

# 超音波による地下水下砂中の物体識別の基礎検討

The foundational examination for imaging object  
in sand saturated with underground water by ultrasonic wave

○伊佐地 昭裕 及川 勝利 井上 浩  
○Akihiro Isaji, Katsutoshi Oikawa, Hiroshi Inoue

秋田大学 鉱山学部 電気電子工学科  
Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Mining College, AKITA University

キーワード：超音波 (ultrasonic wave), 水を含んだ砂の減衰 (attenuation of sand saturated with water), パルスエコー法 (pulse echo technique), 映像化 (imaging)

連絡先：〒010 秋田市手形学園町1-1 秋田大学 鉱山学部 電気電子工学科 井上研究室  
井上 浩 Tel.: (0188)89-2491, Fax.: (0188)35-4651, E-Mail: inoueh@ipc.akita-u.ac.jp

## 1. はじめに

地中の様子を探る方法に、ボーリング調査がある。この方法で、例えば、地滑りが起こりやすい場所を調査した場合、地中の砂礫を取り出すことはできるが、その物体がどの位置に、どのように置かれていたかの情報が乏しい。そこで、図1-1のようにボーリング孔パイプ内から超音波を用いてパイプのごく近傍の測定を行い、地中(パイプの周囲)にある物体のより詳しい情報(位置、形状、種類など)を得ることを検討してきた<sup>1)</sup>。超音波は空気中より水中の方が伝搬しやすいので、地下水下での測定を条件とし、パルスエコー法で測定を行うことにした。また、パイプの外の媒質は、水を含んだ砂であると仮定する。

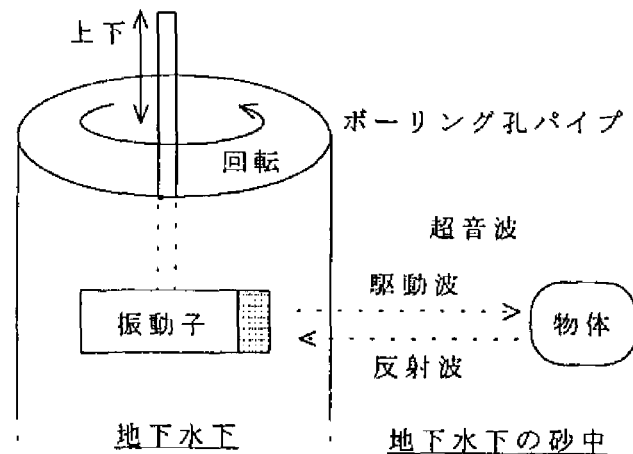


図1-1 モデル実験図

パルスエコー法で測定を行うとき、物体(反射体)との伝搬時間と反射波の大きさが問題となる。媒質中の音速が分かれば物体までの距離を伝搬時間から知ることができる。水を含んだ砂の音速は約  $1700\text{m/s}$ <sup>2)</sup>と測定

されていて水中と比較すると約 200m/s ほど速い。また、物体の反射率の違いによる反射波の大きさから、およその物体を識別できる。ここで媒質中の超音波の減衰が大きいと、反射波が小さくなり映像化を行う場合には影響がでることが考えられる。

そこで最初に水を含んだ砂の超音波の減衰率の測定を行い、またパイプ内からその水を含んだ砂の中にある物体の表面形状の測定を行った。

## 2. 水を含んだ砂の超音波の減衰

### 2.1 測定原理

砂中と水中の超音波の反射波の振幅の比によって減衰率を得ることを考える。一般に音波が媒質中を  $x$  方向に伝搬するとき、 $\alpha$  を減衰定数とするとその音圧の減衰は平面波に対して次のように表される<sup>3)</sup>。

$$p_x = p_0 e^{-2\alpha x} \quad (2-1)$$

ここで  $p_0$  は  $x=0$  における音圧で、 $p_x$  は距離  $x$  における音圧である。

図 2-1 に示すように水中と水を含んだ砂について音波伝搬を考える。水中について、入射波の音圧を  $p_i$ 、反射波の音圧を  $p_o$ 、反射体の反射率を  $R_w$  とすると、

$$p_o = p_i \cdot R_w \quad (2-2)$$

となる。次に水を含んだ砂中について、入射波の音圧を  $p_i$ 、反射波の音圧を  $p_{oo}$ 、砂の層の厚さを  $x$ 、水を含んだ砂中での反射体の反射率を  $R_s$ 、水中から砂中への透過率を  $T_{ws}$ 、砂中から水中への透過率を  $T_{sw}$  とし、水と砂の層を考慮すると、

$$p_{oo} = p_i \cdot T_{ws} \cdot R_s \cdot T_{sw} \cdot e^{-2\alpha x} \quad (2-3)$$

