

# 港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 677 June 1990

海底粗度計の開発  
——海底砂超音波特性に関する基礎実験——

木原 純孝	入江 功
加藤 一正	柳嶋 慎一
栗山 善昭	白井 一洋
塚田 泰久	篠原 丈人
宮沢 久	伊藤日出人

運輸省港湾技術研究所



# Development of Sand Ripple Meter

## —Basic Experiments on Ultrasonic Waves— under Sea Bottom Sand

Sumitaka KIHARA\*  
Isao IRIE\*\*  
Kazumasa KATOH\*\*\*  
Shin-ichi YANAGISHIMA\*\*\*  
Yoshiaki KURIYAMA\*\*\*\*  
Kazuhiro SHIRAI\*\*\*\*\*  
Yasuhisa TSUKADA\*\*\*\*\*  
Taketo SHINOHARA\*\*\*\*\*  
Hisashi MIYAZAWA\*\*\*\*\*  
Hideto ITOH\*\*\*\*\*

### Synopsis

Although the profile of sand ripples is important for predicting sea bottom changes, this is not investigated enough in the field, especially in storms. The sand meter, which is the instrument for measuring sand ripples by utilizing ultrasonic waves, has been developed. However, the meter set up in the sea can not be used in the surf zone because of the air due to breaking waves, and suspended sand. The fluid turbulence due to the existence of the meter destroys sand ripples. Therefore, the measuring method with the sand meter buried under the sea bottom is investigated.

The results are as follows :

- (1) The interface between the sea water and the sand bottom can be detected by sending out mono-pulse ultrasonic waves from a transmitter buried in the bed.
- (2) Under the sea bottom in the swash zone, where a void in the bottom sand is partly filled with the air, the sound velocity is about 500m/s, the propagation frequency is 300Hz to 1 kHz, with the large propagation loss. In the bottom sand which void is entirely filled with the sea water, however, the sound velocity is about 1660m/s, the propagation frequency is 15kHz to 30kHz, and the damping constant is 6 dB/m to 8 dB/m.
- (3) The system of the sand ripple meter has been designed based on the experimental data.

**Key words :** Sand Ripples, Field Observation, Submarine Prospecting, Ultrasonic Wave Propagation, Ultrasonic measurement

---

\* Chief of the Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division.  
\*\* Former-Director of Marine Hydrodynamics Division.  
\*\*\* Chief of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division.  
\*\*\*\* Member of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division.  
\*\*\*\*\* Former-Member of the Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division.  
\*\*\*\*\* Member of the Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division.  
\*\*\*\*\* Tohwa, Ltd.

# 海底粗度計の開発

## —海底砂超音波特性に関する基礎実験—

木原 純孝\*  
入江 功\*\*  
加藤 一正\*\*\*  
柳嶋 慎\*\*\*\*  
栗山 善昭\*\*\*\*  
白井 一洋\*\*\*\*\*  
塚田 泰久\*\*\*\*\*  
篠原 丈人\*\*\*\*\*  
宮沢 久\*\*\*\*\*  
伊藤日出人\*\*\*\*\*

### 要 旨

砕波帯内外の漂砂を定量的に明らかにし、精度の高い海浜変形予測技術を確立することが要望されている。

精度の高い予測手法の確立に際して、モデル化しなければならない多くの現象の一つに、砂澁の形状がある。しかしながら、砂澁形状の研究は主に実験室レベルで検討されているにすぎず、現地の、特に荒天時の砂澁がいかなるものであるかについては、ほとんど分かっていない。

そこで、荒天時においても海底の砂澁が観測できるような、超音波を利用した海底粗度計の開発研究を行った。荒天時においては、超音波計測を用いた従来方式では、波による流れ、海底土砂の浮遊、砕波による気泡、漂流物等による超音波伝搬特性へ与える悪影響があり、海上からの計測が不可能である。例え可能であったとしても、センサー自身による流体の乱れが、海底の微地形である砂澁形状を壊してしまい、正しい形状を測定することができない。このようなことから、超音波送受波器を海底面に埋設して、砂中から海底面の砂澁を測定する方式を検討した。研究の結果は、次のとおりである。

- 1) 室内モデル実験の結果、モノパルス超音波を用いて、砂中からの砂面形状測定が可能であることがわかった。
- 2) 砂中の超音波伝搬特性を把握するため、室内実験および波崎海洋研究施設における現地実験の結果、空気に触れる波打際の砂中の音速は約500 m/sで伝搬周波数も300 Hz～1 kHzと低く、且つ伝搬減衰も多い。しかし、水で満たされた砕波帯内の海底砂中の音速は約1660 m/s、超音波周波数が15～30 kHzで、減衰定数が6～8 dB/mであり、さらに、高い周波数においても計測可能であることがわかった。

---

\* 機械技術部 計測施工研究室  
\*\* 前海洋水理部長（現九州大学教授）  
\*\*\* 水工部 漂砂研究室長  
\*\*\*\* 水工部 漂砂研究室  
\*\*\*\*\* 前機械技術部 計測施工研究室（現第二港湾建設局 横浜機械整備事務所）  
\*\*\*\*\* 機械技術部 計測施工研究室  
\*\*\*\*\* (株)東和製作所

- 3) 距離分解能の関係で、超音波周波数を20~88 kHzの間で可能な限り高くする必要がある。
- 4) 以上のデータを基に、システム設計を行った。
- 5) 今後は得られたシステム設計に基づいた海底粗度計を試作し、荒天時を含めた現地の海底粗度計の連続観測を行えば、本方式の海底粗度計の実用化が可能であると考えられる。

キーワード：漂砂，砂漣，現地観測，海底探査，超音波伝搬，超音波応用計測

## 1. まえがき

沖から岸に打ち寄せてくる波は、その進行の過程で海底面に対して様々な影響を与える。水深が十分深い場合には、波による底面近くの流速が小さいため、底質は全く移動しないか、多少前後に移動するのみである。しかし、水深がさらに浅くなるにつれ、波による水粒子の軌道流速も大きくなり、この影響を受けて海底面に波状の微地形が形成される。これを砂漣 (sand ripples) と呼ぶ。

この砂漣の大きさは、波がさらに浅水域に進み、底面に沿う水粒子の速度が大きくなるにつれ増大するが、ある水深に達すると波が砕け、それ以後の浅い領域では砂漣は消滅するものと考えられている。

砂漣は、寄せてくる波の大きさ、水深、底質特性により様々な形状、大きさに変化する。また、砂漣の規模は、波動運動する流体に対し底面での粗度としての役割を果たし、流体の乱れの発達や底質の巻き上げ、浮遊を大きく左右する。よって、海底粗度としての砂漣の形状特性を明らかにすることは非常に重要である。

しかし、砂漣規模については室内実験的に波、水深、底質との関連づけがなされているにすぎず、底質移動における縮尺効果の関係から、これらの室内実験の結果を適用して現地の砂漣の規模を求めることは難しい。

一方、現地における砂漣の規模に関する調査研究もなされつつあるが、海底地形の変化の激しい大波浪時の砂漣の特性については、その測定法の困難さのため、皆目わかっていないのが現状である。

そこで、荒天時においても、海底の砂漣が観測できるようにするため、超音波を利用して海底粗度を計測する方法を考えた。荒天時には、波による流れが大きく、底質の浮遊、砕波による気泡、漂流物等が著しく増大しており、海水中には、超音波に悪影響を及ぼす要因が多すぎる。さらには、海底面近くにセンサーを設置すると、センサーを設置することによって、その周辺物体運動に乱れが発生し、この乱れの影響を受けて砂漣形状が変形

する可能性が高い。そこで本研究では、これらの問題を回避するために、送受波器を海底面に埋設し、砂中から海底面の砂漣を測定する方式について検討することにした。

主な検討課題として、

- 1) 砂と水との境界面からの反射強度の計測に必要なレベルの確保の可能性 (漂砂や海水中の気泡等からの反射ノイズとの分離)
  - 2) 砂中の音波伝搬の可否と砂漣のリップルの分解に必要な周波数の使用の可能性
  - 3) 砂中での超音波ビームのスキニング方式、またはパワースペクトル方式による砂漣のリップルの高さ間隔の測定の可能性
  - 4) その他、規模等の運用上の問題
- 等が考えられ、これらを中心に港湾技術研究所内の水槽によるモデル実験、一般海岸における超音波の伝搬特性の調査、および波崎海洋研究施設における現地実験等を行った。

本資料は、昭和60年度から昭和63年度の4年間に実施した、港湾技術研究所と(株)東和製作所との共同研究の実施成果をとりまとめたものである。

### 1.1 砂漣の特性に関する研究状況

#### (1) 漂砂に対する砂漣 (海底粗度) の役割

波が進行している時の海底面近くの水粒子は、波の進行する方向に沿って往復運動をしている。その往復運動の振幅及び最大流速は、同じ波に対しては水深が浅いほど増大する。従って、波が沖合いから海岸へ向かって進行する場合は、水深に応じて底質の移動形態は図-1に示すように変化する。すなわち、水深が十分に深い場合には、図-1(a)に示すように底質は全く移動しないが、ある水深 (移動限界水深) より浅い領域に達すると、図-1(b)のように底質は水粒子の往復運動に従って前後に移動するようになる。さらに水深が浅くなり、水粒子の往復運動が大きくなると、図-1(c)のように海底に波状の地形、すなわち砂漣が形成される。実際の海岸の浅海域のほとんどの範囲で、このような砂漣が形成されてお

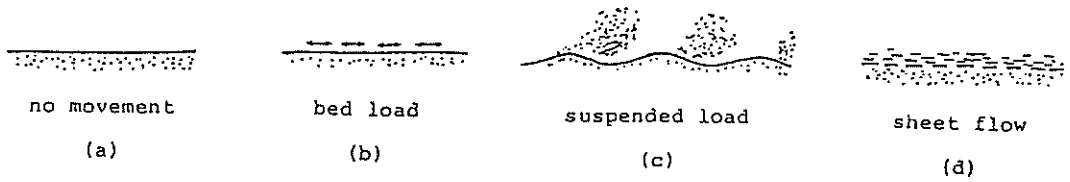


図-1 波による底質の移動状態

り、底質の移動と密接に関係している。水深がさらに浅くなり、波が砕けつつ進行するようになると、図-1(d)のように砂澁は消滅し、底質は掃流状態で移動する。

海岸に対し、常に一定の波が作用する場合には、図-1の移動形態が発生する領域は、場所的に定まっている。しかし、実際の海岸では、作用する波が時々刻々変化しているので、同じ地点であっても底質の移動形態は変化する。また、浅海域の大部分の底質移動形態を示す図-1(c)の場合でも、砂澁の規模は波の変化に応じて変化している。この砂澁上の底質移動は、他の移動形態の場合に比べ、より複雑なものである。

図-2は、砂澁上での典型的な底質移動状況を概念的に示したものである。図中の(a)は、砂澁上を波の峰が通過する場合を示している。岸向の強い水粒子運動により、砂澁の沖側斜面の底質が掃流され、砂澁の岸側に形

成される後流渦に巻き込まれる。やがて、水粒子は、図中の(b)のように運動方向を変え、今度は沖方向の流れに転ずる。この沖向きの流れにより、図中の(a)で巻き上げられた底質の一部は、沖向きに浮遊状態で運ばれると共に、砂澁の沖側に渦が発生し、この渦の中に岸側斜面から掃流されてきた底質が巻き込まれる。以上が、砂澁の上での典型的な底質の移動形態であるが、図-2は、底質粒径に対して波の規模の小さい室内実験において見られるものである。実際の海岸では、波の規模はこれに比べてはるかに大きく、底面の砂澁によって生ずる乱れの上方拡散により、図-2に見られるよりさらに上方まで底質が巻き上げられるものと思われる。

一方、砂澁は底質の浮遊に寄与する海底粗度とみなすことができる。海底粗度が流体中の乱れ強度の分布に及ぼす影響は極めて大きい。これを実験結果により示したのが図-3~6である<sup>1)</sup>。これらの図において、左端に鉛直壁があり、これに対し波を作用させて図中に示す包絡線の重複波を形成している。すなわち左端が重複波の腹の位置、中央が節の位置に相当する。先ず、図-3(a)は、底面が平滑な場合の乱れ強度の空間分布を示す。ここに乱れとしては、各点での流速 $u$ をレーザードップラー流速計にて測定し、その流速信号を10~100 Hzの Band pass-filter を通して得られた $u'$ を、自乗平均して求めたものである。底面近くから上方に至るまで、乱れ強度は全体的に小さい。図-3(b)は、平均流速の空間分布を示したものである。重複波の下では、底面近くに節から腹へ向かう流れがあり、上方では腹から節へ流れることが Longuet-Higgins (1953) により理論的に示されている<sup>2)</sup>が、図-3(b)に見られるように節から腹へ向かう下層の厚さが非常に薄いものとなっている。

これに対し、底面を平坦な砂面とし、他の条件は同じとした場合の実験結果を図-4(a), (b)に示す。乱れの強度の大きさは平滑底面の場合に比べやや大きくなっており、節から腹へ向かう平均流を示す層の厚さも流速の絶対値と共にやや増大している。

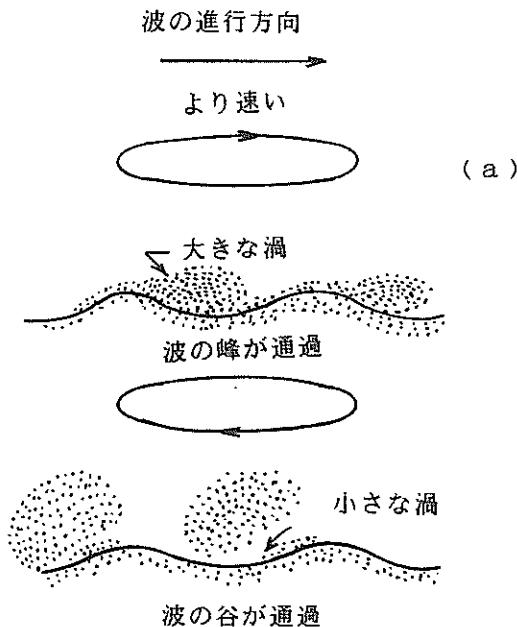


図-2 砂澁上での典型的な底質移動状況の概念図

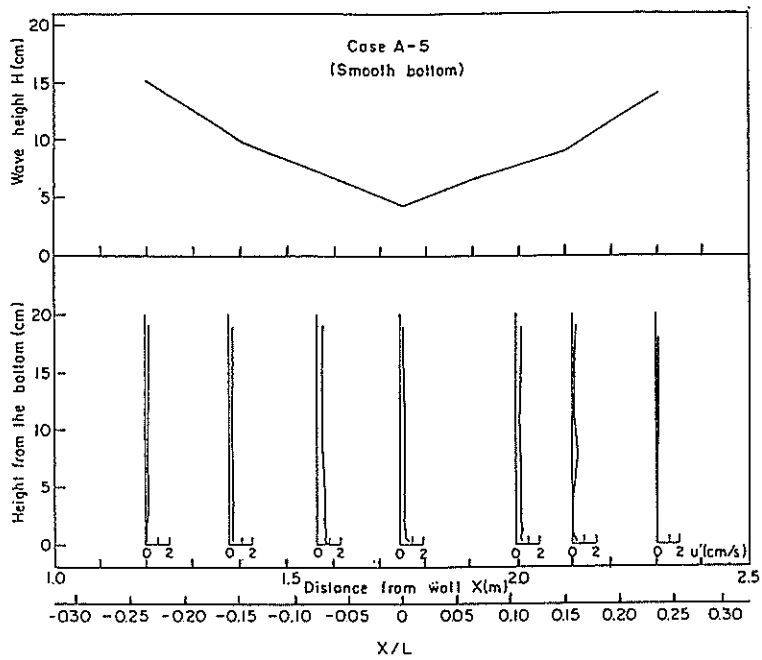


図-3(a) 乱れ強度の空間分布 (平滑底面)

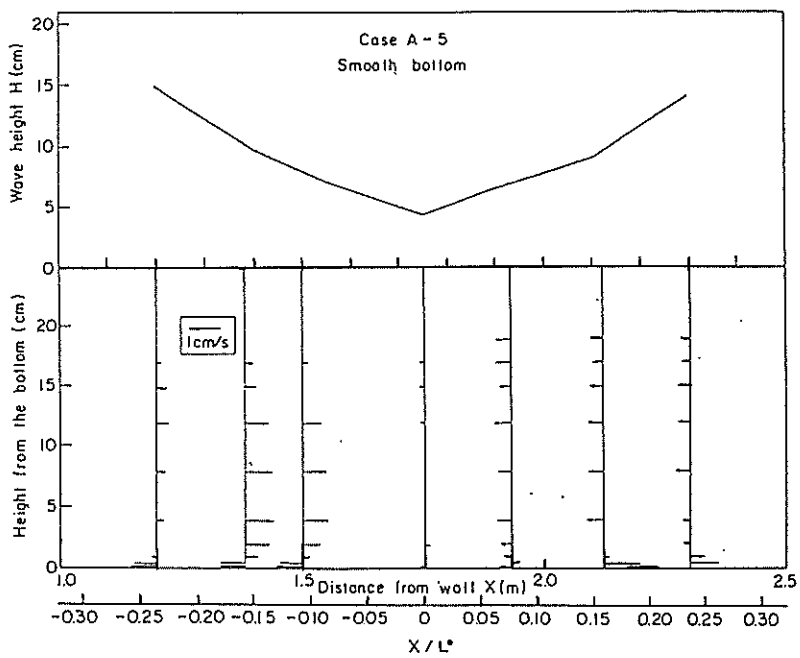
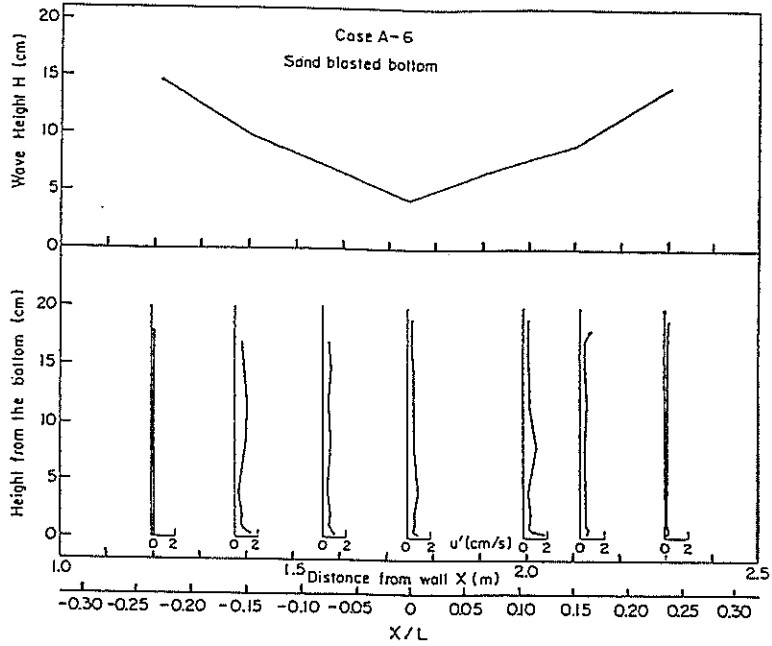
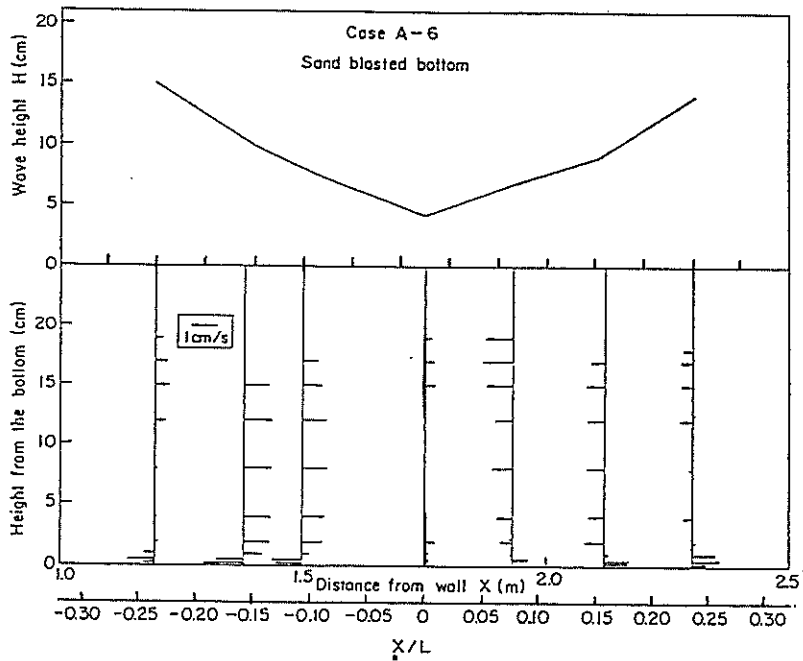


図-3(b) 平均流の空間分布 (平滑底面)



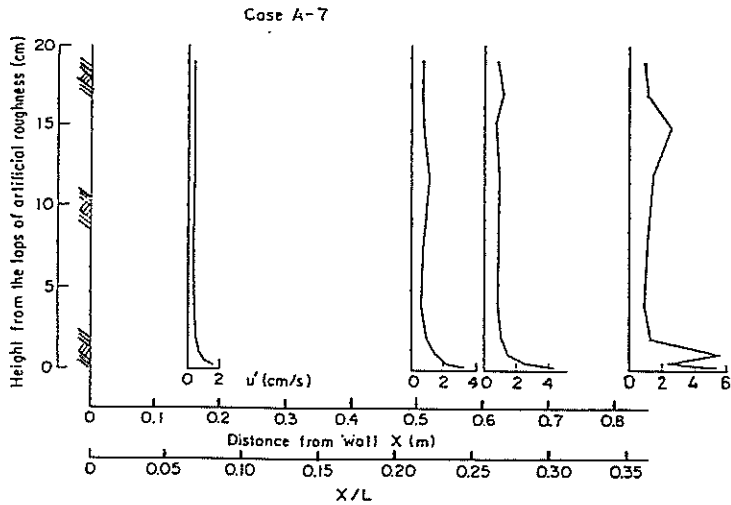
乱れ強度の空間分布 (砂吹付底面) (Case A-6,  $H_0=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{sec}$ )

図-4(a) 乱れ強度の空間分布 (砂吹付底面)



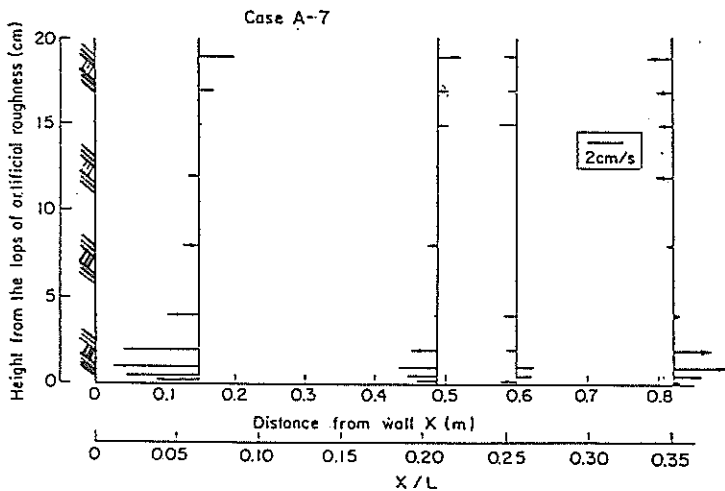
平均流の空間分布 (砂吹付底面) (Case A-6,  $H_0=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{sec}$ )

図-4(b) 平均流の空間分布 (砂吹付底面)



乱れ強度の空間分布 (Case A-7,  $H_0=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{sec}$ , 粗度:  $0.5 \times 1.0\text{cm}$ )

図-5(a) 乱れ強度の空間分布



平均流の空間分布 (Case A-7,  $H_0=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{sec}$ , 粗度:  $0.5 \times 1.0\text{cm}$ )

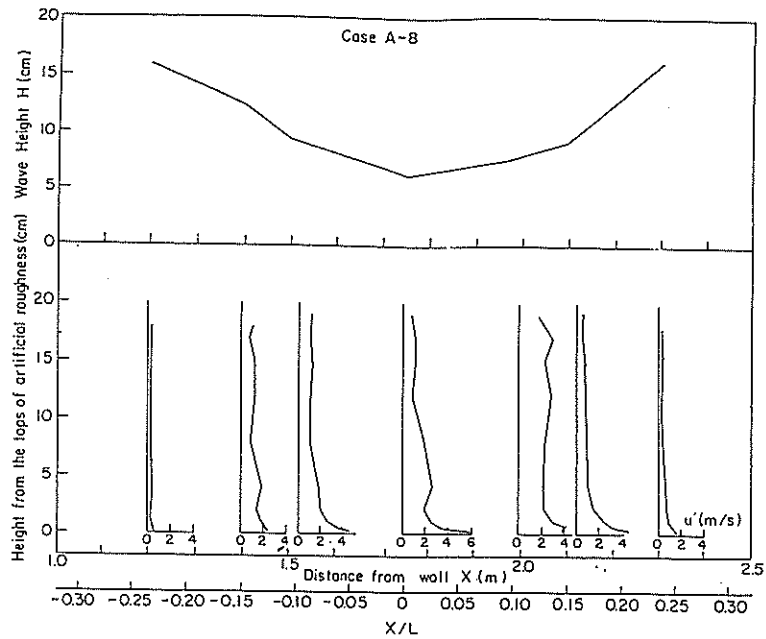
図-5(b) 平均流の空間分布

さらに、図-5に示すように、水路の底面に $0.5\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ 及び $1.0\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ の角材をそれぞれ $3\text{cm}$ 及び $5\text{cm}$ の間隔に並べて人工粗度を作り、他の条件は、図-3、4と全く同じとして実験した結果をそれぞれ図-6、7に示す。図-6(a)のように乱れ強度は底面近くで著しく増大しており、上方の流体中の乱れ強度も増大している。また、図-6(b)のように平均流の絶対値、節から腹へ向かう下層の厚さも増大している。さら

に粗度を大きくした図-7では、底面近くから上方の流体中に至るまで、乱れ強度の発達は極めて著しい。節から腹へ向かう流れを示す下層の厚さ、平均流共に著しく増大している。

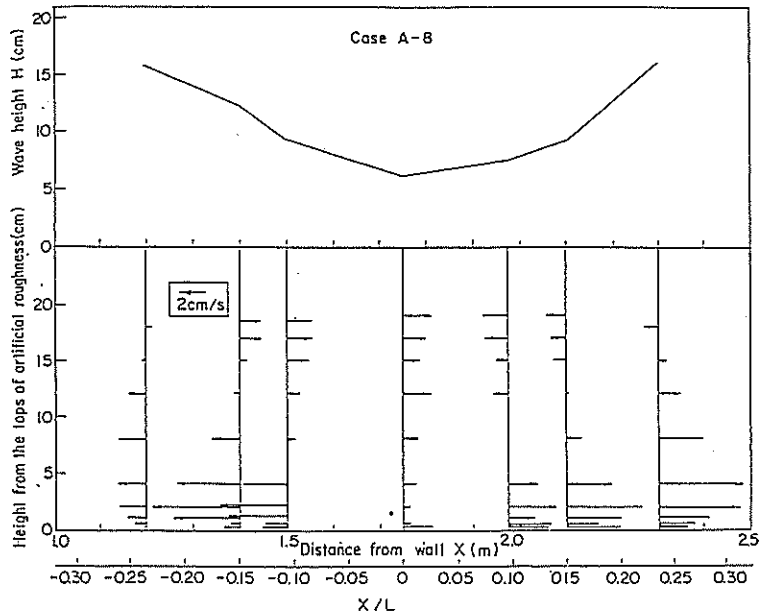
海底粗度の大小は、乱れ強度の空間分布を支配し、底質の流体中への巻き上げ、平均流に大きく影響することが上記の実験から明白である。これらの実験は重複波に対するものであるが、進行波の場合も同様のことが言える。





乱れ強度の空間分布 (Case A-8,  $H_0=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{sec}$ , 粗度:  $1.0 \times 1.0\text{cm}$ )

図-6(a) 乱れ強度の空間分布



平均流の空間分布 (Case A-8,  $H_0=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{sec}$ , 粗度:  $1.0 \times 1.0\text{cm}$ )

図-6(b) 平均流の空間分布

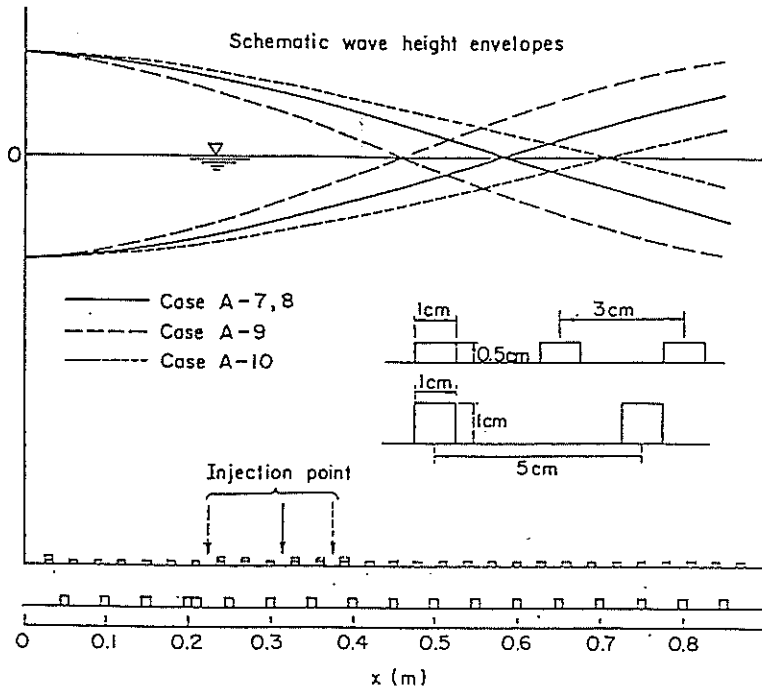


図-7 人工粗度の形状と配置

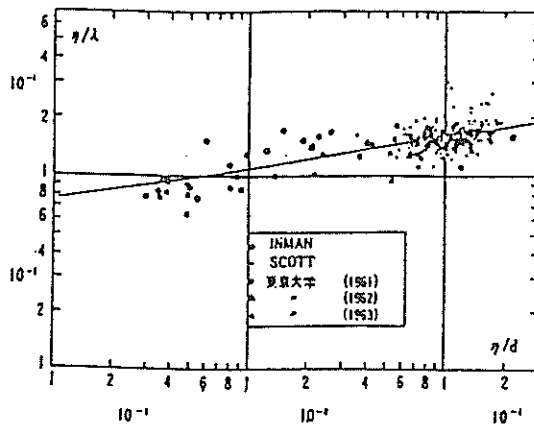


図-8  $\eta/\lambda$  と  $\eta/d$  との関係

## (2) 砂澁の特性

漂砂の定量的観測のために波浪特性、流況、浮遊砂量を正確に観測し得たとしても、底面の砂澁の規模に関する特性を明らかにできない限り、精度の高い漂砂量公式を求めることはできない。何故なら、砂澁の規模は、波、流れ等の漂砂の外力条件の増大あるいは減少に対し、連続的に変化せず、ある条件を境にして全く別の形

態をとるものと考えられるためである。また、砂澁の影響を十分把握しなければ、漂砂の定量観測値のバラツキを誤差として評価せざるを得ないので、漂砂の高精度な定量化ができない。よって、砂澁の特性を明らかにする必要がある。

砂澁の特性については、室内実験的に多くの研究がなされ、かなりのことが明らかにされてきている。ここで

は本間・堀川・鹿島(1964)による研究結果について述べる<sup>3)</sup>。本間らは砂漣の特性が、次の5つの無次元量が関係しているとした。

$$\phi(\eta/\lambda, \eta/d_0, \lambda/d_0, U_m d_0/\nu, W_0 M_d/\nu) = 0 \quad (1)$$

ここに、

$d_0$ : 底面付近の水粒子の水平方向軌道幅(全振幅)

$U_m$ : 底面付近の水粒子の水平方向最大速度

$W_0$ : 底質の沈降速度

$M_d$ : 底質の中央粒径

$\eta$ : 砂漣の波高

$\lambda$ : 砂漣の波長

$\nu$ : 流体の動粘性係数

である。本間らは、実験結果(一部現地データも含む)を用いて、これらの無次元量の相互関係を調べた。図-8は、 $\eta/\lambda$  と  $\eta/d_0$  との関係、図-9~11は、 $M_d$  の範

