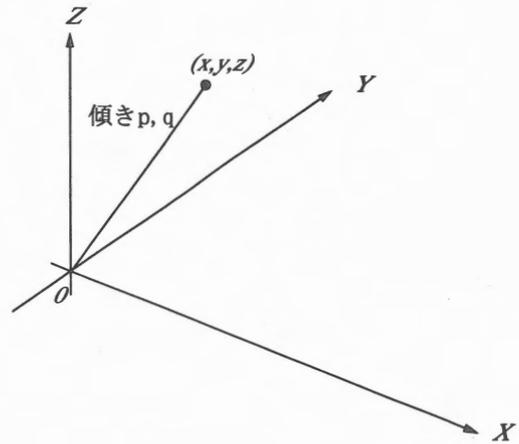


図9: XYZ平面における傾き

ルの横の長さを  $L$ 、縦の長さを  $H$ 、一番最初のピクセルのZ軸方向の値を0とすると最初のZ座標は、 $Z_0 = p * L$  で求まる。2ピクセル以降は傾きに  $L$  をかけて、前の値を加えればよい。求めた点を結ぶと図10の例のようなになる。

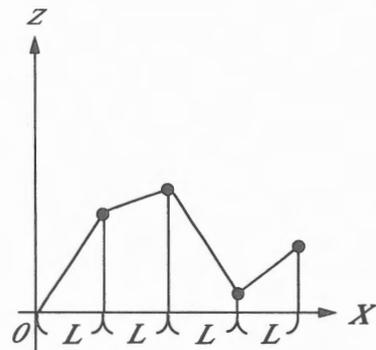


図10: Z-Xグラフ

開始ピクセルを原点にとるとX座標は、1ピクセルの横の長さなので  $X_0 = L$  と表され、 $X_1$  以降は  $L$  ずつ増えていく。Y座標は1ピクセルの縦の長さなので  $Y_0 = H$  となり、 $Y_1$  以降は  $H$  ずつ減っていく。したがってXYZ座標は、

