

## 埋蔵文化財のコンピュータ映像化†

## —音響パルスエコー法の試み—

小沢 一雅\*\* 松田 稔\*\*

考古学における発掘調査の合理化をはかるため、音響計測にもとづいて埋蔵文化財を映像化するパイロットシステムの構成と映像化実験について述べる。パイロットシステムの構成では、まずパルスエコー法による音響計測に適する送受波系の設計指針を述べ、試作した OM 式送波器を含む送受波系について、みかけの分解能を定義する。さらに、受波された反射波形から地表面に平行な断面上の反射強度分布（平断面）を求める映像化処理について述べる。

最後に、実際の埋蔵文化財（古墳の石室）を対象とした映像化実験を通じて、パイロットシステムの事実上の分解能を把握するとともに、埋蔵文化財のコンピュータ映像化が実際にいくつかの困難があるにもかかわらず原理的に可能であることを実証している。この結果、今後実用に耐え得るシステムを構築する際、解決しなければならない問題点が整理され、はっきりした見通しが得られることとなった。

## 1. ま え が き

埼玉県の稲荷山古墳から出土した鉄剣の銘文が日本の古代史を全面的に書き換えさせる可能性をもつことで大きな注目を集め、古市古墳群中の仲津媛陵の陪塚から出土した巨大な修羅が我々に古代への郷愁を再びよみがえらせたことは記憶に新しい。日本の国のみならず、民族の形成に対する関心が高まるにつれ、埋蔵文化財の重要性が広く認識されるに至った。周知のように、埋蔵文化財は考古学に従事する人々によって慎重に調査され、その成果は古代史学をはじめその他の分野にも大きな影響を与えている。このような調査において避けることのできない過程はいうまでもなく膨大な労働力と日数を要する発掘である。

発掘調査の迅速化・合理化をめざした工学的技術の援用の試みも活発である。リモートセンシング<sup>1)</sup>、磁気探査<sup>2)</sup>、電気探査<sup>3),4)</sup>などの非破壊探査 (nondestructive detection) 技術の研究がその代表的なものである。国内の状況を見ても、すでに消失した幻の前方後円墳を電気探査によって発見した例\*も有名であり、このほか、リモートセンシング、磁気探査などの応用研究も着々と進められているようである。

本稿では、このような動向を背景として、パルスエ

コー法による音響計測にもとづいて埋蔵文化財を映像化するパイロットシステムの構成<sup>5)</sup>ならびにその実験結果について述べる。音響計測にもとづく不可視情報の映像化技術は、医用領域などで最近めざましい進歩をみせているが<sup>6)</sup>、埋蔵文化財は土という音響学的にはきわめて取扱いの難しい“媒質”中にあるため、現在のところ多くの未解決の問題が残されたままである。本稿の特長は、不可視情報の映像化技術を考古学領域へ適用しようとするところにあるが、上記の理由によって、まず音響計測にもとづく埋蔵文化財の映像化が実用上可能かどうかの見通しを得ることに力点が置かれており、パイロットシステムも当面の実用をある程度度外視して構成されている。

## 2. パイロットシステム

## 2.1 埋蔵文化財の非破壊探査

前章で述べたリモートセンシング、磁気探査、電気探査など、在来の探査手法は機能上、それぞれ短所があり、現在のところ必ずしも十分とはいえない面があることも事実である。困難を少しずつ克服し、探査能力を向上させる努力が続けられる一方で、在来の方法を補完する新しい探査方法を開拓する必要性が感じられている。既存の方法と本質的に異なると考えられるものの1つは、音響計測にもとづく方法—音響探査—であろう。在来の方法と比較した場合、音響探査の利点として；

(1) 地表面近傍ではなく、かなりの深さ（数 m）まで探査可能

(2) 雨など天候に左右されることのない探査が可

† Computer Assisted Imaging of Underground Cultural Properties Based on Acoustic Pulse-echo Techniques by KAZUMASA OZAWA and MINORU MATSUDA (Information Science Center, Osaka Electro-Communication University).

