

論文

前方後円墳のパターンマッチング*

小 沢 一 雅**

Abstract

In ancient Japan there existed a period when vast manpower was expended in building tomb mounds and numerous treasures were buried within them. Recently, the shapes of those tomb mounds which look like "key-hole" have been earnestly investigated by archaeologists, because some features of the shape seem to be strongly connected with the historical background where the tomb mound at issue was built.

The author already pointed out that the methodology of archaeological investigation on the objects might be nothing but pattern recognition. In this paper it is described how to apply pattern matching techniques to archaeological pattern recognition, and their validity in archaeology is shown either theoretically or experimentally.

1. ま え が き

日本の考古学において占める古墳研究の役割は非常に大きいといえる。これは文献の空白によって生じている古代史の不明確な諸点に関する推論を支える重要な情報を提供し得る可能性が大きいことに他ならない。古墳は一つの遺跡・遺物であるが、その他考古学の扱う遺跡・遺物の種類は多岐にわたり、その数量もまた膨大である。これに対してこれら古代情報源を分析・処理する考古学者の数は決して十分とはいえず、新しいデータ処理法の導入によって迅速かつ正確な処理を実現し、古代史学の飛躍的な前進をはかるとともに遺跡・遺物の保存方針を早期に明確にすることが期待される。

本稿は、古墳、特に前方後円墳を巨大ではあるけれども一つの造形物である点に着目し、物体のパターン認識の観点から主として形態分類を行うための前提となるパターンマッチングの技法^{1),2)}に関する検討を述べたものである。前方後円墳のパターン認識はあのように巨大な造形物が明確な設計企画なしには築造され得ないという常識的な見方を前提としている。実際、

* Pattern Matching Technique for Classifying the Key-hole Shaped Tomb Mounds by Kazumasa OZAWA (Osaka Electro-Communication University)

1, ** 大阪電気通信大学工学部経営工学科

*** 宮内庁の治定になる天皇陵古墳等の考古学的な調査が十分行えない現在の状況は古代学発展の意味で残念なことである。

航空写真³⁾によって一見してわかるその整然とした左右対称構造はこのような前提を抵抗なく納得させる実例の一つであろう。

本稿で述べる前方後円墳のパターン認識では、主観を排除する意味で現状の古墳の実測図を忠実に計数データ化する方法を採用しているが、古墳築造時（4世紀から6世紀にかけて）の形態と現在の形態との間かなりの隔りがあることについて考慮すべき問題があるといえる。ただし、現在までの筆者の検討結果によれば、盛土によって築造されている前方後円墳の現状は人為的な激しい破壊のある場合を除いて、築造時の『骨格的』特徴をまだ十分に保存しているものが多く、パターン認識研究の対象として極めて興味深いものであると考えられるのである。

2. 形態研究の意義

前方後円墳は近畿地方を中心として、九州から関東まで全国的に分布しているわが国の代表的な古墳であるが、いわゆる王朝交代論等とも関連して大和王朝成立期の古代史を解明する有力な情報を提供する研究素材である。実際、その発掘によって出土する副葬品の数々はすでに従来より古代史へ貴重な貢献をしてきたことは周知の事実である***。

一方、すべての前方後円墳が自由奔放な設計企画によって適当に盛土されて築造されたものではなく、そ

の形態や規模について厳重な規制の下で築造されたものであることが予想され⁴⁾、築造の背後には強力な政治的権力の存在が推測されるのである。したがって、逆に見れば前方後円墳の形態を調べることが、古代における政治的権力の変遷過程をより一層鮮明にする足がかりとなることが期待できるのである。