囲ごとの  $d_0/\lambda$  と、 $U_m d_0/\nu$  との関係をプロットしたものである。

図-8の関数形は

$$\eta/\lambda = 0.231 (\eta/d_0)^{0.160} \quad (2)$$

また、図-9~11の関数形はそれぞれ

$M_d = 100 \sim 200 \mu$  のとき

$$d_0/\lambda = 0.00234 (U_m d_0/\nu)^{0.674}$$

$M_d = 200 \sim 300 \mu$  のとき

$$d_0/\lambda = 0.0985 (U_m d_0/\nu)^{0.289} \quad (3)$$

但し、 $U_m d_0/\nu < 3 \times 10^5$

$M_d = 300 \sim 400 \mu$  のとき

$$d_0/\lambda = 0.0253 (U_m d_0/\nu)^{0.409}$$

但し、 $U_m d_0/\nu < 9 \times 10^4$

本間らは、これらの結果から図-12~15に示すような砂漣のピッチ $\lambda$ 、高さ $\eta$ を求める算定図を作った。

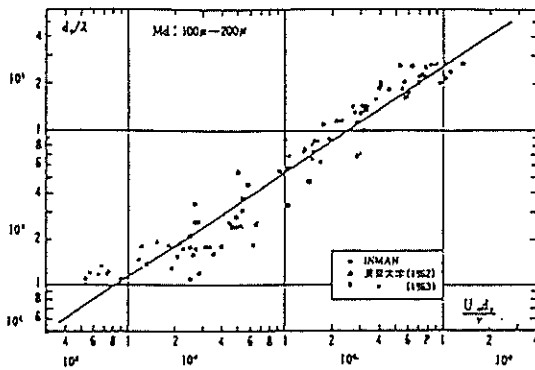


図-9  $d_0/\lambda$  と  $U_m d_0/\nu$  との関係  
 $M_d = 100 \sim 200 \mu$

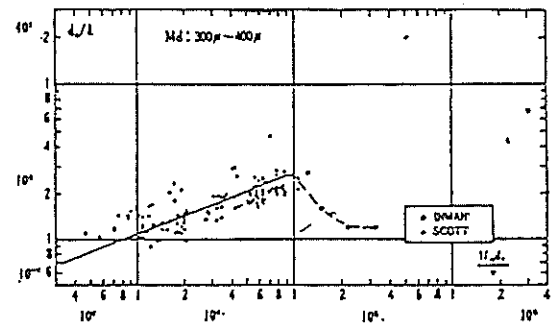


図-11  $d_0/\lambda$  と  $U_m d_0/\nu$  との関係  
 $M_d = 300 \sim 400 \mu$

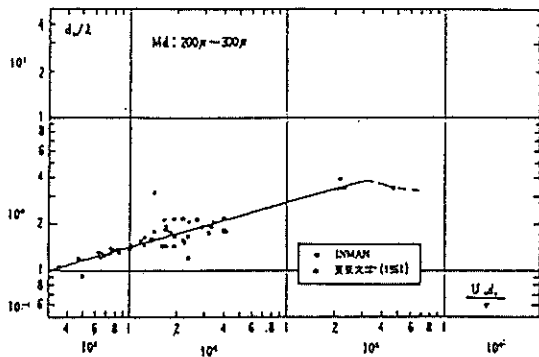


図-10  $d_0/\lambda$  と  $U_m d_0/\nu$  との関係  
 $M_d = 200 \sim 300 \mu$

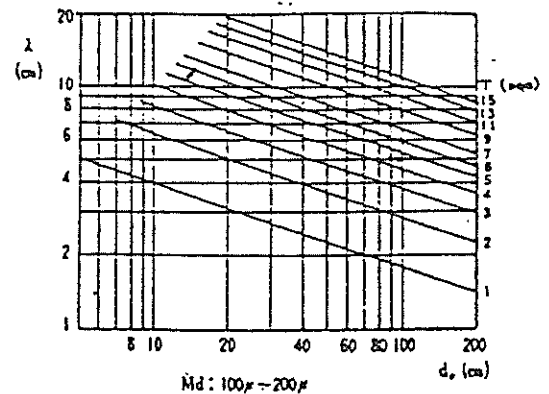


図-12 T、 $d_0$  による砂れんピッチ $\lambda$ の算定図  
 $M_d = 100 \sim 200 \mu$

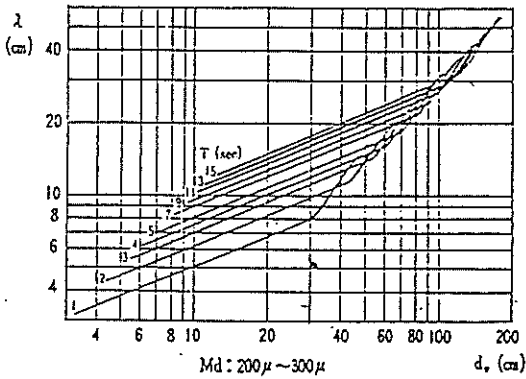


図-13 T,  $d_0$  による砂れんピッチ  $\lambda$  の算定図  
Md = 200  $\mu$  ~ 300  $\mu$

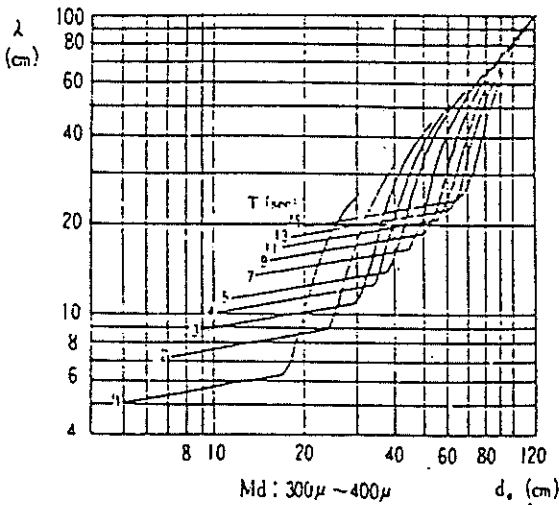


図-14 T,  $d_0$  による砂れんピッチ  $\lambda$  の算定図  
Md = 300  $\mu$  ~ 400  $\mu$

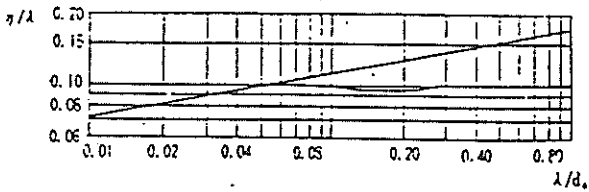


図-15  $\lambda$ ,  $d_0$  による砂れん高さ  $\eta$  の算定図

ここで、

$$d_0 = H \operatorname{cosech} (2\pi h/L) \quad (4)$$

H : 波高 (cm)      d : 水深 (cm)  
L : 波長 (cm)      T : 波の周期 (sec)

である。本間らは、これらの算定図を用いるに当たり、次の項目に注意すべきであるとしている。

① 200  $\mu$  ~ 300  $\mu$  の図は200  $\mu$  に、300  $\mu$  ~ 400  $\mu$  の図

は300  $\mu$  に近いデータで作られた。170  $\mu$  以上はむしろ200  $\mu$  ~ 300  $\mu$  の図とよく一致する。

② 曲線部は精度が低い。砂澁そのものは不規則であり、ここで用いたデータは平均値であって、しかもかなりばらつきがある。

③ 砂澁の消滅限界は考慮していない。しかし、曲線の描いてある付近までは、砂澁のデータが実際にある。

④ 現地の波のデータは有義波を用いている。

また、堀川は、以上のデータ解析から、砂澁の波形勾配の最大値は波や砂の性質に関係なく一定値0.23をとり、砂の水中の安息角を  $\mu$  とするとき、

$$(\eta/\lambda)_{\text{MAX}} = \tan \mu = 0.23 \quad (5)$$

となることを指摘している<sup>4)</sup>。

本間らによる以上の結果を見れば、砂澁の特性についてはほとんど解決されたように思える。しかし、これらのほとんどのデータが室内実験によるものであり、現地データといっても波が小さい場合のものである。現地海岸で漂砂が支配的に大きくなるのは、いうまでもなく荒天時である。この海象の時の砂澁の特性を明らかにしない限り、荒天時の漂砂を定量的に精度高く求めることはできない。

(3) 現地の砂澁測定に関する既往の成果

現地における砂澁規模の調査は、最近多くの研究者により実施されつつある。例えば、Nielsen ら (1984) は、水深24 m の位置に設置された波高計を維持管理するついでに、周辺の砂澁の形状寸法を測定している<sup>3)</sup>。この観測では、波高は1.6 m 以下となっている。また、図-16に示すように、砂澁の波長と波高に一定の相関を得ている。しかし、このような小さな波が、水深24 m

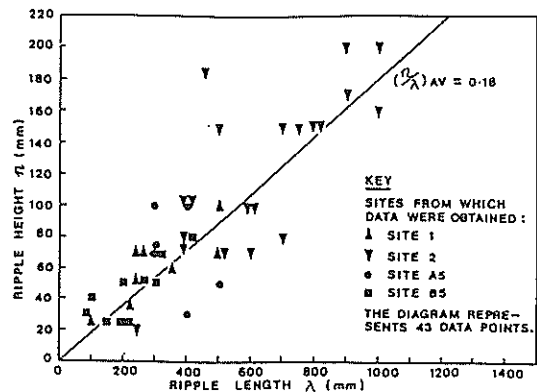


図-16 砂澁の波長と波高の関係

の海底に及ぼす効果は、荒天時の漂砂が卓越する条件からは程遠いものであり、荒天時の砂漣の特性を実際に計測する必要がある。

そこで、本研究では、海底に埋設した超音波送受波器を用いて、静穏時、荒天時に関係なく、砂漣の規模が観測できる装置の開発を検討した。

## 1.2 海底粗度計研究開発の経緯

### (1) 概要

海岸等は、波浪や潮流の影響を受けるため、海底面が変動する。特に砕波帯においては、海底砂は浮遊する。この海底変動によって生じる諸現象を解明するために連続観測が望まれる。しかし、水中からの観測は、砕波等による外力や空気の水中への巻き込み等により、連続観測はもとより、計測センサの維持管理も困難と考えられる。このため、超音波により海底面下から海底の粗度を測定する手法の開発を行った。ここで、問題となる事項は、

- ① 海底面下の超音波の減衰損失と測定周波数の関係
- ② 砂中から水の海底面の境界を判別するための問題の有無
- ③ 砂漣による海底面の凹凸の測定の可否と分解能などである。

### (2) 経過

#### a) 昭和60年度

(昭和60年10月1日～61年3月31日)

予備実験 ・水槽内に砂(平均粒径0.14 mm)を投入して砂層を作り、砂面下20 cmの深さに送受波器を埋設し、砂面を変化させて形状測定を行った。その結果、

- ・砂面の傾斜角30°まで計測可能
- ・砂面の谷、山は角度20°で計測困難。送波のビームを狭くする必要がある。
- ・砂中の音速は1600～1650 m/sであった。

水路実験 ・港研不規則波造波水槽を利用して実験を行った。その結果、

- ・水中から砂漣の測定は可能
- ・砂中から砂面の測定は不可能(含有気泡多く、音波伝搬不可)であることがわかった。

#### b) 昭和61年度

(昭和61年7月1日～62年3月31日)

予備実験 ・港研内に砂を盛土し、パイプレータで(室内実験) 固め、砂中の音波伝搬特性を測定した。

その結果、

音速 150±30 m/s  
伝搬周波数 300～600 Hz  
測定距離 25～40 cm

であった。

- ・S62年3月20日、久里浜海岸の波打際で砂中の音波伝搬特性の測定を行った。その結果、

音速 350±20 m/s  
伝搬周波数 900 Hz～1.2 kHz

であった。

- 本実験 ・S62年3月23日～25日波崎海洋研究施設にて実験を行った。その結果、

- ・海岸での盛土

音速 500～540 m/s  
伝搬損失 33～34 dB-m  
伝搬周波数 520～680 Hz

- ・水面下の砂中の伝搬

音速 1500 m/s

- ・沈埋物(沈船)

音速 1500 m/s

周波数 5～20 kHz

であった。

#### c) 昭和62年度

(昭和62年7月1日～63年3月31日)

室内実験 ・1 m×1 m×1.5 mの水槽内に砂を入れ、砂上にブロックを置き、100～500 kHzのモノパルスで水中から測定したが、水槽壁等、周囲からの反射波が多く、ブロックからの反射波の識別は困難であった。

処理方式の検討 ・測定データの処理方式の検討を行い、ビームスキャンニング及びビームフォーカシングを行うことによって、粗度は計測可能であるとの見通しを得た。

過去のデータの検討 ・過去のデータから空気(又は気泡)の含有している海底下の音速は、150～700 m/sで、伝搬周波数も150 Hz～1.2 kHzと低い。しかし、砕波帯のような常時水が上部にあり、且つ、波等による圧力変化を受ける一般海底面下では

音速 1600～1650 m/s  
減衰定数  $\alpha = 0.04 \sim 0.6 f$  dB-m  
f : 周波数 (kHz)

と考えられることが明確となった。

d) 昭和63年度

(昭和63年7月1日～64年3月31日)

現場実験 ・昭和62年度の海底下の過去の結果を確認すると共に水中から砂澱の測定を行った。その結果、

・砂中の特性

音速 1660 m/s  
 減衰定数 4.5～6.8 dB-m  
 at 20～30 kHz  
 42.5 dB-m  
 at 88 kHz

・砂澱の測定方式の検討、水中から砂澱のリプル測定を円配列の送受波器を用い、実海面でのリプルの測定を行い、測定可能であることがわかった。

粗度計の概略設計 ・以上の実験データ及び机上検討の結果を基に、海底粗度計実用化のために、実機製作の概略設計を行った。

2. 海底粗度計の測定原理と開発イメージ

荒天時においては、従来の海上からの超音波計測では、波による流れ、海底土砂の浮遊、砕波による気泡、漂流物等による超音波伝搬特性へ与える悪影響があり、高精度の計測が不可能なため、超音波送受波器を海底面に埋設して、砂中から海底面の砂澱を測定する計測方式を検討した。

本方式の測定原理は、砕波による気泡、海底土砂の浮遊、漂流物等に起因する超音波伝搬の障害を避けるよう、超音波送受波器を海底面に埋設し、海底面に向けて超音波パルスを送波し、海底面での反射波を受波して、海底面の粗度を測定するものである。すなわち、送波器から、海底砂中の超音波減衰が受波に適当な周波数の超音波パルスを送波し、海底面の粗度に応じた反射の度合いで、超音波パルスが再び砂中を伝搬して受波器に帰着する。その際の送波から受波までの到達時間を測定したり、受波波形を分析することによって、海底面の粗度、すなわち、砂澱のピッチや形状を計測しようとするものである。

このような測定原理を用いた超音波海底粗度計を開発するためには、海底砂層中の超音波の減衰特性や海底粗度と超音波反射特性等の音響特性の究明、ならびに、受波信号処理法や表示法等情報処理システム系の研究が必要となる。

図-17に示すように、海底面下任意の深度に設置した

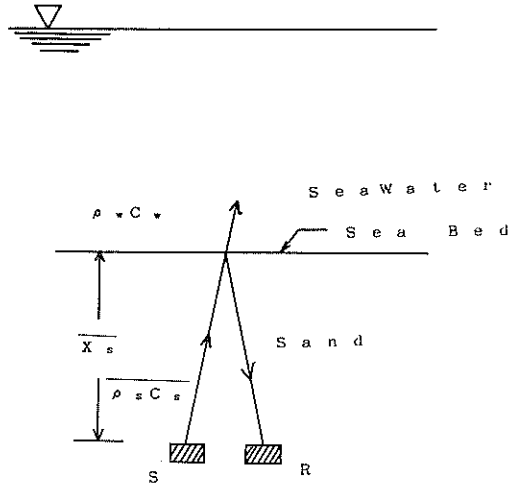


図-17 海底粗度計の測定原理

送波器から放射された超音波パルスは、拡散減衰、砂中吸収減衰等、伝搬減衰しながら海底表面に到達する。ここで、超音波の一部は反射し、一部は透過する。

今、砂の密度  $\rho_s$ 、音の伝搬速度を  $C_s$ 、海水の密度を  $\rho_w$ 、音の伝搬速度を  $C_w$  とする。海底表面における超音波の反射率  $R_s$  は、

$$R_s = \frac{\rho_s C_s - \rho_w C_w}{\rho_s C_s + \rho_w C_w} = \frac{Z_s - Z_w}{Z_s + Z_w} \quad (6)$$

となる。ここに、

$Z_s, Z_w$ : 砂及び海水の固有音響インピーダンスである。反射損失は上式の対数を取り、 $20 \log R_s$  (dB) となる。

砂中を伝搬する(送波器→海底面→受波器)超音波は、砂の減衰定数を  $\alpha_s$  (dB/m)、減衰損失を  $2AL_s$  (dB)、送受波器より海底面までの距離を  $X_s$  とすると、

$$2AL_s = 2\alpha_s X_s \quad (7)$$

だけ減衰して受波器に到達する。この反射・伝搬の模様をソナー方程式で定量的に表してみる。海底砂表面からの反射のエコーレベル  $EL_s$  (dB) は、(6)、(7)式を用いて、

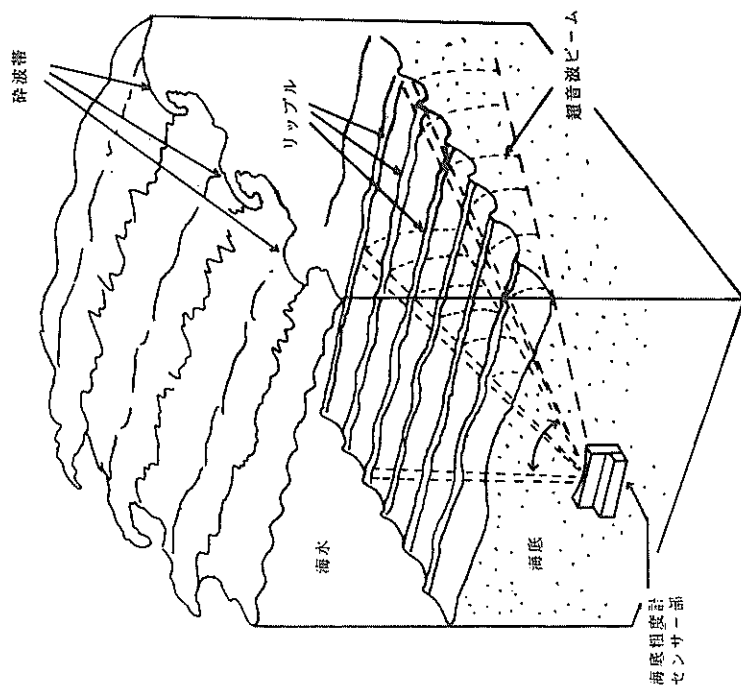
$$\begin{aligned} EL_s &= SL - 2TL_s - 2AL_s - RL_s \\ &= 20 \log P_s - 20 \log 2X_s \\ &\quad - 2\alpha_s X_s - 20 \log R_s \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、

$EL_s$ : 反射音圧レベル (dB)

# 海底粗度計開発イメージ

② 測定状況



③ 海底設置状況

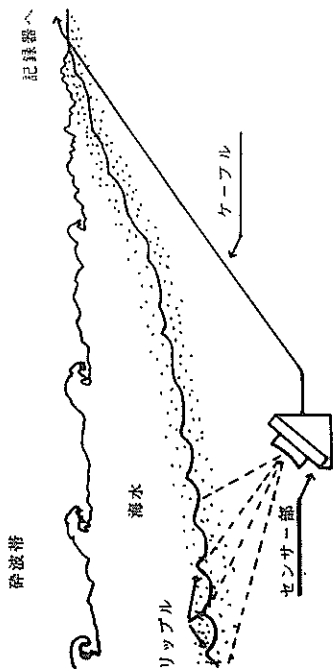


図-18 海底粗度計開発イメージ

- $SL$  : 送波音圧レベル (dB)
- $TL$  : 拡散損失 (dB)
- $AL$  : 砂中の減衰損失 (dB)
- $RL$  : 海底反射損失
- $P_s$  : 送波音圧 ( $\mu\text{bar}$  at 1 m)
- $X$  : 送波器から海底面までの距離 (m)
- $\alpha$  : 砂中の減衰定数 (dB/m)
- $R$  : 海底砂面の超音波反射率

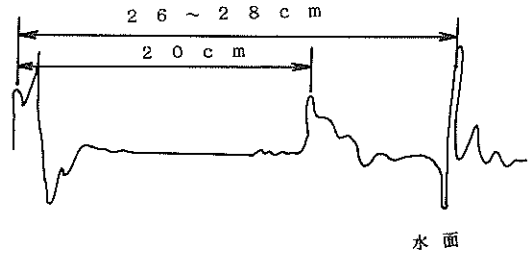


図-19 水面からの反射波形

である。

図-18(a), (b)に海底粗度計の開発イメージの概念図を示す。(a)図に測定状況を示す。碎波帯域の海底砂中の砂の変動のない深度に、海底粗度計センサー部(超音波送受波器部)を設置し、送受波器を任意の角度に傾けて超音波パルスを送波に向けて送受波し、海底面の砂澁の高さ、ピッチを測定する。受波器は、広い範囲の海底情報を得るために、電気的に水平方向 $0 \sim 360^\circ$ 掃引して受波できる。受信した信号出力は、(b)図の海底設置状況に示すように、ケーブルで陸上の観測室にある受信装置に伝送され、所要の信号処理を行って記録・表示部に伝送し、記録・表示する。

### 3. 海底粗度計の開発実験

#### 3.1 室内モデル実験

##### 3.1.1 超音波の減衰に関する予備実験

###### (1) 実験方法

砂中に送受波器を埋設した状態で、砂面及び水面からの反射波が、確認できるかを調べた。

まず、水槽内に標準砂( $d_{50} = 0.198 \text{ mm}$ )を入れ、砂面下20 cmの深さに送受波器を設置した。送受波器は、音源として、電磁誘導型音源、圧電振動子として、P, Z, T,をそれぞれ使用した。そして、60 kHz程度のインパルスを用い、受波された波形から水面、砂面からの反射波のピークを判定した。

まず、水面からの反射波を調べるため、砂面と送受波器との間隔を20 cmと一定にし、水面高を変化させた。

次に、砂面からの反射波を調べるため、水面高さを一定にし、砂面高さを変化させた。

受波された波形には、送受器からの誘導と思われる低周波成分が含まれていることが予想されたので、32 kHzのハイパスフィルタによりろ波した波形もストレージ・スコープに収録した。

###### (2) 実験結果

###### a) 水面からの反射波

水面からの反射波を確認するため、送受波器を水底面より20 cmの深さに埋め込んだ後、水底面と水面の反射

波を確認するため、水面の送受波器からの高さを26 cm, 27 cm, 28 cmと変化させて受信波形を調べた。図-19に送信及び各部からの反射の受信波を示す。

送信から第1受波波形は水面を変化させても、変動せず第2波が26~28 cmの範囲で変動していることがわかり第2波が水面よりの反射波であることを確認した。

###### b) 砂面からの反射

上記の結果より、第1波目が砂面からの反射であることを確認した。

#### (3) 実験結果の考察

予備実験の結果、水面からと砂面からの反射波が受波されることが実験によって明らかとなった。

この実験では、砂面を約1 cmずつ(往復の伝搬距離としては約2 cmずつ)変化させているが、波形の時間的ずれがはっきりとあらわれているので、砂面レベルが正弦的に変化した場合も、受信波形に砂面レベルの変化に対応した形が出てくると考えられる。

##### 3.1.2 砂澁形状測定に関するモデル実験

###### (1) 実験方法及び結果

本研究項目の目的は、底面の砂澁の形状を砂中に埋め込んだ送受波器により検知する方法を検討することである。

水槽内に、砂(平均粒径0.14 mm)を投入して砂層を作り、図-20に示すように、砂中に、送波器とその周辺に4個の受波器を設置して、砂面との距離を20, 21, 22 cmと変化させ、受信波形を調べた。3.1におけると同様に、第1波の移動が確実に受信できている。

そこで、まず、図-21のような斜面を有する砂面をつくり、この斜面を5 mmずつ横にずらして行くことにより受信波形がどう変化するかを調べた。

傾斜の勾配は、 $20^\circ$ ,  $30^\circ$ と変化させた場合について測定した。傾斜砂面の移動方向は、受波器No.3から受波器No.7の方向である。実験によれば受波器No.1, 5については、斜面の形をとらえることができた。しかし、No.3, 7については、受波器感度の指向性に幅があるた



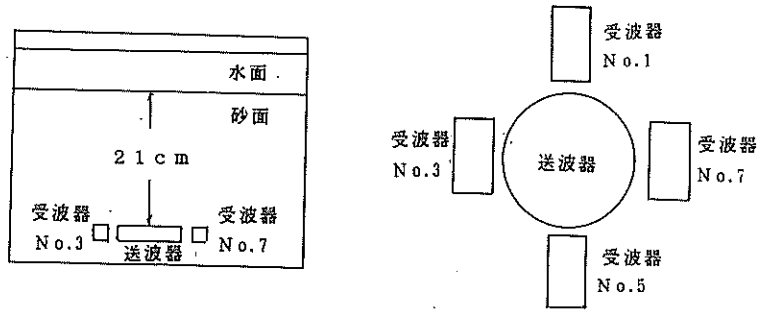


図-20 送受波器の配置 (砂面形状測定)

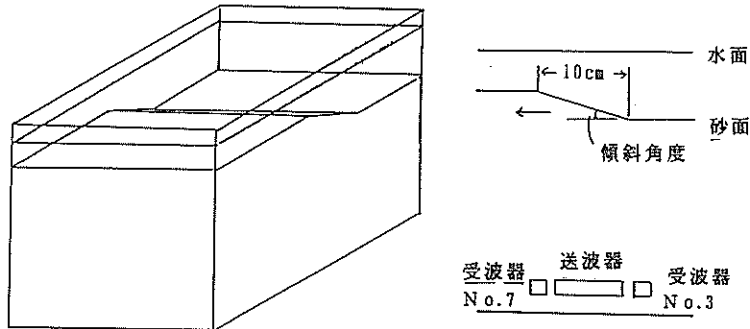


図-21 傾斜砂面形状測定実験配置図

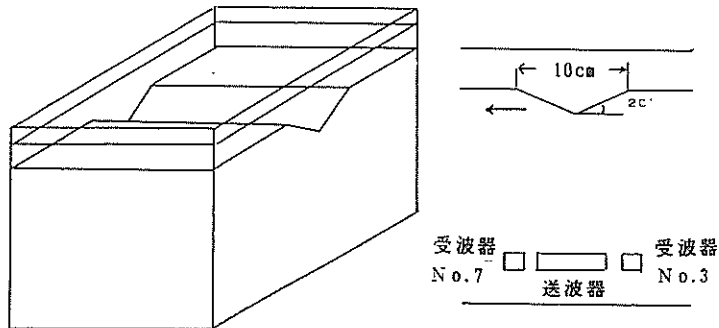


図-22 20° 傾斜谷の形状測定実験配置図

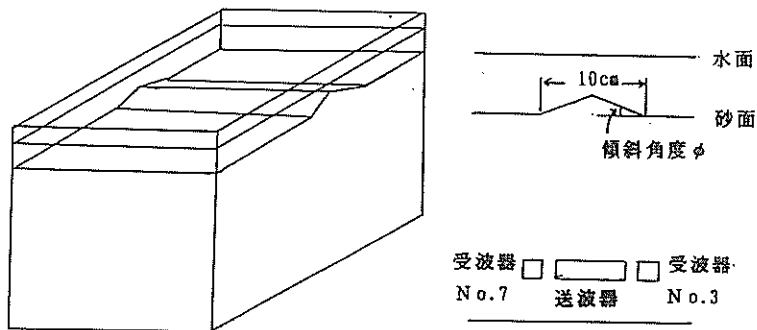


図-23 20° 及び30° 傾斜山の形状測定実験配置図

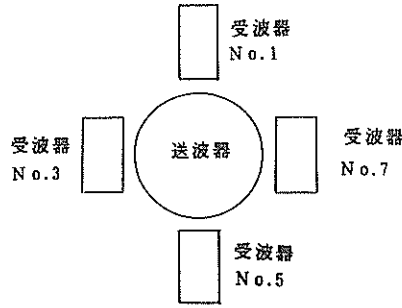
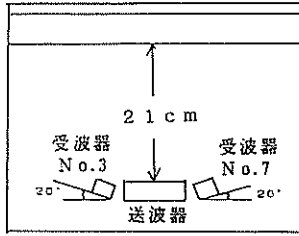


図-24 20°傾斜受波器による砂面形状測定実験

め、正確に斜面の位置をとらえることができなかった。

次に、図-22に示すように、砂面に20°傾斜面をもつ谷をつくり、これを矢印の方向に5mmずつ移動したときの受信波形を調べた。その結果、砂面からの反射波がほとんど受信できなかった。

次に傾斜角が、20°及び30°の山を図-23のように設定し、これを5mmずつ水平方向に移動した場合の受信波形を調べた。その結果、No.7とNo.3は山の立ち上がり部を、明瞭に検知できたが、No.1とNo.5については受波器の指向角が大きいため、山を縮小した形で検知される結果となった。

次に、図-24に示すように受波器を20°だけ傾けた場合の受信波形を調べ、砂面地形の判別能力を調べた。砂面の傾斜が20°の場合、受波器を傾斜しない場合と砂面山形の検知能力はほとんど変わらなかった。

## (2) 実験結果の考察

水槽内に砂(平均粒径0.14mm)を入れて砂層を作り、砂面下20cmの深さに送受波器を埋設し砂面を変化させて形状測定を行った結果、砂面の傾斜面30°までは検知可能である。また、砂面の谷、山は角度が20°になると計測が困難ということがわかり、計測音波のビームを狭くする必要がある。

なお、砂中の音速は1600~1650m/sであった。

### 3.1.3 波により形成された砂澁形状の測定実験

砂澁形状測定に関するモデル実験では、山形の砂面(模擬砂澁)を5mmずつ移動させて計測し、受信波形を調べた結果、山形の両端はかなり正確に測定できることがわかった。これは、波により形成された砂澁においても、峰から峰、或いは谷から谷の距離が判定できる可能性を有することを示しており、砂中埋込式による砂澁波形の測定の可能性を示唆するものである。というのは、波により形成された砂澁の波形勾配は、1/4~1/5と

考えてもさしつかえないからである。

ただし、進行している波の下に存在する砂澁の上には、砂澁自体の影響による乱れのために巻き上げられた高濃度浮遊砂が存在する。このため、砂澁表面が、水と砂との境界として明瞭なものとなっていない可能性がある。砂中からの超音波では砂澁形状が検知されない可能性がある。この問題を調べるため、港湾技術研究所の不規則波造波水路にて、水深約50cmとし、波高12cm、周期1.6秒の波を作用させ、水平床砂面に形成された砂澁の形状を予め埋め込まれた送受波器により測定する実験を行った。しかし、送波器より上方砂中へ向けて発進したパルスの水面・砂面で反射信号は全く受信できなかった。

この原因として、次の4つが挙げられる。

- ① 超音波は、気泡にたいして減衰率が著しく大きいため、砂中に送受波器をセットする時に、気泡が砂粒の隙間にとどまり、発信パルスが途中で吸収されてしまった可能性がある。
- ② 砂中での超音波の減衰率が大きいため信号が途中で消えてしまったことも考えられる。これを確かめるには、さらに大きなパワーの送波器を用いる必要がある。
- ③ 造波水路が鋼鉄できているため、鉄板による反射波が砂中に充満し測定不能となった。
- ④ 超音波発信装置に異常がある。

以上のように、信号が全く帰ってこない原因は種々考えられるが、今後、それらの要因を実験的検討により一つ一つ除いていく必要がある。

### 3.1.4 今後の問題

3.1.2の室内実験の結果、山形の砂面形状は、その水平スケールを十分に検知できることが判明した。しかし、3.1.3の造波水路での実験では、超音波パルスは全

く受信されず、その原因を究明する必要が生じた。

そのためには、

- ① 超音波の反射の少ない FRP などの容器の中に砂、水をいれて実験を行うこと。
  - ② さらに超音波パワーを上げて実験を行うこと。
  - ③ 砂中の気泡について、対策を講じること。
- などについて十分検討する必要がある。

### 3.2 超音波伝搬特性実験

本研究項目の目的は、超音波実験装置の特性を把握するための水槽を用いた予備実験及び現地海岸砂や砕波帯の海底砂の音波反射、伝搬特性把握のための現地実験を行い、実用化のためのデータを把握することである。

#### 3.2.1 予備実験

海底粗度計開発のための予備実験として、港研内小型水槽における砂中の音響特性実験や、港研内コンクリート上盛砂の砂中音波伝搬実験を行った。

##### (1) 港研小型水槽における砂中音響特性実験

本実験は、1×1×1.5 m FRP 製小型水槽を用いて、種々の実験により砂中の超音波の反射、伝搬特性を究明し、海底粗度計開発のための基礎データを得るものである。

##### a) 実験の概要

海底砂中に超音波送受波器を埋設して、砂漣の凹凸を測定する超音波式海底粗度計を開発するには、砂中の超音波パルスの伝搬損失が小さく、分解能のよい音源を用いる必要がある。この必要性に適合した音源として、港湾技術研究所で開発したクロスアレイ型モノパルス超音波探査装置を用いる。音源にモノパルス超音波を用い、砂中の超音波送受波器で海底面の粗度を計るには

- ① 砂漣層の反射率、透過率、音速
- ② 砂層中の残響レベル、多重反射量

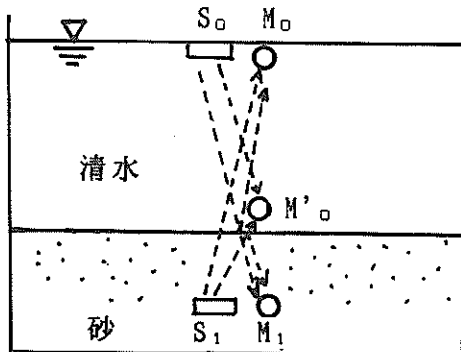


図-25 送受波器の配置

##### ③ 砂層中の空気含有率と音響特性の把握

##### ④ 最適周波数の選定

等を明らかにする必要がある。そこで下記のような実験を行った。

##### b) 実験の内容

図-25に示すように、FRP 水槽の底に、砂 ( $d_{50} = 0.14 \text{ mm}$ ) を約10 cmの厚みになるように入れ、送波器  $S_1$  ( $\phi 50$ の送波器) 及び受波器  $M_1$  を砂中に埋設し、水槽に脱気水を入れて、水面近くに送波器  $S_0$  ( $\phi 100$ 送波器) 及び受波器  $M_0$  (標準ハイドロホン) を設置した。使用した機材の特性を表-1に示す。

##### c) 実験計測機器の構成

###### ・計測ブロック図

図-26に計測ブロック図を示す。

###### ・機器の構成

###### 音源

モノパルス高圧送信器	1式
モノパルス送波器 ( $\phi 100$ )	1台
モノパルス送波器 ( $\phi 50$ )	1台
受波器 (標準ハイドロホン円筒型)	1個
受波器 (5 cm × 5 cm × 5 cm角型)	1個
ろ波、増幅器	1台
メモリースコープ	1台
ポラロイドカメラ	1台