\*\* 大阪電気通信大学情報科学センター

\* 奈良国立文化財研究所が昭和 36 年平城宮跡発掘調査の際、平城宮造宮で破壊されたとみられる全長 100m 余の前方後円墳の痕跡が電気探査によって検出された。

能

(3) 鉄道などによる環境的電磁気雑音の影響が少ない

(4) 水中に埋没した遺物・遺構も探査が可能などをあげることができよう。

もちろん、音響探査を実現するにあたっては、音波伝播の媒質である土の音響特性の複雑さが原因となつて、実際上、種々の困難が生じると予想される。

## 2.2 音響計測

埋蔵文化財のコンピュータ映像化が首尾よく達成されるためには、基礎となる音響計測がしっかりしていなければならない。実際、地表面での音響計測の成否が全体の成否を決めてしまうからである。

従来、医用、地下資源探査<sup>7)</sup> および海洋<sup>8)</sup> などで行われてきた音響計測の具体例と比較して、埋蔵文化財に対する音響計測が著しく異なる点は、送受波系と土との整合が難しいことである\*。医用や海洋探査のように媒質が液体(水)である場合と対照的である。一方、地下資源探査では音源として火薬爆発などを用い、深さが数百m~数十kmの地下の探査が行われている。埋蔵文化財の探査では、遺跡に火薬を埋めることも不可能である上、取扱いも危険なのでこの方法は適用できない。

そこで、上記のような具体例を参考にしながら、試作したパイロットシステムの送受波系についてその概要を述べる。

### 2.2.1 送波器

我が国における発掘調査で出現する埋蔵文化財の大部分は地表面下3m以内の深さにある<sup>9)</sup>。埋蔵文化財の大きさ(サイズ)は数mm~数十mの範囲でありその材質は、(i)土そのもの、(ii)木材、(iii)石材(陶磁器を含む)あるいは(iv)金属などである。音響探査によって、あらゆる材質の埋蔵文化財をすべてのサイズで検出することは、現在のところまず不可能と考えねばならない。媒質となる土は、実際上、砂、小石、粘土、水あるいは空気などの不均一な混合体であり、海水などの理想的な音響媒質とは程遠い性格もっているからである。

送波器の特性は、計測能力を決定づける主な要素であるが、パイロットシステムでは、とりあえず対象とする埋蔵文化財の材質やサイズなどを実用を度外視して限定し、考えねばならないファクタを減らすことを

\* 遺跡保護の点から、地面に送受波器を置く(埋めないで)形式になるが、この際、土との間にできる空気層に起因する反射の影響などが予想される。

主眼としてつぎのような条件の下で送波器の設計・試作を行った。

(1) 土中では音波の減衰が著しいので適度のパワーがあり、かつ遺跡を破損しないこと。

(2) 探査の実際を考慮して、電気的手段によらず、かつ可搬性にも富むこと。

(3) 当面、対象とする埋蔵文化財の材質を石や金属など音響インピーダンスの高いものに限定するとともに、小石などの影響を避けるためにサイズも十分大きいもの(mオーダー)に限ること。

以上の諸条件を満たす送波器として図1に示す機械式ハンマリング送波器(OM式送波器)を試作し、実験に使用した。この送波器は、落下体による打撃によって鋭いインパルス音を地中に送波する形式である。

### 2.2.2 受波系

送波器から直下に入射した音波が埋蔵文化財の表面(音響インピーダンスの不連続面)で反射して地表に戻ってくるまでの時間を測定して深さを知る方法は、パルスエコー法とよばれ、断層映像化法として広く用いられている。本稿でも埋蔵文化財のコンピュータ映像化のための音響計測の手法として、まずパルスエコー法を試みることにした。具体的には、図2に示すように送波点のまわりの4点で反射波を独立に受波する方式をとっている。

### 2.3 システム構成

音響計測から映像出力に至るまで全過程を調査現場で実時間で処理できれば理想的であるが、運搬能力・電力などの制約があり、パイロットシステムは調査現場に搬入する計測システムと、以後の処理を行う映像化システムに分かれている。(図3参照)

計測システムは、送波器、受波器、デジタル波形メモリ、紙テープパンチャからなり、送波器からのト

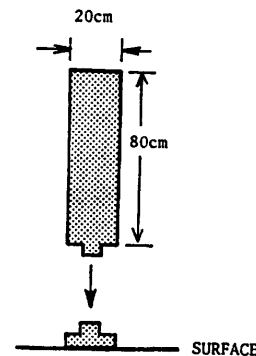
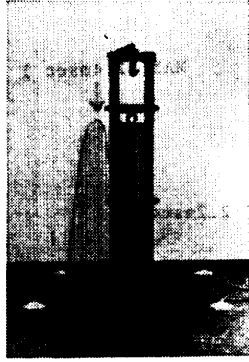
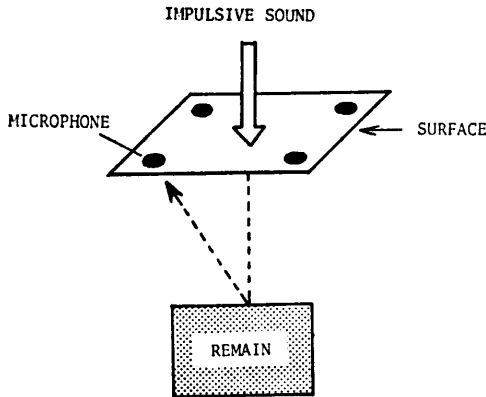


図1 送波器の基本構造

Fig. 1 A sketch of the proposed sound generator.