$$X_n = X_{n-1} + L \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

$$Y_n = Y_{n-1} + H \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

$$Z_n = Z_{n-1} + p * L \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

と表せる。

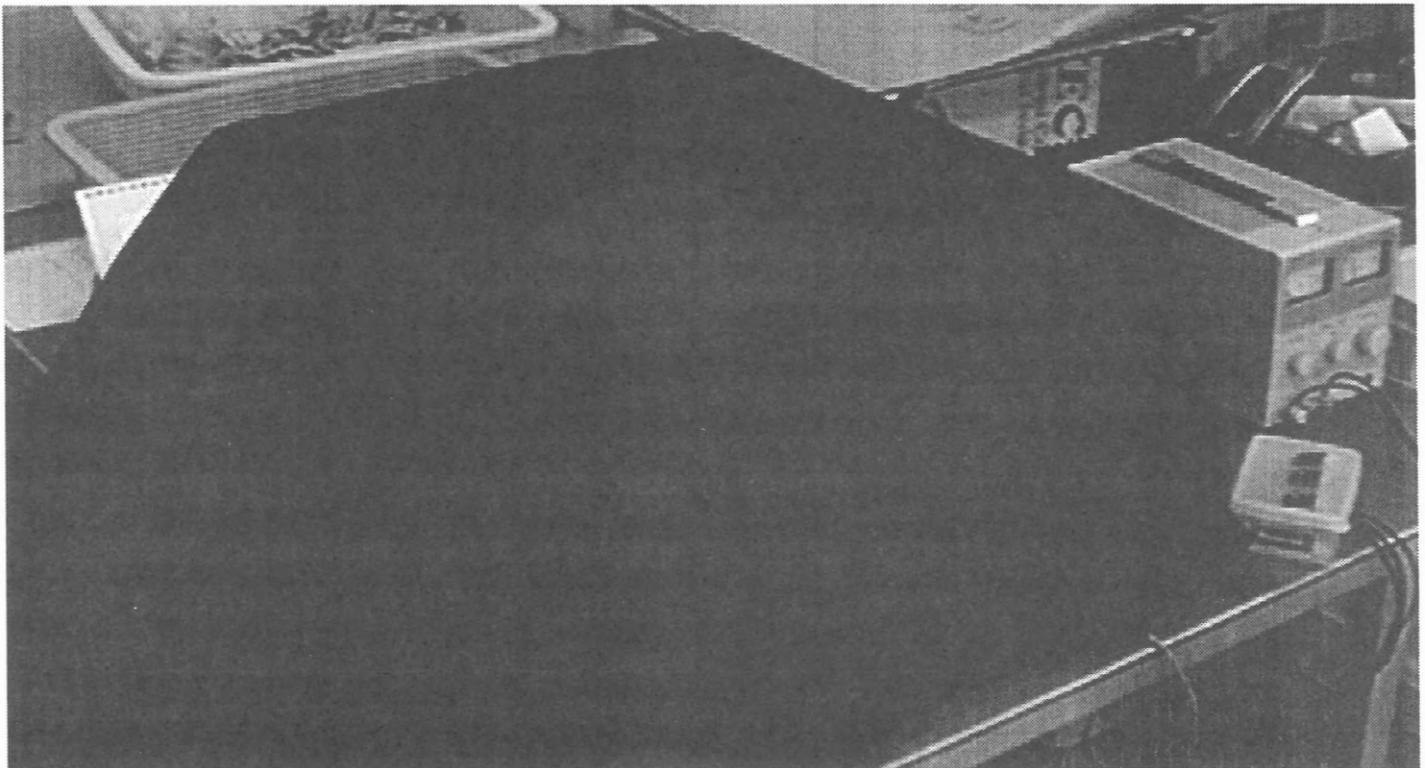


図 11: 計測装置

#### 4 計測装置

製作した計測装置を図 11 に示す。この計測装置の大きさは、幅 440mm、奥行き 440mm、高さ 250mm である。

この装置はフレームに木材を使用して頑強なものにし、また、外部からの環境光の侵入を防ぐために計測装置全体を暗幕で囲っている。上部からデジタルカメラを使用し撮影するように製作されている。最近のデジタルカメラは安く高性能であり、ビデオカメラよりも携帯性が優れている。また、計測装置に設置するのが容易という点で採用した。光源の数は、3つである。