##### d) 実験結果

実験の結果を表-2(a)~(e)に示す。

表-1 砂中音響特性実験(港研小型水槽)使用機材特性  
(a) 送波器

送波器	型式	コンデンサ容量 ( $\mu\text{F}$ )	送波レベル (dB-m)	周波数 (kHz)	半減角 ( $^\circ$ )
送波器 $S_0$	モノパルス $\phi 100$	40	89	7.1	84
		5	90	12.5	48
送波器 $S_1$	モノパルス $\phi 50$	5	73	9.1	132

##### (b) 受波器

受波器	型式	受波感度 (dB re $V/\mu\text{bar}$ )
受波器 $M_0$	標準ハイドロホン円筒型	-115
受波器 $M_1$	5×5×5 cm角型	-103

表-2 港研小型水槽砂中音響特性実験結果

(a) 透過波測定 ( $S_0 \rightarrow M_1$ ) 水面から砂中へ

送波器	コンデンサ容量 $C$ ( $\mu F$ )	$f_1$ (kHz)	$SL$ (dB·m)	$x$ (m)	$TL$ (dB)	$RL$ (dB)	$E_s$ (mV)	$EL$ (dB)	$AL$ (dB)	$\alpha$ (dB/m)	$\int f$ (kHz)	備考
$S_0$ (100φ)	40	7.1	89	1.05	0.42		3.0	52.5	36.0	72.1		砂厚50 cm 10 kHz~100 kHz
$S_0$ (100φ)	40	7.1	89	1.05	0.42		0.3	32.5	56.0	112.1		砂厚50 cm 10 kHz~10 kHz

(b) 透過波測定 ( $S_1 \rightarrow M_0$ ) 砂中から水面へ

$S_1$ (50φ)	40	9.1	73	1.05	0.42		0.1 (-80 dB)	35.0	37.6	75.2		10 kHz~10 kHz
$S_1$ (50φ)	40	9.1	73	1.05	0.42		0.05 (-86 dB)	29.0	43.6	87.2		10 kHz~10 kHz
$S_1$ (50φ)	5	9.1	73	1.02	0.17		0.8 (-61.9 dB)	53.1	19.8	39.5		10 kHz~100 kHz

(c) 透過波測定 ( $S_1 \rightarrow M_0$ ) 砂中から砂面へ

$S_1$ (50φ)	40	9.1	73	0.51	-5.8		0.3 (-70.5 dB)	44.5	34.3	68.5		10 kHz~100 kHz
$S_1$ (50φ)	5	9.1	73	0.48	-6.4		0.5 (-66 dB)	49.0	30.4	60.8	33.3	10 kHz~100 kHz

(d) 砂面反射波測定 ( $S_0 \rightarrow M_0$ )

$S_0$ (100φ)	5	12.5	90	0.54	0.67	1.5	43.7 (-27.2 dB)	87.8				10 kHz~100 kHz
$S_0$ (100φ)	5	12.5	90	0.54	0.67	14.3	10.0 (-40 dB)	75.0				10 kHz~10 kHz
$S_0$ (100φ)	40	7.1	89	0.54	0.67	-9.0	130.0 (-17.7 dB)	97.3				100 kHz~100 kHz

$$RL = SL - 2TL - EL$$

(e) 砂中から砂面反射波測定 ( $S_1 \rightarrow M_1$ )

$S_1$ (50φ)	40	9.1	73	0.6	-4.4	16.3	8.0 (-41.9 dB)	61.1				10 kHz~100 kHz
$S_1$ (50φ)	40	9.1	73	0.6	-4.4	-3.7	80.0 (-21.9 dB)	81.1				10 kHz~100 kHz
$S_1$ (50φ)	40	9.1	73	0.6	-4.9	-8.0	140.0 (-17.1 dB)	85.9				10 kHz~100 kHz

\*  $RL + AL$  (dB)

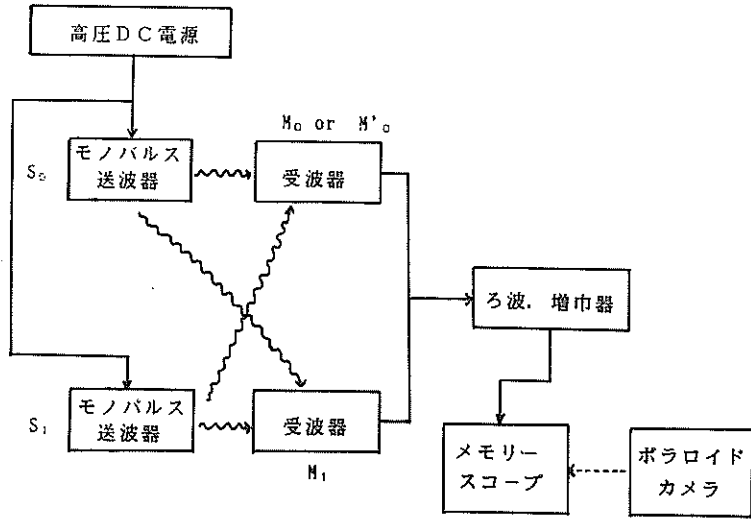


図-26 計測システムブロック図

(2) 盛砂の音波伝搬実験

砂の中に含まれる空気含有率が、音波伝搬に及ぼす影響を検討するために、コンクリート製の床の上に乾燥した砂を山盛りにし、砂中の下側にモノパルス送波器を、上側に受波器、または加速度計のセンサーを設置して、砂中音波伝搬特性を測定した。

a) 実験の概要

図-27に示すように、コンクリート製の床の上に乾燥したふるい分砂 ( $d_{50}=0.1\text{ mm}\sim 2.0\text{ mm}$ ) を用い、高さ約50 cmに盛り上げ、パイプレタで締め固めた。この盛砂の中に、図に示すような配置でモノパルス送波器S及び受波器  $M_1$ ,  $M_2$ , 加速度計Aを埋設した。

使用した実験用機材は次の通りである。

- ・高圧送信機 1台
- ・モノパルス送波器 ( $\phi 100$ ) 1台

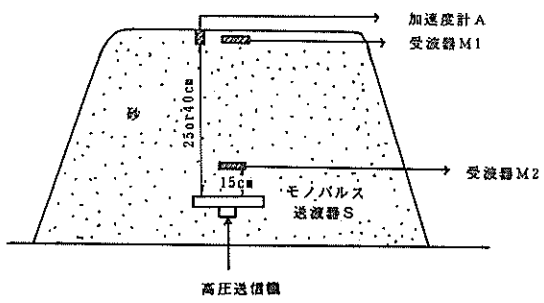


図-27 盛砂の送受波器の配置

- ・受波器 (標準マイクロホン TW-9103) 1個
- ・受波器 (標準マイクロホン TM-4409) 1個
- ・加速度計 (TEAC) 1個
- ・直流増幅器 1台

b) 実験結果

実験の結果を表-3に示す。

3.2.2 現地実験

海底の砂中から砂面に音波を放射し、海底面の砂面の移動、リップル等を測定するための基礎実験として、音波の伝搬実験を、久里浜海岸波打際及び波崎海洋研究施設において行った。

(1) 久里浜海岸波打ち際における音波伝搬実験

実海岸の砂の音波伝搬特性を検討するために、久里浜海岸波打ち際の砂を対象に、干潮時に送受波器を砂中に設置し、満潮時に測定することにより実施した。実施海面は図-28に、送受波器及び測定装置の配置を図-29に示す。

a) 実験概要

干潮時に砂が露出した場所に受波器Mを約30 cmの深さに埋め込み、その砂上に送波器Sを設置した。図-30に設置状況を示す。満潮時にこの状態で音波伝搬特性実験を行った。

送信電圧Eは700V、コンデンサー容量Cが40  $\mu\text{F}$ のときのモノパルス超音波を使用した。このときの水中での送波レベルSLは86.4 dB-m、送波周波数fは6.6 kHz、水中音速  $C_w=1499\text{ m/s}$ であった。

表-3 盛砂の音波伝搬特性

送信電圧 $E_s$ (V)	コンデンサ容量 $C_c$ (μF)	受波器	測定距離 $x$ (m)	音速 $C_s$ (m/s)	受波器出力電圧 $V_L$ (dB)	伝搬周波数 $f_c$ (kHz)	測定帯域 $\Delta f$ (kHz)	送波レベル $SL$ (dB-m)	拡散損失 $TL$ (dB)	受波レベル $EL$ (dB)	減衰損失 $AL$ (dB)	減衰定数 $\alpha$ (dB/m)	
1500	60	TW-9103	0.4	160	-38.4 (12 mV)	333	0.1~20	107.5	-8.0	73.6	41.9	104.8	
1500	60	加速度計	0.4	160	-13.5 (2.1 G)	500							
1000	260	TW-9103	0.4	125	-37.6 (13.2 mV)	330	0.1~20	103.5	-8.0	74.4	37.1	92.8	
1000	260	加速度計	0.4	154	-14.0 (2.0 G)	455							
1500	60	TW-9103	0.25	156	-33.7 (20.7 mV)	294	0.1~20	107.5	-12.0	78.3	41.2	164.8	砂山を20 cm削り取って低くした。
1500	60	加速度計	0.25	139	-9.9 (3.2 G)	250							
1000	260	TW-9103	0.25	167	-39.7 (10.4 mV)	286	0.1~20	103.5	-12.0	72.3	43.2	172.8	
1000	260	加速度計	0.25	147	-14.9 (1.8 G)	308							
				152		283							

減衰損失  $AL = SL - TL - EL$  (dB)  
 受波感度 標準マイク:  $k_m = -112$  dB (V/μbar)  
 加速度計: 100 mV/1 G

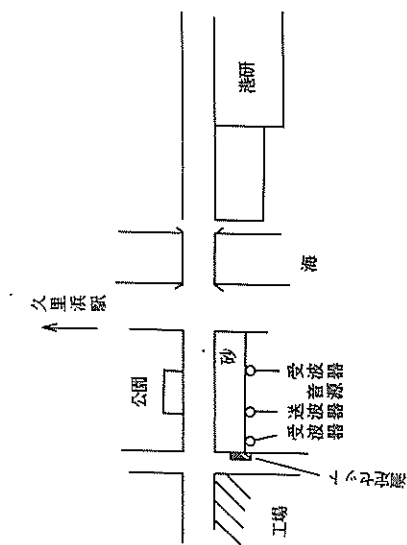


図-28 実験実施海面

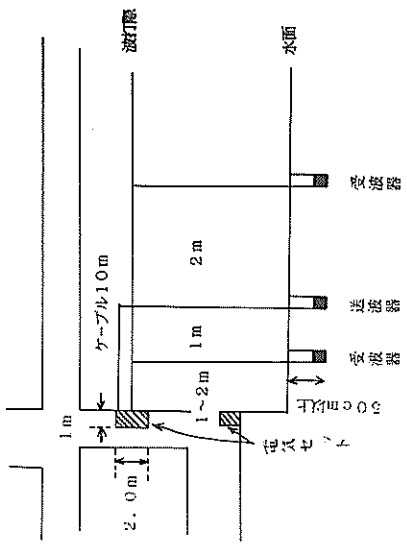


図-29 送受波器等の配置

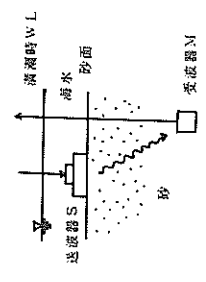


図-30 送受波器設置状況

## b) 実験結果

表-4に実験結果を示す。

### (2) 波崎海洋研究施設における音波伝搬実験

実海域の砕波帯における海底砂の音波伝搬特性を検討するために、波崎海洋研究施設の砕波帯総合観測用栈橋付近の海底砂の音波伝搬実験を行った。

#### a) 実験概要

実験の行われた場所は、図-31に示すように茨城県鹿島郡波崎町須田浜地先にある港湾技術研究所の波崎海洋研究施設の砕波帯総合観測用栈橋である。(写真-1、写真-2)。

測定項目は

- ① 砂中の伝搬損失の測定
- ② 砂に水を含んだ状態での伝搬損失及び反射損失の測定
- ③ 水中での伝搬損失と反射損失の測定

の三項目である。①は波打際の潮の干潮に影響をされないで、水を含まない砂の音の減衰や音速など、伝搬特性を測定するのが目的である。②は①よりも海側に近い波打際の比較的水を含んだ砂の伝搬損失や反射損失を測定するのが目的である。③は砕波帯で常時海底砂の上に海水がある場所の水中での伝搬損失や反射損失を測定するのが目的である。

#### イ) 測定位置

図-31は実験に使用した観測用栈橋の全体図である。図中の①、②、③は測定位置で、各々前述の測定項目と対応している。③'は、③と同じく常時海底上に海水がある砕波帯での伝搬損失と反射損失の測定であるが、異なるところは③'は沖合いの海底砂に自然に沈埋している物体(昭和初期に沈んだ船)を反射体として、自然のままの海底砂の音波伝搬特性や、海底砂表面の反射損失を測定して、海底粗度計実用化の基礎データを得ることを目的としたものである。

#### ロ) 実験用機材

実験に使用した機材は、下記の通りである(写真-3)。

・ 高圧送信機	1台
・ コンデンサーボックス	1台
・ モノパルス送波器(φ200)	1個
・ 受波器	2個
・ 加速度計	1個
・ 低周波増幅器	1台
・ ファンクションジェネレータ	1台
・ MT	1台
・ シンクロスコープ	1台

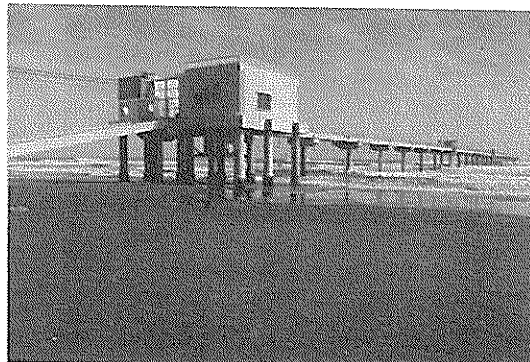


写真-1 波崎海洋研究施設の全景



写真-2 砕波帯の砕波状況



写真-3 測定機器

#### ハ) 測定要領

測定項目の測定要領は、音速  $C_s$  測定にあつては、送受波器間隔  $L$  を伝搬時間  $t$  で除した値を用いた。即ち、

$$C_s = \frac{L}{t} \quad (\text{m/sec}) \quad (9)$$

伝搬損失  $TL$  の測定にあつては、受波出力電圧  $E_R$  を測定して、下記方式で伝搬損失  $TL$  (dB) を求めた。

表-4 久里浜海岸波打際砂中音波伝搬特性実験結果

送信電圧 $E_s$ (V)	コンデンサ容量 $C$ ( $\mu$ F)	受波器感度 $P_m$ (dB)	測定距離 $x$ (m)	音速 $C_s$ (m/s)	受波器出力電圧 $V_L$ (dB)	伝搬周波数 $f_p$ (kHz)	測定帯域 $\Delta f$ (kHz)	送波レベル $SL$ (dB)	拡散損失 $FL$ (dB)	受波レベル $EL$ (dB)	減衰損失 $AL$ (dB)	減衰定数 $a$ (dB/m)	
700	40	-112	0.316	373	-76.5 (150 $\mu$ V)	1.2	~10	86.4	-10.0	35.5	60.9	192.7	海岸砂
700	40	-112	0.36	360	-66.0 (500 $\mu$ V)	0.909	~10	86.4	-8.9	46.0	49.3	136.9	"
700	40	-112	0.50	308	-74.9 (180 $\mu$ V)	1.0	~10	86.4	-6.0	37.1	55.3	110.6	"
700	40	-103	0.447	344	-72.0 (250 $\mu$ V)	0.909	~10	86.4	-7.0	31.0	62.4	139.6	"
700	40	-103	0.53	353.3	-78.4 (120 $\mu$ V)	1.0	~10	86.4	-5.5	24.6	67.3	127.0	"
				346.7		1.0						141.4	平均
700	40	-112	2.62	1497	-34.0 (20 mV)	6.6	~10	86.4	8.4	78.0	0	0	水中
700	40	-111	2.175	1500	-31.2 (27.5 mV)	6.6	~10	86.4	6.7	79.7	0	0	"

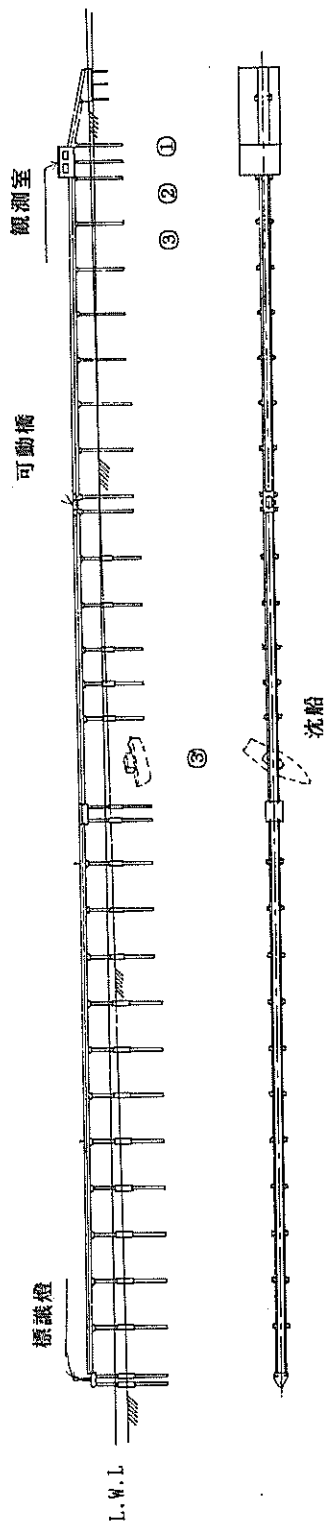


図-31 波崎海洋研究施設現地実験配置図



$$TL = 20 \log L = 20 \log \frac{E_R}{E_0} \quad (10)$$

$E_0$  : 水中の出力電圧

伝搬周波数  $f_R$  の測定にあつては、受信波形のパルス幅から求めた。すなわち、図-32に示すようにシクロスコープの波形のパルス幅（一波長）の長さ（時間）から下記式を用いて求めた。

$$f_R = \frac{1}{t} \text{ (kHz)} \quad (11)$$

となる。

測深値  $D$  (m) の測定はシクロスコープの送受信波形の所要時間  $t$  から下記式を用いて求めた。

$$D = \frac{1}{2} C_p t \text{ (m)} \quad (12)$$

$C_p$  : 音速

## 二) 測定項目の測定方法

①～③の各測定項目の測定方法は下記のとおりである。

### ①伝搬損失の測定（砂中）

図-33のように波打際に深さ20 cmの穴を掘り、モノパルス送波器  $S_0$  を埋設し、砂上にマイクロホン  $M$  を置き測定する。上記の測定後約40 cm土盛りを行い、図-34のようにして同様に測定を行う。

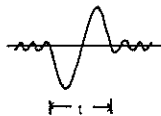


図-32 伝搬周波数の求め方

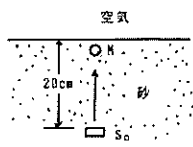


図-33 海底砂の測定

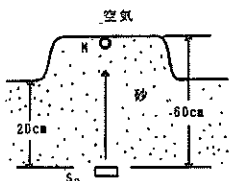


図-34 海岸盛砂の測定

### ②伝搬損失及び反射損失の測定（砂+水）

図-35のように波打際に穴を掘り  $S_0$  及び  $M$  を埋設し、埋設後測定を行う。18時間後再度砂面からの反射を測定した後上部に図-36のように土盛りを行つて（伝搬損失+反射損失）を測定した。

### ③水中での伝搬損失+反射損失の測定

図-31の③の位置でダイバーによりジェット水流により水深約70 cmの海底面から約50 cm吊り下げ、図-37のように  $S_0$ 、 $M_1$  を埋設し水中での透過及び反射損失を測定する。

次に図-31の③'位置で海底面を攪乱することなく海底面下約4 mに埋設していると考えられる沈船を目標とし水中及び海底から図-38のようにして測定を行い、伝搬損失を測定した。

### b) 実験内容及び実験結果

#### イ) 測定用送受波器の特性

この実験に使用した機器の特性を表-5及び付図-1. 1. 1. 2に示す。

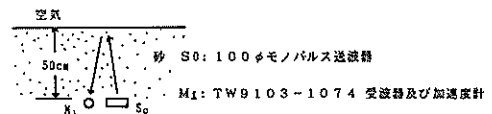


図-35 水を含んだ海岸砂の測定

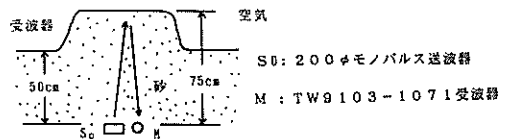


図-36 水を含んだ海岸盛砂の測定

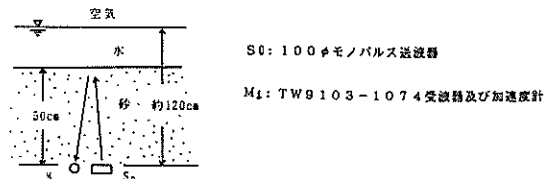


図-37 上に海水がある場合の海底砂の測定

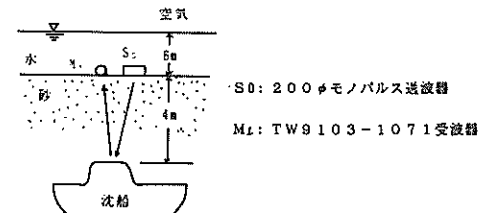


図-38 海底沈埋物（沈船）の測定

表-5 海底砂音波伝搬実験（波崎海洋研究施設）使用  
機材特性

(a) 送波器

型式	送信電圧E, (V)	コンデンサ容量C ( $\mu$ F)	送波レベルSL (dB-m)
モノパルス $\phi$ 100	1500	60	107.5
	1000	260	103.5
モノパルス $\phi$ 200	1500	60	96.7
	1000	260	90.0

(b) TW-9103型受波器

受波器 No	受波感度 (dB re V/ $\mu$ bar)
No. 1051	-112
No. 1071	-112
No. 1074	-110

(c) 加速度計

共振周波数 (kHz)	20
感度 (mV/G)	100

ロ) 水のない砂面の音波の伝搬特性実験

波打際の水のない海岸砂に約20 cmの穴を掘り、図-33のように $\phi$ 100モノパルス送波器を埋設し砂面に受波器(TW9103-1074受波器及び加速度計)を置き、砂をかけて固定した(写真-4)。なお、砂中に一部海水を含んでいることが観察された。この測定の結果を表-6(a)及び付図-2.1, 2.2に示す。

上記の実験終了後、測定した砂面の上にさらに砂を40 cmかけ砂層を盛り上げ叩き固めて、同様な測定を行った(写真-5)。測定結果を表-6(a)及び付図-2.3に示す。

この時の主な特性は、

- ・伝搬の音波の周波数 555 Hz~685 Hz(埋設の時)  
526 Hz~283 Hz(盛砂の時)
- ・伝搬損失 20 dB (埋設の時)  
24 dB (盛砂の時)
- ・音速 500~540m/s (埋設の時)  
187~176m/s (盛砂の時)

である。

盛砂の時伝搬損失が増え、伝搬周波数及び音速が低下したのは、土盛時に比較的水分の少ない空気を含んだ砂を上部にのせたからであると考えられる。

ハ) 波打際における砂中からの反射

波打際の砂面から50 cm掘り下げ $\phi$ 100モノパルス送



写真-4 波崎海岸波打際の送受波器埋設状況

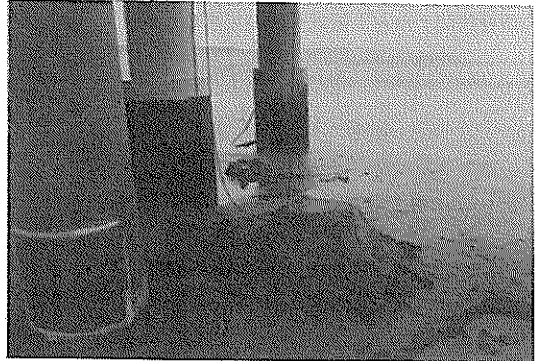


写真-5 盛砂の造成状況

波器及び受波器を埋設し、砂面からの反射波を受波した。この様子を図-35に示す。

付図-3.1に示すように、砂中に海水が浸水しているのが観察された。この場合2 msと6~8 msに反射波がみられ6~8 msの波形は250~312 Hzの受信波で2 msの所に比して明瞭に出ている。6~8 msの波形が砂面からの反射で、2 msは砂中の層(砂と水)からの反射と考えられる。

このときの反射特性を表-6(b)(その1)に示す。

上記の状態に更に砂を盛り上げ送受波器と砂面の間隔を約75 cm(図-36)として測定した結果を表-6(b)(その2)及び付図-3.2に示す。結果は、周波数が低く幾つかの波が重畳して伝搬時間の判断が不明確であった。常に明瞭に認定できるのは1.4 msと6 msの所に生じる反射波である。1.4 msに生じる反射波は、砂中に存在する水の層からの反射で、6 msの反射波が、砂面からの反射波と推定される。

また、分解能を向上させる為にろ波器を5 kHz以上で測定したところ、付図-3.3に示すように反射波が得られなかった。これと同一条件で録音し、ろ波器の周波数帯域を5 kHz~20 kHzと100 Hz~20 kHzに変えて測定

表-6 波崎海洋研究施設音波伝播特性実験結果

(a) 砂中の音波伝播実験 空気+砂 (フラット) 及び (山盛)

送信電圧 $E_s$ (V)	コンデンサ容量 $C$ ( $\mu$ F)	測定距離 $x_c$ (m)	音速度 $C_s$ (m/s)	受波器出力電圧 $V_L$ (dB)	伝播周波数 $f_p$ (kHz)	測定帯域 $\Delta f$ (Hz~kHz)	送波レベル $SL$ (dB)	拡散損失 $TL$ (dB)	受波レベル $RL$ (dB)	反射損失 $RL$ (dB)	減衰損失 $AL$ (dB)	減衰定数 $\alpha$ (dB/m)	
1500	60	0.2	500	-22.5 (75 mV)	0.555		107.5	-14.0	87.5		34.0	170.0	
1500	60	0.2	540	-22.5 (75 mV)	0.685		107.5	-14.0	87.5		34.0	170.0	
1500	60	0.6	187	-28.5 (37.5 mV)	0.620		107.5	-4.4	87.5		34.0	170.0	平均
					0.526		107.5		83.5		28.4	47.3	空気+砂 (山盛)

(b) 砂中における反射特性実験 (その1) 空気+砂 (フラット)

1500	60	0.5	500	-41.4 (8.5 mV)	0.312	100 Hz~	107.5	0	68.6	0	38.9	38.9	
1500	60	0.5	500	-46.0 (5.0 mV)	0.312	100 Hz~	107.5	0	64.0	0	43.5	43.5	
			500		0.312				66.3		41.2	41.2	平均

(b) 砂中における反射特性実験 (その2) 空気+砂 (山盛)

1500 (200 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.75	268	-37.0 (14 mV)	0.562	100 Hz~	96.7	3.5	75.0	0	18.2	12.1	
1500 (200 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.75	250	-30.5 (30 mV)	0.547	100 Hz~	96.7	3.5	81.5	0	11.7	7.8	
1500 (200 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.75	250	-34.0 (24 mV)	0.430	100 Hz~	96.7	3.5	78.0	0	15.2	10.1	
1500 (200 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.75	250	-34.4 (19 mV)	0.430	100 Hz~	96.7	3.5	77.6	0	15.6	10.4	
1500 (200 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.75	-	-	-	5 kHz ~20 kHz	96.7	3.5	-	0	-	-	
1500 (200 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.75	-	-	-	5 kHz ~20 kHz	96.7	3.5	-	-	-	-	
			255	-34.0	0.492				78.0		15.2	10.1	平均

(b) 砂中における反射特性実験 (その3) 空気+水+砂

送信電圧 $E_s$ (V)	コンデンサ容量 $C$ ( $\mu F$ )	測定距離 $x$ (m)	音速度 $C_s$ (m/s)	受波器出力電圧 $V_L$ (dB)	伝搬周波数 $f_r$ (kHz)	測定帯域 $\Delta f$ (Hz~kHz)	送波レベル $SL$ (dB)	拡散損失 $TL$ (dB)	受波レベル $EL$ (dB)	反射損失 $RL$ (dB)	減衰損失 $AL$ (dB)	減衰定数 $\alpha$ (dB/m)
1500 (100 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.5	1500	-44.0 (6 mV)	5.0	5 kHz ~20 kHz	107.5	0	65.6	10.0	31.9	31.9
1500 (100 $\phi$ )	60 (6.3 kHz)	0.5	1500	-27.0 (45 mV)	5.6	100 Hz ~20 kHz	107.5	0	83.1	10.0	14.4	14.4
1500	60	0.5	1500	-	-	100 Hz ~20 kHz	107.5	0	-	-	-	-
1500	60	0.5	1500	-33.6 (23.5 mV)	10.0	5 kHz ~20 kHz	107.5	0	77.4	10.0	20.1	20.1
1500	60	0.5	1500	-28.0 (40 mV)	10.0	5 kHz ~20 kHz	107.5	0	82.0	10.0	15.5	15.5
			1500	-33.2	7.7				77.0		19.5	20.5
平均												

(b) 砂中における反射特性実験 (その4) 水+砂+沈船

1500 (200 $\phi$ )	60 (3.6 kHz)	1.80	1500	-26.9 (45 mV)	0.5	100 Hz ~20 kHz	96.7	5.1	85.1	1.1	5.4	1.5	砂上
1500 (200 $\phi$ )	60	1.88	1500	-39.6 (10.5 mV)	5.0	5 kHz ~20 kHz	96.7	5.5	72.4	1.1	17.7	4.7	"
1500	60	1.88	1500	-23.1 (70 mV)	0.5	300 Hz ~20 kHz	96.7	5.5	88.9	1.1	1.2	0.3	"
1500	60	1.80	1500	-35.1 (17.5 mV)	6.0	5 kHz ~20 kHz	96.7	5.1	76.9	1.1	13.6	3.8	"
1500	60	3.90(海底) 5.93(船)	1500	-40.0 -40.2	5.0	5 kHz ~20 kHz	96.7	17.8 21.5	71.8 72.0	7.1(海底) 1.1(船)	2.1	0.2	水中吊下
1500	60	2.25	1500	-46.0 (5 mV)	5.0	5 kHz ~20 kHz	96.7	7.0	66.0	1.1	22.6	5.0	砂上
平均													
0.9(0.5k) 4.5(5k)													

※ 反射損失は計算値



写真-6 海岸砂音波伝搬実験

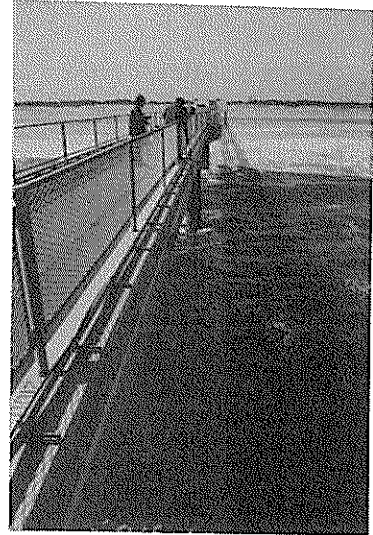


写真-7 沈船音波探査状況

して比較した結果を付図-3.4に示す。明らかに低周波域を含む100 Hz~20 kHzの周波数帯域の方が400 Hzの反射波が得られていることわかる。

#### 二) 海底下の砂中に埋設した砂面からの反射

水面下50 cm~70 cmの海底をダイバーにより約50 cm掘り、送受波器を埋設し砂面からの反射波を測定した。この様子を図-37に示す。測定位置は図-31の③の位置で栈橋の陸側から約50 mの満潮時、海底砂が海水下に没する場所である。実験結果を表-6(b) (その3)及び付図-4.1, 4.2に示す。

付図-4.1は5 kHz~20 kHzの帯域の受信波形で、付図-4.2は100 Hz~20 kHzの広帯域の受信波形である。

付図-4.1に示すように5~6 kHzの周波数成分は充分透過し、しかも音速は約1500 m/sと認められた。音速1500 m/sとすると砂面は52.5 cm、水面は120 cmの所に送受波器があると考えられ、初期の設定値と合致する。

次に、付図-4.2に示すように周波数帯域を広くすると低周波成分が強調され、目標の分解能力が低くなる。低周波の場合、受信信号の位相の変化に注目して、反射波の有無を判断する必要があることが分かった。また、付図-4.2は、埋設直後と30分経過後の受信波形を表すが、後者の方が砂面の反射波形の位置を認めることが容易である。これらより、伝搬周波数が10 kHzであることが分かった。

加速度計による結果を付図-4.3に示すが、音圧方式と同様の結果が示されている。

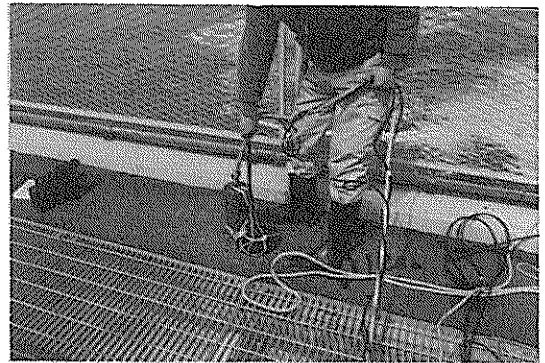


写真-8 沈船探査の送受波器

以上の結果、音速は約1500 m/sであり、分解能も良好であった。

#### ホ) 海底沈埋物の探査

前項までは海底面や砂面を掘削、埋め戻した、いわゆる人工的に加工した状態での計測であった。本項では長時間海底に埋没していた物体の探査であって、自然状態における埋設物探査実験で、実用機を設計する上で貴重なデータを得ることができた(写真-7, 写真-8)。