(a) A photograph of the sound generator and microphones.

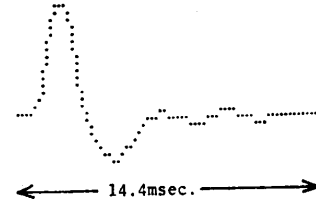


(b) Arrangement of microphones for receiving the reflected sounds.

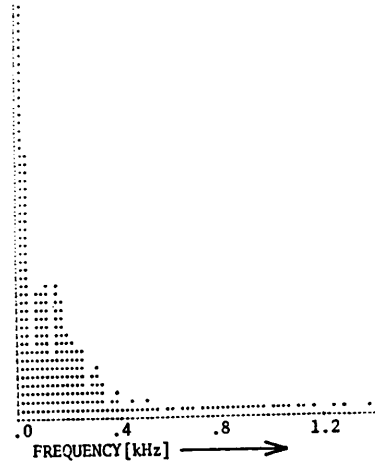
図 2 埋蔵文化財の音響計測法

Fig. 2 Acoustic measurement of underground cultural properties (remains).

リガ信号によって起動する形式をとっている。映像化システムは、現場から持ち込まれた紙テープのデータ



(a) A reflected waveform



(b) Frequency power spectrum

図 4 反射波形とその周波数スペクトル (エネルギー)  
Fig. 4 An actually received reflected waveform and its frequency power spectrum.

を処理しうる計算機システムそのものである\*。

#### 2.4 送受波系の分解能

実験的に受波された反射波形の具体例(昭和53年11月、高槻市昼神車塚古墳上で採取) およびその周波数スペクトル (エネルギー) を図4に示す。この例では、カットオフ周波数は 0.5 kHz 付近と認められる

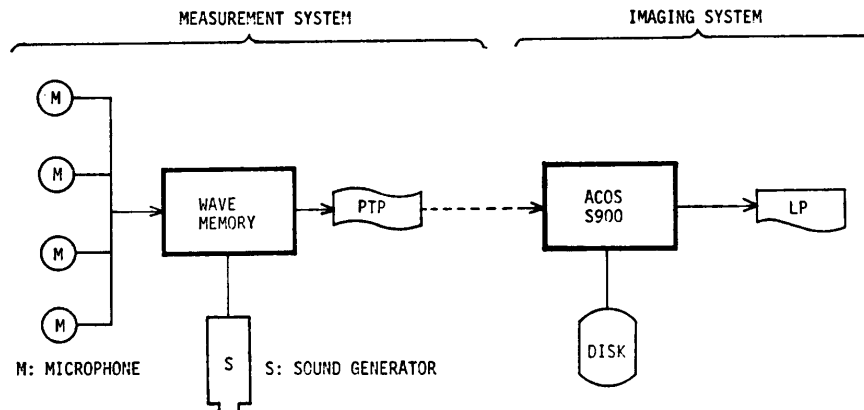


図 3 パイロットシステムの概要

Fig. 3 A full view of the pilot system implemented for acoustic imaging of underground remains.

\* 本学情報科学センターの阪大 RJE 端局装置

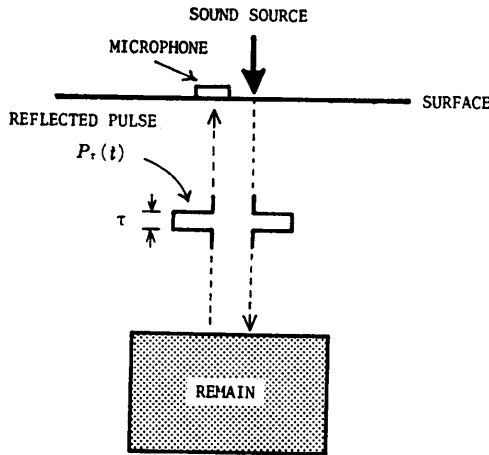


図 5 理想的矩形パルスの受波  
Fig. 5 An ideal situation of receiving a reflected rectangular pulse.