となる。

ここで、水中と水を含んだ砂で反射波の音圧の比をとると、

$$\frac{p_{oo}}{p_o} = \frac{R_s}{R_w} \cdot T_{ws} \cdot T_{sw} \cdot e^{-2\alpha x} \quad (2-4)$$

となり、自然対数をとると、

$$\ln\left(\frac{p_{oo}}{p_o}\right) = -2\alpha x + \ln\left(\frac{R_s}{R_w} \cdot T_{ws} \cdot T_{sw}\right) \quad (2-5)$$

となる。(2-5) 式の第 2 項は、同一条件下においては定数となるので、砂の層の厚さ  $x$  を変化させ、反射音圧  $p_o$  と  $p_{oo}$  を測定すれば、傾きから減衰率  $2\alpha$  Np/m を求めることができる。

dB/m で減衰率を表すと

$$20\log\left(\frac{p_{oo}}{p_o}\right) = -40\alpha x \cdot \log e + \log\left(\frac{R_s}{R_w} \cdot T_{ws} \cdot T_{sw}\right) \quad (2-6)$$

となり、減衰率は傾き  $40\alpha \log e$  dB/m となる。

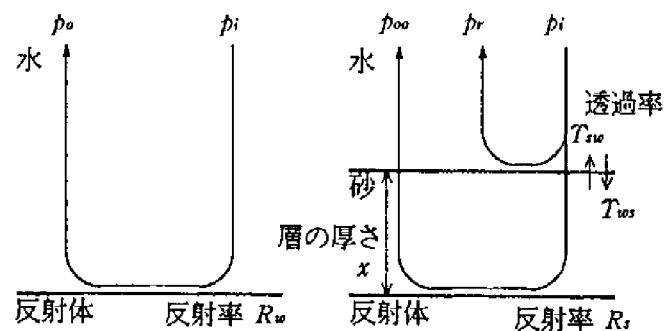


図 2-1 減衰率の測定原理

### 2.2 試料の砂について

秋田県内で採取した砂を表 2-1 のようにふるい分けて使用した<sup>2)</sup>。以下、砂を表 2-1 に従って、砂 #1、砂 #2、砂 #3 と呼ぶ。

表 2-1 砂の諸データ

砂番号	篩寸法 [mm]	平均粒径 [mm]	隙間率 [%]	密度	
				乾燥砂 [ $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ]	水を含んだ砂 [ $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ]
#1	0.105-0.250	0.235	51	3.0	2.0
#2	0.250-0.420	0.301	49	2.7	1.9
#3	0.420-1.19	0.728	40	2.6	2.0

### 2.3 測定方法

図 2-2 に測定図を示す。表 2-1 の砂を脱気した水に浸し十分かき混ぜて 1 日以上経過した状態で測定を行った。振動子を発振器で駆動し、反射体であるアルミ板から反射した反射波の振幅を、それぞれ水を含んだ砂の場合と、水の場合でオシロスコープで観測した。(2-6) 式により dB 換算し、砂の層の厚さに対する砂中における超音波の減衰 (dB) とする。駆動周波数は 570kHz, 700kHz, 1MHz の 3 種類、砂は表 2-1 の 3 種類で測定を行った。