沈埋物は海底下4 m付近に沈没した船の残骸であると考えられ、これを目標として海中に受波器を吊下した状態と海底に送受波器を設置した時(図-38)について測定を行った。測定位置は、図-31の栈橋で陸側から約220 mの所、栈橋のちょうど半分くらい場所で栈橋に対して直角に横断した形で沈没している海域である。測定の結果を付図-5.1に示す。音速は約1500 m/sで、周

波数帯域は広い地域で500 Hz～1 kHzが受信できたが低周波では分解能が悪い。

そこで、受信帯域を5 kHz～20 kHzとすると5～6 kHzの周波数で充分受信可能であった。付図-5.2及び表-6(b) (その4) にその結果を示す。受信波形を見ると2.4 ms (180 cm), 4.6 ms (345 cm), 8.2 ms (615 cm) に反射波形 (付図-5.2下参照) があるが、8.2 msは明らかに水面からの反射で2.4 msの反射は船のブリッジ部、4.6 msの反射は船のデッキ部からの反射と考えられる。この結果から海底下埋設物をモノパルス音波で充分探査できることがわかると共に海底下の音波伝搬を利用する海底粗度計の実用化の可能性も得られた。

### 3.2.3 実験結果の考察

以上、港研小型水槽における砂中音響特性モデル実験、港研内盛砂の音波伝搬実験などの室内モデル実験や、久里浜海岸波打際における音波伝搬実験、波崎海洋研究施設における音波伝搬実験等の現地実験の結果を述べたが、これら個々について検討を加え、最後に総合的にとりまとめて考察する。

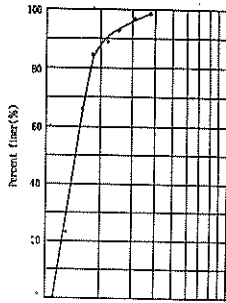


図-39 供試砂の粒径加積曲線

### (1) 供試砂土質分析結果

各項目の検討に入る前に、各々の実験の対象になった供試砂の土質分析結果について延べ、検討を加える。

#### a) 港研小型水槽における砂中音響特性モデル実験の供試砂

図-39は供試砂の粒径加積曲線である。50%粒径0.14 mm、均等係数が1.33で比較的均等径の砂である。均等径の砂の間隔比  $\varepsilon$  は1.00～0.50の範囲であるが、砂を水槽中にゆるやかに投入したことを考慮して、その中間をとって間隔比  $\varepsilon$  を0.75とすると、間隔比  $n=42\%$  となる。

#### b) 港研内盛砂の音波伝搬実験の供試砂

供試砂の粒径加積曲線を図-40に示す。粒径を0.1 mm～2.00 mmの範囲でふるい分けした砂で50%粒径が0.61 mmである。60%粒径が0.4 mm、10%粒径が0.27 mmで均等係数2.74の比較的粒度分布のよい砂で間隔比  $\varepsilon$  が0.70～0.30の範囲である。盛砂を作る際、パイプレータで砂を叩いて締め固めたもので、間隔比は非常に少なくなっており  $\varepsilon$  は0.3以下であると考えられる。したがって間隔率  $n$  は23%程度と考えられる。

#### c) 久里浜海岸波打際における音波伝搬実験の供試砂

図-41に供試砂の粒径加積曲線を示す。図-42に示す位置で採取した、測定位置とほぼ同じ場所の砂である。平均の50%粒径は0.262 mmで平均係数が2.621であ

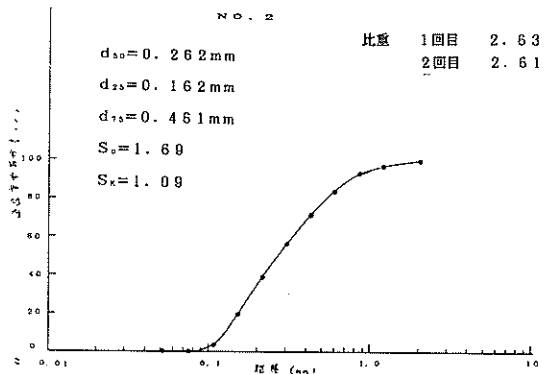


図-41 久里浜海岸砂の粒径加積曲線

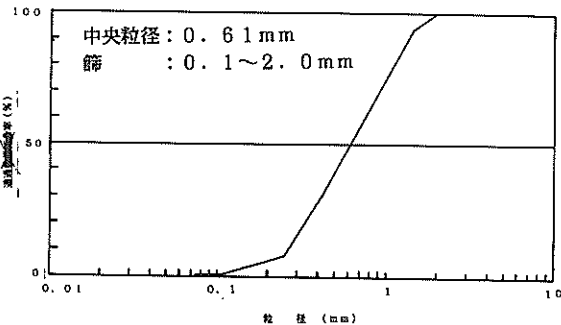


図-40 盛砂の粒径加積曲線



図-42 砂採取位置

る。砂の真比重  $G_s$  は 2.67 であった。中程度の砂の締め具合として間隙率  $\varepsilon$  を 0.5 と仮定すると間隙率  $n$  は 33%、密度は  $2.15 \text{ g/cm}^3$  となる。

d) 波崎海洋研究施設における音波伝搬実験の供試砂  
イ) 波打際の供試砂

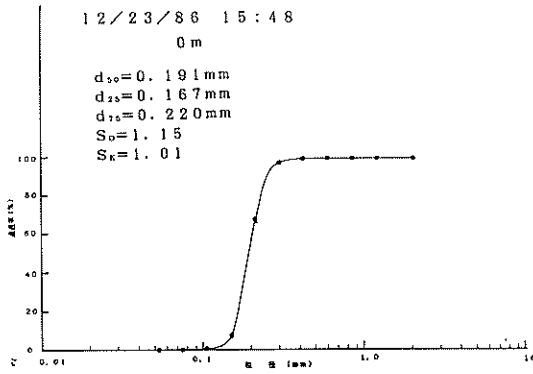


図-43 波崎海洋研究施設の波打際の砂の粒径加積曲線

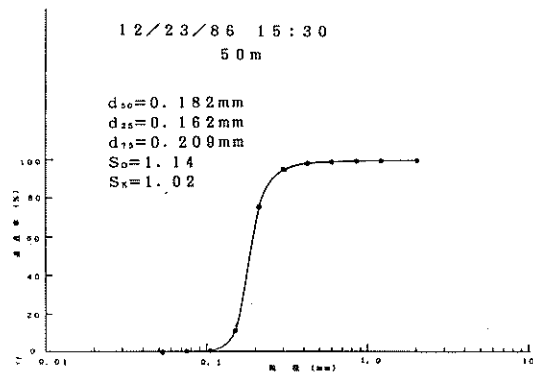


図-44 砕波帯海底砂の粒径加積曲線

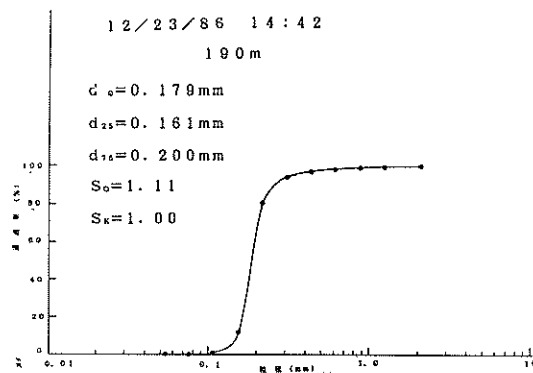


図-45 沈埋物のある海底砂の粒径加積曲線

波打際の音波伝搬実験を行った場所の供試砂の粒径加積曲線を図-43に示す。50%粒径は0.191 mmで、均等係数は1.333であった。砂の締め具合を(a)の場合と同様に考えると、間隙比  $\varepsilon$  は同じく0.75で間隙比  $n$  も約42%と考えられる。

ロ) 砕波帯海底砂

海底砂の上に海水がある場合の砂中音波反射伝搬特性実験を行った場所の供試砂の粒径加積曲線を図-44に示す。50%粒径は0.182 mmで、均等係数は1.338であった。送受波器を海底砂に埋設するため、掘削したため、砂は比較的緩くなっていると考えられている。従って間隙比  $\varepsilon$  が1.00、間隙率  $n$  が50%程度と思われる。

ハ) 沈埋物探査の海底砂

海底砂の粒径加積曲線を図-45に示す。50%粒径は0.179 mm、均等係数1.247で比較的均等径の砂である。砕波帯で海底砂の巻き上がりも考えられるので、砂の締め具合は緩く、間隙比も(a)同様に1.00程度で間隙比  $n$  も50%程度と考えられる。

(2) 砂、水、空気混合体中の音速度

a) 理論的検討

砂と水の混合体中に含まれる砂の体積率を  $\phi$ 、間隙率を  $(1-\phi)$ 、間隙率の水分含有率を  $\beta$  として、水の体積率を  $(1-\phi)\beta$ 、空気の体積率を  $(1-\phi)(1-\beta)$  とする。砂と水と空気の体積弾性率を各々  $K_s \cdot K_w \cdot K_A$  とすると、混合体の平均体積弾性率  $K$  は

$$\frac{1}{K} = \frac{\phi}{K_s} + \frac{(1-\phi)\beta}{K_w} + \frac{(1-\phi)(1-\beta)}{K_A} \quad (13)$$

となる。砂と水と空気の密度を各々  $\rho_s, \rho_w, \rho_A$  とすれば、混合体中の平均密度  $\rho$  は(14)式、また、音速  $C_v$  は(15)式で表される。

$$\rho = \phi\rho_s + (1-\phi)\beta \cdot \rho_w + (1-\phi) \cdot (1-\beta) \cdot P. \quad (14)$$

$$C_v = (K/\rho)^{1/2} \quad (15)$$

故に

$$\begin{aligned} C_v = & \frac{\rho_s}{K_s} \phi^2 + \frac{\rho_w}{K_s} + \frac{\rho_s}{K_w} \phi(1-\phi) \\ & + \frac{\rho_A}{K_s} + \frac{\rho_s}{K_A} \phi(1-\phi)(1-\beta) \\ & + \frac{\rho_w}{K_w} (1-\phi)^2 \beta^2 + \frac{\rho_A}{K_w} + \frac{\rho_w}{K_A} \\ & \cdot (1-\phi)^2 \cdot \beta \cdot (1-\beta) \\ & + \frac{\rho_A}{K_A} (1-\phi)^2 (1-\beta)^2 \cdot 1/2 \end{aligned} \quad (16)$$

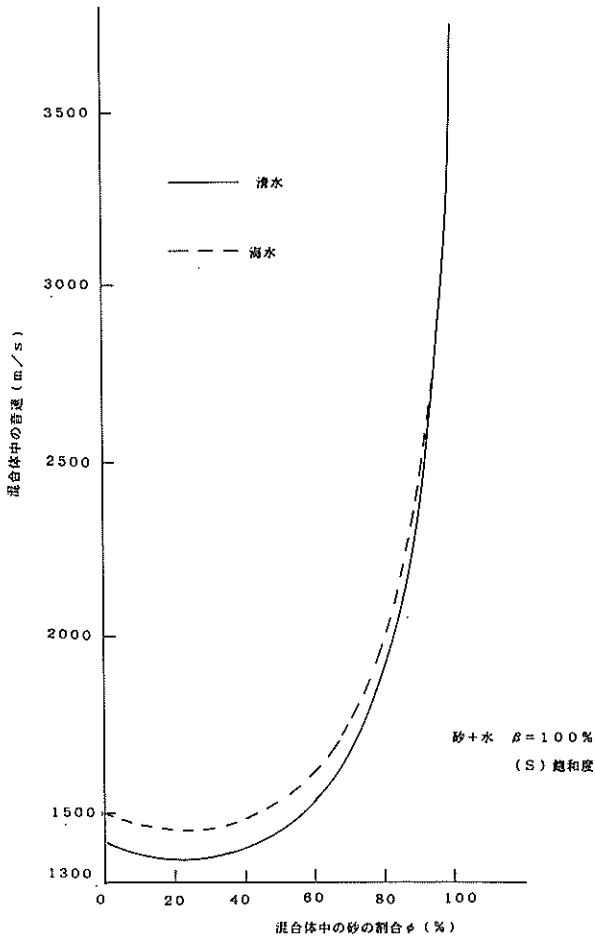


図-46 砂と水混合体の音速度

ここに  $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$   $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$   
 $\rho_A = 1.22 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$   
 $K_s = 3.67 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$

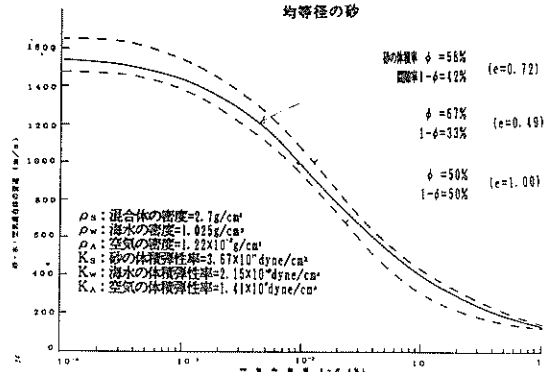


図-47 砂・水・空気混合体の音速度

$$K_w = 2.0 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$$

$$K_A = 1.4 \times 10^8 \text{ dyne/cm}^2$$

(10式を用いて計算した結果を、図-46及び図-46~47に示す。図-46は、間隙が完全に水で飽和した場合、図-47は空気を含む場合である。

b) 海底沈砂の音速度実測例

表-7, E. L. Hamilton 等が海底沈砂の音速度を粒度毎にまとめたものである<sup>7)</sup>。平均粒径0.19 mmの細砂から0.02 mmの粘土性の微粒の微砂までの音速度があり、粒径が大きいほど速度が早いことがわかる。図-48は空孔率と沈砂の音速度の関係を示す<sup>8)</sup>。空孔率すなわち間隙率が大きくなり、砂中に占める海水の割合が大きくなると、音速度が低下することがわかる。なお空孔率が55%以上になると海水の音速度約1500 m/s近づくことがわかる。図-49は沈砂の音速度の温度変化を示す<sup>8)</sup>。

(3) 砂中音波の反射、伝搬

表-7 沈砂の音速度

沈砂	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	空孔率 %	平均直径 mm	V(15.6 C) (100 kc) m/sec	$\rho c$ g·cm <sup>2</sup> /sec	$\beta$ cm <sup>2</sup> /dyn	G dyn/cm <sup>2</sup>	$\sigma$
細砂 fine sand	1.93	46.2	0.19	1690	$\times 10^5$ 3.25	$\times 10^{-12}$ 21.2	$\times 10^{-11}$ 0.06	0.44
微粒の細砂 very fine sand	1.92	47.7	0.12	1660	3.18	21.8	0.05	0.45
微砂性の細砂 silty very fine sand	1.68	61.3	0.05	1551	2.60	32.9	0.01	0.48
微砂 medlum silt	1.69	60.9	0.03	1475	2.49	27.3	0.00	0.50
粘土性の微粒の微砂 clayey fine silt	1.60	65.6	0.02	1467	2.31	29.2	0.00	0.50
海底の海水				1510	1.51	42.94	0.00	

H.Brandt, Factors affecting compressional wave velocity in unconsolidated marine sand sediments. J. Acous. Soc. Amer. 32 (1960) 171.



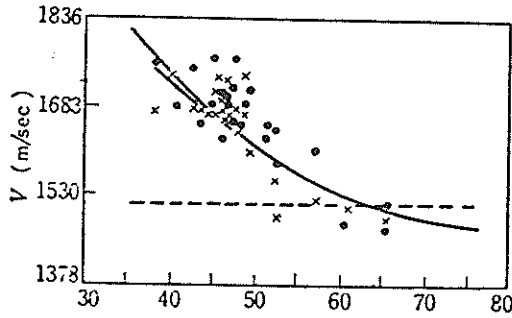


図-48 穴孔率と沈砂の音速度の関係

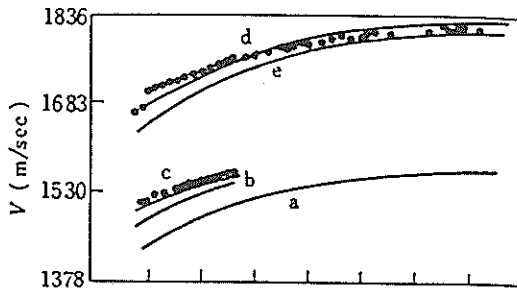


図-49 沈砂の音速度の温度変化

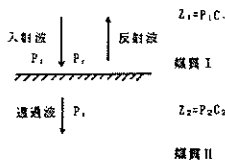


図-50 2 媒質境界面での音波の反射と透過

音波が、水から砂へ、砂から水へ、または砂から空へ入射した場合、その境界面で反射したり透過したりする。図-50に示す様に媒質 I から媒質 II へ音波が入射したときの反射、透過を理論的に検討する。

媒質 I の密度を  $\rho_1$  ( $\text{g/cm}^3$ )、音速を  $C_1$  ( $\text{cm/s}$ )、固有音響インピーダンスを  $Z_1 = \rho_1 C_1$  ( $\mu\text{bar/cm/s}$ )、媒質 II の密度を  $\rho_2$  ( $\text{g/cm}^3$ )、音速を  $C_2$  ( $\text{cm/s}$ )、固有音響インピーダンスを  $Z_2 = \rho_2 C_2$  ( $\mu\text{bar/cm/s}$ ) とする。また入射波の音圧を  $P_i$ 、反射波の音圧を  $P_r$ 、透過波の音圧を  $P_t$  とすると音圧の反射率  $R_p$ 、透過率  $T_p$  は、

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (17)$$

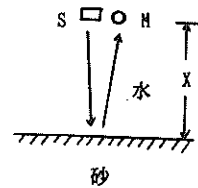


図-51(a) 海上から海底砂面の反射損失の求め方

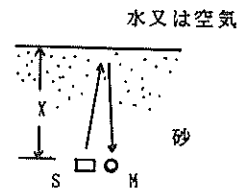


図-51(b) 砂中から海底砂面の反射損失の求め方

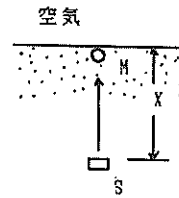


図-51(c) 砂中伝搬損失の求め方

$$T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (18)$$

である<sup>3)</sup>。従って反射損失  $RL$ 、透過損失  $TL$  は

$$RL = 20 \log R_p = 20 \log \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (19)$$

$$TL = 20 \log T_p = 20 \log \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (20)$$

a) 反射損失、伝搬損失の求め方

受波器出力電圧  $E_R$  から反射伝搬損失を求める方法は下記の通りである。すなわち反射損失  $RL$  (dB) は表面が平滑な反射面と考えた場合の超音波の反射によってエコーが生じるものとして解析した。

①海上から海底砂面の反射損失  $RL$  (図-51(a))

$$\begin{aligned} RL &= SL - 2TL - EL \\ &= 20 \log P_s - 20 \log 2X \\ &\quad - 20 \log P_r \quad (\text{dB}) \end{aligned} \quad (21)$$

②砂中から海底砂面の反射損失  $RL$  (図-51(b))

$$\begin{aligned} RL + 2AL &= SL - 2TL - EL \\ &= 20 \log P_s - 20 \log 2X \\ &\quad - 20 \log P_r \quad (\text{dB}) \end{aligned} \quad (22)$$

ここに

$SL$  : 送波音圧レベル (dB)

$TL$  : 拡散損失 (dB)

$EL$  : 反射音圧レベル (dB)

$P_s$  : 送波音圧 ( $\mu\text{bar at/m}$ )

$P_r$  : 受波音圧 ( $\mu\text{bar}$ )

$X$  : 音源からマイクまでの距離 (m)

$AL$  : 砂中の減衰損失 (dB)

$$AL = \alpha x$$

$\alpha$  : 砂中の減衰定数 (dB/m)

③ 砂中減衰損失  $AL$  (図-51(c))

$$AL = SL - TL - EL$$

$$= 20 \log P_s - 20 \log 2X$$

$$- 20 \log P_r \text{ (dB)}$$

②

b) 海底沈埋物の探査

イ) 送波器  $S$ , 受波器  $M$  を海底に設置した場合

図-52(a)に示すように送受波器  $S, M$  を海底に設置して海底沈埋物(沈船)を探査する場合の沈埋物の反射損失, 砂中減衰損失等の求め方を検討する。沈船からの反射波は船の上部にあるブリッジ部からの反射と下部のデッキ部からの反射が考えられる。

①ブリッジからの反射

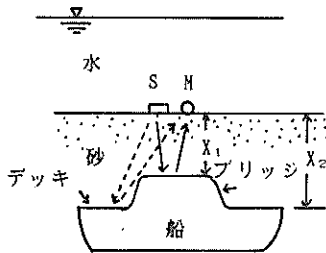


図-52(a) 海底沈埋物の探査

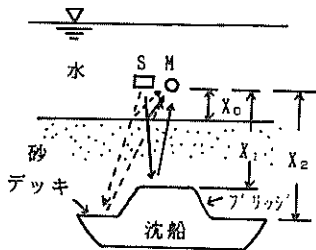


図-52(b) 送受波器を水中に吊下した場合の反射・伝搬損失の求め方

送波器とブリッジまでの距離を  $X_1$  (m), 送波レベルを  $SL$  (dB-m) とすると, 送波器  $S \rightarrow$ ブリッジ $\rightarrow$ 受波器  $M$  の伝搬損失  $N_p$  は

$$N_p = SL - EL = 2TL + 2AL + RL \quad (24)$$

で表される。ここに,

$EL$  : 反射音圧レベル (dB)

$TL$  : 伝搬損失 (dB)

$AL$  : 砂中減衰損失  $AL = \alpha x$

$\alpha$  : 砂の減衰定数 (dB/m)

②デッキからの反射

①と同様にして  $X_1$  を  $X_2$  におきかえて求められる。

ロ) 送波器  $S$ , 受波器  $M$  を水中に吊下した場合

図-52(b)に示すように送受波器  $S, M$  を水中に吊り下げ, 海底面下に埋没している沈船を探査した場合の沈埋物の反射損失, 海底砂面の反射損失, 砂中減衰損失, 伝搬損失等の求め方を検討する。反射波は図-52(b)に示すように海底面及び沈船のブリッジ・デッキ部の3カ所から得られるものと考えられる。

①海底面からの反射

送波器と海底面までの距離を  $X_0$  (m), 送波レベルを  $SL$  (dB-m) とすると, 送波器  $S \rightarrow$ 海底面 $\rightarrow$ 受波器  $M$  の伝搬損失  $N_p$  は,

$$N_p = SL - EL = 2TL + RL \quad (25)$$

で表される。ただし周波数が低いので水中の吸収損失は無視する。ここに,

$EL$  : 反射音圧レベル (dB)

$TL$  : 拡散損失 (dB)

$RL$  : 海底面の反射損失 (dB)

従って, 海底面の反射損失  $RL$  (dB) は

$$RL = SL - 2TL - EL \text{ (dB)} \quad (26)$$

②沈船のブリッジ及びデッキからの反射

(イ)-①, ②と同様である。

(4) 実験結果の検討

a) 予備実験

イ) 港研水槽における砂中音響特性実験

水底に砂を投入(砂層厚さ約50cm)して, 7日間経過した後, 測定した。表-2(a)~(e)に実験結果を示す。データの解析は②③及び②④式を用いて行った。

表-2(a)の水面の送波器  $S_0$  から砂中の受波器  $M_1$  の透過波測定では, 受信機の周波数帯域を10 Hz~100 kHzと広くした場合と10 Hz~10 kHzと狭くした場合とは, 後者の方すなわち高域を100 kHzから10 kHzに狭くすると, 受信信号が約20 dB低くなり, 且つ残響が多く

なることがわかった。

表-2(b)の砂中送波器  $S_1$  から水面の受波器  $M_1$  の透過波測定では  $C=40\ \mu\text{F}$ 、周波数帯域を10 kHz~10 kHzと狭くすると残響が高くなり  $C=5\ \mu\text{F}$ 、周波数帯域を10 kHz~100 kHzと広くすると、受信信号レベルも約20 dB高くなり残響も少なくなって直接伝搬波が明確に確認できた。

表-2(c)の砂中送波器  $S_1$  から砂面上受波器  $M_0$  の透過波測定では周波数帯域が10 kHz~100 kHzの状態では  $C=40\ \mu\text{F}$  を  $5\ \mu\text{F}$  に変更すると、残響が少なく信号の判別が容易となることがわかった。

表-2(d)の水面下の送波器  $S_0$  から砂面へ音波を放射し水面下の受波器  $M_0$  で受波する砂面反射波測定では、周波数帯域が10 kHz~10 kHzの場合、残響が大であるが、100 kHzまで帯域を広くすると反射波が明確に判別できる。又、 $C$  が  $40\ \mu\text{F}$  に比して  $5\ \mu\text{F}$  の場合の方が残響が少なく砂面反射波の判別が容易である。

表-2(e)の砂中の送波器  $S_1$  から音波を放射し、砂中の受波器  $M_1$  で砂面及び水面などからの反射波を受信する砂中から砂面反射測定では砂面からの反射信号は、30 cm付近の深さに認められ、しかも砂面と思われる反射信号は高周波成分が多い。(約90 kHz) 実測による砂厚は約40 cm程度であるにも拘らず、30 cmの所に反射信号が得られるが、高周波成分の発生原因と共に今後検討を要する。

#### ロ) 盛砂の音波伝搬特性実験

砂中の間隙中の空気含有率が音波伝搬特性に及ぼす影響について検討するための実験結果を表-3に示す。解析には、 $\text{式}$ を用いた。

音圧で作動するマイクロホンは、空気を含む砂中では、音波振動で砂粒子が振動するだけで、圧力として作用しなくて、音圧感度が低下することを考慮して加速度計を併用した。

砂中の音速度は送受波距離を0.4 mから0.25 mに変えても約150 m/sと変わらなかった。伝搬周波数は送波周波数に比較して約400 Hz以下に低下している。マイクロホンで計った受波レベルは送受距離が0.4 mから0.25 mに変化しても約74から78 dBと変わらない。これはマイクロホンの受波感度があるレベル以上は飽和して計測困難になっているものと考えられる。従って、空気を含む砂中の音波減衰損失の測定は不可能であった。

しかし、音速度と砂中伝搬周波数は測定可能だったと考えられる。

ここで、 $\text{式}$ を用いて砂の空気含有率を推定してみる。砂の間隙率が23%程度あるので、空気含有率は1%

以上あるものと考えられる。

#### b) 現地実験

##### イ) 久里浜海岸波打際における音波伝搬実験

実海岸砂の音波伝搬特性を把握するための実験を久里浜海岸波打際で行った結果を表-4に示す。伝搬損失の求め方は $\text{式}$ を用いた。

本実験でも、前項(ロ)の盛砂の音波伝搬特性実験と同様、マイクロホンを砂中に埋設して実験を行ったため、海底砂の土圧と、空気を含んだ砂のため、音圧受波感度が低下し減衰損失が異常に大きくなっている。砂中の音速度は平均約350 m/sで、空気を含んだため異常に低下している。ここで、 $\text{式}$ を用いて空気含有率を推定してみる。砂の間隙率を4.31(c)から33%と仮定すると0.16%程度の空気を含んでいることがわかる。伝搬周波数  $f_R$  は、水中では6.6 kHzであったが、砂中では1.0 kHzに低下していることがわかった。

##### ロ) 波崎海洋研究施設における音波伝搬実験

実海域の砕波帯における海底砂の音波伝搬特性を把握するための実験を波崎海洋研究施設の海底砂で行った結果を表-6に示す。

##### ①砂中の音波伝搬実験

波打際の海岸砂に送波器を埋設し、上部砂面上に受波器を設置して音波伝搬実験を行った結果、砂中伝搬音速は、平均520 m/s、伝搬周波数は平均620 Hzであった。減衰損失の算出の方法は $\text{式}$ を用いた。

その結果、砂中の減衰定数  $\alpha$  (dB/m) は、170 dB/mであった。これは波打際で潮の干満があって砂中に空気を巻き込むし、且つ送波器を埋設するため人工的に穴を掘り、埋め戻したためであると考えられる。ここで、供試砂の間隙率が4.31(d)(イ)より42%程度とすれば $\text{式}$ より砂の空気含有率は音速520m/sだから0.056%と求められる。この砂の上に0.4 m砂を盛り、パイプレータで叩いて締め固めた砂の音波伝搬特性を求めた結果、音速度が187 m/sに低下し伝搬周波数は526 Hzと少し低下し、砂中の減衰定数  $\alpha$  (dB/m) は、47.3 dB/mと1/3以下に低下している。締め固めたため、砂の間隙率が約33%以下に低下したとすれば $\text{式}$ より空気含有率は、音速度が187 m/sだから0.6%として求まる。

##### ②砂中における反射特性実験

##### ・波打ち際海岸砂

波打際の砂に穴を掘り、底に送受波器をおいて上方へ音波を放射し、砂面からの反射特性を求める実験を行った結果、砂中の音速度は平均500 m/s、伝搬周波数は312 Hzであった。砂中からの砂面の反射、減衰損失は $\text{式}$ を用いて求めた。ここで、砂面の反射損失は0 dB

とした。減衰定数  $\alpha$  (dB/m) を求めると平均41.2 dB/m であった。砂の空気含有率を求めてみると、間隙率を42%位として図-47より音速度500 m/sで0.06%であることがわかる。次に、この砂面の上に砂を0.25 m盛り上げて測定した結果、砂中音速度は平均255 m/sと半分に低下し伝搬周波数492 Hzと少し高くなり、減衰定数  $\alpha$  dB/mは、平均10.1 dB/mと4分の1に低下している。砂の間隙率を33%として、砂中の空気含有率を求めてみると、音速度が255 m/sであるので、図-47より砂中空気含有率は、ほぼ0.12%として求まる。砂を盛りあげたため空気の含有率が大きくなったものと考えられる。

・砕波帯の海底砂

海底砂の上に海水がある場合の反射特性実験を行った結果、砂中の音速度は平均1500 m/sで、ほぼ海水中の音速度と一致している。伝搬周波数は、広い測定帯域で約5 kHz、高く狭い測定帯域で10 kHzの比較的周波数の高い成分が伝搬していることがわかった。

減衰定数  $\alpha$  dB/mは、海底砂表面の反射損失を10 dBと仮定すると、平均20 dB/mであった。砂の間隙率を

4.3(1)(d)から50%と仮定し、音速度1500 m/sの時の空気含有率を求めてみると、ほぼ0に等しいことがわかる。音速度が1500 m/sで伝搬周波数が10 kHzで比較的高周波数が伝搬することがわかり、海底粗度計実用化の可能性が得られた。

・沈埋物探査の海底砂

海底面下約1.8 mに埋没している沈船を対象物として、反射伝搬特性実験を行った結果、砂中の音速度は1500 m/s伝搬周波数は広帯域の場合500 Hz、高周波で狭帯域では5 kHzであり、高い周波数も伝搬することがわかった。砂中の伝搬定数は伝搬周波数が500 Hzのときは0.9 dB/m、5 kHzのときは4.5 dB/mで非常に小さいことがわかった。また、砂中の音速度が1500 m/sであるので、砂中の空気含有率は、ほぼ0とみなして良いと考えられる。従って海底粗度計を設置する砕波帯の海底砂の音波伝搬特性は、音波を利用した測定機器にとって有利な特性を有していることがわかった。

(5) 供試砂の土質と音響特性

表-8に海底粗度計開発のための実験に供された砂の

表-8 供試砂の土質と音響的定数

実験種別	平均粒径 $D$	均等係数	密度 $\rho$	間隙率 $n$	空気含有率	音速度 $C$	減衰定数 $\alpha$	固有音響インピーダンス $\rho \cdot C \left( \frac{\mu\text{-bar}}{\text{cm/S}} \right)$
	mm		g/cm <sup>3</sup>	%	%	m/s	dB/m	$\times 10^5$
港研小型水槽	0.14	1.33	1.99	42	0	1500	60.8 (33 kHz)	2.99
港研山盛砂	0.61	2.74	2.28	23	1~	150	134 (400 Hz以下)	0.34
久里浜海岸砂	0.28	2.62	2.15	33	0.16	350	141.4 (1 kHz以下)	0.75
波崎海岸砂 (波打際)	0.19	1.33	2.00	42	0.06	520	170 (620 Hz)	1.04
波崎海岸砂 (波打際)	0.19	1.33	2.15	33	0.60	187	47.3 (526 Hz)	0.40
波崎海岸砂 (波打際)	0.19	1.33	2.00	42	0.06	500	41.2 (312 Hz)	1.00
波崎海岸砂 (波打際)	0.19	1.33	2.15	33	0.12	255	10.1 (492 Hz)	0.55
波崎海岸砂 (砕波帯)	0.18	1.34	1.86	50	0	1500	20.0 (10 kHz)	2.79
波崎海岸砂 (沈船)	0.18	1.25	1.86	50	0	1500	4.5 (5 kHz) 0.9 (500 Hz)	2.79

