

前方後円墳の形態分析と復元形の生成

西風 隆 小澤 一雅

大阪電気通信大学大学院工学研究科情報工学専攻

本研究では前方後円墳の形状復元問題を取りあげて、実測図から推定墳形を生成するシステムの構築を行っている。推定墳形の生成には前方後円墳の各部位の数値データを必要としているが、その一部に崩壊による損失データが存在する場合、その他の部位（既知データ）に基づいてそれを補完している。ここで今回は損失データの補完に、前方後円墳の特徴を現す2つの指数（型式変化指数・胴長指数）を利用したシステムを採用している。本論文では、型式変化指数・胴長指数を利用した前方後円墳の形状復元と、等高線図や3D画像（VRMLを使用）による推定墳形の表示を含めた現在試作中の「前方後円墳復元システム」について紹介する。

Shape Analysis and Pictorial Restoration of Japanese Ancient Tomb Mounds

Takashi Nishikaze and Kazumasa Ozawa

Graduate School of Engineering
Osaka Electro-Communication University
Neyagawa, Osaka 572-8530, Japan
nisikaze@ozlab.osakac.ac.jp

This paper presents a procedure to restore the shapes of damaged Japanese ancient tomb mounds. This procedure begins with measuring the seven dimensions from the contour map of a given ancient tomb mound. Statistical knowledge on the relation between chronological change of the tomb mounds and the seven dimensions plays an important role in our restoration procedure. This paper also presents the outline of the statistical knowledge in terms of shape analysis of the ancient tomb mounds. Especially the two principal components derived from the seven dimensions act well in quantitative estimation of lost parts of the damaged mound. Our procedure is now being implemented on computer as a restoration system to support archaeological studies on the Japanese ancient tomb mounds, including VRML-Based 3D visualization. This paper also presents an example of a restored ancient tomb mound in terms of a contour map and a 3D image given by the system.

1. はじめに

前方後円墳は、今から約 1500 年以前（4 世紀～6 世紀）に造られた日本古代の墳墓である。前方後円墳の「かたち」は、その名のとおり前方部が方型、後方部が円型という独特の形状をしており、非常に綿密な企画のもとで築造されたものだと考えられている[1, 2]。しかしながら、千数百年の歳月をくぐり抜けて来た前方後円墳の形状は築造当時の姿から、地震や様々な自然現象・都市開発のために多かれ少なかれ変形してしまっている。考古学では、このような対象物の断片からその原形を復元する復元作業がしばしば行われる。

試作中の前方後円墳復元システムは、実測図から推定墳形を生成するまでの 3 つの過程、実測図データの取り込み部分・実測図から判明した前方後円墳の各部位の大きさ（既知データ）から、実測図からでは判断できなかった崩壊部分の元の大きさ（未知データ）を導き出す推定部・実測データと推定データより前方後円墳の推定墳形を生成する生成部の 3 つに大きく分けられている。本研究報告では主成分分析法により導き出した前方後円墳の 2 つの特徴指数（型式変化指数・胴長指数）とそれを利用した前方後円墳の形状復元について紹介する。

2. 前方後円墳の基本形状

(1) 前方後円墳の骨格的な概形

前方後円墳の基本形状は墳丘主体部に注目すると以下のような 7 要素に分類できる。

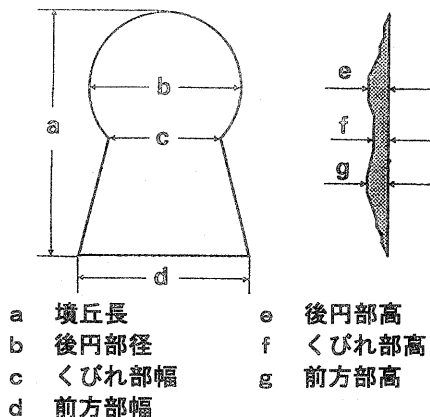


図1 基礎パラメータ

(2) くびれ部の位置

前方後円墳の等高線図生成において必要不可欠なデータとして、くびれ部の位置（前方部前線からくびれ部までの距離）があげられる。

通常、前方後円墳の復元作業を行う場合は、コンパスや定規を使用し、必要な計測値を導き出しながら作業を進めていく。この際、くびれ部の位置の推定に関しては、比率が使用されることが多い。しかし、比率による前方後円墳の形状復元の手法は多数存在する。また、復元するすべての前方後円墳にその比率が当てはまるわけではなく、復元を行なう人の経験的知識が必要不可欠である。