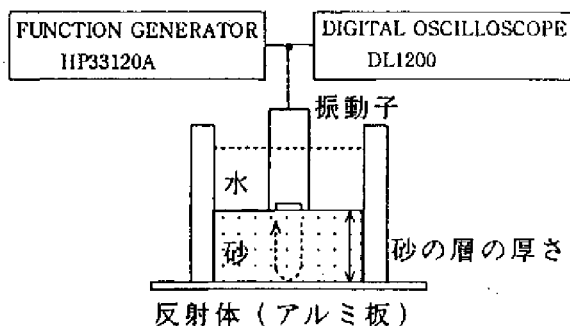
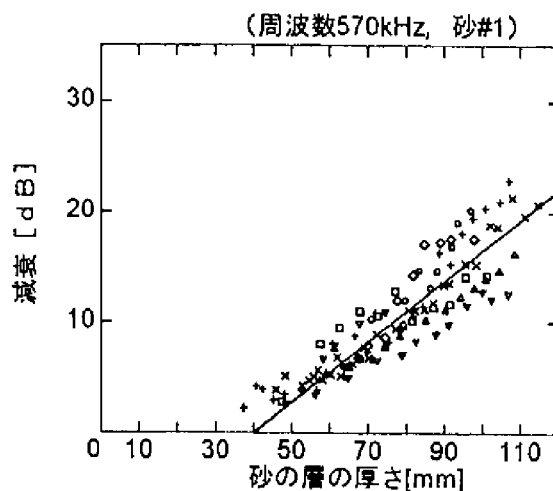


図 2-2 測定図

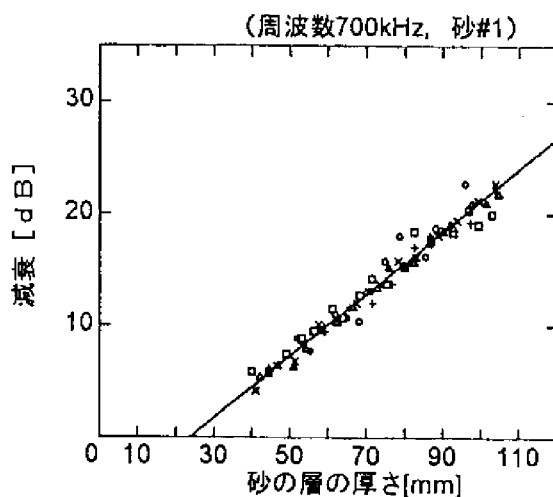
### 2.4 測定結果

測定にばらつきができることが予想されるので、それぞれの周波数と砂について 5 回以上の測定を行った。また、砂の層の厚さは、測定周波数によって異なるが、およそ 10 ~ 110mm である。それぞれの周波数の砂の層の厚さに対する減衰の測定結果を、砂 #1 は図 2-3 に、砂 #2 は図 2-4 に示す。ここで砂 #3 については散乱が大きいため反射波の測定ができなかった。

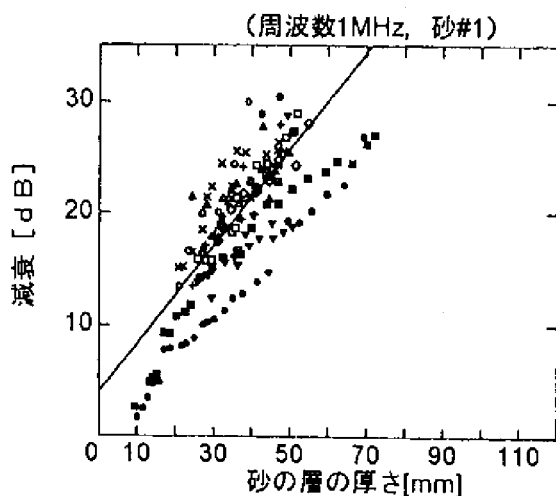
以上の結果から、砂 #1 と砂 #2 について、それぞれの測定ごとに最小二乗近似の一次式から傾きを求め、周波数に対する平均減衰率と標準偏差を表した結果を図 2-5 に示す。