考古学における前方後円墳の形態研究は、上田⁴⁾の『型式学的分類学説』によって計量科学的な色彩を強めて前進したとい

える。上田は前方後円墳についての旧来の定性的な分類法(Fig. 1 参照)に対して、作図法を用いて墳丘の形態を簡単な3連比によって把握する方法を導入し、設計企画の定量的な考察をはじめ可能としたのである。上田の手法を含めて考古学者の分析作業を注意深く見て行くと、実測図の等高線の乱れの修正・復元などの前処理、墳丘の形態の特徴抽出さらにそれにもとづく同定の作業等に細分化でき、これらがきわめて高度なパターン認識過程に他ならないことがわかる。しかし、完全な手作業で進められてきた従来の手法では、人間の優れたパターン認識能力とは異質の誤った主観が介入する余地がないわけではないと考えられる。そこで、筆者は後者の危険を排除する意味で、工学的なパターン認識技術を援用する意義のあることに着目し、すでにその方法論について発表した¹⁾。すでに述べたように前方後円墳の設計企画に厳重な規制が加えられているという観点から、これらのパターン認識は、たとえば文字認識に対比させて考えれば、固定フォントの場合に相当するといえよう。したがって工学的パターン認識技術の援用についても、パターンマッチングなど固定フォントに対する技法が大いに参考となるのである。

3. 前方後円墳のパターンマッチング

3.1 データの規格化

パターンマッチング技術の具体的な適用に際しては前方後円墳のパターンとしての特殊性を配慮しなければならない。まず、第一に考えなければならないことは、墳丘の大きさが千差万別である点である。実際、

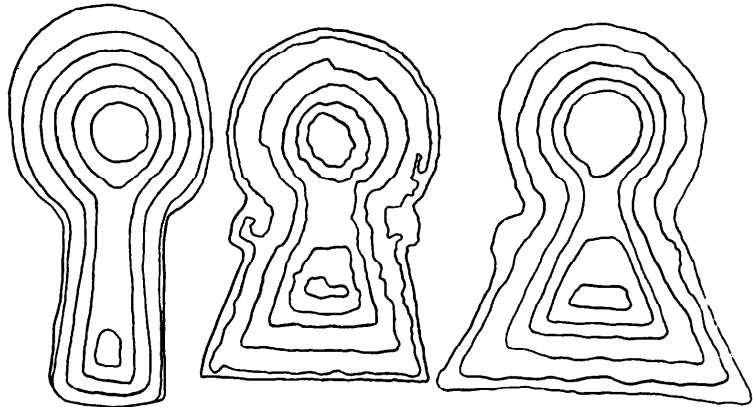


Fig. 1 Three typical types of key-hole shaped tomb mounds

世界最大級の規模をもつ墳墓として有名な大阪府堺市の百鳥古墳群に属する仁徳陵古墳は全長が486mもある一方で、全長が20~30m程度の小さなものまである。いま、設計企画の同一性を調べるという目的のためには、このような絶対的な大きさに関する情報は意味をもたないことはいうまでもない。そこで、適当な規格化を行うことによって、大きさに関する情報を排除してしまうことが必要となる。

第二には、墳丘の位置ぎめの問題がある。前方後円墳というユニークではあるけれども整然とした規則性のある形態をもった物体を2次元平面上にどのような位置座標を設定して関数的に表現するかはまた一つの重要な問題である。

筆者は、上記の2点を解決する具体的方法の一つとして以下に述べる古墳データの規格化を行っている^{1), 2)}。

Fig. 2. (次頁参照)に示すように、前方後円墳の実測図は通常等高線で表示されている。この実測図を120×120の画素からなる2次元画像データに変換するにあたって、規格化は実測図の最外郭等高線*に注目して行われる。縦横120単位に区切られた定義域内の位置座標を $x=(x_1, x_2)$ と示すことにしよう。ただし x_1, x_2 は、 $1 \leq x_1, x_2 \leq 120$ なる整数である。

Fig. 3(次頁参照)のように、後円部の中心を検出し、位置座標(60, 45)に設定する。つぎに主軸線(対称軸)を縦座標軸 x_2 の方向に平行に定め、さらに後円部直径を50単位になるように実測図を相対的に拡大または縮小する。 $x=(x_1, x_2)$ にある画素の値は、その位置における実測図の等高線の示す高度を読み取って定義される* (次頁参照)。すなわち、一つの古墳