が、この値は計測場所を変えて得られる波形によって異なり、ほぼ 0.4~0.8 kHz の範囲に分布する。これらの波形群の周波数スペクトルを用いてパイロットシステムの送受波系の分解能を推定する一手法を以下に述べる。

図 5 に示されるように、幅  $\tau$  の矩形インパルスが地下に打ち込まれ、受波される理想な場合を想定する。土中の音速を  $v$  とすると、深さ方向の分解能  $\xi$  は、  
$$\xi = v\tau \tag{1}$$

と書けよう。式 (1) は、弁別できる 2 つの反射点の最小距離を意味している。(地表面からの深さを推定する場合の精度を距離精度とよび、分解能と区別することにする。)

図 4 に示されるように、実際に受波される反射波形は、理想的な矩形インパルスとはかなり異なることや厳密な波形の恒常性もないことを前提として、波形群の周波数スペクトルから、式 (1) の  $\tau$  を推定するための一手法が考えられる。すなわち、まず 1 つの反射波形の周波数スペクトルと、幅  $\tau$  をパラメータとする矩形パルスの周波数スペクトルとの相関係数を最大にする  $\tau$  を見つけることにする。矩形パルスを  $p_\tau(t)$  とすると、その周波数スペクトル(エネルギー)  $p_{\tau^*}(\omega)$  は、周知のように

$$p_{\tau^*}(\omega) = \tau^2 \left( \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} \right)^2 \tag{2}$$

\*  $(f^*, g^*) \equiv \int_0^\infty f^*(\omega)g^*(\omega)d\omega, \|f^*\|^2 \equiv (f^*, f^*)$   
 $f^*$  は  $f$  の周波数スペクトル (エネルギー)

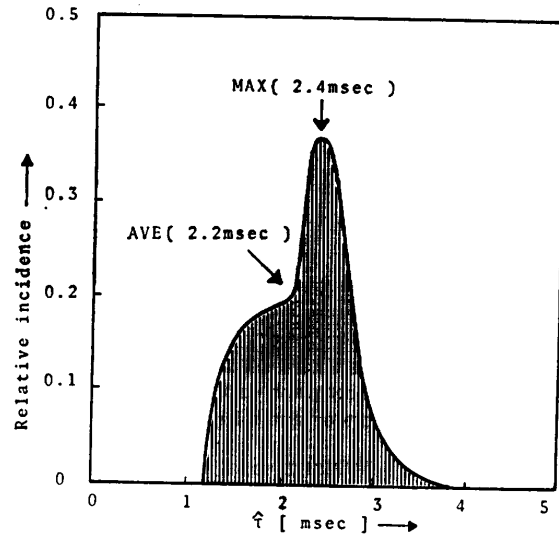


図 6 推定パルス幅 ( $\tau$ ) のヒストグラム  
Fig. 6 Distribution of the assumed pulse widths for actually received reflected waveforms.

で与えられる。反射波形  $s(t)$  の周波数スペクトル(エネルギー)を  $s^*(\omega)$  とすると、

$$\phi_\tau = \frac{(p_{\tau^*}, s^*)}{\|p_{\tau^*}\| \cdot \|s^*\|} \tag{3}^*$$

によって、パルス幅  $\tau$  をパラメータとする相関係数  $\phi_\tau$  が定義できる。 $\phi_\tau$  を最大にする  $\tau$  を  $\hat{\tau}$  と書くことにすると、 $\hat{\tau}$  は反射波形によって多少異なった値をとるので、一定個数の波形を用いて  $\hat{\tau}$  の度数分布を求めてみることにする。

図 6 に昼神車塚古墳の後円部頂上付近で採取した 30 波形についての  $\hat{\tau}$  のヒストグラムを示している。図中に示されているように、最頻値 (MAX) および平均値 (AVE) それぞれ 2.4 msec および 2.2 msec である。ここで、平均値を用いることにすれば、等価な矩形パルス幅は 2.2 msec ということになる。地中音速を  $v=200$  (m/sec) とし、 $\tau=2.2$  msec を式 (1) に代入すると、分解能のめやすの値(みかけの分解能)  $\hat{\xi}$  は下記の如くなる。

$$\hat{\xi} = 44 \text{ (cm)} \tag{4}$$

埋蔵文化財の映像化で問題になるもう 1 つの要素である距離精度は、3 章で映像化実験の結果にもついで若干の検討を行うが、パイロットシステム全体の精度、とりわけ送受波系の記録精度に関連する問題を含んでいると考えられる。