本システムでは、くびれ部位置を簡易的に求めるために、後円部は完全な円形・左右対称形状という条件の下で基礎パラメータより以下の計算式を使用して、前方部前線からくびれ部までの距離を求めている。この方法により、すべての前方後円墳において共通の方法を用い、くびれ部位置の推定を行なうことができる。

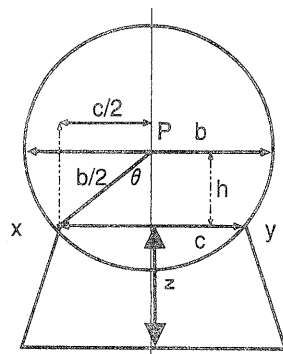


図2 くびれ部の位置

$$\text{図2より} \quad \cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$$

$$\text{すなわち} \quad \frac{h}{b/2} = \sqrt{1 - \left(\frac{c/2}{b/2}\right)^2}$$

$$\therefore h = b/2 \cdot \sqrt{1 - (c/b)^2}$$

ここで、くびれ部距離（ $z = a - b/2 - h$ ）は次のように与えられる。

$$z = a - b/2 \cdot (1 + \sqrt{1 - (c/b)^2}) \cdots (1)$$

(3) 前方後円墳の相対値ベクトル

前方後円墳の推定形状を導き出す手段として本システムでは34基の標準古墳を用意している。その標準古墳と最も近似している標準古墳を推定古墳と判断し、それを元に推定形状を算出している。前方後円墳はその築造時期により、その形状に大きな特徴が出ている。初期の前方後円墳は死者を埋葬している円墳に隣接する形で方形の盛土をした墳墓であり、その前方部で埋葬者に対する祭りごとを行ったのが起源だと考えられている。しかし、時代が進むにつれて前方後円墳の前方部部分が、どんどん発達してゆき(墳墓の大きさが権力の象徴になった為だと考えられている)終には前方部で行われていた祭りごとを、くびれ部付近に新たに「造出」という盛土部分を造り、その上で行うようになった。標準古墳には時代推移による形状変化を表す代表的な畿内の前方後円墳を採用している。ここで、前方後円墳の形状を比較するパラメータの集合として下記の相対値ベクトルを用意した。

$$\mathbf{x} = \left(\frac{g}{e}, \frac{f}{e}, \frac{a}{b}, \frac{c}{b}, \frac{d}{b} \right) \cdots (2)$$

3. 前方後円墳の形態分析

(1) 前方後円墳の主成分分析

主成分分析は、いわゆる多変量解析法と呼ばれる統計的なデータ分析手法である。主成分分析を数学的にいうと、多次元の特徴空間に分布する点(データ)の集合を、より低次元の空間へ射影するときに情報の損失が最小となる座標軸系を見つける操作で、例えば図3のように3次元空間に与えられている点集合(データ)を2次元平面に射影する場合、変動したデータが直線方向に最大の広がりを示す方向に座標軸を設定し、その軸に垂直な座標軸をもうひとつ決定する。これにより3つの特徴量によって表されていた1つの個体が、2つの主成分によって簡約的に記述できることになる。本研究室では前方後円墳の形状を7つの計測データ(5つの相対値ベクトル)を用いて表現しているが、主成分分析を用いて前方後円墳の形状特徴を2つの主成分によって表現したものが次の2式である。

[第1主成分]

$$z_1 = \frac{0.70a + 3.58c + 1.79d}{b} + \frac{2.51g + 3.03f}{e} - 9.14 \cdots (3)$$

[第2主成分]

$$z_2 = \frac{-4.83a + 1.74c - 0.73d}{b} + \frac{-0.05g + 1.61f}{e} + 7.26 \cdots (4)$$