* 墳形を保っている最も外側の(低い)等高線

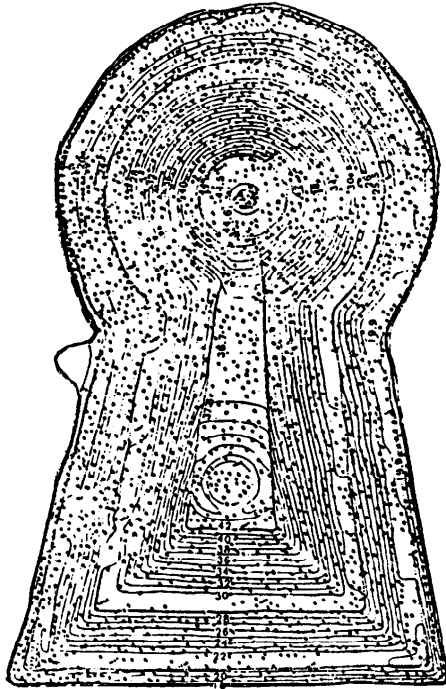


Fig. 2 Contour lines of mausoleum of the Emperor Richu (Osaka)

f はこのようにして関数表現 $F(x)$ の形で得られる。特に、実測図の等高線が示す高度は、通常海拔表示であるため、最外郭等高線のさらに外側の等高線をすべて0メートルとし、それを基準として相対高度を定義する形式をとっている。規格化に際して、特に最外郭等高線の後円部に着目した理由は、前方後円墳の設計企画が後円部に対する前方部の相対的な形態の差異に重点を置いており、後円部はいわばすべての『共通部分』となっている点にある (Fig. 1 参照)。

前方後円墳のパターンマッチングを行うにあたって以上のように規格化された 120×120 の画素からなる古墳データ $F(x)$ をさらにスムージング効果を考慮して 40×40 すなわち画素数にして $1/9$ に圧縮する。圧縮は、 $1 \leq x_1, x_2 \leq 40$ とし、

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{9} \sum_{x_1'=3x_1-2}^{3x_1} \sum_{x_2'=3x_2-2}^{3x_2} F(x_1', x_2')$$

によって行う。このようにして最終的に得られる古墳データの定義域 D は、

$$D = \{x = (x_1, x_2) | 1 \leq x_1, x_2 \leq 40\} \quad (1)$$

のように 40×40 に縮小されることになる。

* 読みとりは手作業で行う。

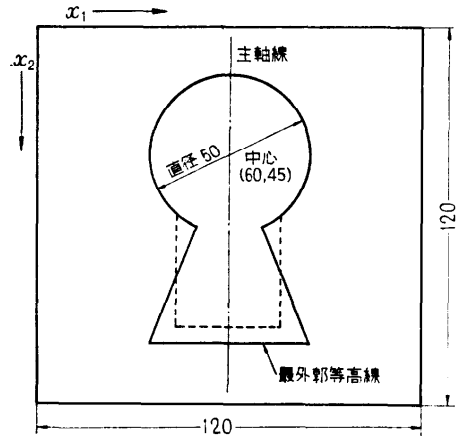


Fig. 3 Standardization of tomb mound data on 120×120 domain

いま、対象とする古墳が N 基あるとし、集合 $F = \{f_1, \dots, f_N\}$ で表わすことにすれば、任意の古墳 f_i が、規格化および圧縮を経て、 D 上の古墳データ $f_i(x)$ として与えられることになる。

3.2 類似度

定義域 D 上に関数表現された古墳データ群 $\{f_1(x), \dots, f_N(x)\}$ を用いて、古墳の形態の類似性をパターンマッチングによって計量化することを考えよう。いま、古墳 f_i と f_j の類似度を s_{ij} とし、類似度という尺度に課すべき便宜上の条件としてつぎの3つの条件を設定することにする。