### 2.5 映像化処理

音響計測は、地表面上の特定区域で行うわけであるが、この区域を計測域とよぶことにする。計測域上の

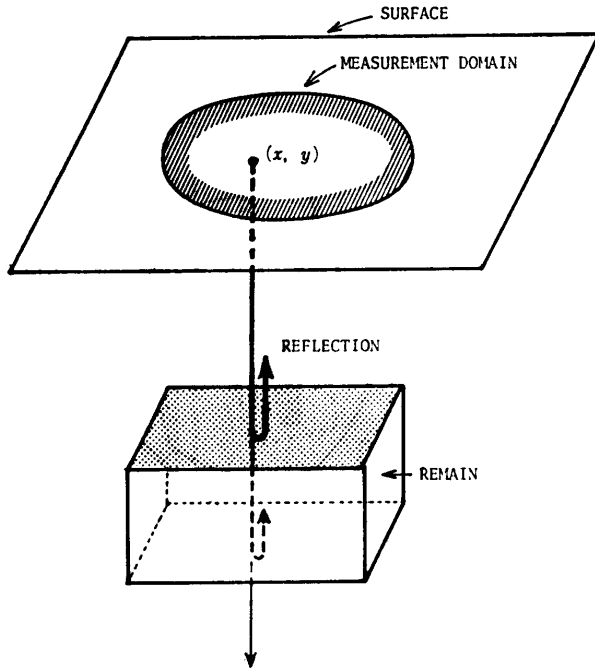


図 7 計測域上の1点  $(x, y)$  から打ち込まれた音波の進行状態  
 Fig. 7 A conceptual sketch of the travelling sound generated at point  $(x, y)$  on the measurement domain.

1点に送波器が置かれると(送波点の設定), 図2のように受波器が配置され, 音響計測が行われる. この結果, 1つの送波点において4つの反射波形群

$$\{f_k(t)\} \quad (k=1, 2, 3, 4)$$

が得られる. 個々の波形に含まれる雑音や歪みの影響を低減させるため, 通常の音響計測では多数回の計測によって得られる反射波形の和をとるなどの手法が用いられている<sup>6)</sup>. ここでは, 送波点の座標を  $(x, y)$  とするとき, つぎのように, 上記の4つの反射波形の相

乗平均を基礎として点  $(x, y)$  における映像波形  $g(x, y, t)$  を定義する ( $t$  は時間).

まず,

$$f(t) \equiv \sqrt[4]{|f_1(t)f_2(t)f_3(t)f_4(t)|} \quad (5)$$

なる合成波形を定義する. さらに, つぎのように, 時間に関するスムージング処理を施して映像波形を得る.

$$g(x, y, t) = \int_{t-\delta}^t f(\tau) d\tau \quad (6)$$

ただし,  $\delta$  はスムージング間隔(時間窓の幅)である. 映像波形  $g(x, y, t)$  は, 計測域上の1点  $(x, y)$  から直下に見たときの地中の音響インピーダンスの変化に関する情報を担っているので, 1次元映像と考えることができる.

すなわち, 地中音速を一定値  $v$  と仮定すれば, おおざっぱに見積って, 時刻  $t$  における映像波形の値は

$$z = \frac{vt}{2} \quad (7)$$

なる深さ  $z$  における反射の強さを示すものと考えられるからである. ただし,  $t$  および  $z$  の原点は, それぞれ, 音波の発射時刻および地表におくものとする.

ここで, 式(7)の関係を念頭においてつぎのように映像波形における時間軸  $t$  を深さ  $z$  に置き換えて, 線映像  $g(x, y, z)$  を定義できる.

$$g(x, y, z) = g(x, y, t) \quad (8)$$

さて, 計測域  $D$  上のすべての点  $\{(x, y)\}$  で得られる線映像の集合を像体とよび,

$$G \equiv \{g(x, y, z)\}$$

と書くことにする. 像体  $G$  をある平面,

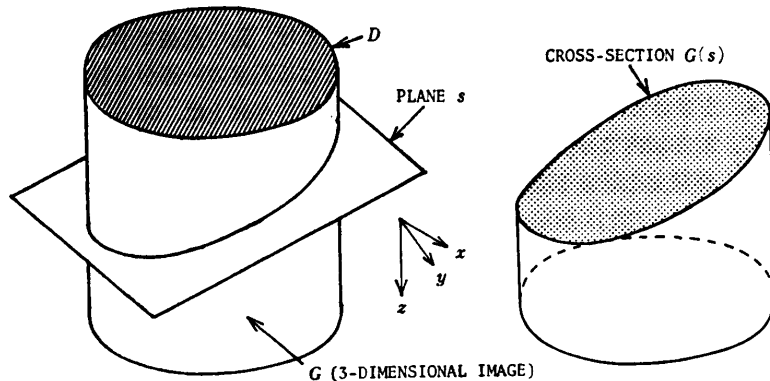


図 8 像体  $G$ , 平面  $s$ , 断面  $G(s)$

Fig. 8 Three-dimensional image and a cross-section given by a plane.