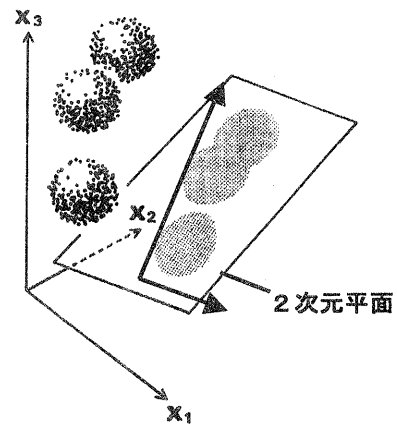


図3 2次元平面への投影

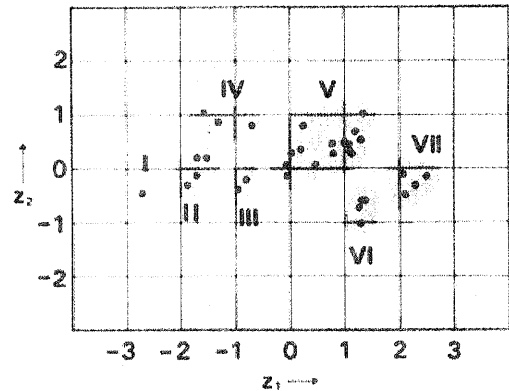


図4 主要古墳の分布

(2) 型式変化指数・胴長指数

前方後円墳の形態を主成分分析してみると第1主成分は築造された年代に比例していることが判明したが、これは全くの偶然である。第1主成分の事を前方後円墳の年代推移に対

しての型式の変化を表しているので「型式変化指数」と呼んでいる。この数値が大きいほど前方部が発達している事を表している。第2主成分は後円部直径に対する墳丘長の長さの影響を大きく受けているので前方後円墳のプロポーションを特徴づける指数として「胴長指数」と呼んでいる。この数値が小さいほどスマートな形状である事を表している。標準古墳の主成分の分布を調べると、大きく7つのグループに分かれる事が判明した。(図4参照)「前方後円墳復元システム」では、近似古墳の型式変化指数・胴長指数と既知データより未知データを推測している。

4. 推定墳形の生成

(1) 推定墳形の生成手順

実測図から推定墳形を求めるにあたっての手順は図5のようになる。墳丘を計測し実測図を生成するまでの作業は、このシステムでは考えていない。

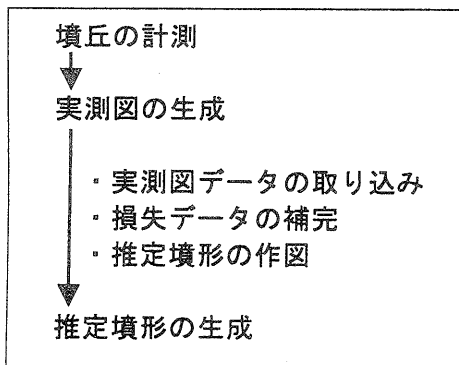


図5 推定墳形の生成手順

(2) 実測図データの取り込み

実測図データの取り込みは、実測図に記載されている各部位の数値データをそのまま入力する方法と、実測図をコンピュータ上で計測する方法の2種類がある。

コンピュータを利用した実測図の取り込みシステムは図6のようにスキャナとコンピュータによって構成される。取り込んだ画像の一部を拡大表示して、縮尺と計測部位の始点と終点を与える事によってその間の距離を測定する事ができる。(図7参照)

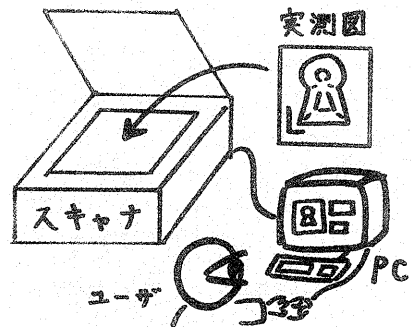


図6 実測図データの取り込み

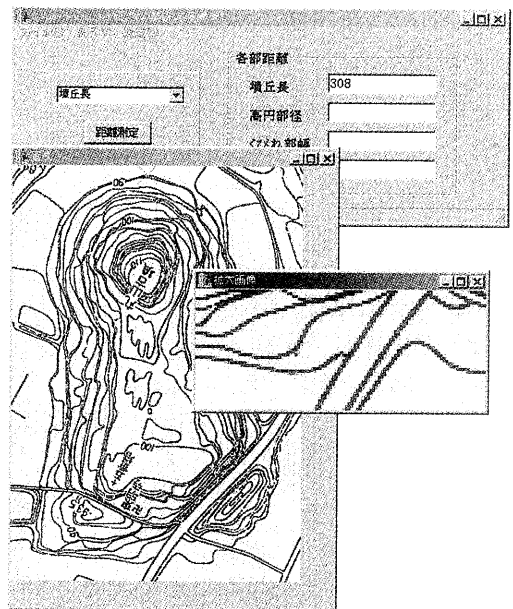


図7 実測図からのデータ取り込み

(3) 破損データの補完

前方後円墳の推定墳形を生成する場合、図1に示した基礎パラメータすべてが必要となる。しかし、すべての前方後円墳において基礎パラメータが揃っているわけではなく、一部のデータが欠落しているものも多い。そのような前方後円墳を復元するためには、既知データから未知のデータを求める手法が必要不可欠である。