電球とカメラと物体の位置関係を図 12 に示す。光源となる電球の位置関係を表す  $\theta$  と  $\phi$  の値を、表 1 に示す。

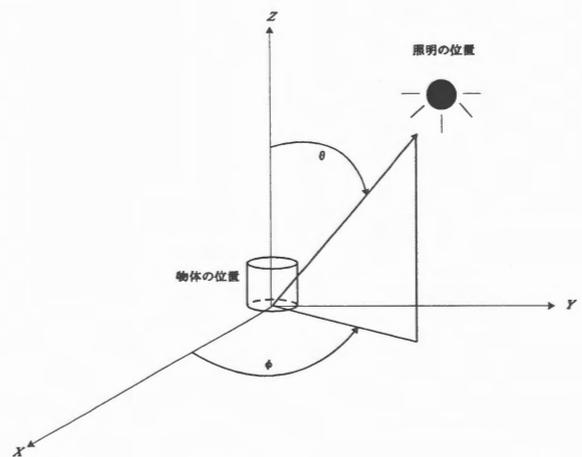


図 12: 電球とカメラのモデル図

表 1: 計測装置の光源の角度

	光源 1	光源 2	光源 3
$\phi$	60	180	300
$\theta$	30	30	30

3光源とも破片を置く中央の位置から均等な距離と角度に位置するように固定する。

破片を置く位置を計測装置の中心に合わせても光源として使用する電球3つの照度が同じ強さだとは限らない。

そこで計測前に3つの電球の照度が同じになる位置を照度計を用いて探し出し、破片を置く位置を決定する。

### 5.1.2 測定結果

球体の測定結果を図14から図17に示す。

## 5 測定実験

### 5.1 球体の測定

#### 5.1.1 測定方法

遺物破片の測定結果を示す前に、比較的測定に容易な球体の測定結果について述べる。ここでは、光源の照度を変えて同じ物体を撮影し、それぞれについて形状を求めめる。

測定に用いた光源の照度を表2に示す。また、測定に用いた球体を図13に示す。

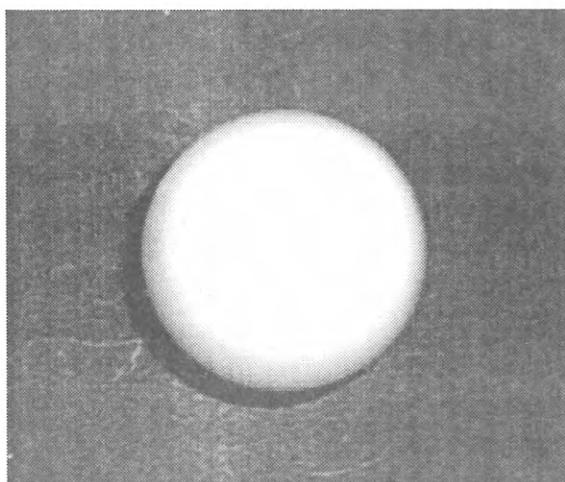


図13: 球体

表2: 光源の照度

	結果1	結果2	結果3	結果4
光源の照度 (ルクス)	150	109	74	50

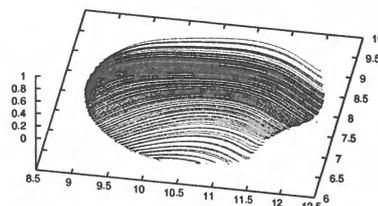


図14: 測定結果1 (照度150ルクス)

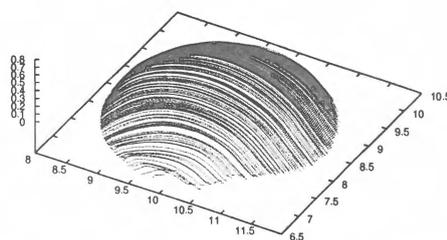


図15: 測定結果2 (照度109ルクス)

#### 5.1.3 考察

測定結果をまとめて表3に示す。ここでいう「高さ」とは、遺物破片を撮影するときの視点方向Zを指すこととする。

表3ならびに、図14から図17の測定結果より、照度の強さによって測定された結果が異なることがわかる。

照度が強いほど高さが低くなり、誤差が大きくなる。逆に照度が弱いほうが、球体の高さに近くなるという結果が得られた。

この結果より、光源の照度を50ルクスよりも弱くするとより正確な高さが得られると推測できる。

この結果を踏まえて次に遺物破片の測定結果について述べる。

表 3: 球体の高さの測定結果

	実測値	結果 1	結果 2	結果 3	結果 4
光源の照度 (ルクス)	--	150	109	74	50
高さ (半径)[cm]	1.8	0.6	0.8	1.0	1.4

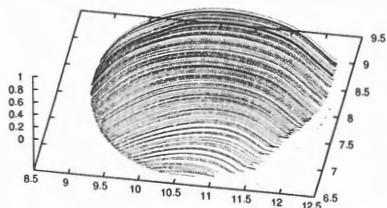


図 16: 測定結果 3 (照度 74 ルクス)

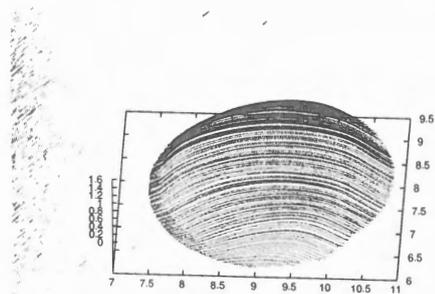


図 17: 測定結果 4 (照度 50 ルクス)

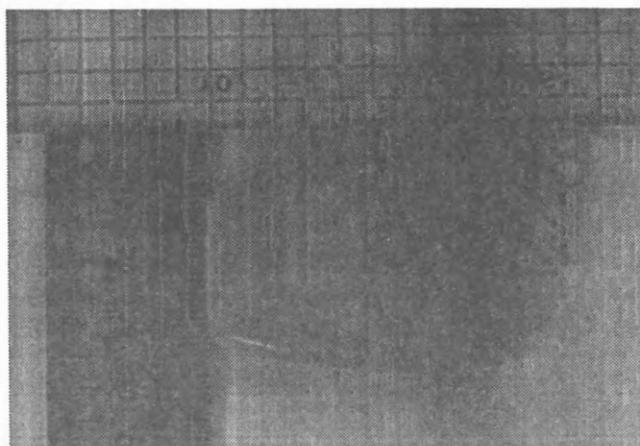


図 18: 白磁 1

## 5.2 遺物破片の測定

### 5.2.1 測定方法

測定に使用した遺物破片は、図 18 と図 19 に示す白磁の破片である。図 18 に示した白磁 1 の破片の大きさは、縦 3.8cm、横 5.1cm、高さ 1.0cm である。また、図 19 に示した白磁 2 の破片の大きさは、縦 4.1cm、横 4.3cm、高さ 0.8cm である。両破片とも凸型の形状をしており滑らかであり、釉薬が塗ってある。白磁 1 は文様が全くないが、白磁 2 の表面は多少ごま塩状の表面をしている。