(a) 周波数 570kHz

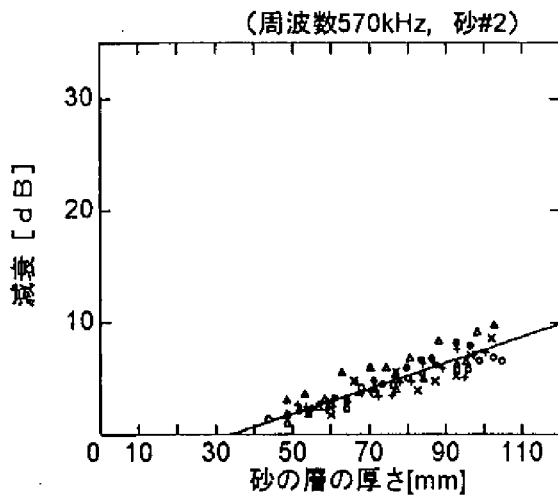


(b) 周波数 700kHz

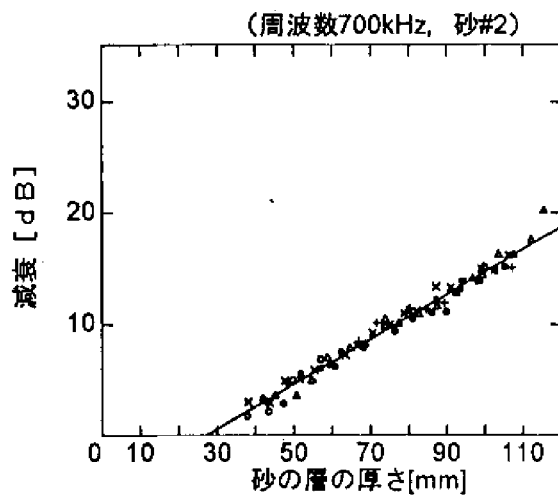


(c) 周波数 1MHz

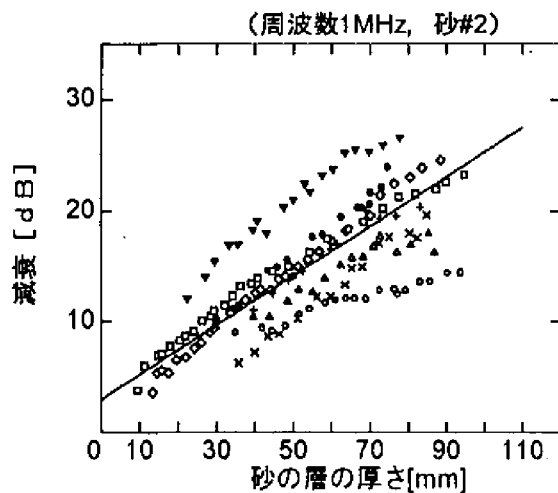
図 2-3 砂 #1 の減衰の測定結果



(a) 周波数 570kHz



(b) 周波数 700kHz



(c) 周波数 1MHz

図 2-4 砂 #2 の減衰の測定結果

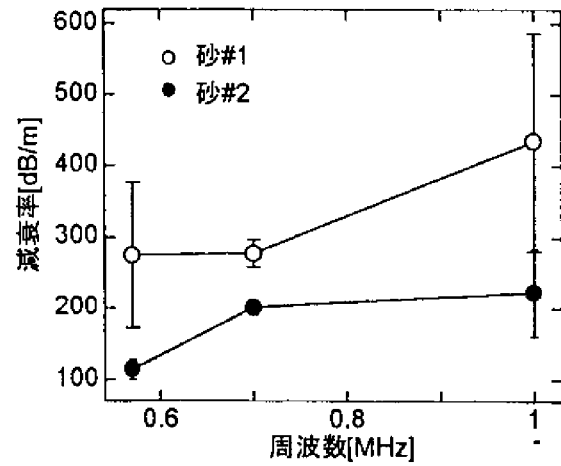


図 2-5 周波数に対する減衰率

## 2.5 検討

超音波の減衰の原因はいろいろあるが、考えられる原因としては粒子による散乱減衰、粘性減衰などがある。基本的に減衰率は周波数の関数で表すことができる。図 2-5 の結果からはばらつきが大きいので周波数の関数として表すことは難しいが、傾向として周波数が大きくなると減衰も大きくなる結果となった。また、砂 #1 と砂 #2 を比較した場合、砂の粒径が大きい砂 #2 の方が減衰率は小さかった。しかし、砂 #3 は測定を行った中では最も粒径が大きかったが、減衰が大きいため測定ができなかった。

## 3. ボーリング孔パイプ内からの 砂中の物体形状測定の実験

### 3.1 測定方法

図 3-1 に測定図を示す。地下水下でパイプ内から砂中の物体形状を測定することを想定している。砂は水に満たされ、パイプの上は水中である。測定はパルスエコー法を行い、ボーリング孔パイプ内を上下方向に走査した場合を想定して行った。駆動波はパースト状波で、1MHz（直径 10mm の振動子）と 570kHz（直径 15mm の振動子）の振動

子を用い、試料は平面と曲面との形状比較のために、アルミ板（幅 25mm）と円筒形真鍮（直径 25mm）を用いた。パイプの外側の媒質となる砂は、他と比較して減衰率の小さい砂 #2 を用いた。また、用いたパイプの材質は塩化ビニルパイプであり、鉄パイプと比較して超音波の透過率は非常によい<sup>1)</sup>。塩化ビニルパイプは外径 88.7mm、内径 78.5mm、厚さ 5.1mm である。