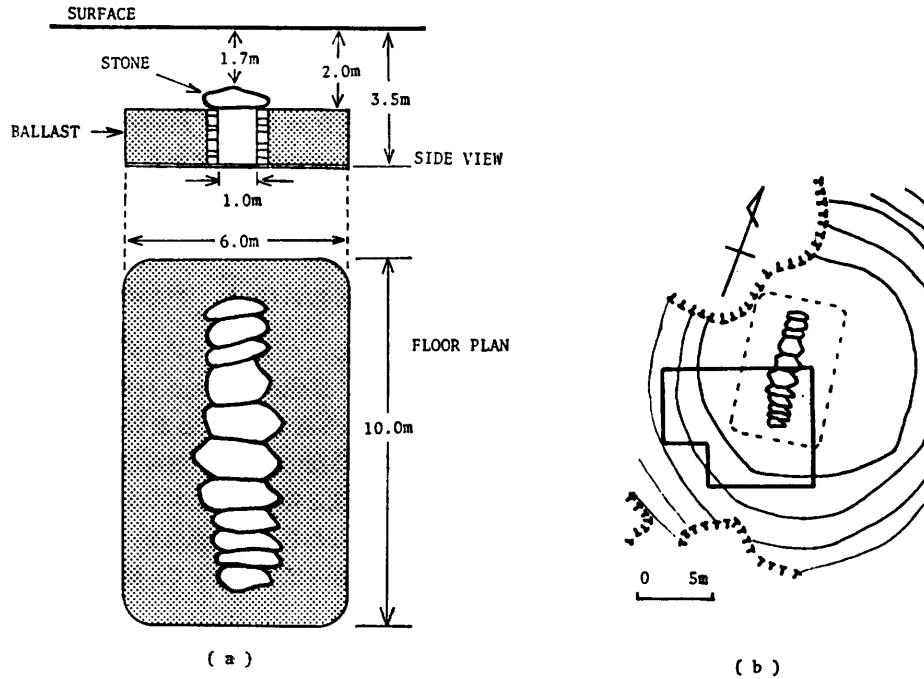


図9 映像化実験における埋蔵文化財(石室)の構造および計測域の設定

Fig. 9 Structure and location of the remain (burial stone chamber) being tested for acoustic imaging.

$$s = \{(x, y, z) | ax + by + cz = d\}$$

で切り, その断面  $G(s)$  を求める操作 (section) をつぎのように表わすことにする.

$$G(s) = P(s) \cdot G \quad (9)$$

通常,  $z$  軸に平行な平面

$$s = \{(x, y, z) | ax + by = d\}$$

で切った断面は断層像とよばれ, 医用, 資源探査などでしばしば用いられている. 本稿では, 逆に,  $z$  軸に垂直な平面で切った断面を等間隔に何枚か用意することで埋蔵文化財の映像化を行うことにする. すなわち, 離散的な深さ  $z_1, z_2, \dots, z_n$  を  $z_i = i \cdot h$  ( $h$  は間隔) のように等間隔にとり, それぞれに対応する平面

$$s_i = \{(x, y, z) | z = z_i\} \quad (i=1, \dots, n) \quad (10)$$

を定める. 各平面に対して, 式 (9) で定義される断面 (平断面とよぶ)  $G(s_i)$  を求める.

$n$  枚の平断面によって, 計測域内での位置および深さに関する情報とともに, 埋蔵文化財の3次元的形状を把握しようとするものである. (図11参照)

### 3. 映像化実験

#### 3.1 計測域の設定

パイロットシステムによる映像化実験を行うにあたり, あくまで基礎的な実験であることを考慮すると, すでに発掘調査済で埋蔵文化財の位置や形状などの地

下情報が明らかになっている遺跡の上に計測域を設定できれば理想的である. そこで, この条件に適合する寺戸大塚古墳(京都府向日市にある前方後円墳)の後円部上に映像化実験のための計測域を設定した\*.

寺戸大塚古墳は, 昭和42年京大考古学教室が発掘調査を行い, 調査終了後に原状回復されている. したがって, ほぼ平坦な後円部頂上付近の地中には, 図9(a)に示されているような構造をもつ石室の存在が確かめられる<sup>9)</sup>.

後円部頂上でほぼ平坦と認められ, かつ樹木など音響計測に支障をきたす障害物のない領域を選んで図9(b)の太線で囲まれる計測域を設定した. 計測域内の地中には, 図中点線で示されているように映像化の対象となる石室の一部が入り込んでいる.

この計測域上に, 50 cm 間隔で正方形格子状に座標点を取り, さらに座標点の中から1m 間隔で計測点を選んだ. 図10にその詳細が示されている. 図中, 黒点が計測点である. 各計測点では式(5)~(8)にしたがって線映像が得られる. 本稿で述べる映像化実験では, 計測点以外の点(図中の白点)の線映像をまわりの計測点における線映像の平均で内挿して\*\*, 50 cm

\* 奈良国立文化財研究所田中塚氏および向日市教育委員会のご好意による.