### 5.2.2 結果結果

図 18 の遺物破片を照度を変えて求めた結果が図 20 から図 23 までである。図 19 の遺物破片を照度を変えて求めた結果が図 24 から図 27 までである。

これら結果をまとめて、表 4 に示す。

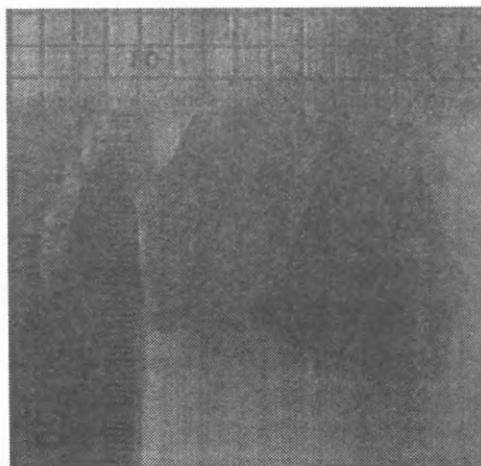


図 19: 白磁 2

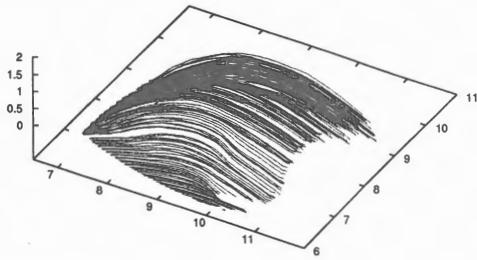


図 20: 白磁 1 測定結果 1 (照度 1 4 9 ルクス)

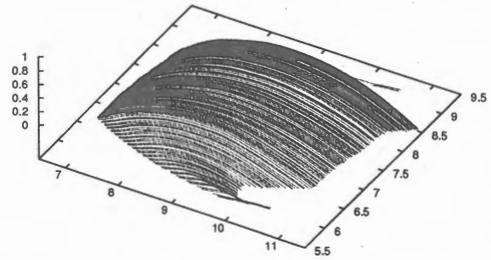


図 23: 白磁 1 測定結果 4 (照度 5 1 ルクス)

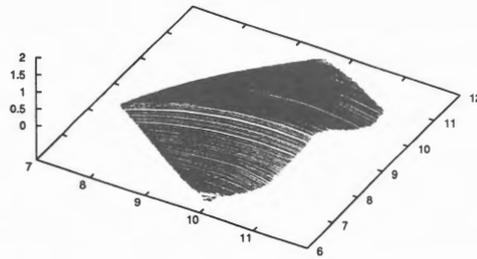


図 21: 白磁 1 測定結果 2 (照度 1 0 7 ルクス)

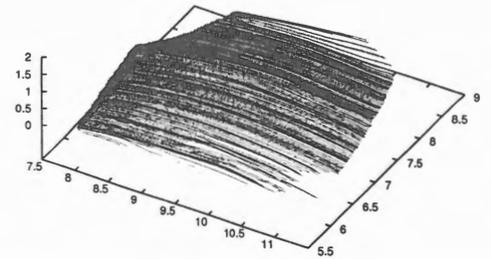


図 24: 白磁 2 測定結果 1 (照度 1 4 9 ルクス)

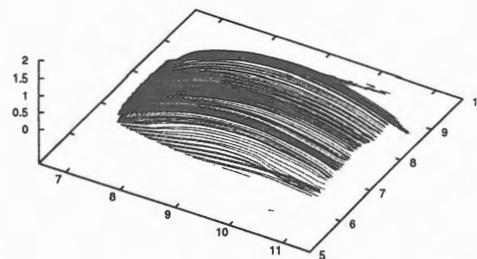


図 22: 白磁 1 測定結果 3 (照度 7 5 ルクス)

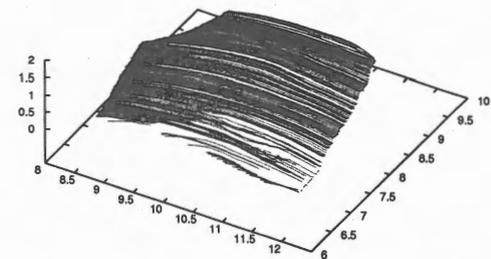


図 25: 白磁 2 測定結果 2 (照度 1 0 7 ルクス)