※ 減衰定数の欄の ( ) 内の数値は砂中伝搬周波数

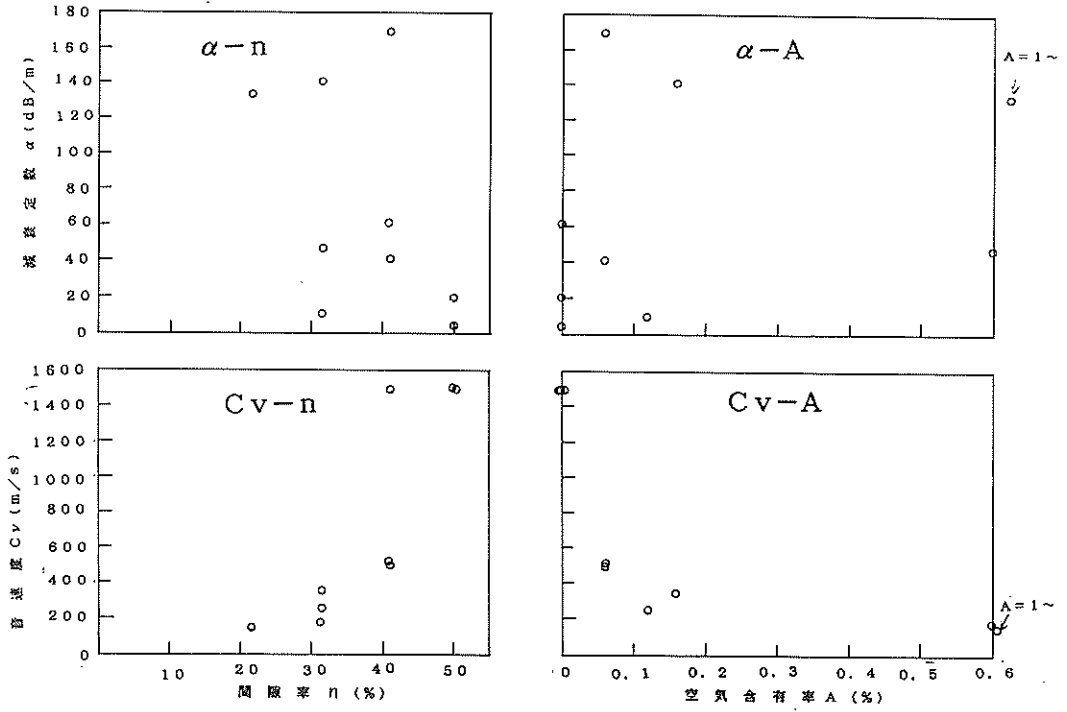


図-53 砂の間隙率  $n$ 、空気含有率  $A$  と音響特性

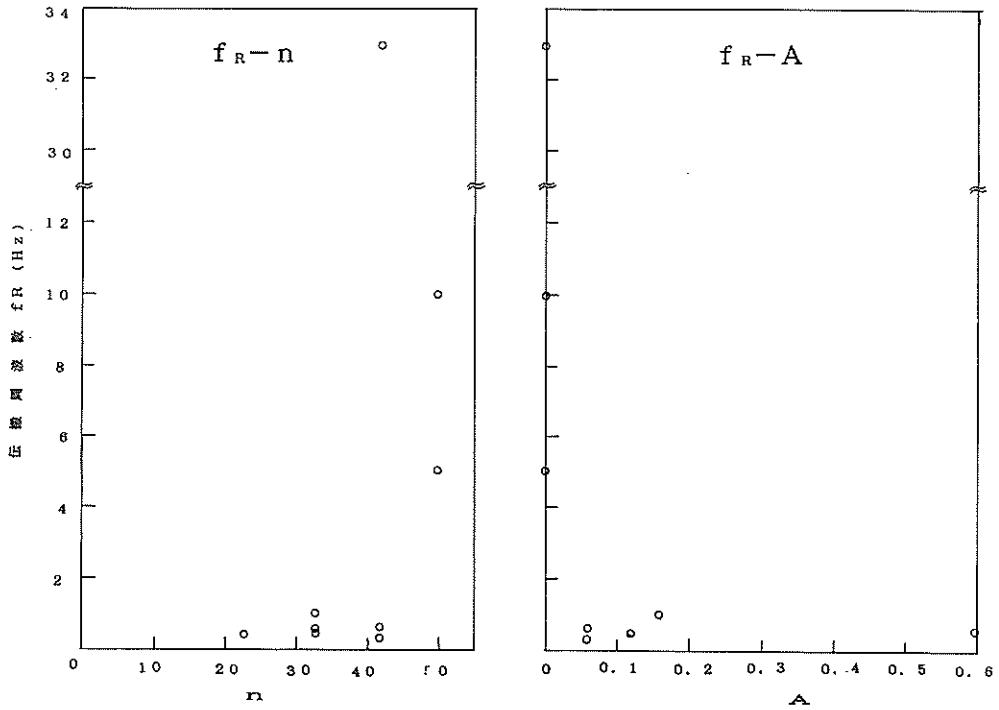


図-54 伝搬周波数  $f_R$  と間隙率  $n$ 、空気含有率  $A$

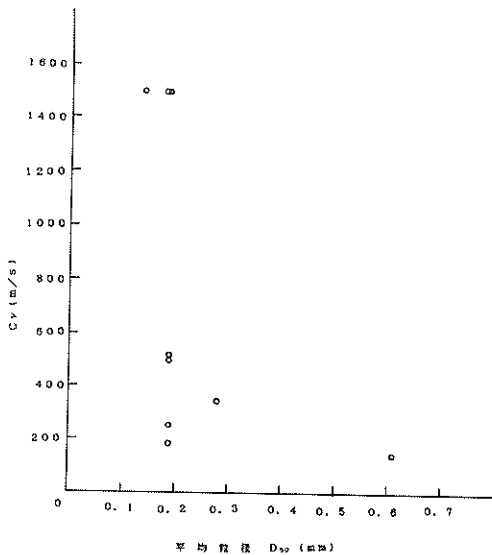


図-55 供試砂の平均粒径と音速度

土質と音響的定数について示したものである。平均粒径は0.14から0.61, 均等係数は港研山盛り砂及び久里浜海岸砂を除いてはほぼ1.3で粒子直径の揃った砂を用いている。図-53に砂の間隙率と音速度, 減衰定数の関係, 空気含有率と音速度, 減衰定数の関係を示す。砂の間隙率と音速度の関係では間隙率が大きくなる程音速度も大きくなっていることがわかる。

また, 砂が水で飽和した海底砂(砂の上に水がある時)の音速度は1500 m/sであることが確認できた。

空気含有率と音速度の関係では空気含有率が大きくなる程, 音速度が低下することがわかる。減衰定数については, 間隙率が大きくなる程, 減衰定数が低下する傾向にあるようである。また空気含有率との関係では余りはっきりした傾向はみられなかった。砂に空気を含むとマイクの感度が低下するからと考えられる。

図-54に砂の間隙率と伝搬周波数, 空気含有率と伝搬周波数との関係を示す。この図から伝搬周波数は間隙率が大きくなる程高くなり, 空気含有率が大きくなる程低下することがわかった。図-55には供試砂の平均粒径と音速度の関係を示す。

粒径が大きくなる程音速度が低下していることがわかる。

#### (6) 海底粗度計の最適周波数

海底粗度計を設置する海底は, 砕波帯の常時海底砂の上に海水のある海域で, 表-8の中で波崎海岸砂の砕砂帯で, 沈船を探索した海域の海底砂が適合する。砕波帯

の海底砂は送波器を砂中に埋設するときに攪乱しているいわゆる人工的な砂であるため自然のままの音響特性を有していない。その点, 沈船を探索した海底砂は遠い過去に沈んだ船に自然に推積した砂であるため, 自然のままの音響特性を有しているものと考えられる。海底粗度計の分解能を高めるためには, 砂中伝搬周波数はなるべく高い方がよい。沈船の探索場所の海底砂の伝搬周波数は, 測定帯域が広い場合は500 Hz, 高周波の狭帯域で5 kHzであった。高い周波数程, 距離分解能は高いので5~10 kHzが最適周波数であると考えられる。

一般に距離分解能は下記式で記される。

$$\Delta X = (1/2)\tau C \quad (27)$$

$C$ : 音速度 (1500 m/s)

$\tau$ : 伝搬周波数のパルス幅 (s)

$\tau = 1/f_R$   $f_R$ : 周波数 (Hz)

②式から伝搬周波数  $f_R$  が500 Hzの時は約150 cm, 5 kHzの時は約15 cmとなる。10 kHzの時は約7.5 cmとなる。

#### (7) 海底粗度探索可能深度

海底砂の中にモノパルス超音波送受波器を埋設して海底砂表面の凹凸状況を探査するため, 超音波を海底面に向けて送受波し, 受信できる送受波器埋設深度の限度を推定してみる。

図-56のように埋設深度を  $X$  (m) とすると音波の伝搬損失  $N_p$  (dB) は, ②式より, 下記ようになる。

$$N_p = SL - EL = 2TL + 2AL + RL \quad (28)$$

送受波器埋設深度  $X$  (m) と伝搬損失  $N_p$  (dB) の関係を, 伝搬周波数  $f_R$  が10 kHz, 減衰定数  $\alpha$  が20 dB/mの場合, 及び伝搬周波数  $f_R$  が5 kHz, 減衰定数  $\alpha$  が5 dB/mの場合について示したものが図-57である。ここで, 海底面と海水の境界面の反射損失  $RL$  は10 dBとして計算した。

送波レベル  $SL$  が107.5 dB, 最低受波レベル  $EL$  を50 dBとすると伝搬損失  $N_p$  は57.5 dBとなる。図-57で

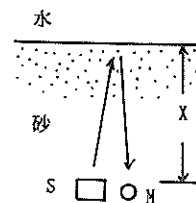


図-56 反射, 伝搬損失の求め方

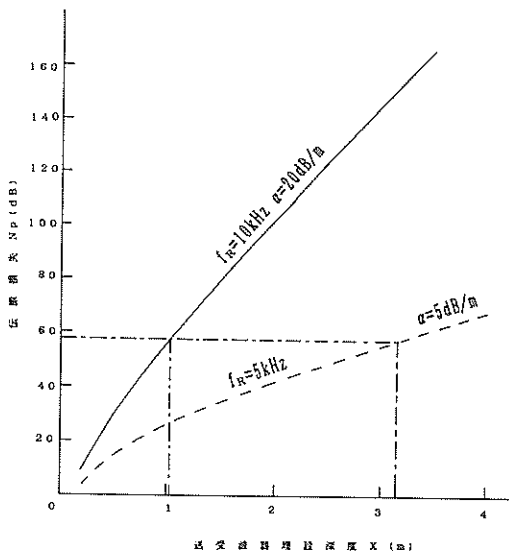


図-57 送受波器埋設深度と伝搬損失

$N_p$ が57.5 dBのときの送受波器埋設深度  $X$  (m) を求めてみると、伝搬周波数  $f_R$  が10 kHzのとき、約1 m、 $f_R$  が5 kHzのときは約3 mであることがわかる。

### 3.2.4 結論

#### (1) 予備実験

砂中モノパルス超音波の反射、伝搬特性の基本的な特性を検討するための港研小型水槽における砂中音響特性実験や、盛砂の音波伝搬特性実験を行った結果をとりまとめると以下のとおりである。

#### a) 港研小型水槽における砂中音響特性実験

水槽中に砂 ( $d_{50} = 0.14$  mm) と水を入れ、水面、砂中に送受波器を設置してモノパルス超音波の反射伝搬特性実験を行った結果、送波超音波周波数を12.5 kHz、受信機の測定周波数帯域10 kHz~100 kHzと高くすると残響が少なくなり、信号の判別が容易となることがわかる。

#### b) 盛砂の音波伝搬特性実験

音圧で作動するとマイクロホンは、空気を含む砂中では、正確に作動しなくなることがあり、音波の減衰損失の測定は正確を期し難く、減衰損失が真値よりも極端に大きくなることがわかった。そこで砂粒子の振動加速度を測定する方法を採用し加速度計の併用を試みた。その結果、砂中の音波伝搬速度は150 m/sは伝搬周波数約400 Hz以下となり、水中にある砂（水で飽和した）に比べて非常に小さいことがわかった。

#### (2) 現地実験

実際の海底砂の音波伝搬特性を把握するための現地実

験を久里浜海岸波打際及び、波崎海洋研究施設の波打際と砕波帯の海底砂において行った結果は次のようである。

#### a) 久里浜海岸波打際

送受波器を波打際の砂に埋設し、音波伝搬特性実験を行った結果、潮の干満地帯であるため砂に空気を混入しているため減衰損失が異常に大きく音速度は約350 m/sと低く、伝搬周波数も送信周波数（水中で測定）の6.6 kHzに比して、砂中では1.0 kHzに低下していることがわかった。

#### b) 波崎海洋研究施設波打際及び砕波帯海底砂

波打際の砂に送受波器を埋設し、音波伝搬実験を行った結果、ここでも久里浜海岸の実験と同じように減衰損失が異常に大きく音速度、伝搬周波数とも低下していることがわかった。また、この砂を盛砂して締め固めると、締め固め前に比して、減衰損失が1/3、音速度も約1/3、また、伝搬周波数も低下することがわかった。これは、盛砂して締め固めたため空気含有率が増加したためと考えられる。なお、砂中の反射特性を求めた結果、人工的に砂を掘って送受波器を埋設しているため、原地盤の特性と異なり音速度、伝搬周波数とも低下し、減衰損失も大きくなっている。この砂に盛砂し締め固めると、空気含有率が増加したためか音速度が低下し、減衰損失も低下している。砕波帯の海底砂に送受波器を埋設して砂中の反射特性実験を行った結果、潜水士による送受波器の埋設にも拘らず音速度1500 m/sで水中の音速度と変わらず、伝搬周波数は10 kHzと比較的高く、減衰損失も比較的小さいことがわかった。掘削に水ジェットを使用し、且つ潜水士による水中作業のための空気の混入を妨げたのではないかと考えられる。

沈船が埋設している砕波帯の海底砂の探査実験では、砂中の音速度が1500 m/sで水中音速度と同じで、伝搬周波数も5 kHzと比較的高く減衰損失も小さいことが確かめられた。

#### (3) 供試砂の音響特性

本実験で使用した砂の音響特性についてとりまとめる。供試砂の平均粒径は0.14~0.16、一部を除いて、均等係数がほぼ1.3の粒子直径の揃った砂が用いられた。砂の性状と音響特性の関係を検討してみると、砂の間隙率と音速度の関係では間隙率が大きいほど音速度が早くなり、海底砂の音速度は海水と同じ1500 m/sであった。

空気含有率が増加すると音速度は低下する傾向がある。減衰定数は間隙率が大きくなるほど低下する。また、伝搬周波数は間隙率が大きくなる程、高く、空気含

有率が大きくなる程、低くなる事がわかった。

#### (4) 海底粗度計の最適周波数

砕波帯の海底砂の音波伝搬実験を行った結果、潜水士によって送受波器を海底砂に埋設した場所では伝搬周波数が10 kHz、沈船探査の海底砂で5 kHzであった。そこで砕波帯海底砂に埋設する海底粗度計のピーク周波数は5 kHz～10 kHzの範囲が適当であると考えられる。

#### (5) 海底粗度探査可能深度

砕波帯の海底砂の音波探査実験の結果、伝搬周波数が10 kHzの時の海底粗度計送受波器深度は海面下約1 m、伝搬周波数が5 kHzのときは、約3 mの深度が適当である。

#### (6) 今後の課題

本実験の結果、砂の基本的な音響特性や、砕波帯の海底砂の音波の反射伝搬特性が判明し、特に実験水槽や海岸の波打際でのいわゆる人口的に作られた供試砂では砂に含まれるわずかな空気によって、音速度や伝搬周波数が低下し減衰損失が増大することが確認できた。

一方砕波帯の海底砂のように砂の上に常時水のある場所では音速度は海水とほぼ同じ速度で、伝搬周波数も高周波が使用でき、且つ減衰損失も小さいことがわかり海底粗度計実用化の可能性が得られた。今後は最適周波数をピーク周波数とする音源の試作、測定精度を向上させるための音波の狭ビーム化、送受波器を海底に埋設して長期計測による信頼性の把握、観測データの処理及び記録方式の確立、送受波器部の海底埋設方策、ケーブルの布設等付帯施設の施工法の確立等が課題となろう。

昭和61年度に行われた超音波を利用した海底粗度計の開発研究についてとりまとめたが、本研究は、昭和60年度に行われた研究に引き続き、主として砂中の超音波伝搬特性について行ったものである。この研究のみでは計測機器の実用化は不十分なため、ここで述べた研究項目を今後引き続き検討していくことが肝要と考えられる。

### 3.3 砂澱測定実験

室内実験及び一部現地実験により、超音波の砂中、水中の伝搬特性、海底面による反射特性を調べることにより荒天時に海底粗度を測定する装置を開発する。海底砂面の凹凸を観察する方法として、海中から測定する方法が従来用いられているが、特に荒天時の測定には不適当なので砂中から砂面を観測するため、モノパルス発生装置を用いて、砂と水との境界面の反射損失、分解能等について過去2ヶ年研究を継続してきた。

今年度はこれ等の反射データの情報を解析し、その処理方法について水理研究部門と計測部門の各々の担当者で共同研究を行い、解析した。

前項の超音波伝搬特性実験の結果を考慮して、室内実験と現地実験（波崎海洋研究施設）に分けて実験を行うように計画した。

室内実験において水中からの Sand Ripples の測定を行うと共に砂中から砂面の測定を行った。

測定結果の処理については使用（又は伝搬して来る）周波数、音速、波長等が処理の難易度に非常に影響する。即ち、音速が約1500 m/s、伝搬周波数3 kHz以上の場合と、音速が150 m/s～500 m/s、伝搬周波数が250 Hz～700 Hzの場合では処理方式が異なる。前者は合焦点ビームのスキヤニングによる位相合成処理で判別が可能であるが、後者の場合は相関手法によりリップルの間隔をパワースペクトルによって判定する必要がある。

この為、今後処理方式の試作に際して、音速、伝搬周波数の選定は、最も重要な事項となる。そこで、本項では室内実験とデータの処理方式とに重点を置いて検討する。

#### 3.3.1 室内モデル実験

##### (1) 概要

1 m × 1 m × 1.5 m の FRT 製水槽内に砂を敷いて砂澱と同様の幾何学的特性を有する波面を作り、水中、砂中から超音波を放射して反射、特性を調べた。

##### (2) 実験内容

###### a) 水中からの測定

水槽内に砂を30 cm 入れ、砂面に砂澱（高さ40～50 mm）を2ヶ設ける。送受波器を砂面から約50 cm の高さに設置し斜め方向に砂澱に向けて音波を放射し、その反射波を受信する。その様子を図-58に示す。図-58において右側が水槽と機器の配置図で関係位置を示す。

図-58の左側上部が受信波形写真で

$$H : 200 \mu s$$

$$V : 0.5 V$$

の場合である。この写真では、直接波が大きく、水底の砂面とリップルBとの反射受信波形が重畳されている。

次に図-59の場合はリップルA、Bの間にブロックがあり、リップルBからの反射受信波形が重畳し、お互いに干渉している。

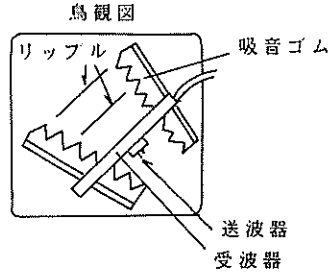
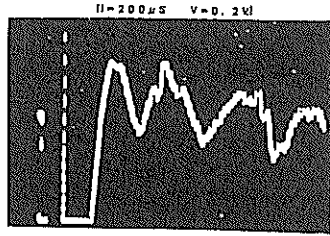
左下は測深用記録機の受信波形を拡大して電圧破壊記録紙に記録した結果である。横軸は時間軸で縦軸が送受波器からの距離を示している。

付図-6 ①～④に水中よりリップルを測定した結果を示す。

①は正常に約45°方向にリップルがある様に正対させた結果である。

②は送受波器をリップルに少し近付けた場合である。





電圧破壊記録

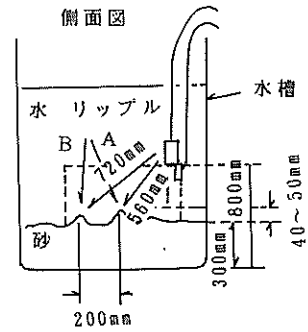
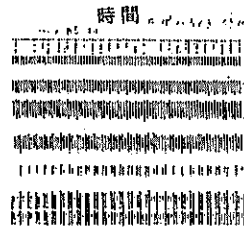
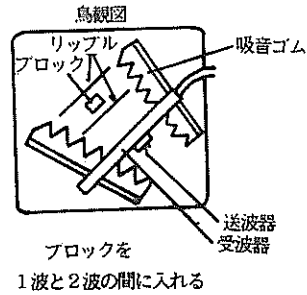
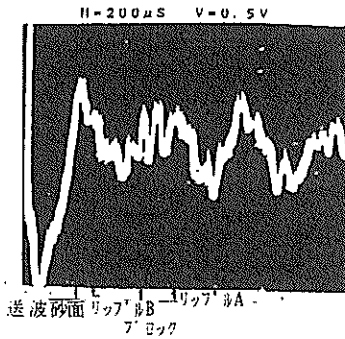


図-58 水中からの測定実験



電圧破壊記録

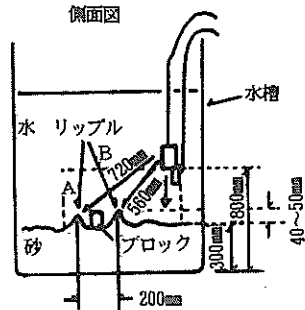


図-59 ブロックを入れた場合の水中からの測定実験

- ③は片方を約45度近くに動かした結果である。
- ④は送受波器をリップルに近づけた場合である。
- ⑤は小型ブロックをリップルAとBの間に入れた場合である。
- ⑥は1より更にリップルに対して送受波器を遠くした場合である。
- ⑦はリップルの後に板を入れた場合である。
- ⑧は板をとってリップルA、Bの間に凹部をつけた場合である。

b) 砂中からの測定

次に図-60に示すように、前記水槽に80 cmの高さに砂を入れ、送波器を砂面から約30 cm、受波器20 cm、送受波器の平均深度25 cmとなる深さに約45°傾けて埋設し、約1カ月以上放置した後、測定を行った。その結果は、(a)の場合と同様に、直接波、砂面等からの反射波が強く、データ処理をする必要がある。

図-60のデータは

増幅度 60 dB

送信電圧 1.7 kV  
 濾波器 OFF~25 kHz  
 横軸 (H) ① 500  $\mu$ s/div  
 ②③ 1 ms/div  
 縦軸 (V) ① 0.2 V/div  
 ②③ 0.1 V/div

で示し、上方にスケールと計算値 (音速300 m/s) と実測結果とを表示してある。

(3) 実験結果

付図-6を観察すると

- 送波器 ——— 受波器への直接波 (約100  $\mu$ s (7.5 cm))
- 送波器 ——— 直下砂面 ——— 受波器の反射波 (約660  $\mu$ s (50 cm))
- 送波器 ——— 水槽側面 ——— 受波器の反射波 (約1 ms (75 cm))
- 送波器 ——— 水槽前面 ——— 受波器の反射波 (約1.44 ms (108 cm))

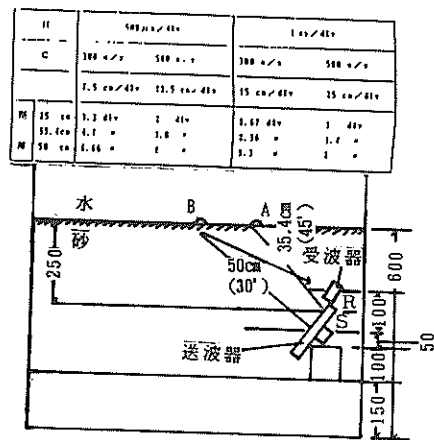
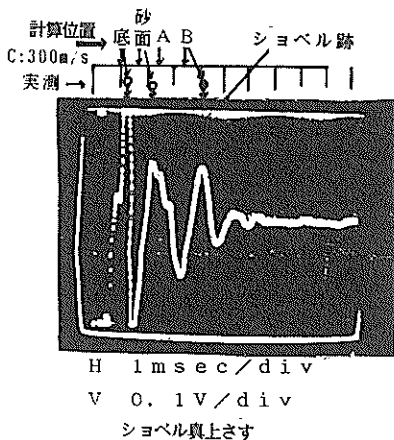
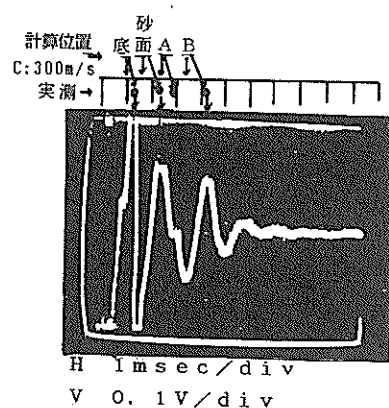
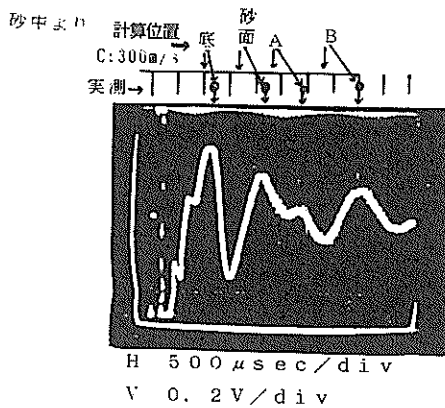


図-60 砂中からの測定実験

の反射波が強い。この間にリップル、ブロック、等の反射波が重畳し、位相干渉を生じ、受信波形が乱される。この為、第3者による判断が非常に困難である。

図-58の左下方の電圧破壊紙による記録は砂面、水槽側面等からの大なる反射波を記録しており、リップル等の存在が認められない。

この原因として

- ①送受波器が無指向性である。
- ②水槽からの反射波がある。
- ③測定距離が波長に比して短い。
- ④その他。

が考えられるが、これ等の問題は解決し得る条件である。

しかし、現地のリップルからの反射波強度は弱く且つ、リップル間隔が30 cm~50 cmと波長に対して短い為、今後この様な場合の処理判別方式を別途検討すると共に現地においての音速及び伝搬周波数によって検出方式が大幅に影響を受けるので早急な測定を行う必要がある。次に砂中からの測定した図-60を観察すると

送波器 ———— 砂面 ———— 受波器  
(往復50 cm, 伝搬時間2.3 m/s)

から音速を求めると約220 m/sとなり、平穏な水槽中に放置した砂中には気泡が多数含まれていることを示している。

砂面のリップル位置は

- リップルA 2.5 m/s~2.9 m/s
- リップルB 4.0 m/s~4.2 m/s

となり、送受波器からの距離は

- 送受波器 ———— リップルA 27.5 cm~32 cm
- 送受波器 ———— リップルB 44 cm~46.5 cm

となる。

送受波器からリップルまでの水平距離は

- 送受波器 ———— リップルA 11.5 cm~20 cm
- 送受波器 ———— リップルB 36.2 cm~39.2 cm

故にリップルAとBの間隔は20 cm~25 cmとなり、造成したリップル間隔が測定されている。

測定結果がばらつく要因としてリップルの下部の判定方法及び、受信波形のみでの判定の為、精度が得られないものと思われる。

### 3.3.2 データ処理手法の検討

3.3.1(3)の実験水槽における室内実験結果において、送波器から発射された音波の一部は、直接受波器に入ると共に周辺からの反射波も強弱に応じ重畳、干渉し、単独の受波器の受信波形だけでは、明確に目的物の判定が困難である。

しかし、複数個の受波器からの情報を合成することによって特定点の目標物の判定が可能となると考えられる。これは地震探査、地層探査等に多く用いられている手法である。その概要について下記に述べる。

送波器からの音波の反射波を各受波器で受信し、地層の個々の一定の点の情報となる様に、ビームフォーカス(焦点結像)を行うと共に、地中内の断面情報を得るためにビームスキャニング(掃引)を行う。また、音速を推定し、音速補正を可変出来るようにする。

#### (1) ビームフォーカス

受波アレイの中心線上に目標物があると考え、最遠部の素子に対し中央部の素子の受信波形を電気的に遅延させ、目標物がアレイの中心にあるようにする。図-61に受波素子5ヶ( $M_2, M_1, M_0, M_1, M_2$ )の場合を考え、目標物をTとすると、焦点距離Rが、

$$\begin{aligned} R &= TM_2 = TM_1 + \delta_1' = TM_0 + \delta_0 \\ &= TM_{-1} + \delta_1' = TM_{-2} \end{aligned} \quad (29)$$

となるように $\delta_1'$ 、 $\delta_0'$ を電気的に遅延させる。

この時、送波器は受波アレイの中央に設けることが望ましい。即ち、目標物の深度Dは

$$D = R - \delta_0 \quad (30)$$

として求めることが出来る。

#### (2) ビームスキャニング

受波器のビームを $\pm\beta^\circ$ だけスキャニングして土層中の一定面積を探査する目的の場合、受波アレイの長さを2a、最大スキャニング角を $\pm\beta_{max}$ とすると、一般に受波素子は

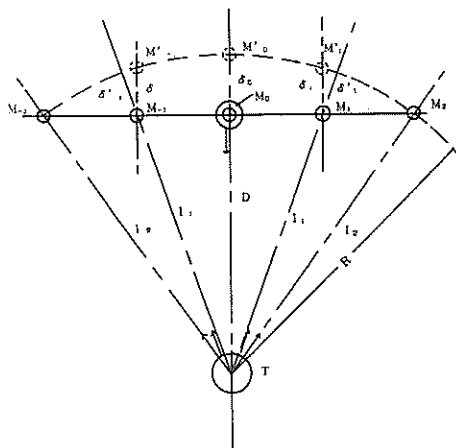


図-61 受波素子5個の場合のビームフォーカス

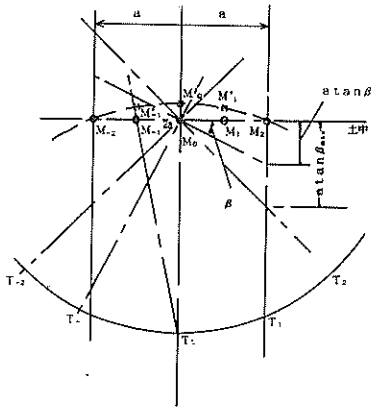


図-62 受波素子5個の場合のビームスキャンニング

$$\delta = a(\tan \beta_{\max} - \tan \beta) \quad (31)$$

だけ遅延をかけ、その点から $\pm \beta$ だけ掃引することによって、受波器アレイの中心は常に一致することになる。

この様にして受信した受信波を $a \cdot \tan \beta_{\max}$ だけ、全ての角度の時間軸を下方に下げればよい。

今、図-62に受波素子5個の場合を示す。この場合、各素子の遅延量は、

$$\begin{aligned} M_{-2}, M_2 & \text{は} & 0 \\ M_{-1}, M_1 & \text{は} & a(\tan \beta_{\max} - \tan \beta) \\ M_0 & & a \tan \beta_{\max} \end{aligned}$$

となる。

この様にすることによって、ビームは $M_0 T_0$ を半径とする円周上をスキャンニングすることになる。

### (3) 受信波の分析処理

前項(1), (2)に示すビームフォーカスとビームスキャンニングを組み合わせることによって、目標物の探知が容易となる。

① 測定深度を $D_1, D_2, \dots, D_0$ とすると、ビームフォーカスは最浅深度 $D_1$ になるように各受波器に遅延を与える。

② 掃引角度 $\pm \beta_{\max}$ になるように下記のフォーカスしたアレイに対し一定角度 $\Delta \beta$ 毎に素子に遅延をかけ、スキャンニングを行う。この結果 $a(\tan \beta_{\max} - \tan \beta)$ だけ、測定データを進める。

③ 同様に深度 $D_1, D_2, \dots, D_0$ としながら②のスキャンニングを繰り返し行う。

$D_1, D_2, \dots, D_0$ の間隔は深度方向の分解能に基づき選定する。

今回の場合は50 cm程度が適当と考えられる。

④ 探査に際して音速の影響

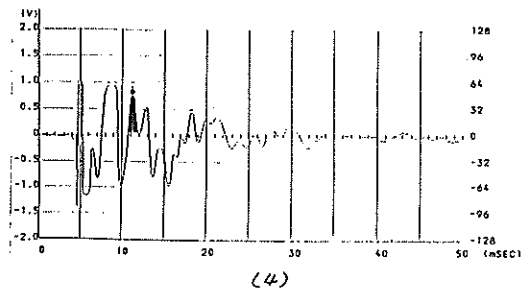
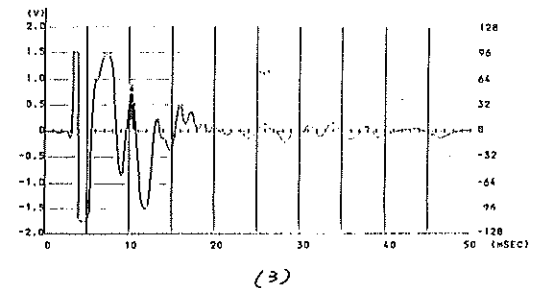
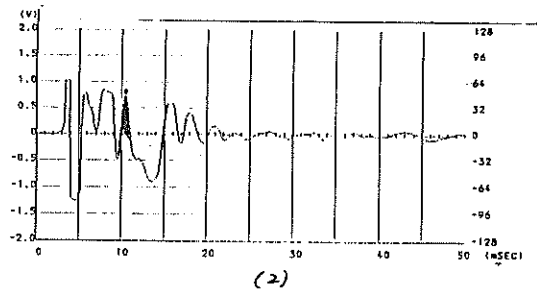
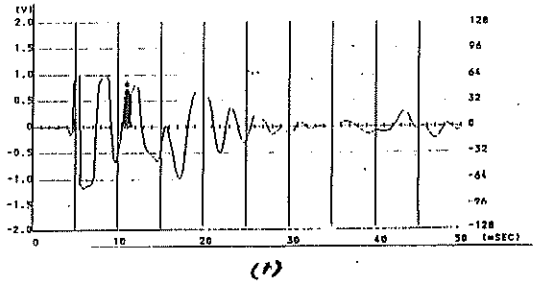