1. $-1 \leq s_{ij} \leq 1$
2. $s_{ii} = 1 \quad (i=1, \dots, N)$
3. $s_{ij} = s_{ji}$

これらを満たす s_{ij} として、よく知られている相関係数を用い、さらに古墳データの特長性を配慮してつぎのような基本類似度式を導入する。

$$s_{ij} = \frac{\text{Max}_{d \in D} (f_i(x), f_j(x-d))}{\|f_i(x)\| \cdot \|f_j(x)\|} \quad (3)$$

ただし、

$$\text{内積: } (f_i(x), f_j(x)) = \sum_{x \in D} f_i(x) f_j(x)$$

$$\text{ノルム: } \|f_i(x)\| = \sqrt{(f_i(x), f_i(x))}$$

とする。また、Max の操作に関する位置移動成分 $d = (\Delta_1, \Delta_2)$ の変域 d は、経験上あまり大きくする必要はなく、全体画素数を 40×40 にとると、 Δ_1, Δ_2 を整数として、

$$d = \{d = (\Delta_1, \Delta_2) | -3 \leq \Delta_1, \Delta_2 \leq 3\}$$

の 7×7 領域で十分目的を達している。 d を移動域と

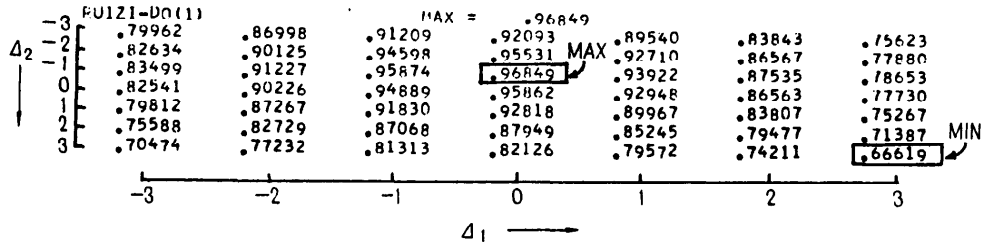


Fig. 5 Computation of the function $S_{ij}(d)$ where f_i and f_j are tomb mounds of code 1 and 3 respectively.

Table 1 List of the tomb mounds for experiment

コード	古墳名	所在	型式
1	允恭陵古墳	大阪	B1
2	継体陵古墳	大阪	B1
3	土師古墳	大阪	D
4	垂仁陵古墳	奈良	A
5	雲部車塚古墳	兵庫	B1
6	白鳥陵古墳	大阪	D
8	箸墓古墳	奈良	A
9	応神陵古墳	大阪	B1
10	桜井茶臼山古墳	奈良	A
12	宣化陵古墳	奈良	B1
13	素神陵古墳	奈良	A
15	郡山新木山古墳	奈良	*
16	仲津姫命陵古墳	大阪	B1
17	履中陵古墳	大阪	C
18	成務陵古墳	奈良	A
20	小那辺古墳	奈良	B1
21	神功陵古墳	奈良	A
22	御鸕山古墳	大阪	C
23	宇和郡辺古墳	奈良	B'
24	五十瓊敷入彦命墓	大阪	*
25	仁徳陵古墳	大阪	B'
28	黒姫山古墳	大阪	C
31	安閑陵古墳	大阪	E
32	日葉酸媛陵古墳	奈良	A
34	反正陵古墳	大阪	E
35	応神陪塚	大阪	B1
36	仁徳陪塚	大阪	B1
38	西都原 265 号墳	宮崎	*
39	欽明陵古墳	奈良	*
42	称徳陵古墳	奈良	*
44	磐之媛陵古墳	奈良	*
45	馬見新木山古墳	奈良	B1
46	女狭穗塚古墳	宮崎	*
48	黄金塚古墳	大阪	A
56	今城塚古墳	大阪	D
58	いたすけ古墳	大阪	*

型式*は現在明らかでないもの。

$$G_{ij} = \text{Max}_{d \in d} s_{ij}(d) - \text{Min}_{d \in d} s_{ij}(d) \quad (5)$$