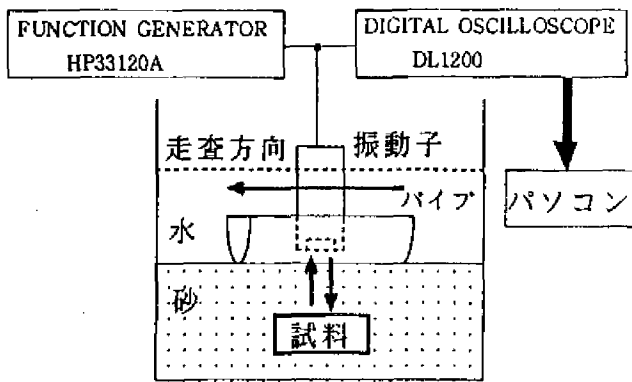


図 3-1 測定図

### 3.2 映像化するためのデータ処理の方法

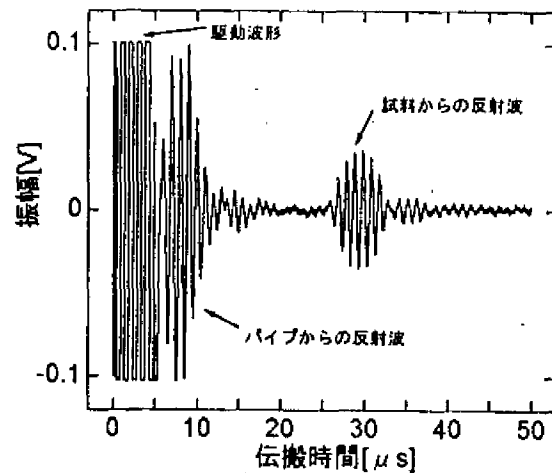
デジタルオシロスコープで取り込んだ波形データの 1 つの例（周波数 1MHz）は、図 3-2(a) のようになる。横軸データ数が 0 ~ 5  $\mu$ s 程度までの波形が、振動子を駆動している駆動波形で、5 ~ 15  $\mu$ s にある波形が、パイプの中で反射した波形を含む、パイプからの反射波である。この駆動波形と、パイプからの反射波は、同じ条件で走査を行っている場合は、ほぼ同じ場所に現れる。

そして、最も重要な波形データは、パイプの外から反射してくる波形データである、約 15  $\mu$ s 以降に現れるデータである。図 3-2(a) の場合、およそ 25  $\mu$ s 以降に、パイプの外にある試料で音波が反射し、戻ってきた波形データがある。

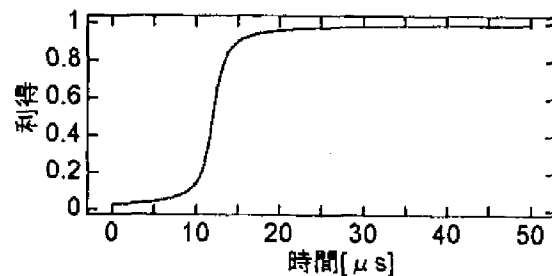
駆動波形とパイプからの反射波は、映像化を行うときには、必要のないデータである。反射波を強調させるために、図 3-2(b) のような時間的感度制御（STC）関数を、取り

込んだデータにかけて反射波形を強調し、包絡線抽出を行った結果が図 3-2(c) である。これを走査した順に 3 次元座標に並べ、その振幅データから等高線を描いて映像化を行う。

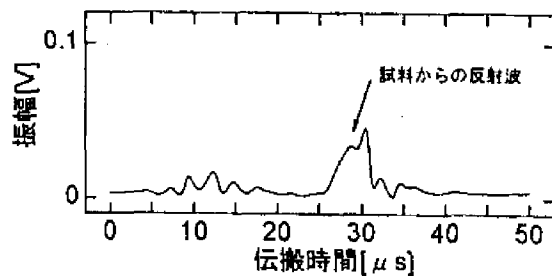
この等高線表示により、媒質中の音速が分かれば試料までの距離が分かる。また振動子に近い方から試料の表面の形状を、反射波の大きさを等高線のレベルにより知ることができる。