図-63 (1)~(4)埋設物(パイプ)受信波のパソコンによる処理結果

埋設物の合成データ例

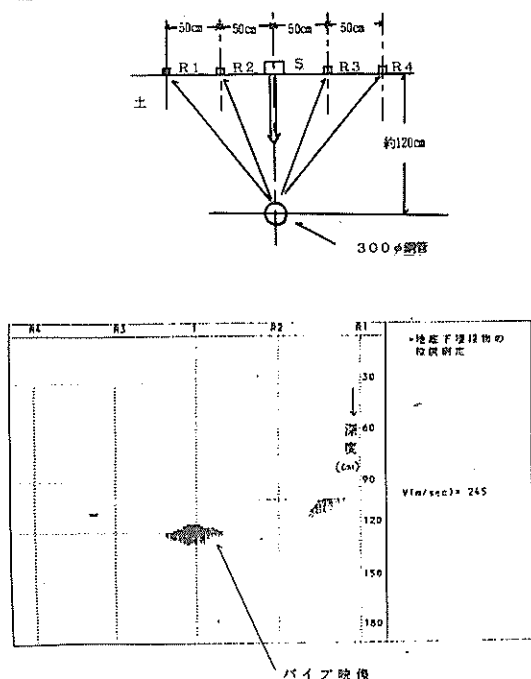


図-64 埋設物（パイプ）の合成データ例

代表的探査実験結果例に示すように、音速の画像に対する影響は少ないが、より良い画像を提供するため、直接波の伝搬時間と距離から音速を推定し、その音速を中心に早くなる音速を2~3種類推定し、適切な画面が得られるようにする。

以上のように処理方式についてパーソナル・コンピュータ（P-CPU）で処理を行った結果を図-63, 64に示す。前述のように受波器を4個、50 cm間隔に一列に並べ（No. 1~No. 4）中央部の送波器から音波を発生し、土中約1.2 mの所の埋設管（管径約300 mm）から反射波を受信した時の受波器の出力波形を図-63(1)~(4)に示す。この個々の受信波形では目標物（導管φ300 mm）の存在の確認が困難であるが、前述の処理を行った結果、図-64に示すように、明確に目標物の存在が確認できた。

今回の粗度計の場合、被測定海面に約30°~45°傾斜させ直径200 mmのビニール製パイプを2.5 m~3 m圧入し、パイプ中に送受波器を設置する送受波器から送りだした音波を砂中の各部及び砂面からの反射波に対し、電子的にビームフォーカス及びビームスキャンを行い処理することによって、リップルが捕捉できることとなる。

### 3.3.3 考察

海底下にセンサー部を埋設し、荒天時、平穏時を問わず現地観測を行う見通しとして次の事項が挙げられる。

#### 1) 砂中の音波伝搬の性質

##### A type

音速	約1500 m/s
伝搬周波数	3 kHz以上
減衰損失	0.5 dB/m以下

##### B type

音速	約250 m/s~500 m/s
伝搬周波数	250 Hz~1 kHz
減衰損失	7 dB/m以上

が考えられ、A typeの場合は波浪が大きい海域では砂中の気泡は殆どないと考えられる。B typeの場合、砂中に空気を含有する海域で、波打際近くではこの状態である。

#### 2) 処理方式として

A type, B typeの何れにおいても、受波アレイを用いて電子的にフォーカシングとビームスキャンにより受信信号を合成処理する。

以上のことにより、砂面の粗度の測定は可能であると考えられる。

しかし、A typeかB typeかによりハード面で大幅に設計が異なる為、実際の使用現場が何れに属するかを明確にすることが好ましい。

この為、今後現地での波打際から数箇所の距離に送受波器を設置しての確認試験が急務と考えられる。

### 3.4 波崎海洋研究施設における現地実験

砂澱の発生海域において、海底の音波伝搬試験を行うと共に現地砂澱の測定を水中から実施した。また、その成果に基づき海底粗度計の設計資料とするための実験を行った。実験場所として、波崎海洋研究施設、実験日時は平成元年1月18日から19日の2日間行われた。

#### 3.4.1 現地砂澱測定実験

##### (1) 実験1

砂澱発生現場における砂中の音波伝搬損失の測定を行った。まず送信レベル及び受信増幅度を決定するために送受信レベルの測定を行った。また、後日、録音結果を分析し適切な周波数を選択するために受信信号の録音を行った。

実験は図-65に示すように砂中約3 mの深さに、直径約70 mmのビニールパイプを投入し、内部に受波器を吊下し、送波器を水中に吊下して送波することによって送波器から受波器迄の音波伝搬損失を求めた。

受信出力から受波器への印加音圧を計算してみると次

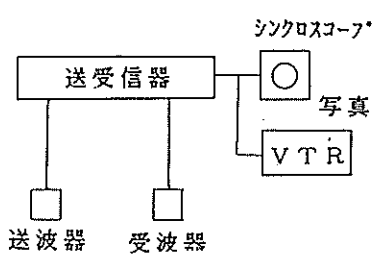
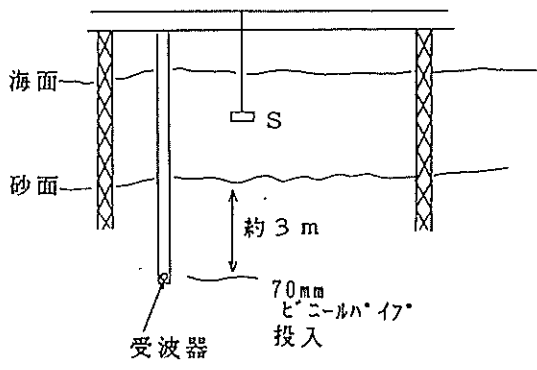


図-65 送受波器の配置と計測ブロック図

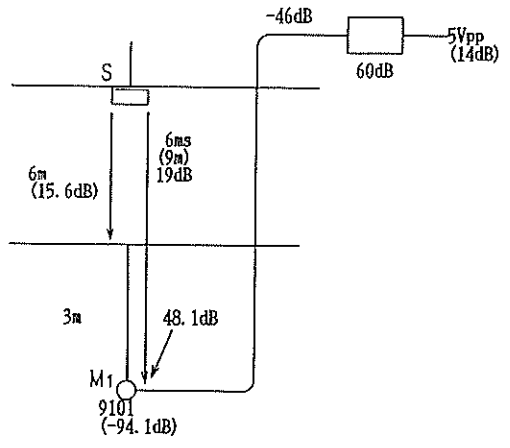


図-67 モノパルスによる砂中の損失

となる。

一方、送波器Sの送波音圧は 100 dBで

送受波器間距離 (4.8 m + 3 m) で7.8 m (17.8 dB)

送波器と海底面の距離は4.8 m (13.6 dB) である。

故に伝搬損失は送波音圧から受波音圧を差引いて

送波音圧 受波音圧 伝搬損失

$$100 \text{ dB} - 64.2 \text{ dB} = 35.8 \text{ dB}$$

となる距離は7.8 mであるので拡散損失は17.8 dBである。故に

$$35.8 \text{ dB} - 17.8 \text{ dB} = 18 \text{ dB}$$

海底面下3mを伝搬する時、拡散損失外に18 dB損失を

生じていることとなり、減衰定数  $\alpha$  は、減衰損失を送受

距離で割って  $18 \text{ dB}/3\text{m} = 6 \text{ dB/m}$  となる。即ち、減衰

損失  $\alpha$  が周波数  $f$  (kHz) に比例するとすれば ( $\alpha = kf$ )、

比例定数  $k$  は、

$$k = \alpha/f = 0.4$$

82

となる。この値は Hamilton が求めた海底堆積層の実測値の範囲にある。

(測定2) ……誘導型送波器 (モノパルス) を用いた  
場合の砂中の損失と音速 (図-67)

送波音圧は85 dBで距離が9mで拡散損失が19 dBと

考えると、受波器への印加音圧は砂中の減衰損失がないと

$$85 \text{ dB} - 19 \text{ dB} = 66 \text{ dB}$$

の音圧となる。

一方、増幅器出力は5 V (14 dB) であるので、増幅度60 dBの場合、増幅器出力14 dBから増幅度60 dBを引いて受波器出力電圧は-46 dBとなる。

受波器 M<sub>1</sub> の受波感度は-94.1 dBであるので受波器

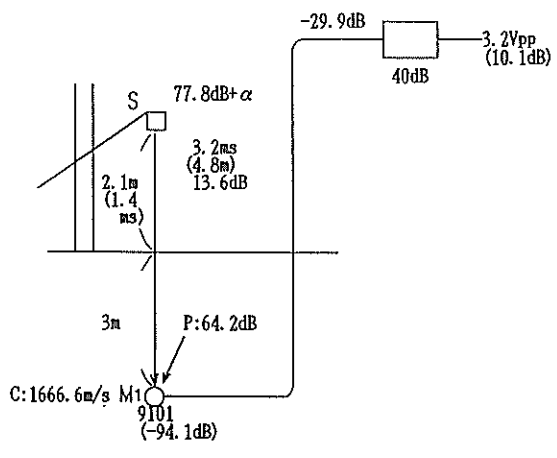


図-66 15 kHz トーンバースト波による砂中の損失

のようになる。

(測定1) ……15 kHz送波器 (トーンバースト波) の場合の砂中の損失 (図-66)

受信出力	3.2 Vpp (10.1 dB)
増幅器	40 dB
増幅器入力	-29.9 dB
受波器感度	-94.1 dB
受波器への印加音圧	64.2 dB

出力から算出した印加音圧は

$$-46 + 94.1 = 48.1 \text{ dB}$$

となる。

吸収損失が無い場合の印加音圧66 dBから受波器出力から算出した印加音圧48.1 dBを引いて17.9 dBとなり、これが3 mの海底面下の減衰損失となる。即ち、減衰損失 $\alpha$ は17.9 dB/3m = 6 dB/mとなる。また、海底面下の音速は $C = 1666.6 \text{ m/s}$ となり、測定1, 2のデータは減衰損失6 dB、音速1666.6 m/sとよく一致する。

## (2) 実験2

砂漣発生現場において砂漣のリップルを水中から測定し計算機により粗度を求めるため、砂漣からの反射を水中からスキャンし、受信波形を録音した。後日相関処理により粗度を求めた。また、上記と同時に海底形状（リップルの状態、リップルの方向、リップルの高さや間隔）をダイバーにより探査した。

実験方法として送波器アレイを傾斜板に取付け、一定角度で吊下して反射レベルを測定した。この時、ダイバーでの計測を行った。図-68に測定状況、表-9に実験使用機材を示す。

(測定1) ……88 kHz, 30 kHz送波器を用いた時の  
砂中の音速と損失

波打際の海面下に送受波器間の距離を20 cm, 40 cm, 60 cmにし、それぞれ埋設して伝搬時間と伝搬損失を測

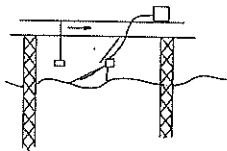


図-68 測定状況

表-9 実験使用機材

機材	数量	備考	重量
15 kHz測深機	1		20 kg
シンクロスコープ	1	撮影装置付	10 kg
誘導型送波器	1	ケーブル10 m以上	8 kg
受波器	1	ケーブル10 m以上	5 kg
録音機	1		10 kg
ビニールパイプ	10 m	径10 m 70~100 mm $\phi$ 肉厚5~10 mm	
ケーブル	100 m	電源用	

定した。その結果をそれぞれ図-69, 70に示す。

この傾度から音速を求めると

$$1.66 \times 10^3 \text{ (m/s)} \text{ (周波数88 kHz)}$$

となり【実験1】の結果とよく合致する。

次に同様に送受波器間の距離をかえて減衰量を求めた

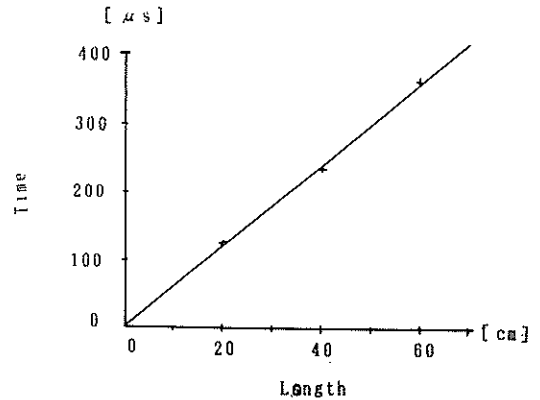


図-69 送受波器間距離と伝搬時間

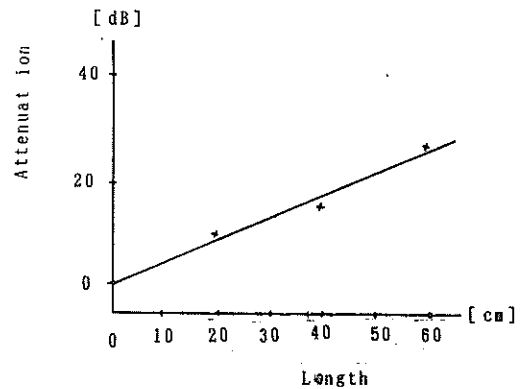


図-70 送受波器間距離と伝搬損失 (88 kHz)

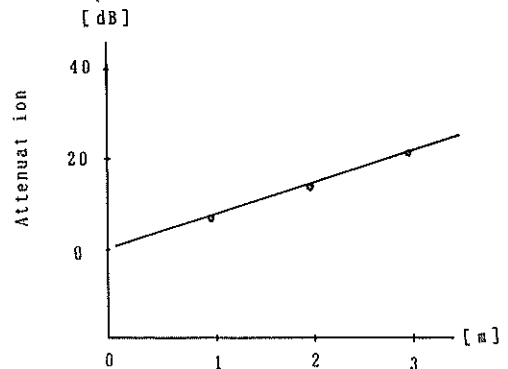


図-71 送受波器間距離と伝搬損失 (30 kHz)

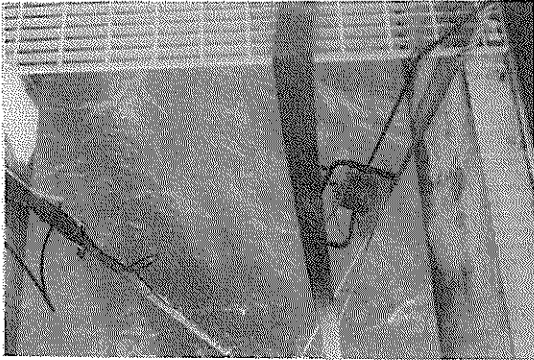


写真-9 砂漣計測用アレイの設置状況



写真-10 砂漣測定状況

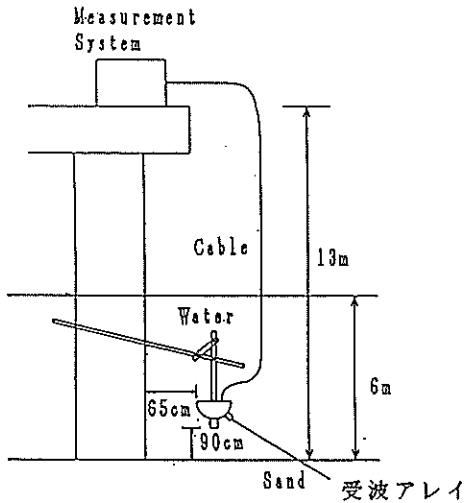


図-72 実験配置図

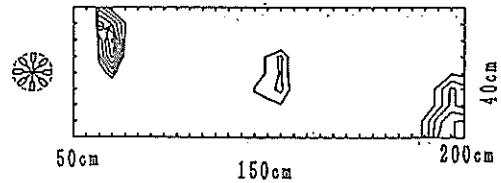


図-73 砂漣の画像

表-10 実験用機材

機材	数量
粗度測定用実験機	1
C P U	1
測 深 機	1
録 音 機	1
シンクロスコープ	1

結果は、図-71に示すように

88 kHzで42.5 dB/m

30 kHzで6.8 dB/m となった。

(測定2) 水中からの砂漣計測実験

実験1と同一の地点で栈橋の橋脚部にダイバーにより図-72および写真-9に示すように、超音波アレイを固定し海底面の砂漣からの反射を測定した。(写真-10) 周波数は88 kHzで画像範囲は幅40 cm、長さ150 cmの範囲である。

砂漣は図-73に示すように送受波器の軸に対し傾斜を持った方向に出来ており、また、砂漣ピッチは約65 cmであると予測できた。

実際の砂漣の形状はダイバーにより直接計測した結果、60~80 cmとなり本計測結果と良く一致している。表-10に実験用機材を、図-74に超音波送受波器アレイ

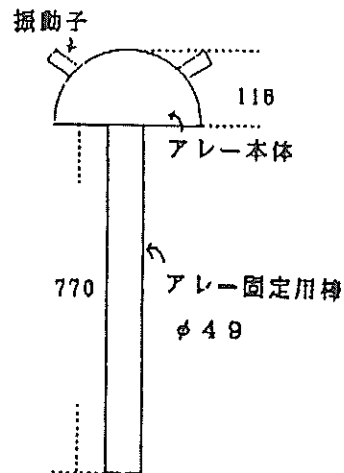


図-74 超音波送受波器アレイ



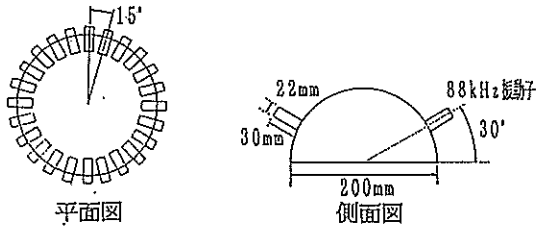


図-75 アレーの構造

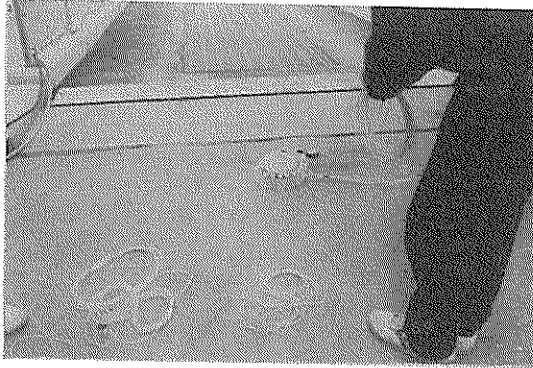


写真-11 砂澁計測用アレーの構造

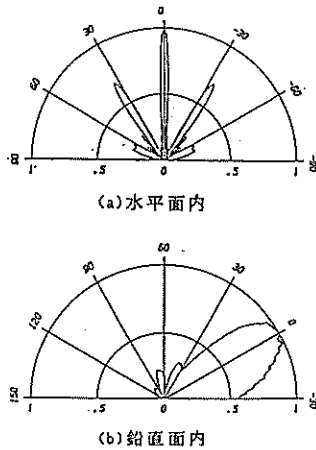


図-76(a)(b) アレーの指向性 (88 kHz)

を示す。この実験に使用したアレーの構造を図-75および写真-11に示す。

半径10 cmの亚克力製の半球に送波仰角 $30^\circ$ となるように振動子をアレーの間隔 $15^\circ$ で配置している。一方方向の測定には7個の振動子を用いる。実際に $360^\circ$ 全ての方向を測定するためには24個の振動子を配列しなければならない。構成したアレーの指向性の計算結果を図-76

(a), (b)に示す。送波は連続波、振動子の指向性は方形盤の理論的指向性であるとした。水平方向のメインローブの片側半値幅は $2.9^\circ$ サイドローブ角は、 $34^\circ$ で垂直方向の半値幅は $20.0^\circ$ である。

### 3.4.2 埋設物形状測定実験

参考実験として砕破帯の海底砂中の超音波伝搬特性や分解能を確認するため、棧橋下の海底下約4 mに埋設している沈船の形状を15 kHz音響測深機を用いて、送受波器を沈船上に移動しながら測定する実験を行った。棧橋上からパイプで吊下し、ロープで固定しながら測定した。その状況を図-77に示す。

吊下場所が砕破帯のため送受波器の動揺が激しかったが、直下に送受波器が向いた時には沈船のエコーを明確に確認することができた。すなわち、水中に設置した送受波器と海底面との水中超音波伝搬時間が10 msで、水中音速を1500 m/sとすると伝搬距離が15 mとなって、片道7.5 mとなる。また、埋設物(沈船)と送受波器との水中、砂中超音波伝搬時間が15 msとなり、伝搬距離

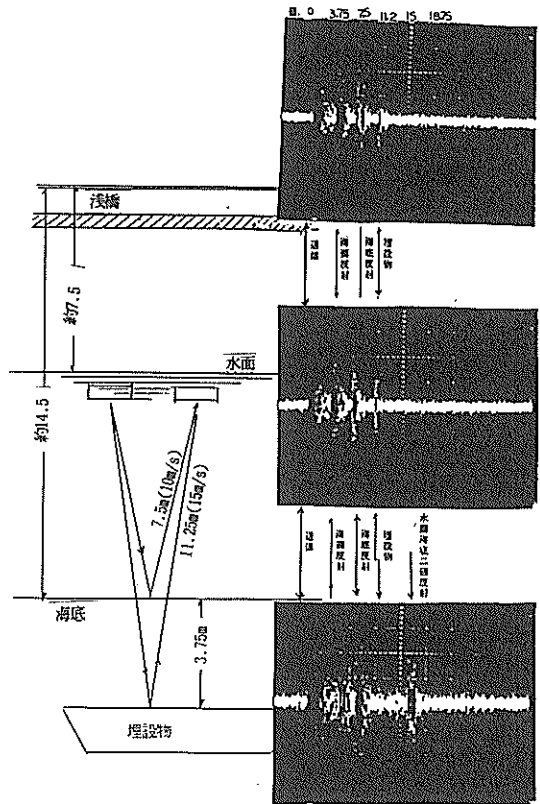


図-77 埋設物(沈船)形状測定実験

が22.5 mとなって片道11.25 mとなる。

従って、海底面から埋設物までの距離、すなわち沈船の埋設距離は $11.25\text{ m} - 7.5\text{ m} = 3.75\text{ m}$ となる。この場所での海底砂は、15 kHzの超音波周波数でも充分伝搬可能であり砂中の音速も1500 m/sであることがわかり、実験1の結果を実証している。

すなわち、埋設物（沈船）上面は海底面下3.75 mに明瞭に確認できた。

#### 4. 実験結果のまとめと測定方法の検討

##### 4.1 砂中の音速と吸収損失

砂中を音波が伝搬する際、砂中の状態により音速変化と減衰損失が生じる。一般に、空気中にある砂中の音波伝搬による減衰定数  $\alpha$  (dB/m) は非常に大きく、

$$\alpha_s = kf^2 \quad (3)$$

$f$  : 周波数

となる。減衰定数  $\alpha$  は土の性質により大きく変わる。砂中の減衰定数  $\alpha_s$  についての一例を図-78に示す。次に水が飽和した砂中の音波伝搬は、砂の粒径や圧力等によっても音速  $C$  は変化することが知られている。図-79にその一例を示す。

これらの音速は、砂中の含水比（空気の含有量）に非常に影響され、空気を少し含有すると音速は非常に遅くなる。その一例を図-80に示す。

今回の開発にあたって、砕波帯での砂中からの砂礫の測定のための最も検討を要する項目として、砕波帯における海底の砂中の音速及び吸収損失や空気を含んだ砂中の特性が、一般海域における海底条件と音響的に一致す

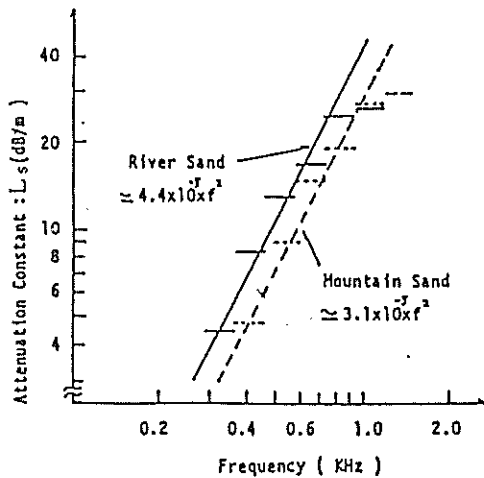


図-78 地層中の減衰定数

るかによって、今後の粗度計の基本方式を左右するため、この点について充分検討を加えた。空気を少しでも含有すると、今回の実験でも非常に音速が低くなる。

この実験結果を表-11, 12に一覧表として示すと共に空気を含有している場合の音速結果を要約すると表-13に示すようになる。

一方、飽和水で土砂が満たされている時は、音速は1600 m/s~1700 m/s、吸収損失は50 kHz以下では10 dB/m以下と考えられるので、分解能も30 cm程度の砂礫の判別は可能と考えられる。

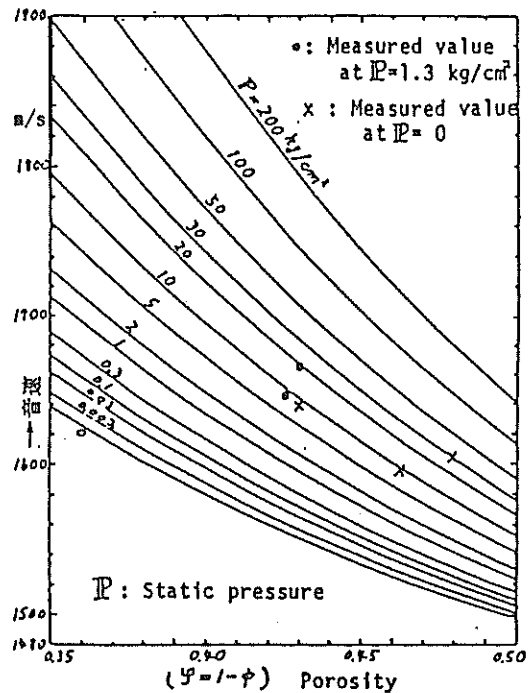


図-79 水が飽和した砂中の音波伝搬速度

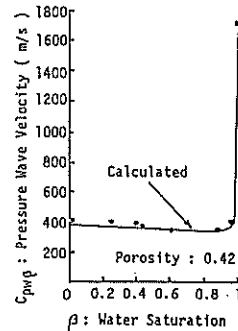


図-80 含水比の変化による砂中の縦波の音波伝搬速度

表-13 空気が混入している場合の音速

		音 速	粒 径
空気のみ	砂層	245~ 260 m/s	0.6 mm (比重2.75)
	砂+水 (同上)	260~ 280 m/s	
	ローム層	325~ 350 m/s	0.018 mm (比重2.81)
空気のみ	盛砂	150~ 160 m/s	0.12 mm
空気+水	久里浜海岸	300~ 370 m/s	0.35 mm
海 水 下	同上	1500 m/s	同上
空 気	波崎海岸	125~ 270 m/s	0.18 mm
		170~ 180 m/s	
空気+水	550~ 680 m/s		
海 水 下		1600~1700 m/s	
空気+水	赤土+粘土(田圃)	60~ 80 m/s	0.12 mm以下
	シルト	230~ 270 m/s	
セメント	固化材	680~ 700 m/s	
	ベントナイト	1350~1400 m/s	

4.2 測定方式の検討

- (1) 超音波反射波のパワースペクトルから砂澁のリッ  
プル間隔を求める方法 (方式1)

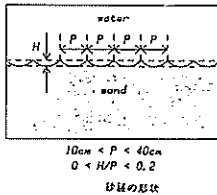


図-81 砂澁の形状<sup>10)</sup>

ここでは、参考文献10) に示されている方法を示す。  
一般に、砂澁は、海底面上の砂の山、谷が波浪によっ  
て往復運動を行い生じるもので、砂澁の方向、ピッチは  
短時間一定であると考えられる (図-81)。

このような考え方から図-82(a), (b)に示すように鉛直  
面内では広いビーム幅を形成する。

超音波パルスは砂中を伝搬し、複数の砂澁から反射  
し、送受波器で受波される (図-83(a))。この理論的な  
受波波形を図-83(b)に示す。今、図-83(a)に示すよう  
に、送受波器から反射点までの距離  $L_i (i=1, 2, \dots)$   
は

$$L_i = (D^2 + (i \times P - P/2)^2)^{1/2} \quad (84)$$

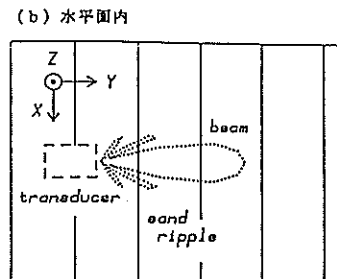
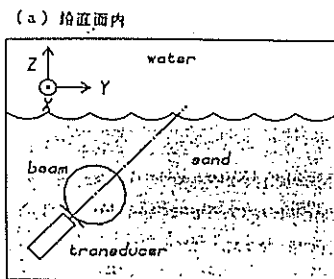
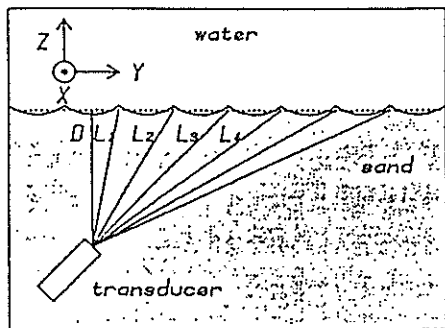


図-82(a)(b) 砂澁ピッチ測定のための送受波器配置<sup>10)</sup>

となり、各反射点からのエコー到達時間を  $t_i (i=1, 2, \dots)$  とすると、



(a)

図-83(a) 砂漣からのエコー信号の伝搬経路<sup>10)</sup>

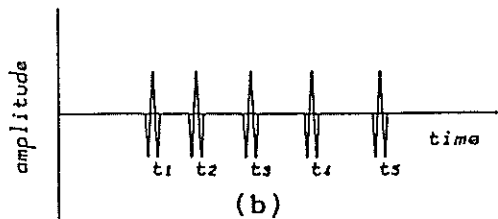


図-83(b) 砂漣からのエコー信号<sup>10)</sup>

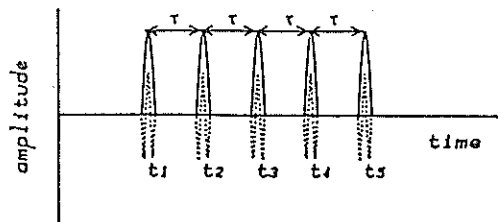


図-83(c) 時間補正した波形<sup>10)</sup>

$$t_1 = \frac{2L_1}{C_s} \quad (35)$$

となる。このパルス間隔を一定とするため次のような時間補正を行う。

$$t_1' = (t_1^2 - (2D/C_s)^2)^{1/2} \\ = \frac{2(i \cdot P - P/2)}{C_s} \quad (36)$$

$$\therefore P = \frac{t_1' \cdot C_s}{(2i-1)} \quad (37)$$

$D$ : 砂面と送受波器との距離

$C_s$ : 砂中の音速

$P$ : 砂漣のピッチ

図-83(b)の受信波形を2乗包絡線検波した後、上式で時間補正した波形を図-83(c)に示す。このパルス間隔  $\tau$  から砂漣のピッチ  $P$  は

$$P = C_s \cdot \tau \quad (38)$$

として求めることができる。

実際には、ピッチ間隔はノイズ等で判別が困難と考えられるので、パワースペクトルを求め平均的な砂漣ピッチを求める。即ち、時間補正迄の波形  $g(t)$  とし、そのフーリエ変換  $G(f)$  は

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (39)$$

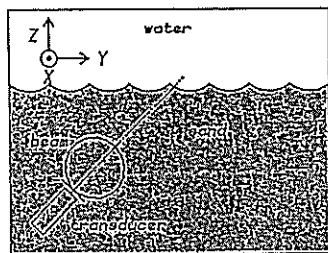
と現せる。パワースペクトル  $|G(f)|^2$  が最大となる周波数  $f_{max}$  とすると、砂漣ピッチは

$$P = C_s / 2f_{max} \quad (40)$$

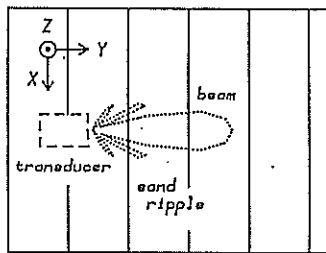
となる。(直流成分は除く)

(2) 超音波の反射波を狭ビームで受信し、砂漣のスキヤニングを行い画像化する方法 (方式2)

本計測方法は、蜂屋ら<sup>10)</sup>によって考案された方法で、砂中に超音波送受波器アレーを設置し、海底面上の



(a) 鉛直面内



(b) 水平面内

図-84 砂中における送受波器配置<sup>10)</sup>

砂澁に向かい超音波ビームを送走するものである。超音波ビームは図-84(a)に示すように鉛直面内では広いビームを持ち、水平面では図-84(b)に示すように狭いビーム幅となるようにする。送受波器により放射された超音波パルスは、砂中を伝搬し、ビーム内の複数の砂澁の上で反射し受波される。砂澁表面で反射し、受波された信号は、砂澁形状を反映したものとなっており、この反射強度を基に砂澁形状を測定する。

ここまでの方法は一般に広く使用されている方式であるが、砂中からの計測では、砂澁のリップルの分解能の測定の可否に問題があった。そこで、蜂屋ら<sup>13)</sup>は、スキャニング方式で映像化することを試みた。

今回、この方法を実験室でのモデル実験に適用したところ、リップル測定の可能性が確認された。今回の実験の結果では、88 kHzで水中からの砂澁のリップル測定は十分可能であることが立証されると共に、砕波帯域の砂中の音速は1600 m/s~1700 m/sと確認された。

以上により水中からの計測同様の考え方で砂中の伝搬損失を考慮することによって測定が可能であることが確認された。

## 5. 海底粗度計のシステム設計

### 5.1 実験データの検討

波崎海洋研究施設における現地実験で、砕波帯の海底砂中の音速は約1600 m/s (1600 m/s~1700 m/s)で、砂中の音波の吸収損失 $\alpha$ は超音波周波数が15 kHz~30 kHzで6~8 dB/mであった。