式(5)のように与えられる G_{ij} は移動域 d 内での $s_{ij}(d)$ の最大偏移幅を意味しており、同じ f_i, f_j について G_{ij} が大きければ大きいほど、式(3)の

* 飯島⁹⁾によって導入された概念。
 ** 詳しいことは機会を改めて議論する。
 *** ある自然数 n について、 $f_i R_n f_j$ とは $f_{n_1}, f_{n_2}, \dots, f_{n_{n-1}} \in F$ が存在して、 $f_i R_n f_{n_1}, f_{n_1} R_n f_{n_2}, \dots, f_{n_{n-1}} R_n f_j$ となることである。

Max 操作が精度よく実行できることが期待できる。

Fig. 5 は、古墳コード 1 と 3 の 2 つの古墳についての $s_{ij}(d)$ の計算結果である。

いま、任意の古墳データ $f(x)$ に対して、

$$f(x) = f(x) - \frac{1}{D} \sum_{x \in D} f(x) \quad (6)$$

$$(D = \sum_{x \in D} 1)$$

で与えられる正準化*をすべての古墳データに施して式(3)と同様の形式で類似度を計算すれば、 G_{ij} が確実に拡大することを示すことができ**、位置移動の効果も $s_{ij}(d)$ に敏感に反映させることができることとなる。

4. 分類

Table 2 のように与えられる類似度表にもとづいて前方後円墳を同値関係によって分類(類別)する手法¹⁾、²⁾を簡単に述べよう。いま、古墳の集合 $F = \{f_1, \dots, f_N\}$ についてつぎの関係 R_λ を定義する。

$$f_i R_\lambda f_j \Leftrightarrow s_{ij} \geq \lambda \quad (7)$$

ただし、 λ は $-1 \leq \lambda \leq 1$ なる範囲の定数である。式(7)に定義された関係 R_λ を『 λ より密な』関係と呼ぶことにする。式(2)より、 R_λ は反射律および対称律を満たすことが容易に確かめられる。

$$\text{反射律: } f_i R_\lambda f_i \quad (i=1, \dots, N) \quad (8)$$

$$\text{対称律: } f_i R_\lambda f_j \Rightarrow f_j R_\lambda f_i \quad (9)$$

さらに、 R_λ の推移的閉包^{6), 7)} \hat{R}_λ をつぎのように導入する。

$$\hat{R}_\lambda = \bigcup_{i=1}^{\infty} R_\lambda^i = R_\lambda \cup R_\lambda R_\lambda \cup \dots \quad (10)$$

式(10)において、 \cup の演算は有限集合 F の場合は有限回 ($N-1$ 回) でよいことはすでに明らかである⁷⁾。さらに、関係 \hat{R}_λ は常に推移律を満たし⁷⁾、同時に式(8)、(9)より反射律、対称律を満たすことが簡単に示される⁶⁾。したがって、 \hat{R}_λ は F 上の同値関係となり、 F を同値類に分類する。具体的にはこれ

らの同値類はλより密な関係にある古墳をつぎつぎ結んで得られる古墳の連鎖²⁾によって表現されることになる。Table 2 の類似度表を見ると全体的に類似度が高いという傾向が見られる(正準化を行えば、もう少し低くなると予想される)。これは、すべて前方後円墳という本来互いに形態の似た物体を対象としていることに一つの原因がある。したがって、これらをさらに分類しようとするれば、式(7)の閾値λを十分高い値(1に近い値)に設定する必要がある。ここで、λ=0.99に設定した関係 $R_{0.99}$ による Table 1 の古墳の集合の分類結果を古墳の連鎖による表現で、Fig. 6 に示す。なお、図中には孤立点(ただ1つの元からなる同値類)は示していない。

Fig. 6 の古墳を結ぶ実線は、その両端の古墳が0.99の類似度をもっていることを意味しているが、この分類結果と上田¹⁾の考古学的見地からの分類結果はよく一致しており、パターンマッチングという客観的な手法の有効性を示しているといえよう。両者の分類結果をもう少し詳しく検討してみよう。