(a) 取り込んだ波形データの一部



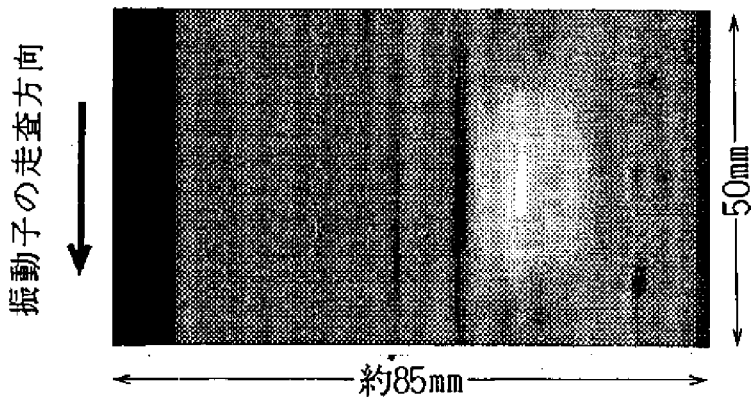
(b) STC 関数



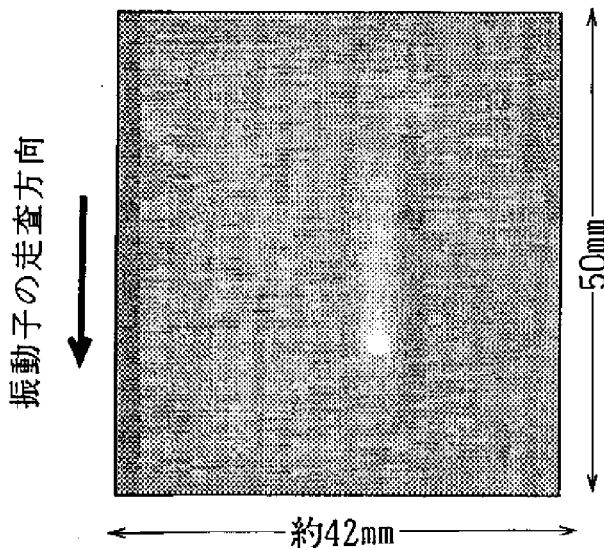
(c) (a) と (b) を掛け、包絡線抽出した結果  
図 3-2 データ処理の方法

### 3.3 測定結果

それぞれ駆動周波数 570kHz（直径 15mm の振動子）と 1MHz（直径 10mm の振動子）で、平面であるアルミ板（幅 25mm）を走査した結果を図 3-3 に、曲面である円筒形真鍮（直径 25mm）を走査した結果を図 3-4 に示す。また、図の横軸は振動子から水、パイプ、水を含んだ砂の 3 媒質から成り立っているが、水を含んだ砂の音速約 1700m/s<sup>2)</sup> と伝搬時間から求めた。



(a) 振動子と試料の距離 49.2mm  
(駆動周波数 570KHz)



(b) 振動子と試料の距離 20.4mm  
(駆動周波数 1MHz)