\*\* 最も近い計測点の線映像を平均する.(近傍の計測点が1個の場合はそのまま用いる.)

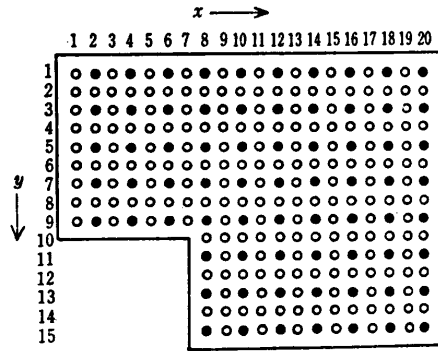


図 10 映像化実験における計測域上の座標点  
Fig. 10 A grid array of points on the domain and the coordinates (x, y).

表 1 実験で用いた各パラメータの値  
Table 1 The constant values used for the experimental works.

反射波形の標準間隔	200 $\mu$ sec
反射波形の量子化レベル数	256
スムージング間隔	800 $\mu$ sec
地中音速	200 m/sec
反射波形の記録時間 (最大探査深さ)	30.4 msec (3.04 m)

間隔で並んでいるすべての座標点に対してそれぞれ線映像を定義することにした。

### 3.2 平断面表示

平断面は、z 軸に垂直な平面で像体を切った断面であるが、映像化実験では地中音速を 200 (m/sec) と仮定したとき、8 cm 間隔\*で平断面を計算することとした。

この結果、表 1 に示されている最大探査深さを考えると、式 (10) より  $h=8\text{ cm}$  として、

$$\{G(s_i)\} \quad (i=1, \dots, 38)$$

なる 38 枚の平断面の集合が得られる。図 12 には、これらのうち、興味ある 6 枚を深さに対応させながら表示している。

平断面の表示は、線映像のレベル値を 3 段階に区分し、それぞれを 3 種類の濃淡レベルとしてプリンタ出力させている。図中、深さ 1.34m より浅い平断面からは、映像出力がないかあるいは弱い雑音のみであることが示されている。((a), (b)) (f) に示されている深さ 1.98m より深い平断面も同様に、無意味な雑音出力のみである。

一方、(c), (d) および (e) の各平断面に

\* みかけの分解能より距離精度が高いことを期待して、式 (4) のほぼ 1/5 に設定している。

よって、埋蔵されている石室の外影が映像化されることが確認できる。8 cm の間隔で隣り合う 2 つの平断面 (d) と (e) は石室の上部付近を示すものと考えられるが、その差異が特に石室の詳細な構造を反映しているものとは考え難い。パイロットシステムの距離精度は、8 cm までゆかないのであろう。

天井石付近を示している (c) と (d) の差異はかなり明瞭であり、これら 2 つの平断面の間隔は 16 cm だから、式 (4) で与えられているみかけの分解能より、距離精度はもう少し良さそうである。

## 4. むすび

パイロットシステムは、本文中で触れたように、実用上十分な機能を備えているわけではなく、あくまで基礎的な研究を目的として構成されたものである。したがって、映像化の対象となる埋蔵文化財の材質やサイズなどについてもかなり強い制約をつけている。

一般論として、本研究の今後の目標はこのような制約を少しずつとり払って実用的システムへ近づけることにあるといえる。このためには、考古学、音響工学、情報工学など関連領域の研究者の密接な協力が不可欠となる。パルスエコー法は、最もポピュラな音響計測法であるが、これ以外で本研究に適用できる可能性をもつ音響計測法として、ホログラフィ技術を利用す

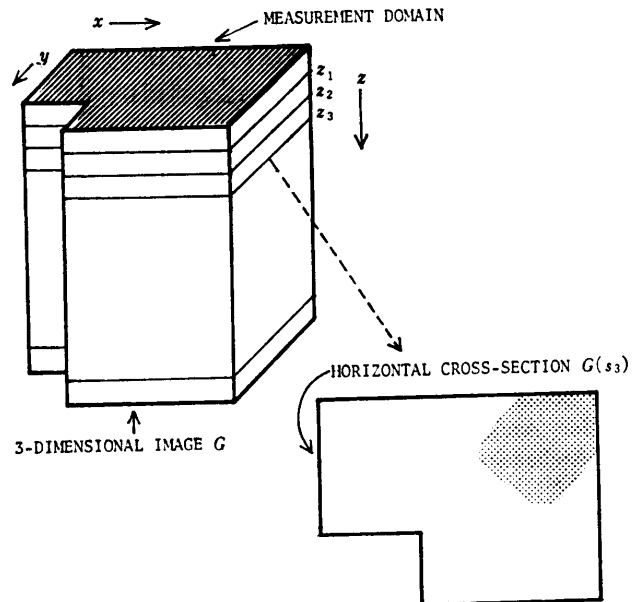


図 11 映像化実験における像体と平断面の例  
Fig. 11 The three-dimensional image obtained by the experimental work and a sketch of a horizontal cross-section.