上田は、前方後円墳を7つの型式A, B1, B2, B', C, D および E 型式に分類し、その編年観を、Fig. 7 のように図式化している。つまり、最も古い型式としての A 型式を出発点として、最終型式としての E 型式に至るまでの形態の時間的変遷を図式的に表現しているのである。Table 1 には、このような考古学的な編年観にもとづく型式分類を併記している。Fig. 7 に示すように、前期型式として A 型式、中期として B1, B2, B'、後期として C, D, E の各型式があるが A 型式は、形態的にみると個々にユニークであり、厳格な設計企画の規制が確立されていないのではないと思われる特徴をもっている。これに対して、中期古墳は、全盛期の古墳であると同時に、きわめて厳重な規制の下でその築造が行われたものと考えられている。さらに、Table 1 を含めて中期古墳が現存する前方後円墳のかなりの部分を占めるものと予想される。

後期古墳、特に E 型式は画一的な規制が認められないという点では前期と共通するところがあり、またその具化例も、全国的にみて比較的少ない。これは、前方後円墳の衰退期に位置しているためと思われる。

さて、上記のような考古学的分類結果と、Fig. 6 に示している同値関係 $R_{0.99}$ にもとづく分類結果とを対比させながら、両者の一致点、相違点について簡単な考察を加えよう。

まず、Fig. 6 中の最も大きな連鎖 C_2 は、Table 1

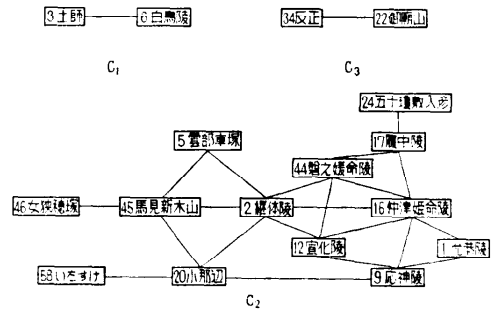


Fig. 6 Three classes given by an equivalence relation $R_{0.99}$ on a set of key-hole shaped tomb mounds shown in Table 1.

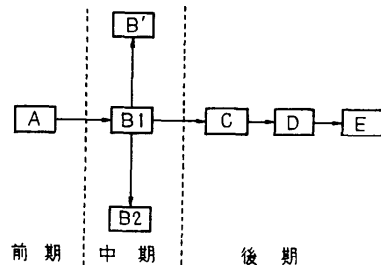


Fig. 7 Archaeological classification based on the 7 types introduced by Dr. Ueda.

に併記されている考古学的型式分類の B1 型式にはほぼ該当することがわかる。ただし、考古学的に B1 型式とされているコード 35 応神陪塚および 36 仁徳陪塚が C_2 に組み込まれず、孤立点となっている点および、C 型式とされる 17 履中陵が入り込んでいる点で相違する。

つぎに、連鎖 C_3 はともに後期古墳である点で問題はないが、考古学的に 34 反正陵が E 型式、22 御廟山が C 型式と分類されている点と 31 安閑陵が脱落して孤立点となっている点(実際には、31 と 34 はかなり形態が異なる。)で相違する。

最後に、連鎖 C_1 は、ともに D 型式の古墳である点で一致しているが、Table 1 の中で 56 今城塚が D 型式であるにもかかわらず脱落している理由として、Fig. 8 (次頁参照)のように、現状はかなり崩壊の激しい古墳であるため、他の古墳に対する類似度が全体的にみて、異常に低くなっている (Table 2 参照) ことに因る。ただし、その最大類似度 0.95 を与える古墳は C_1 の 6 白鳥陵である点で、もし崩壊の程度が軽ければ、連鎖 C_1 に連結することはほぼ確実とみてよいものと思われる。