今回、未知データの推定アルゴリズムとして、既知データから34基の標準古墳との類似度を求め、その結果より最も近似した標準古墳と既知データから、未知のデータを導き出す方法を用いた(図8参照)。

標準古墳 1～3 4 の相対値ベクトルをそれぞれ x_n ($n = 1 \sim 3 4$)、任意の古墳の相対値ベクトルを x とする。

入力古墳 X の相対値ベクトル x と、それぞれの標準古墳の相対値ベクトルの距離は、2つのベクトルの距離 $\|x - x_n\|$ で表すことができる。この距離が最小の標準古墳を、入力古墳 X の近似古墳とする。

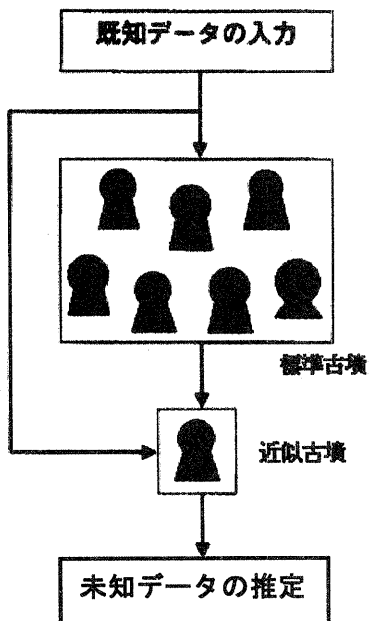


図 8 未知データ推定の流れ

(4) 型式変化・胴長指数を利用した復元

従来の前方後円墳復元システムでは、後円部と各部位の相対値を元に推定古墳を算出し推定墳形を導き出していた。しかし、後円部が崩壊した前方後円墳も数多く存在し、そのような前方後円墳の復元は後円部データに依存した従来の手法では復元不可能だった。そこで、どのような崩壊をしても対応できるように下記の 2 点の変更を試みた。

- 1) 相対値ベクトルを幅・高さ、それぞれの相対値を全て含むように変更する。

$$x = \left(\frac{g}{e}, \frac{f}{e}, \frac{g}{f}, \frac{a}{b}, \frac{c}{b}, \frac{d}{b}, \frac{c}{a}, \frac{d}{a}, \frac{d}{c} \right) \dots \quad (5)$$

- 2) 未知データの補完に「型式変化指数」・「胴長指数」を利用する。

型式変化指数や胴長指数は、前方後円墳の形態を 7 つの基礎データ (5 つの相対値) から導いているので近似古墳が判別できれば、未知データを他の全ての既知データから推測することができる。この時、未知データの数によって下記の方法によりそれぞれの未知データを補完する。

- 1) 損失データが 1 つの場合

形式変化指数による未知データの判定結果と胴長指数による未知データの判定結果の平均を推定データとする。

- 2) 損失データが 2 つの場合

型式変化指数・胴長指数と 5 つの既知データから 2 つの未知データを推測する。(2 つの主成分の連立方程式を解く事によって、2 つの未知データの判定が可能となる。)

- 3) 損失データが 3 つ以上の場合

型式変化指数・胴長指数から推定データを導き出す手法では、補完できる破損データの数には 2 ヶ所が限界である。現在、3 ヶ所以上の損失データの補完には、従来の後円部データに依存した復元システムを用いている。しかし、崩壊した前方後円墳の実測図を見てみるとデータが 3 箇所以上測定不能なものは、その時点で情報がほとんど損失しているものとして復元形の推定は不可能と考えられる。

(5) 推定墳形の生成

推定墳形の表示方法として、いくつかの形式が考えられる。今回は前方後円墳の推定墳形を Web ページ等で公開する事を考えて、等高線図による表示と VRML を利用した 3 D 画像の表示を採用した。

図 9 は、奈良県橿原市見瀬町にある日本で 6 番目の大きさ (墳丘長) を誇る見瀬丸山古墳の実際の等高線実測図である。前方部が開発のため一部崩壊しているのが確認できる。