図 3-3 アルミ板を走査した結果

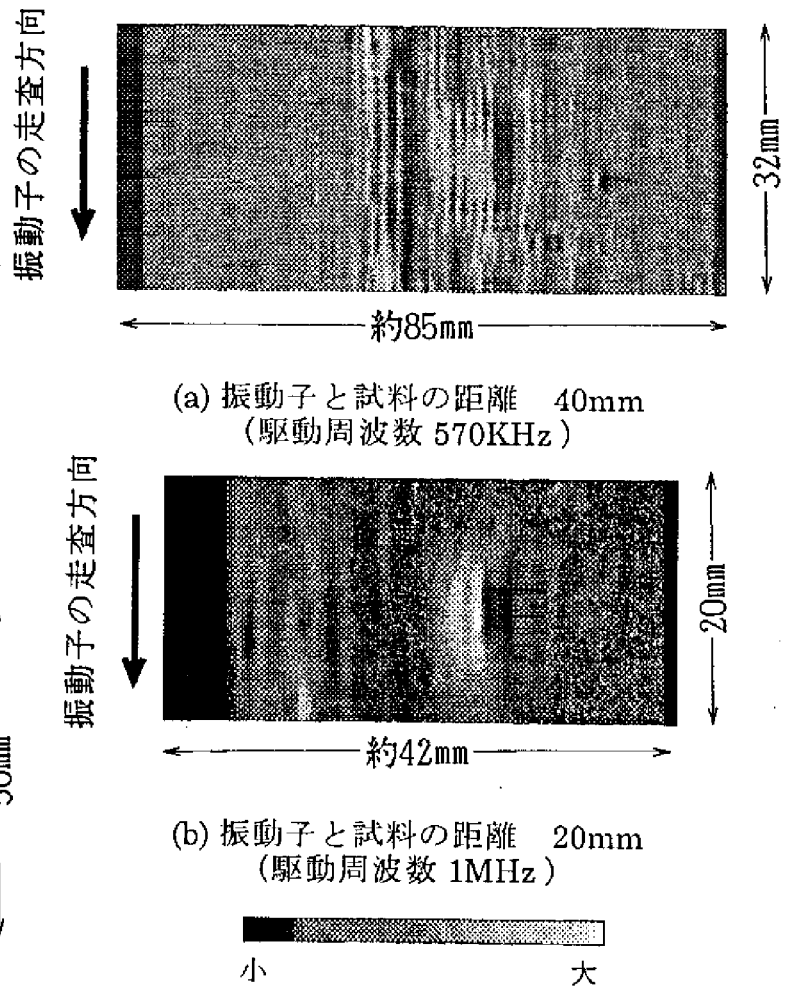


図 3-4 円筒形真鍮を走査した結果

### 3.4 検討

図 3-3 と図 3-4 のそれぞれ平面と曲面の形状を持つ試料を走査し映像化を行った結果、平面と曲面の表面形状を測定することができた。ただし図 3-4(a) については試料の位置を把握するのは難しい。ここで表面形状とは 3.2 で述べたように、振動子に近い方から現れてくるデータである。同様に横軸に現れる幅はパルス幅であり、試料の大きさを表すものではない。

一方縦軸について試料の大きさは、平面のアルミ板の幅は横方向に振動子の直径が加わった幅が現れたために、実際の幅 25mm より大きい結果となった。また、直径 25mm の円筒形真鍮の幅は約 15mm となり、全体像を測定することはできなかった。

曲面（円筒形）の試料の音波の反射率は平

面より小さくなるので、今回の測定でも、平面であるアルミ板の方がより長い距離で映像化が可能であった。

駆動周波数について、2.5で述べたように周波数が低い方が砂中の超音波の減衰が小さくなるので、反射波が大きくなる。従って駆動周波数570kHzで測定を行った場合の方がよりはっきりと表面形状を映像化できると考えられるが、バースト状波で測定を行っているので、周波数が低くなると波長が長くなり、パルス幅が大きくなり、距離分解能が悪くなる。今回の測定での砂中でのパルス幅は、砂中の音速を1700m/sとすると、駆動周波数570kHzで約15mm、1MHzで約8.5mmであった。これにリングングなどの影響が加わったパルス幅が結果に現れた。また、振動子の特性により、特に570kHzの振動子は他の低い周波数成分が出てしまし、パルス幅が長くなった。従って1MHzの振動子による測定結果の方がはっきりと映像化できた。

#### 4. おわりに

ボーリング孔パイプ内から地下水下砂中の物体識別を行うために、水を含んだ砂の粒径と周波数に対する超音波の減衰率を測定し、モデル実験としてパイプ内からの水を含んだ砂中の、平面であるアルミ板と曲面である円筒形真鍮の表面形状を測定した。その結果、水を含んだ砂の減衰率は周波数に対して増加する傾向を示した。またアルミ板は70mm程度まで、円筒形真鍮は50mm程度までの表面形状を測定することができた。

今後は様々な状況を想定した実験を行う予定である。

#### 謝辞

研究に協力していただいた奥山ボーリング(株) 林 克彦氏に感謝します。また、種々お世話になった井上研究室の皆様に感謝します。

#### 参考文献

- 1) 伊佐地, 井上, "ボーリング孔パイプ内からの超音波の透過に関する一考察", 平成7年電気関係学会東北支部連合大会 2A22
- 2) 井上, 吉田, 西平, 奥山, 林, "水中の粒径の異なる砂の音速測定", 日本音響学会講演論文集 平成5年3月
- 3) 日本学術振興会製鋼第19委員会編, "超音波探傷法(改訂新版)", 日刊工業新聞社, 昭和62年1月