一方、Fig. 6 に示されていない孤立点で、以上の議



Fig. 8 Topographical map of Imashiozuka Tomb with irregular contour lines

論に現われなかったもののうち、A 型式と E 型式を除いては 23 宇和那辺と 25 仁徳陵がある。この 2 つの古墳は、ともに B' 型式であるが、 $R_{0.99}$ では孤立点となる。

以上、両者の興味ある比較を簡単に行ったが、いくつかの相違点が認められる。とりわけ、この相違点は、前述の孤立点を上田が、経験的見地から強制的にグループ化している点にあるが、筆者はこれに関して孤立点を合理的に解消するアルゴリズムを検討中である。

Fig. 6 に示されている連鎖 C_2 (1 つの同値類) 中の女狭穂塚古墳は九州の宮崎県西都原にあるが、他はすべて近畿地方にある前方後円墳である。0.99 という類似度を同一の設計企画を示すものとすれば、約千五百年前に近畿と九州の間に設計企画という計数的情報の伝播が認められることとなり、はなはだ興味深い問題を提供しているといえよう⁹⁾。

以上の点を含めて、分類の問題には工学的パターン認識技術と関連が深い側面が多くあるが、本稿の主題と直接の関係がないので詳しい検討結果については、別の機会にゆずることとする。

5. むすび

本稿は、日本の古代人が多大の労力を費して築造した前方後円墳という巨大な造形物のパターン認識にパターンマッチング技術を適用することの妥当性を検討

したもので、特に、前方後円墳というパターンの特殊性を配慮して、古墳データの規格化と圧縮および類似度計算等を具体化した。文字認識の場合との大きな相違点は『基準パターン』と呼べるものが、問題の性質上、存在しないことによって生じているといえよう。

筆者は、パターンマッチングによる前方後円墳の分類の他、画像処理技術を援用した古墳の特徴抽出および復元等の問題についても研究を進めつつあるが、我々の祖先である古代人と、古墳などの遺跡・遺物を通して千数百年を隔てて対話し、正確な古代情報を得るためには、情報工学、考古学および古代史学を結合した新しい学際研究が必要であることを強調している²⁾。⁹⁾ これは、工学的な処理技法に考古学および古代史学的な先見知識を織り込むことによって、より信頼度の高い古代情報の抽出が可能となることが期待できるからである。

おわりに、本稿での計算はすべて大阪大学大型計算機センター NEAC 2200-700 を用いて行ったものであることを付記する。

謝辞 筆者の研究に暖い御支援を賜る奈良県立橿原考古学研究所長末永雅雄博士に深謝します。日頃古代学上の貴重な御教示を賜る大阪市立博物館上田宏範博士ならびに大阪電気通信大学吉田 晶教授に深謝します。最後に、実験に熱心にとり組んで頂いた宮崎龍夫君をはじめ大阪電通大小沢研究室の学友諸君に深謝します。

参考文献

- 1) 小沢：前方後円墳のパターン認識(1)，信学会「パターン認識と学習」研究会資料 PRL 75-35 (昭 50-09)
- 2) 小沢：コンピュータによる前方後円墳のパターン認識，bit, 8, 1, 共立出版。(昭 51-01)
- 3) 末永：古墳の航空大観，学生社。(昭 50-01)
- 4) 上田：前方後円墳，学生社。(昭 44-10)
- 5) 飯島：パターン認識，コロナ社。(昭 48-10)
- 6) 田村，樋口，田中：Fuzzy 関係を用いたパターンの分類，信学論 C53-C, 12 (昭 45-12)
- 7) M. A. Harrison: Introduction to switching and automata theory, p. 9, McGraw-Hill, New York (1965)
- 8) 小沢：コンピュータによる前方後円墳の設計企画の研究，奈良県立橿原考古学研究所研究会(昭 50-10)
- 9) 小沢：考古学と類型認識，古代学研究, 77 号 (昭 50-09)

(昭和 51 年 2 月 24 日受付)

(昭和 51 年 4 月 1 日再受付)