方式(1)と(2)の場合の実験結果をまとめてみると次のようになる。

- ・方式(1)の場合
  - 周波数 400 kHz
  - 指向幅 鉛直方向30° (送受波器長さ20 mm)  
水平方向3° (送受波器長さ200 mm)
- ・方式(2)の場合
  - 周波数 88 kHzまたは15~30 kHz
  - 指向幅 鉛直方向 20°  
水平方向 2.9°
  - 吸収損失 39.2 dB/m at 88 kHz  
6~8 dB/m at 15~30 kHz
  - 音速 1600 m/s
  - 送受波アレイ 径20 cm at 88 kHz ( $\lambda : 1.7$  cm)
  - リップル分別
    - リップル間隔 16 cm (9.4  $\lambda$ )
    - リップル高さ 3.5 cm (2  $\lambda$ )  
at 88 kHz
    - リップル間隔 65 cm

以上の結果

- 砕波帯の海底面下の砂中の
  - 音速 1660 m/s
  - 吸収損失 6~8 dB at 15~30 kHz
  - 送受波器の指向幅
    - 鉛直方向  $\pm 30^\circ$
    - 水平方向  $\pm 3^\circ$

にすると

- 砂澁のリップル間隔
  - 距離1 mで 20 mm
  - 距離3 mで 30 mm

が判別可能となる。

### 5.2 海底粗度計測システム

次に海底粗度計測システムを計測する際の留意する点を方式の選定、送受波器アレイ、計測システム、システムの展開に分けて検討する。

#### (1) 方式の選定

方式(1), (2)の使い方として

- ・方式(1)の場合
    - ①砂澁の方向が波浪等で変化せず一定の場合
    - ②方式(2)で砂澁の方向が既知の場合
    - ③方式(2)でリップルの間隔が不明確な場合
    - ④その他
  - ・方式(2)の場合
    - ①砂澁の方向が不明な時
    - ②砂澁の方向が絶えず変化する場合
    - ③連続的に記録する場合
    - ④その他
- が考えられる。

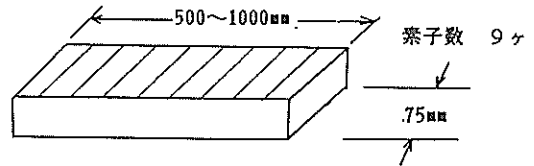


図-85 アレイの形状寸法

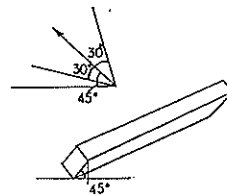


図-86 アレイの配置と掃引角

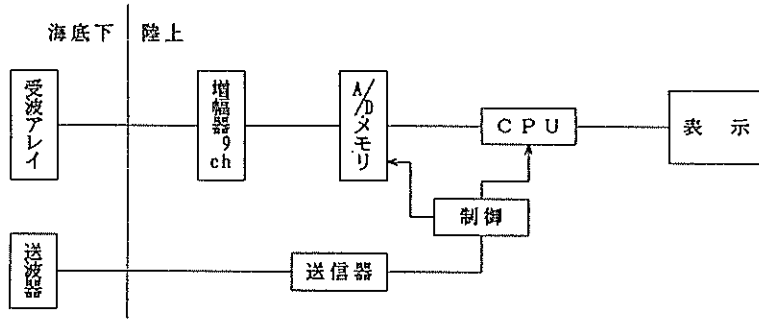


図-87 海底粗度計のブロック図

## (2) 送受波器アレイ

送受波器アレイの分解能は、周波数が20 kHzとすると、

- 鉛直方向 幅 15 cm  
 (指向角  $\gamma/2 = 20^\circ$  at 20 kHz)  
 水平方向 長さ 100 cm  
 (指向角  $\gamma/2 = 3^\circ$  at 20 kHz)

となる。この結果、実用的には図-85の形状寸法を目標にアレイを形成し、図-86のように約 $45^\circ$ 方向に向け、 $\pm 30^\circ$ 掃引する。

## (3) 計測システム

海底粗度計測システムは図-87のブロック図に示すように構成する。送信器で所要の周波数の電気パルス信号を発生させ、送波器で超音波パルスに変換して、砂中に放射される。超音波パルスは海底面に到達すると、反射してある範囲を掃引している受波アレイに掃着する。

この受信出力を増幅器で所要のレベルまで増幅してA/Dコンバータでデジタル値に変換してメモリに記録される。このデータは、CPUで適時処理されてCRTに表示される。

## (4) システムの展開

この海底粗度計測システムを現地実用海域で運用する際の手順を次に示す。

### ① 送受波器の設定

ジェット水流にて、掘削しながら深さ約3 mを目標に設置する。

### ② 送受波器ケーブルは、補強材に沿って砂中深く、陸上に導く。

### ③ 陸上で情報を増幅し、A/D変換した後、メモリに収納する。

### ④ CPUからの読み出しにより、情報をCPUに送出処理後、表示する。

以上に述べたような、海底粗度計測システムを設計製作し、現地海域でシステムの展開をしていけば、荒天時でも碎波帯域の流れを自動的に、連続的に観測記録することができるものと考えられる。

## 6. まとめ

海底粗度計の開発に関する研究の成果をまとめてみると次のようである。

### (1) 室内モデル実験

#### a) 水槽内予備実験

水槽内に入れた砂の表面の一部に傾斜面を作り、電磁誘導型送波器及び受波器を水槽底面に設置して傾斜面を少しずつ移動させつつその形状を測定した結果、砂中からの砂面形状測定が可能であることがわかった。

#### b) 二次元水路実験

二次元水路内に砂を敷き、波をかけて砂澁を形成させて砂中の送受波器 (a) で用いたもの) にて砂面形状を測定した結果、砂間隙中の気泡のため測定不可能であった。

### (2) 超音波伝搬特性実験

#### a) 予備実験

港研敷地内で砂を盛土し、パイプレータで締めて、砂中の音波伝搬測定し、また、港研小型水槽内に砂を入れて砂中音波伝搬特性実験を行った。さらに、久里浜港海岸の波打際で砂中伝搬特性の測定実験を行った結果、砂中音速は150 m/s~350 m/s、水槽内では1500 m/sであることがわかった。

#### b) 現地実験

波崎海洋研究施設にて実験を行った結果、砂の間隙が空気の波打際の砂の音速は500~540 m/s、水で満たされた海底砂の音速は1500 m/sであることがわかった。また、沈船を対象にした測定では、音速は1500 m/s、

表-11 砂中の音波伝搬試験結果のまとめ

項目	単位	Vin	C	送波器	受波器	測定距離	音速	受波器出力電圧	伝搬周波数	測定帯域	コメント	平均粒径
港水 研なし 内堆盛 積砂 砂		1500	60	100φ	TW-9103 加速度計	25~40	152	-36.1	314	100~20k	コンクリート面上に盛り上げた砂層をスコップで叩いて固めた程度の砂層	0.12
		1000	260	100φ	TW-9103 加速度計	25~40	150	-11.7	375	"		
				100φ	TW-9103 加速度計	25~40	152	-38.7	308	"		
				100φ	TW-9103 加速度計	25~40	150	-14.9	379	"		
堆加 積土・水なし		700	100~260	200φ 千葉工大	加速度計	50~200	302	---	400	---	10 cm~20 cm 毎に加圧器を用いた約2 m厚さの土層細砂は砂に比して10倍以上伝搬損失多し	0.35
		"	"	"	"	"	279	---	700~1k	---		
久里浜海岸波打際		700	40	100φ	TW-9103	32	373	-76.5	1.2k	0~10k	干潮時波打際に受波器を埋設し送波器を砂面上に移動して測定した。	0.35
						36	360	-66	909	"		
					港研	40	303	-75	1k	"		
					港研	45	344	-80	909	"		
		700	40	100φ	TW-9103	262	1500	-54	6.6k	0~10k	水 中	
					港研	218	1500	-51.4	6.6k			
港研小型水槽		1000	40	100φ	TW-9103	30	1500	-54~-40.9			砂中から砂上の受波器で測定	0.12
						50	1500	-48				
波崎海岸		1500	60	100φ	TW-9103	20	500~540	-22.5 (34 dB-m)	550~680	100~20k	海岸の波打際に20 cmの穴を掘り送波器を埋設し砂をかき上げ上面に受波器を置いた(水有り) 上記状態の上に砂を40 cm盛り上げその上に受波器を置いた。盛り上げ部は水なく固さはスコップで固めた程度	0.18
		1500	60	100φ	TW-9103	60	137~176	-28.5 (30.4 dB-m)	520	100~20k		

表-12 砂中における反射特性のまとめ

項目	Vin	C	送波器		受波器		測定距離	音速	受波器出力電圧		伝搬周波数	測定帯域	コメント		平均粒径
			型名	型名	型名	型名			dB	Hz			Hz~Hz		
港研小型水槽	1000	40	100φ	TW-9103	TW-9103	30×2	1500	-20	15k	100~100k		水面から水中に砂を投入し、規定高さになる様にし、送受波器を埋設して測定した。(1日以上経過後)	0.12		
	"	"	"	"	"	57×2	1500	受信せず							
波崎棧橋	1500	60	100φ	TW-9103	TW-9103	50×2	125 (165)	-34	250 (310)	100~20k		波打際の砂面を50cm掘り下げ送受波器を埋設した(水の侵入あり)	0.18		
	"	"	200φ	"	"	75×2	250~270	-30.5~37	450~550	"		上記の状態に25cm砂をつみ上げスコップで叩き固めて判定した			
橋における測定	"	"	100φ	"	"	50×2	1500	-27	1k	"		水中50cm~70cmの深さの場所をダイバーにより水中ポンプで掘削し送受波器を埋設して判定した	0.18		
	"	"	"	"	"	"	"	-44	5k	5k~20k					
	"	"	200φ	"	"	200~400×2	1500	-23~-27	500	100~20k		海底砂面上に送受波器を置いて砂上から埋設物を判定した	(水深 約6m) (埋設深度 約4m)		
	"	"	"	"	"	"	1500	-35	5k	5k~20k					



周波数 5 kHz で 5 dB/m 減衰定数, 10 kHz で 20 dB/m の減衰定数であった。

### (3) 砂澁測定実験

#### a) 室内モデル実験

1 × 1 × 1.5 m の FRP 製小型水槽内でブロック検知実験を行ったが, 周囲からの反射が多く, ブロックからの反射波の識別は困難であった。

#### b) テータ処理方式の検討

測定データの処理方式の検討を行い, ビームスキャンニング及びビームフォーカシングを行うことによって, 粗度は計測可能であることがわかった。

### (4) 波崎海洋実験施設における現地実験

#### a) 実験-1

砕波帯内の砂中超音波伝搬特性の測定を行った結果, 15 kHz トーンバースト波で, 音速は 1500 m/s, 減衰定数 6 dB/m であった。

モノパルス波では, 音速は 1666.6 m/s, 減衰定数 6 dB/m であった。

#### b) 実験-2

砂澁の測定及びそれに係わる砂中伝搬の測定をおこなった結果, 88 kHz トーンバースト波で音速が 1660 m/s, 減衰定数が 42.5 dB/m, 30 kHz 波で音速が 1660 m/s, 減衰定数が 6.8 dB/m であった。

超音波アレイにより砂澁を水中から測定した結果, 88 kHz 波を用いたところ, 砂澁ピッチは 65 cm であった。この値は, ダイバーで確認した値 60 cm ~ 70 cm と一致した。

### (5) 結論

以上の成果を検討した結果, 総合的な結論として, 次のようになる。

- ① 測定方式としては, 送受波アレイによるスキャンニング方式, またはパワースペクトル方式とする。
- ② 砕波帯内の海底砂の音波伝搬特性は, 音速が 1660 m/s, 超音波周波数が 15 ~ 30 kHz で, 減衰定数が 6 ~ 8 dB/m であること。
- ③ 距離分解能  $\Delta X$  は, 音速を  $C$ , パルス幅を  $\tau$  として,  $\Delta X = 1/2 \cdot C \cdot \tau$  であるから, 周波数を 20 kHz とすると,  $\Delta X$  は約 4 cm となる。従って, 周波数を 20 kHz ~ 88 kHz の間で可能な限り高くする必要はある。

## 7. あとがき

昭和60年度から63年度までの調査で海底粗度計に必要な超音波の諸元について, 1つの指針が示された。

この方式の海底粗度計を実用化することによって, 波

による海底砂の捲き上げを大きく支配する砂澁のピッチを荒天時に観測する手法について指針が得られたものと考えられる。ただし, 海底砂面の微地形測定について, 測定データ処理方式としてのパワースペクトルと送受波アレイのスキャンニング方式の有利不利, 砂澁測定に最も適した超音波周波数 (15 kHz ~ 88 kHz の範囲) の選定, 荒天時の砂移動の激しい時の砂中からの超音波に対する砂面の反射損失等の問題が残されている。

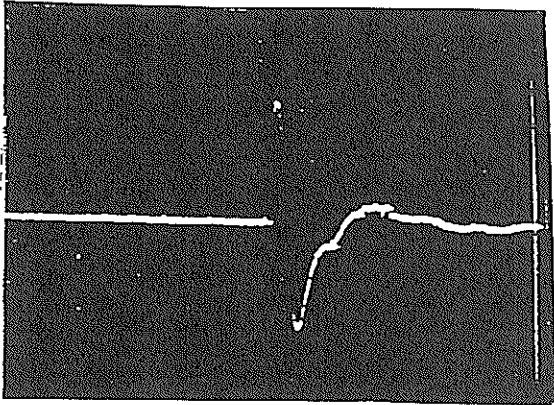
このため, システム設計で述べた方式の海底粗度計を試作し, 荒天時を含めた現地の海底粗度の連続観測を行い, その結果を含めて上記課題を解決すれば, 本方式の海底粗度計の実用化が可能であると考えられる。

最後に, 本研究は, 港湾技術研究所と備東和製作所の共同研究として行われたものである。また, 東京工業大学精密工学研究所からは有益な助言をいただいた。関係各位に深謝いたします。 (1990年3月30日受付)

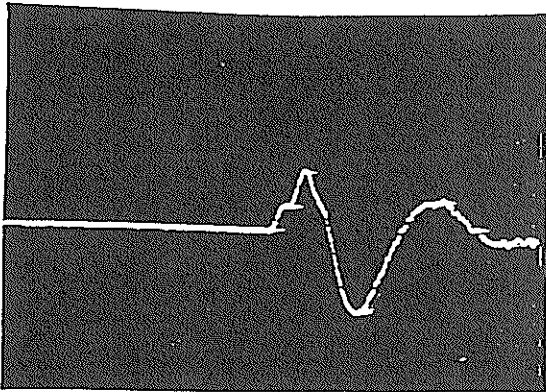
## 参考文献

- 1) 入江功・澁岡和夫・近藤隆直・寺崎賢次: 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘-底質の移動機構に着目した研究-, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, 1984, pp. 3-52.
- 2) Longuet-Higgins, M. S.: Mass transport in water waves, *Phil. Trans. of Royal Soc., London, series A, No. 903, Vol. 245, 1953, pp. 535-581.*
- 3) 本間仁・堀川清司・鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第11回海岸工学講習会講演集, 1964, pp. 159-168.
- 4) 堀川清司・漂砂論, 1965年度水工学に関する夏季研究会講義集B・海岸港湾コース, 1965, p. 25.
- 5) Nielsen, A. F. and A. D. Gordon: Sediment responses to natural waves, *Proc. 19th ICCE, 1984, pp. 1797-1815.*
- 6) 木原純孝: 超音波による海底探査技術の開発について, 昭和57年度港研講演会講演論文集, 1982, pp. 227-286.
- 7) E. L. Hamilton, G. Shumway, H. W. Menard and C. J. Shippek: Acoustic and other physical properties of shallowwater sediments off San Diego, *J. Acous. Soc. Amer.* 28, 1956, p. 1.
- 8) H. Brandt: Factors affecting compressional wave velocity in unconsolidated marine sand sediments, *J. Acous. Soc. Amer.* 32, 1960, p. 171.

- 9) 実吉純一・菊地善充・能本乙彦：超音波技術便覧，  
日刊工業新聞社，昭和53年新訂版。
- 10) 奥島基良・大槻茂雄・蜂屋弘之・吉田俊之：超音波  
による砂漣のピッチ測定に関する基礎的研究，海洋音  
響研究会講演論文集，1986，pp. 45-48。
- 11) 蜂屋弘之・林秀樹・大槻茂雄・奥島基良：超音波水  
平円弧アレーを用いた海底砂漣形状の計測法，電気学  
会計測研究会資料，IM-88-37，1988，pp. 1-10。

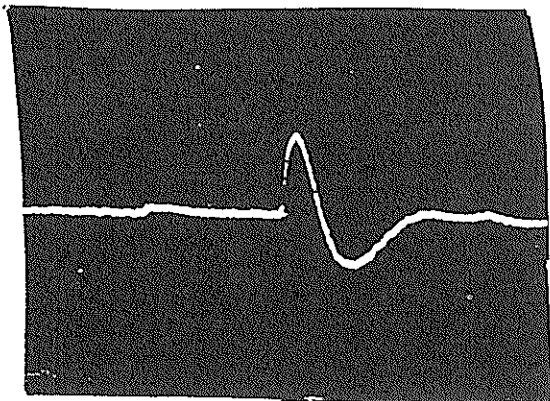


100φ 1ヶ誘導型(ケーブル10m)  
 付加電圧 1500V<sub>op</sub>  
 Filter 100Hz~THRU  
 C 60μF  
 スケール 100μs/div 1V/div  
 出力 150mV(-16.5dB)  
 距離 5m(14.0dB)  
 音圧 107.5dB-m  
 半波 40μs(12.5KHz)  
 一波 170μs(5.9KHz)

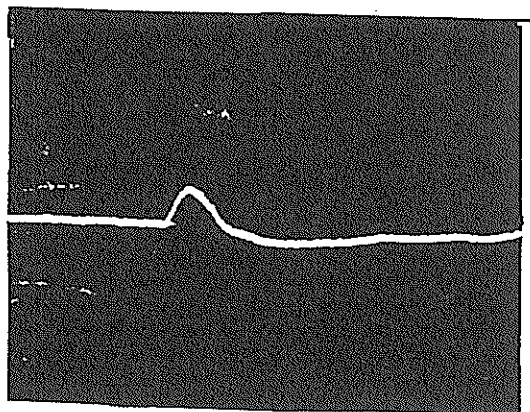


付加電圧 1000V<sub>op</sub>  
 Filter 100Hz~THRU  
 C 260μF  
 スケール 100μs/div 1V/div  
 出力 93mV(-20.6dB)  
 距離 5m(14.0dB)  
 音圧 103.5dB  
 半波 120μs(8.3KHz)  
 一波 260μs(3.8KHz)

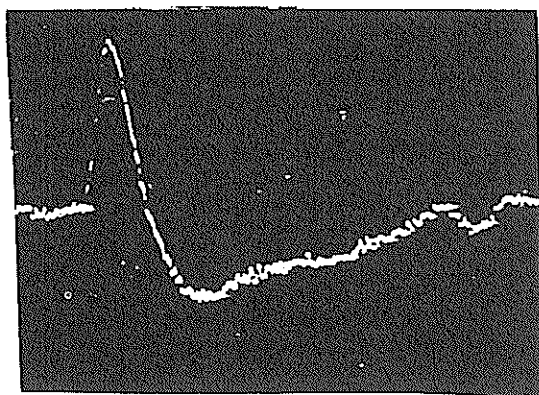
付図-1-1



200φ 1ヶ誘導型(ケーブル35m)  
 付加電圧 1500V<sub>op</sub>  
 Filter 100Hz~THRU  
 C 60μF  
 スケール 100μs/div 0.5V/div  
 出力 43mV(-27.3dB)  
 距離 5m(14.0dB)  
 音圧 96.7dB-m  
 半波 80μs(6.3KHz)  
 一波 280μs(3.6KHz)



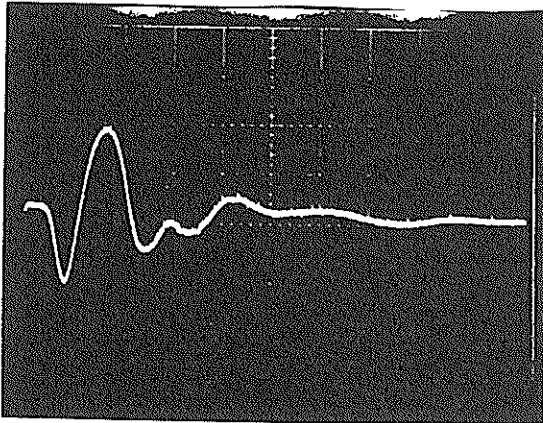
付加電圧 1000V  
 Filter 100Hz~THRU  
 C 250μF  
 スケール 100μs/div 0.5V/div  
 出力 20mV(-34dB)  
 距離 5m(14.0dB)  
 音圧 90dB  
 半波 120μs(4.2KHz)  
 一波 700μs(5.9KHz)



付加電圧 同上  
 Filter 同上  
 C 同上  
 スケール 100μs/div 0.1V/div  
 出力 同上  
 距離 同上  
 音圧 同上  
 半波 同上  
 一波 同上

付図-1-2

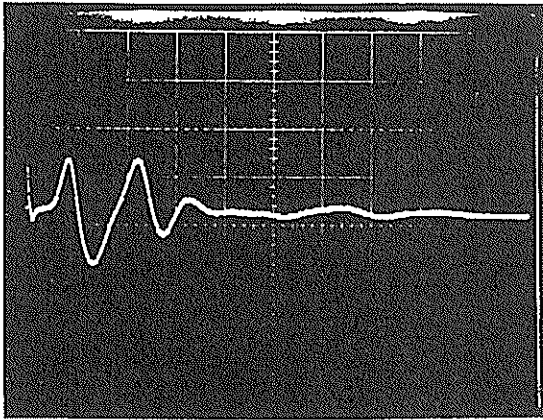
送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>3</sub>)      S L = 107.5 d B - m  
 ( 1 0 0 φ )      ( 9 1 0 3 S 1 0 7 4 )      k m = - 110 d B



↑ 0.4ms

送信電圧    1500 V p - p  
 容    量    60 μ F  
 Amp. Gain    6 d B  
 Filter       0 H z  
 Scale        50 m V    1 m s e c  
 受信波  
     半波      0.8 m s e c ( 625 H z )  
     一波      1.8 m s e c ( 555 H z )  
 受信電圧    ( - 16.5 d B ) 150 m V  
 音    速    500 m / s

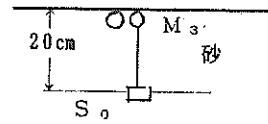
送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>3</sub>)  
 ( 1 0 0 φ )      ( 加 速 度 計 )



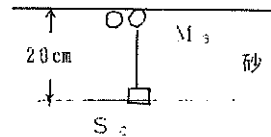
↑ 0.4ms

送信電圧    1500 V p - p  
 容    量    60 μ F  
 Amp. Gain    6 d B  
 Filter       0 H z  
 Scale        0.5 V    1 m s e c  
 受信波  
     半波      0.57 m s e c ( 880 H z )  
     一波      1.36 m s e c ( 730 H z )  
 受信電圧    1.0 V  
 音    速    500 m / s

送受信状態    空 氣



送受信状態    空 氣



付図-2-1

送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>3</sub>)  
 (100φ) (9103S1074)

SL = 107.5 dB - m  
 km = -110 dB

送信電圧 1500 V p - p

容量 60 μ F

Amp. Gain 6 dB

Filter 0 Hz

Scale 50 m V 0.5 m s e c

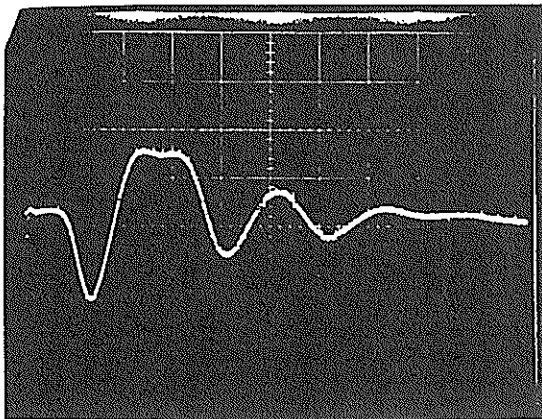
受信波

半波 0.57 m s e c (877 H z)

一波 1.46 m s e c (685 H z)

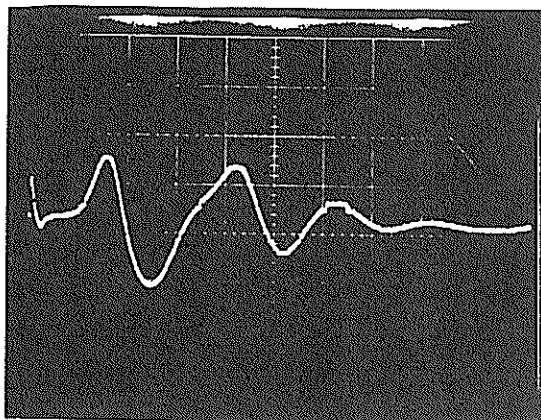
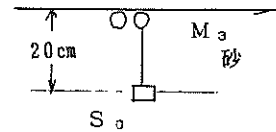
受信電圧 150 m V

音速 540 m / s



↑  
0.37 m s

送波器 (S<sub>0</sub>) ——— 受波器 (M<sub>3</sub>)  
 (100φ) (加速度計)



↑  
0.38 m s

送信電圧 1500 V p - p

容量 60 μ F

Amp. Gain 6 dB

Filter 0 Hz

Scale 0.5 V 0.5 m s e c

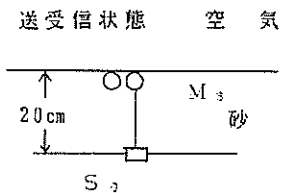
受信波

半波 0.6 m s e c (834 H z)

一波 1.6 m s e c (625 H z)

受信電圧 1.3 V

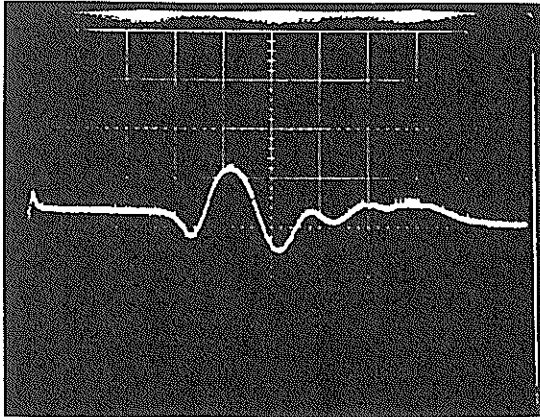
音速 540 m / s



付図-2-2

↑ 3.2ms

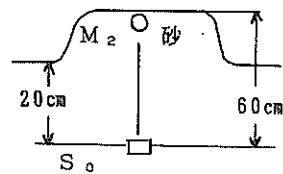
送波器 (S) ——— 受波器 (M)      S L = 107.5 d B - m  
 ( 1 0 0 φ )                      ( 9 1 0 3 S 1 0 7 1 )      k m = - 1 1 2 d B



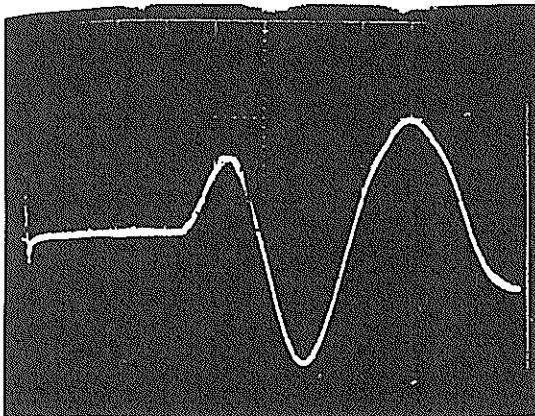
↑ 3.4ms

送信電圧    1500 V p - p  
 容    量    60 μ F  
 Amp.Gain    6 d B  
 Filter       0 H z  
 Scale       50 m V    1 m s e c  
 受信波  
     半波     0.7 m s e c ( 7 1 4 H z )  
     一波     1.9 m s e c ( 5 2 6 H z )  
 受信電圧    0.075 V ( - 2 2 . 5 d B )  
 音    速     176 m / s

送受信状態    空 氣



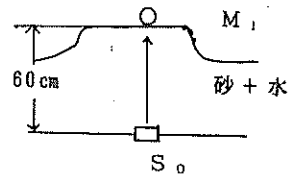
送波器 (S) ——— 受波器 (M)      ( 加 速 度 計 )  
 ( 1 0 0 φ )                      ( 加 速 度 計 )



↑ 3.4ms

送信電圧    1500 V p - p  
 容    量    60 μ F  
 Amp.Gain    20 d B  
 Filter       0 H z  
 Scale       0.5 V    1 m s e c  
 受信波  
     半波     1.5 m s e c ( 3 3 3 H z )  
     一波     3.5 m s e c ( 2 8 5 H z )  
 受信電圧    2.1 V  
 音    速     176 m / s

送受信状態    空 氣

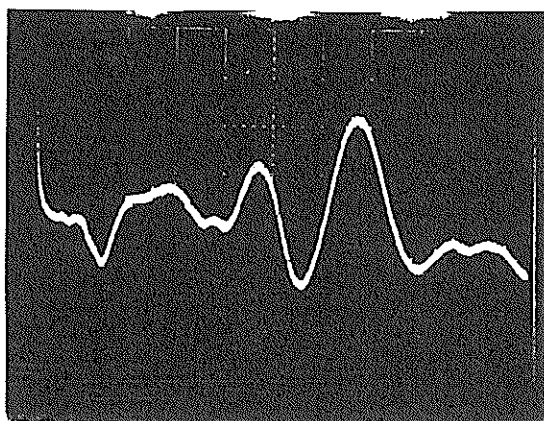


付圖-2-3

送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>1</sub>)  
 (100φ) (9103S1074)

埋設直後 (16.00)

k m = -110 d B

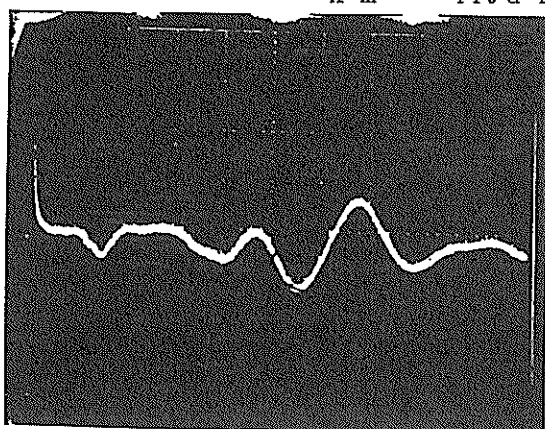


2ms 6ms 8ms  
 送波器 (S) 受波器 (M)

(100φ) (9103S1074)

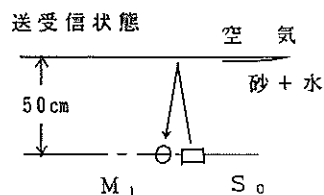
埋設18H後 (10.00)

k m = -110 d B

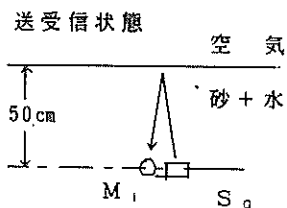


2ms 6ms 8ms  
 500m/s 167m/s 125m/s

送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 100Hz  
 Scale 50mV 2msec  
 受信波  
 半波 msec (250Hz)  
 一波 msec (312Hz)  
 受信電圧 60,130mV  
 音速 500,167,125m/s



送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 100Hz  
 Scale 100mV 2msec  
 受信波  
 半波 msec (250Hz)  
 一波 msec (312Hz)  
 受信電圧 120 200mV  
 音速 500 167 125m/s



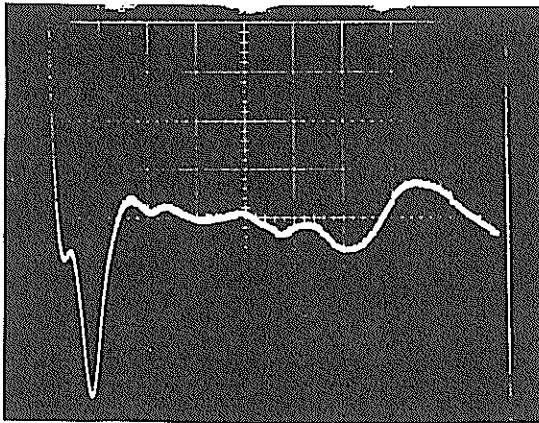
付図-3-1



送波器 (S) ----- 受波器 (M)  
 (200φ) (9103S1071)

km = -112dB

SL = 96.7dB - m

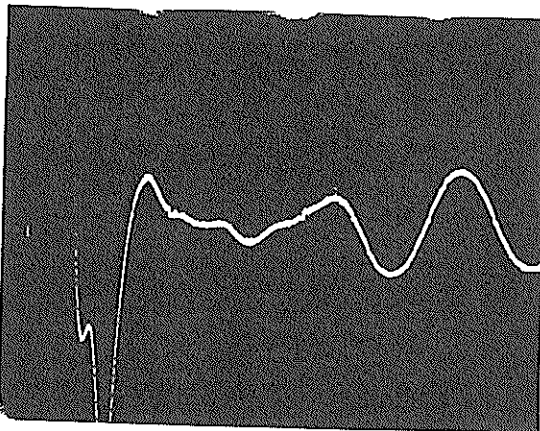
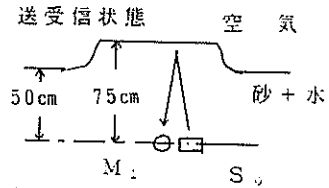


送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 100Hz  
 Scale 0.1V 1msec  
 受信波  
 半波 0.94msec (532Hz)  
 一波 1.78msec (562Hz)  
 受信電圧 0.14mV  
 音速 714,555,268m/s