崩壊のためデータが不明である前方部前線の幅の推定値を、その他の部位の既知データから求め推定墳形を示したのが図 10 である。



墳丘長 308m 後円部径 162m
 くびれ部幅 115m 前方部幅 不明
 後円部高 20m くびれ部高 15m
 前方部高 22m

図9 見瀬丸山古墳の実測図

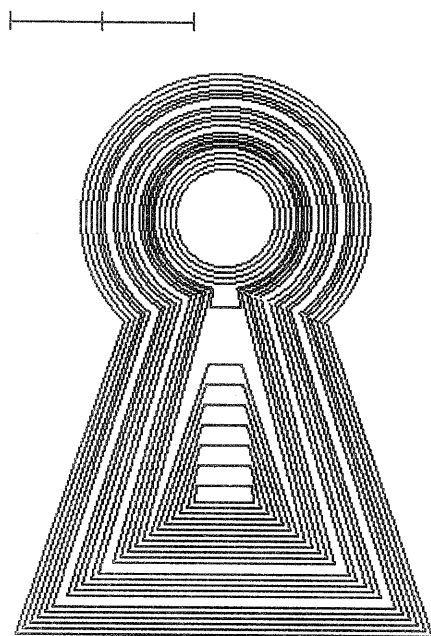


図10 見瀬丸山古墳の推定墳形

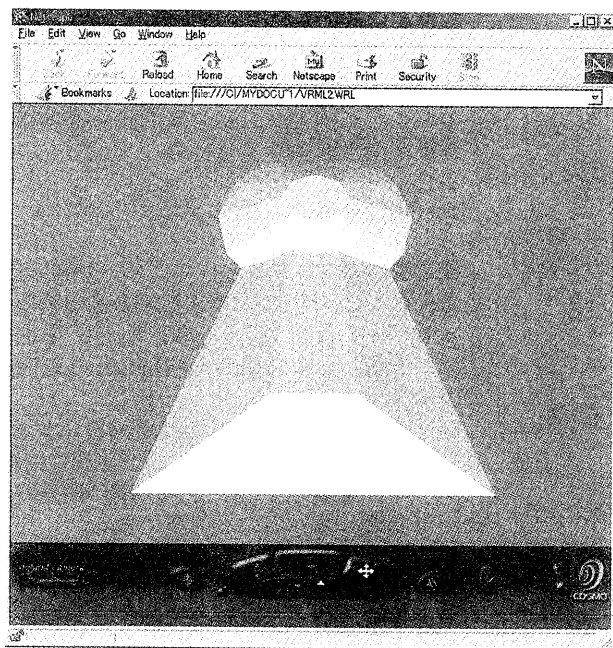


図11 VRMLによる3D画像の表示

また、VRML による推定墳形の 3D 画像を表示したものが図 11 である。この画像は VRML に対応したブラウザで見ることができ、非対応のブラウザでも CosmoPlayer 等の専用のプラグインの導入により表示させる事が可能になる。

5. まとめ

今回、前方後円墳の形状復元に焦点をあて、その手続きからシステム化に至るまでの基本的な考え方を述べた。

考古学的復元問題において対象となる遺物・遺構の欠損状態は極めて多様であり、復元作業の過程において人間の柔軟な判断力を随時活用できるシステムが望まれる。

例えば、前方後円墳は通常自然地形を巧妙に利用して構築されている。よって、常に平坦な土地に築造されているわけではない。とくに、丘の斜面などに築造されている場合などは、古墳の形状は同じでも等高線は歪んだものになってしまう。これらの問題に対応していくには、完全に人間が行なう作業（復元作業）を代行するシステムではなく、コンピュータ・人間の双方で効果的に共同作業を行なうシステムが理想的だ考えられる。

6. 参考文献

- [1] 上田 宏範,『前方後円墳』,学生社 (1969)
- [2] 小澤 一雅,『前方後円墳の数理』,雄山閣 (1988)
- [3] 小澤 一雅,古墳の復元とシステム化,
『情報処理学会論文誌』,
32 巻 6 号,pp756-765(1991)
- [4] 西風 隆,治居 秀法,小澤 一雅,
前方後円墳復元形の生成システム,
『情報処理学会研究報告』,
99-CH-42,pp23-29 (1999)
- [5] 近藤 義郎編,『前方後円墳集成—近畿編』
山川出版社 (1992)
- [6] ローラ・リメイ,ケリー・マードック,
ジャスティン・コーチ,
『3D グラフィックスと VRML2.0』
ブレンティスホール出版 (1998)