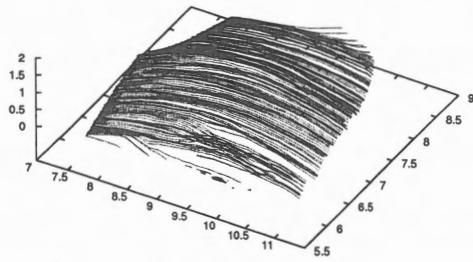


図 26: 白磁 2 測定結果 3 (照度 75 ルクス)

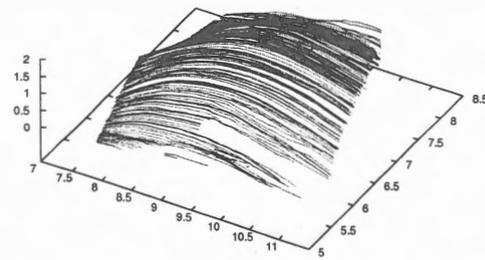


図 27: 白磁 2 測定結果 4 (照度 51 ルクス)

表 4: 破片の高さの測定結果

	実測値	結果 1	結果 2	結果 3	結果 4
光源の照度 (ルクス)	—	149	107	75	51
高さ [cm] (最高点) 白磁 1	1.0	0.68	1.02	1.38	1.94
白磁 2	0.8	0.50	0.65	0.94	1.69

### 5.3 考察

白磁 2 の結果が実測値に近い値しか得られなかったのは、ごま塩の様な模様をしていたからと考えられる。この模様によって破片の反射率に影響を与えて近い値しか得られなかったと考えられる。もしこの模様がなかったら、白磁 1 と同様に 107 ルクスの方が実測値に近い値になったと思われる。

球体と遺物破片の形状計測の結果より、照度が強いほど求められる傾きの値が小さくなり、高さが低くなったと考えられる。その反対に照度が弱くなると得られる傾きの値が大きく、高さが高くなると考えられる。これは、物体表面の反射率に関係すると考えられる。物体の反射率と照度の強さの関係の法則を捜し出すことができれば、正確に高さを求めることができると思われる。

## 6 まとめ

遺物の 3 次元形状を求めることを目的として計測装置を製作した。形状測定には照度差ステレオ法を用いている。測定の結果、球体も白磁の破片も大まかな形状測定が可能であることが分かった。照度の強さをうまく設定することによって物体の高さの精度を良く測定できることが分かった。また、照度が強い程、遺物の形状の高さが低くなり、照度が弱い程、遺物の形状の高さが高くなる傾向が見られた。

今後は、適当な照度と物体の反射率の関係を明瞭化し正確な高さを求めること、文様の入った遺物の測定、遺物の裏側の測定等が課題である。

### 5.2.3 評価

白磁 1 では、照度が 107 ルクスの場合に実測値にほぼ等しい高さが得られた。白磁 2 では、照度が 75 ルクスと 107 ルクスの場合に実測値に近い高さが得られている。また、白磁 2 には遺物番号が書かれている(図 19 参照)。照度 51 ルクスで測定した場合、この部分が欠落している。他の照度でも同様の影響が出ている。

また、表 4 に示すように、白磁の遺物破片でも球体で得られた結果のように照度が強い程、高さが低くなり、照度が弱い程高さが高くなっている。

## 謝辞

データの収集・分類作業や考古学におけるデータ管理についての議論などでお世話になった福井県立一条谷朝倉氏遺跡資料館の水村伸行氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 結城宏和、寶珍輝尚、都司達夫:照度差ステレオ法を用いた遺物の3次元形状の推定, 日本情報考古学会第5回大会 発表要旨, pp.65-70(1998)
- [2] 中嶋正之、山本正信:グラフィックスとビジョン-デジタル映像処理- オーム社出版局,(1996)
- [3] 池内克史:反射率地図に基づき、二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する2手法, 電子通信学会論文誌, 842-849(1982)
- [4] *Berthold K.P.Horn and Robert W.Sjoberg : Calculating the reflectance map, APPLIED OPTICS, Vol18, No11, pp.1170-1179 (1979)*
- [5] 鄭絳宇、村田昭雄:考古出土品の計測保存と仮想復元, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J81-D-II, No.5, pp.1035-1038 (1998)
- [6] 結城宏和、寶珍輝尚、都司達夫:考古学遺物の形状の測定, 電気関係学会北陸支部連合大会, pp.328(1998)