↑ 1.4ms ↑ 2.7ms ↑ 5.6ms

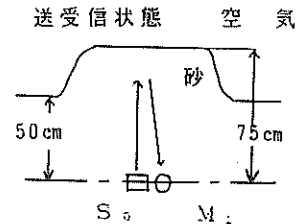
714m/s 555m/s 268m/s

送波器 (S<sub>0</sub>) ----- 受波器 (M<sub>1</sub>)  
 (200φ) (91031071)



送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 100Hz  
 Scale 0.1V 1msec  
 受信波  
 半波 1.36msec (551Hz)  
 一波 2.74msec (547Hz)  
 受信電圧 0.15mV  
 音速 714377250m/s

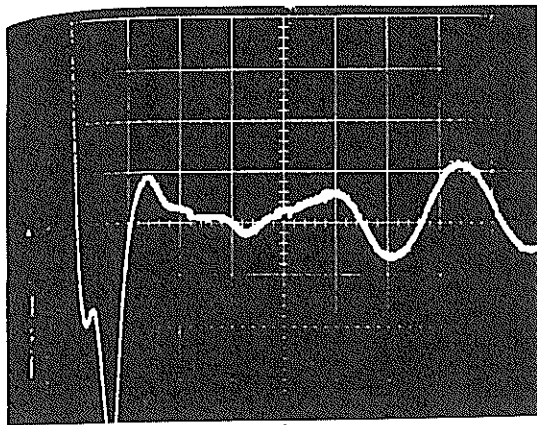
↑ 1.4ms ↑ 3.98ms ↑ 6.0ms  
 714m/s 377m/s 250m/s



付図-3-2

送波器 (S) ----- 受波器 (M<sub>1</sub>)

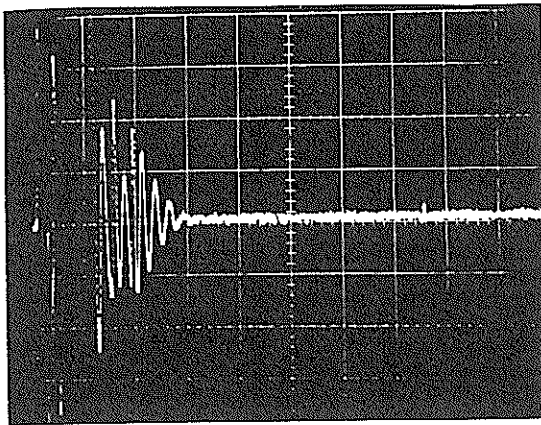
(200φ) (9103S1071)



3.2ms 6ms  
496m 250m

送波器 (S) ----- 受波器 (M<sub>1</sub>)

(200φ) (9103 1071)  
同上5KHzハイパスフィルター

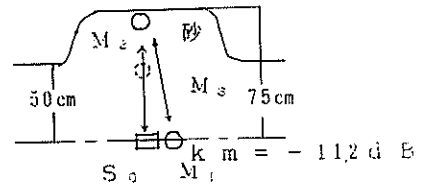


↑  
直接波 反射波なし

km = -112dB

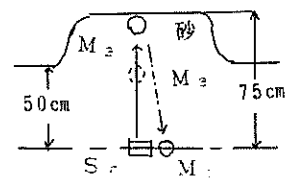
送信電圧 1500V p-p  
容量 60μF  
Amp.Gain 20dB  
Filter 100Hz  
Scale 0.1V 1msec  
受信波  
半波 1msec (500Hz)  
一波 2.3msec (430Hz)  
受信電圧 0.19V  
音速 469,250m/s

送受信状態 空気



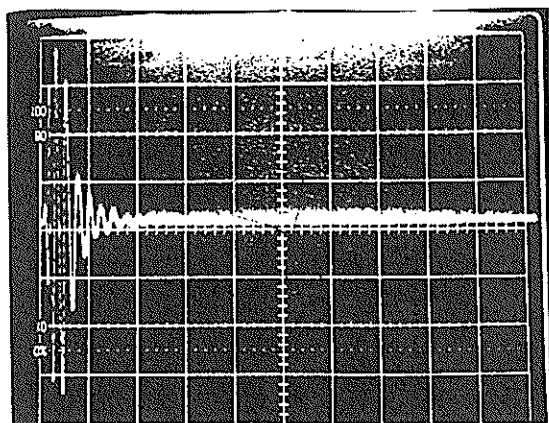
送信電圧 1500V p-p  
容量 60μF  
Amp.Gain 20dB  
Filter 5KHz 20KHz  
Scale 0.1V 1msec  
受信波  
半波 msec ( Hz )  
一波 msec ( Hz )  
受信電圧 mV  
音速 m/s

送受信状態 空気



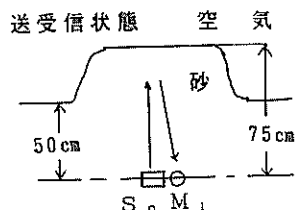
付図-3-3

送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>1</sub>)  
 (200φ) (9103S1071)

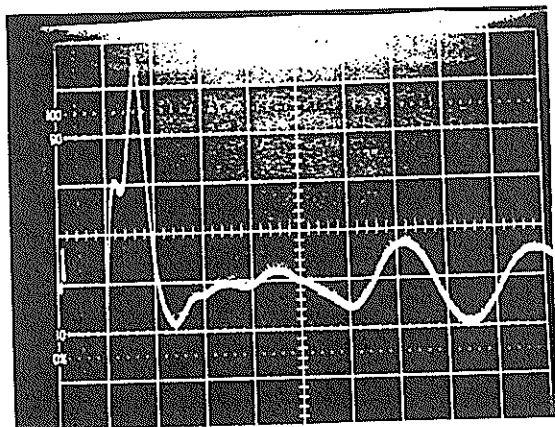


送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 5KHz 20KHz  
 Scale 50mV 1msec

受信波  
 半波 msec (Hz)  
 一波 msec (Hz)  
 受信電圧 V  
 音速 m/s



送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>1</sub>)  
 (200φ) (9103 1071)



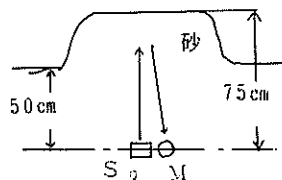
送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 100Hz 20KHz  
 Scale 50mV 1msec

受信波  
 半波 1.2msec (417Hz)  
 一波 2.5msec (400Hz)  
 受信電圧 mV  
 音速 m/s

↑ 1.3ms      ↑ 6ms

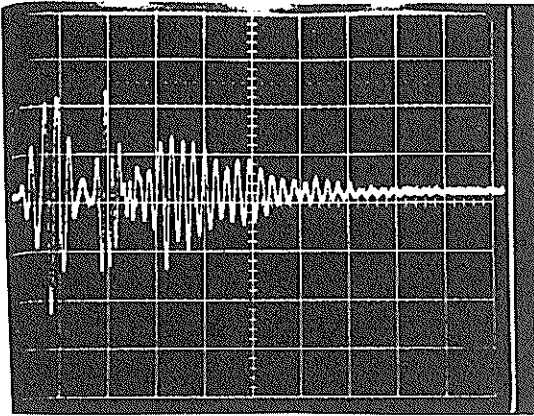
砂面

送受信状態 空気



付図-3-4

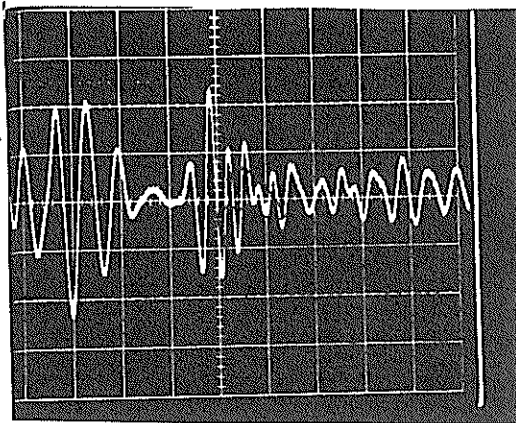
送波器 (S) —— 受波器 (M<sub>1</sub>)  
 (100φ) (9103S1074)



↑ 0.8ms ↑ 1.5ms 水面

送波器 (S) —— 受波器 (M<sub>1</sub>)  
 (200φ) (9103 1074)

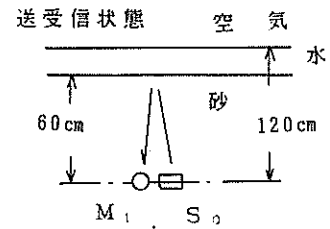
水平軸擴大



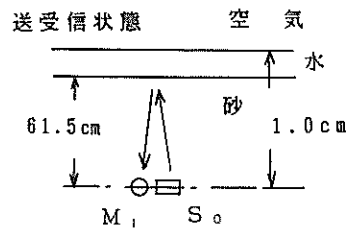
↑ 0.82ms  
 砂面  
 61.5cm

送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 40dB  
 Filter 5KHz 20KHz  
 Scale 1V 0.5msec

受信波  
 半波 msec (Hz)  
 一波 msec (Hz)  
 受信電圧 37mV  
 音速 1500m/s



送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 40dB  
 Filter 5kHz 20KHz  
 Scale 1V 0.2msec  
 受信波  
 半波 msec (Hz)  
 一波 msec (Hz)  
 受信電圧 4V  
 音速 1500m/s



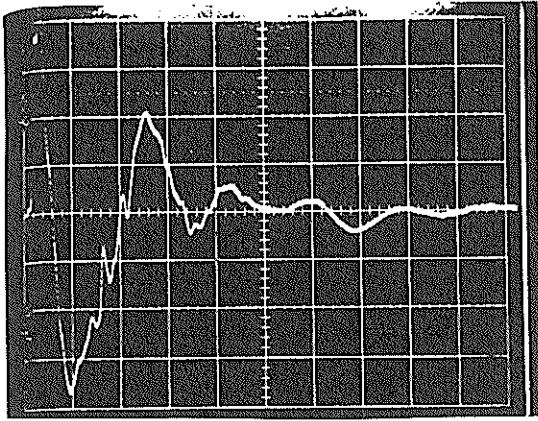
付図-4-1

埋設直後

送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>1</sub>)

(100φ)

(9103S1074)



送信電圧 1500V<sub>p-p</sub>

容量 60μF

Amp.Gain 20dB

Filter 100Hz 20KHz

Scale 0.5V 0.5msec

受信波

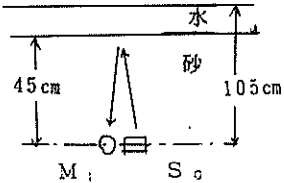
半波 msec (Hz)

一波 msec (Hz)

受信電圧 mV

音速 m/s

送受信状態 空気

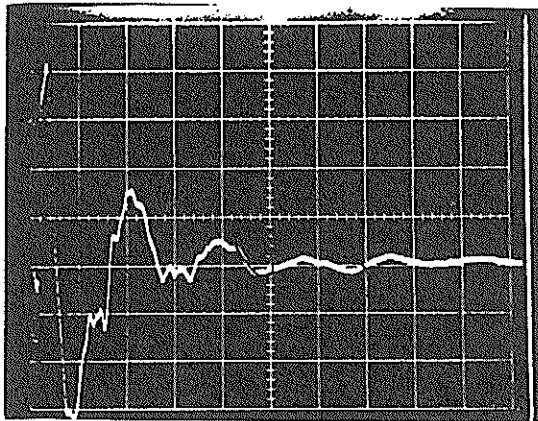


送波器 (S) ——— 受波器 (M<sub>1</sub>)

(200φ)

(9103S1074)

同上約30分経過



送信電圧 1500V<sub>p-p</sub>

容量 60μF

Amp.Gain 20dB

Filter 100Hz 20KHz

Scale 0.5V 0.5msec

受信波

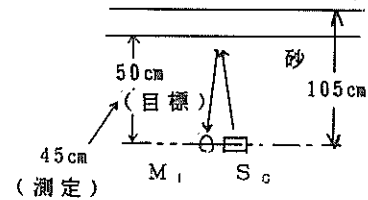
半波 msec (Hz)

一波 msec (Hz)

受信電圧 V

音速 1500m/s

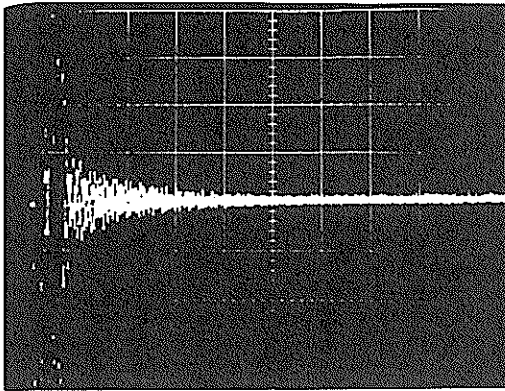
送受信状態 空気



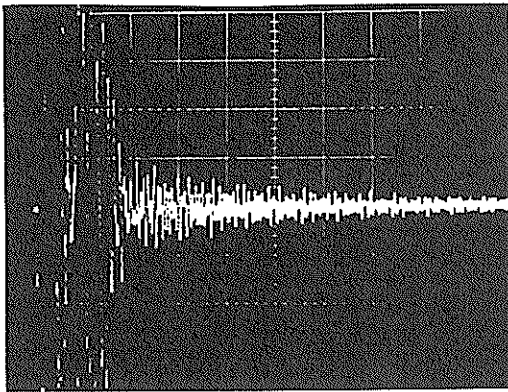
↑      ↑  
0.6ms   1.4ms  
45cm   105cm  
砂面   水面

付図-4-2

送波器 (S) —— 受波器 (M)  
(100φ) (加速度計)

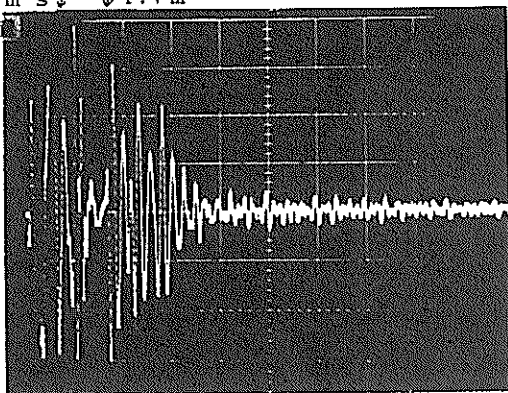


送波器 (S) —— 受波器 (M)  
(100φ) (加速度計)



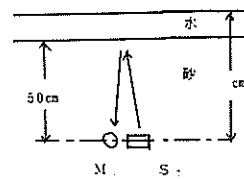
送波器 (S) —— 受波器 (M)  
(100φ) (加速度計)

0.8ms ↓ ↓ 1.7m  
水



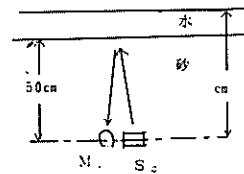
送信電圧 1500V p-p  
容 量 60μF  
Amp. Gain dB  
Filter Hz  
Scale 0.2V 5msec  
受信波  
半波 msec (Hz)  
一波 msec (Hz)  
受信電圧 V  
音 速 m

送受信状態 空気



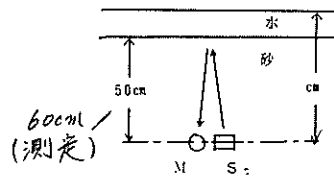
送信電圧 1500V p-p  
容 量 60μF  
Amp. Gain 40dB  
Filter Hz  
Scale 20mV 2msec  
受信波  
半波 msec (Hz)  
一波 msec (Hz)  
受信電圧 V  
音 速 m

送受信状態 空気



送信電圧 1500V p-p  
容 量 60μF  
Amp. Gain 40dB  
Filter 5KHz 20KHz  
Scale 0.5V 1msec  
受信波  
半波 msec (Hz)  
一波 msec (Hz)  
受信電圧 V  
音 速 m

送受信状態 空気



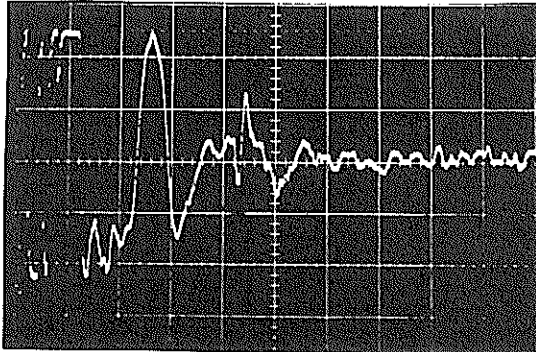
付図-4-3

付図-4-3

送波器 (S) ——— 受波器 (M)

(200φ) (9103 1071)

2.4ms 4.2ms 8.2ms SL = 96.7dB  
 180cm 沈船 315cm 615cm 水面 km = -112dB

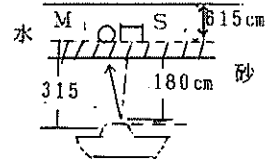


送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 40dB  
 Filter 100Hz 20KHz  
 Scale 1V 2msec

受信波  
 半波 msec (Hz)  
 一波 msec (Hz)

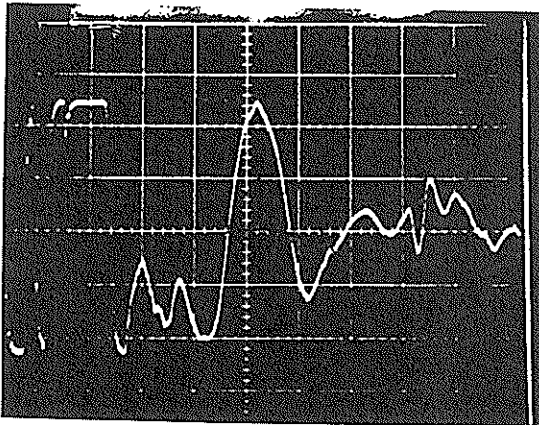
受信電圧 4.5mV  
 音速 1500m/s

送受信状態 空気



送波器 (S) ——— 受波器 (M)

(200φ) (9103 1071)

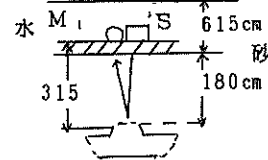
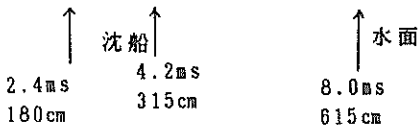


送信電圧 1500V p-p  
 容量 60μF  
 Amp.Gain 40dB  
 Filter 100Hz 20KHz  
 Scale 1V 1msec

受信波  
 半波 msec (Hz)  
 一波 msec (500Hz)

受信電圧 4.5mV  
 音速 1500(-26.9dB)m/s

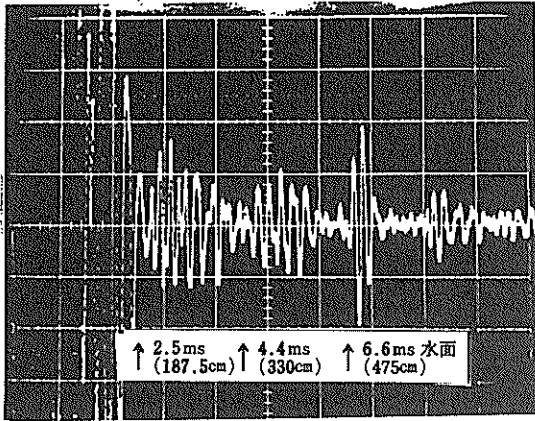
送受信状態 空気



付図-5-1

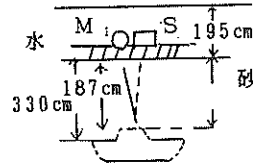
送波器 ( S ) ----- 受波器 ( M )  
 ( ) ( )

SL = 96.7 dB - m  
 km = -112 dB

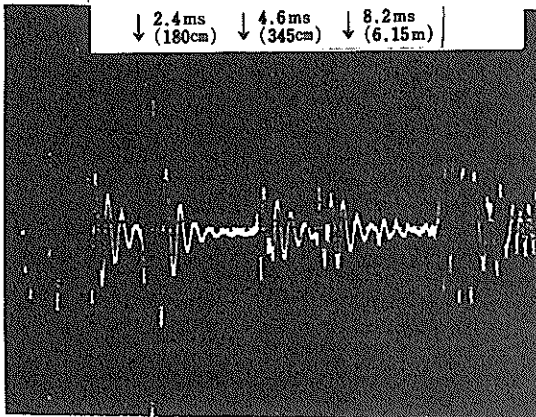


送信電圧 1500V p-p  
 容量 60 $\mu$ F  
 Amp.Gain 20dB  
 Filter 5KHz 20KHz  
 Scale 50mV 1msec  
 受信波  
 半波 msec ( Hz )  
 一波 msec (5KHz)  
 受信電圧 (-15.4dB)170mV  
 音速 1500m/s

テープカウンタ 1:07:30,  
 送受信状態 空気

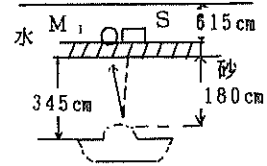


送波器 ( S ) ----- 受波器 ( M )  
 ( ) ( )  
 16.5mV (12mV) 4.6mV



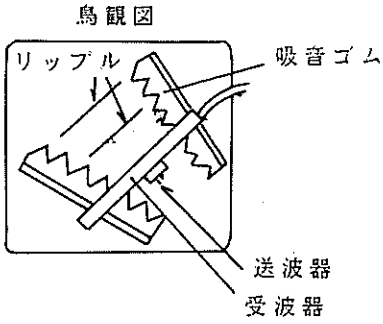
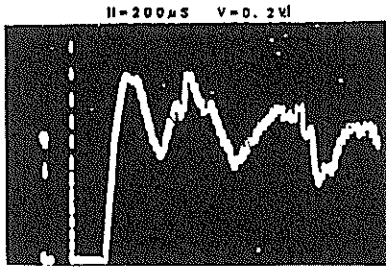
送信電圧 1500V p-p  
 容量 60 $\mu$ F  
 Amp.Gain 46dB (199.5)  
 Filter 5KHz 20KHz  
 Scale 0.5V 1msec  
 受信波  
 半波 msec ( Hz )  
 一波 msec (6KHz)  
 受信電圧 3.5V  
 音速 1500 m/s

送受信状態 空気

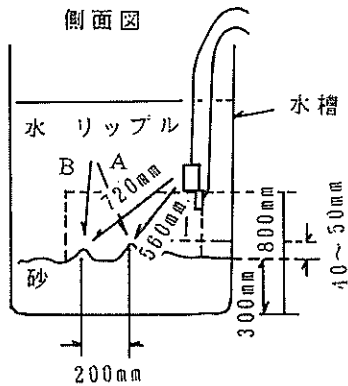
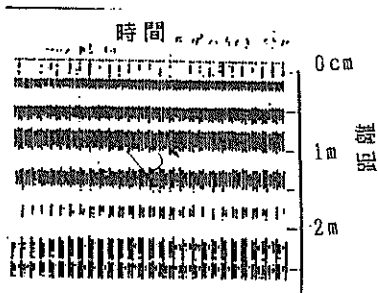


付図-5-2

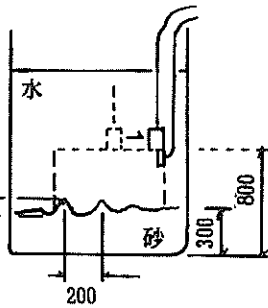
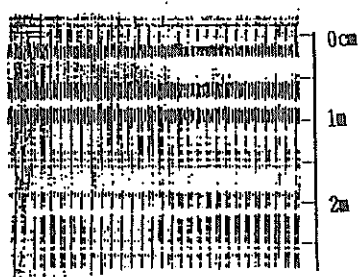
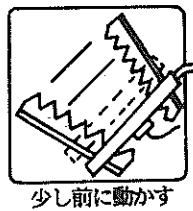
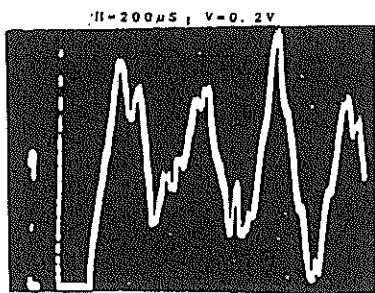




電圧破壊記録

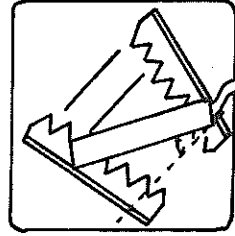
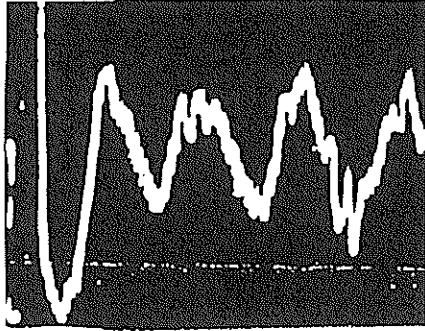


付図-6-①

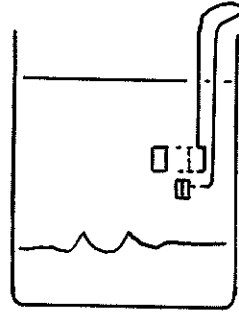
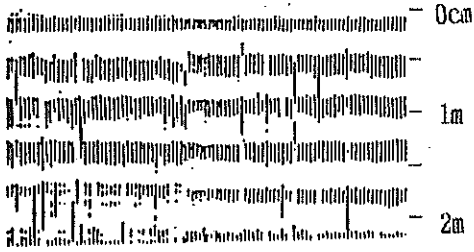


付図-6-②

$H=200\mu S$   $V=0.5V$

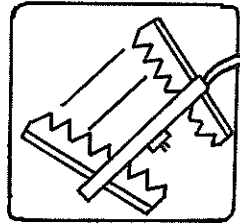
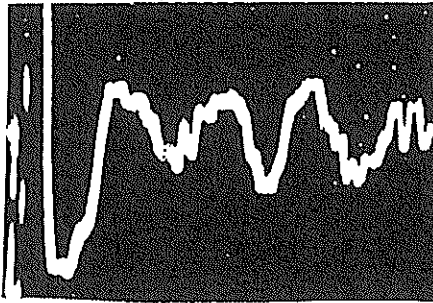


片方を45°前に動かす

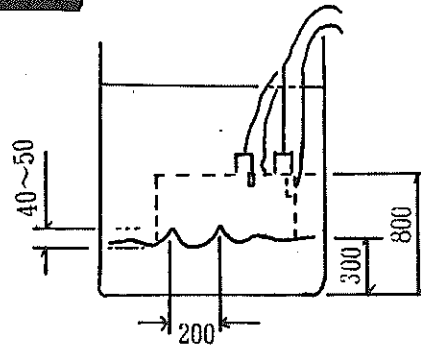
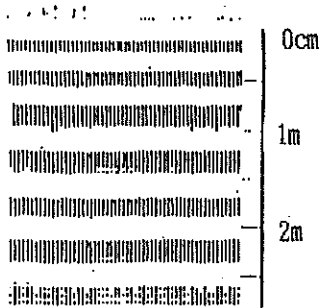


付図-6-③

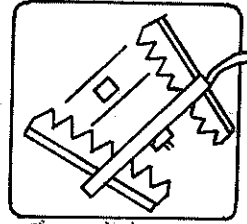
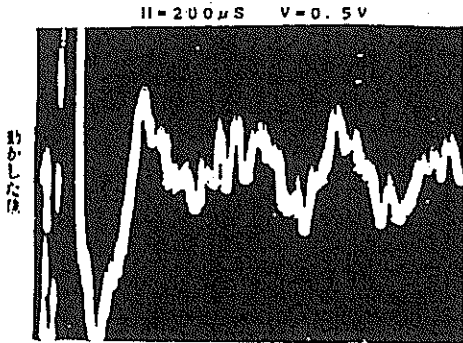
$H=200\mu S$   $V=0.5V$



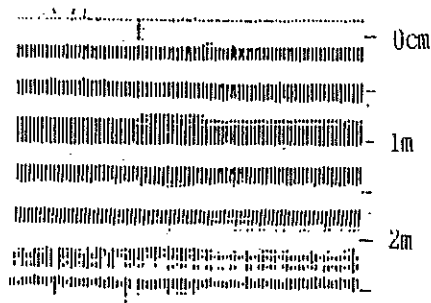
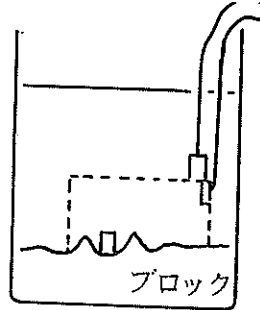
送受波器を近くする



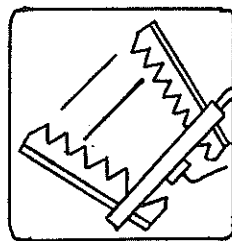
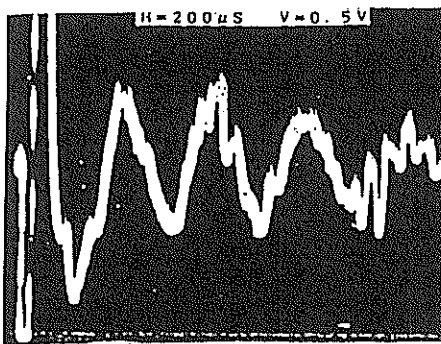
付図-6-④



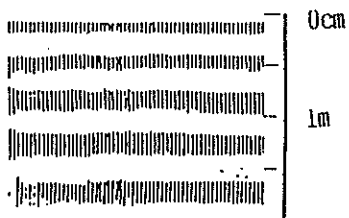
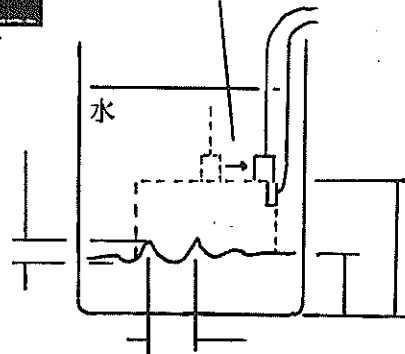
ブロックを  
1波と2波の間に入れる



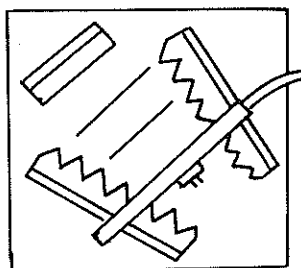
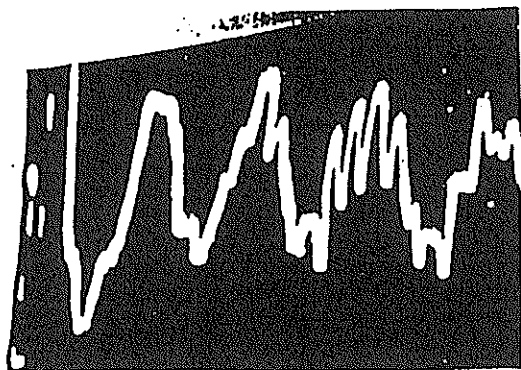
付図-6-⑤



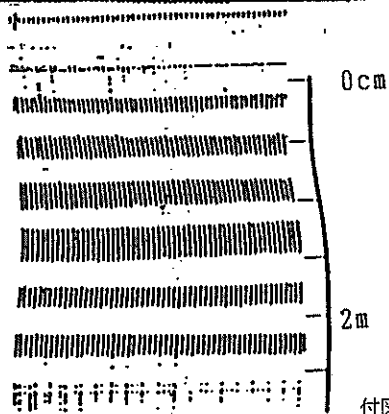
最も遠くする



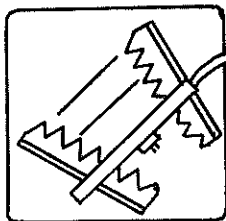
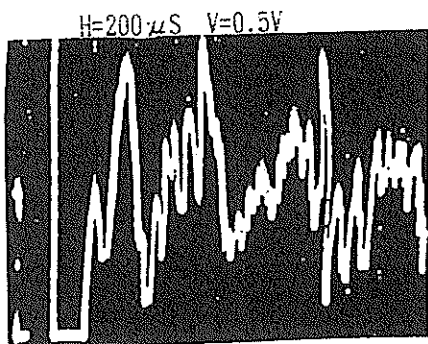
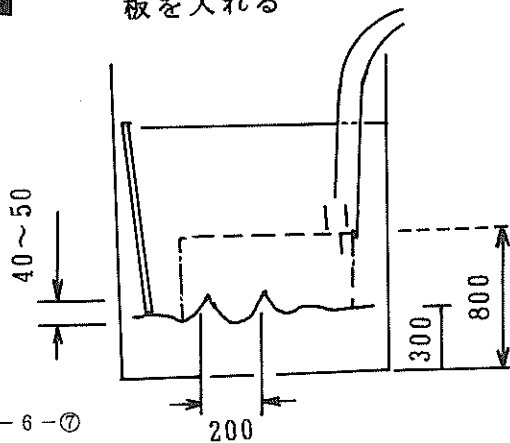
付図-6-⑥



板を入れる

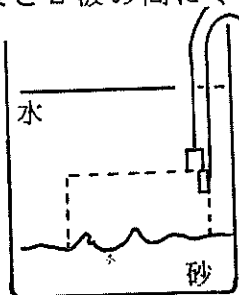
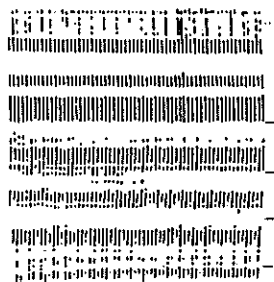


付図-6-⑦



板をとる

1波と2波の間にくぼみ



2 cm のくぼみあり

付図-6-⑧

港 灣 技 研 資 料      No. 677

1 9 9 0 · 6

編集兼発行人      運輸省港湾技術研究所

発 行 所      運輸省港湾技術研究所  
                 横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所      奥村印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.