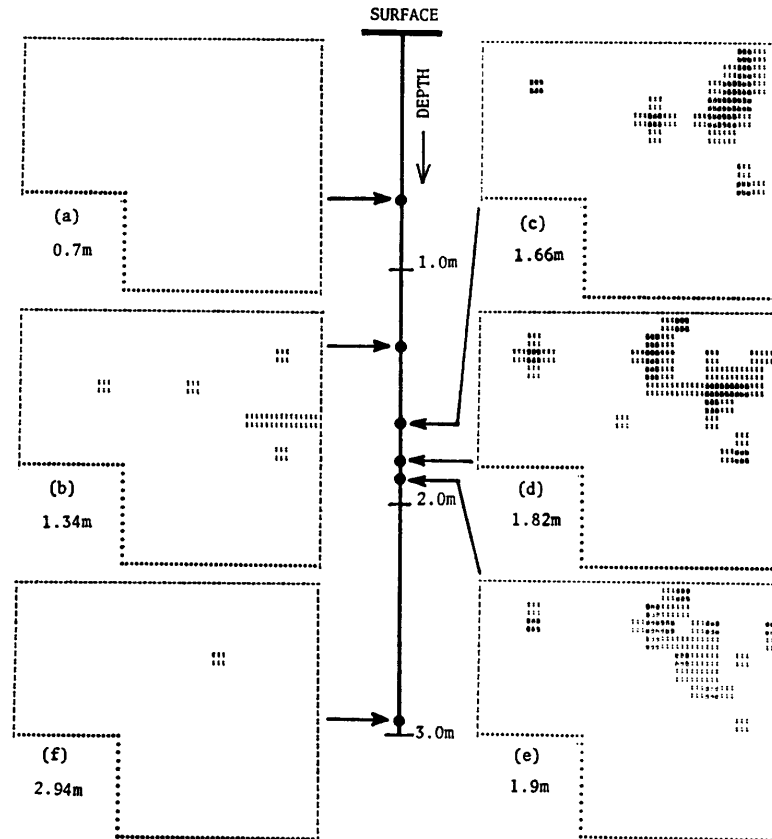


図 12 計算された 6 枚の断面面

Fig. 12 The six examples of computed cross-sections and their depths from the surface.

る方法が考えられる。現在、筆者の 1 人はホログラフィ技術を有効に利用した映像化システムを研究中であり、その結果については機会を改めて発表する所存である。

**謝辞** 本研究の推進にあたり、有益なご教示、ご配慮を賜った奈良国立文化財研究所田中琢氏に深謝致します。

### 参 考 文 献

- 1) Scollar, I.: Computer Image Processing for Archaeological Air Photographs, World Archaeology, Vol. 10, No. 1, pp. 71-87 (June 1978).
- 2) Clark, A.J. and Haddon-Reece, D.: An Automatic Recording System Using a Plessey Fluxgate Gradiometer, Prospezioni Archeologiche, Vol. 7, No. 8, pp. 107-113 (1972-1973).
- 3) Aspinall, A. and Lynam, J.T.: An Induced Polarization Instrument for the Detection of Near Surface Features, Prospezioni Archeologiche Vol. 5 (1967-1975).
- 4) Aitken, M.J.: Physics and Archaeology, Interscience Publishers Inc., New York (1961).
- 5) 小沢, 松田: 地中に埋れた遺物・遺構の音波探査, 画像工学コンファレンス論文集, 5-2 (昭 52, 11月).
- 6) Havlice, J.F. and Taenzer, J.C.: Medical Ultrasonic Imaging, Proc. of IEEE, Vol. 67 No. 4, pp. 620-641 (Apr. 1979).
- 7) Fitzpatric, G.L.: Seismic Imaging by Holography, Proc. of IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 536-553 (Apr. 1979).
- 8) Sutton, J.L.: Underwater Acoustic Imaging Proc. of IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 554-566 (Apr. 1979).
- 9) 京大文学部考古学教室 (代表者有光): 京都向日丘陵の前期古墳群の調査, 史林, Vol. 54, No. 6 (昭 41, 11月).
- 10) 松田, 小沢: 音波による地中遺跡探査について, 第 18 回情報処理学会全国大会論文集 (昭 52, 11月).

(昭和 55 年 7 月 9 日受付)

(昭和 55 年 10 月 23 日採録)