

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

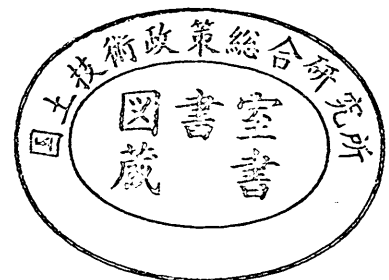
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 28

NO. 1

MAR. 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第1号 (Vol. 28, No. 1), 1989年3月 (Mar. 1989)

目 次 (CONTENTS)

1. 波による汀線付近の水位上昇量
——波崎海洋研究施設における現地観測——
.....加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸..... 3
(Wave Set-up near the Shoreline ——Field Observation at HORF——
.....Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Tomoyoshi ISOGAMI
and Hiroyuki MURAKAMI)
2. 円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する実験的研究
.....村上和男・菅沼史典・佐々木均.....43
(Experimental Investigation on Erosion and Deposition of Fine
Cohesive Sediments in an Annular Rotating Channel
.....Kazuo MURAKAMI, Fuminori SUGANUMA and Hitoshi SASAKI)
3. 航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動
.....深海正彦・佐藤勝久・小林正樹.....77
(Behaviour of Buried Pipes under Loading of Aircraft
.....Masahiko FUKAMI, Katsuhisa SATO and Masaki KOBAYASHI)
4. 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現
.....土田 孝・小林正樹・水上純一・田中政典... 121
(Duplication of Aged Clay by Consolidating Clay Slurry at
High Temperature
.....Takashi TSUCHIDA, Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI
and Masanori TANAKA)
5. 覆砂工法における砂層探査装置に関する実験
.....木原純孝・白井一洋・篠原文人... 149
(Experiments on Ultrasonic Sand Layer Profiler System in
Capping Constructions
.....Sumitaka KIHARA, Kazuhiro SHIRAI and Taketo SHINOHARA)

5. 覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

木原純孝*・白井一洋**・篠原丈人**

要 旨

海底軟弱地盤の上にかかれた砂層の厚さを計測することは底質浄化対策としての覆砂工法や地盤改良工事等軟泥層海域の施工管理に重要なことである。

この論文は、覆砂厚計測用超音波探査装置開発のため、砂中の超音波の減衰定数、砂層と軟泥層との境界からの超音波反射の測定に関するモデル実験及び覆砂された軟泥層のある海域での現地実験について記述したものである。研究の結果は次のとおりである。

- 1) 比較的低周波の半減指向角の小さいモノパルス超音波は、軟泥層上に覆砂した砂層の厚さを計測することができる。
- 2) 砂層と軟泥層との境界からの超音波反射、砂中の減衰定数や伝搬速度は、砂中の空気含有量に依存する。
- 3) 砂層中を伝搬するモノパルス超音波の周波数はその送波周波数のほぼ半分に低下する。
- 4) 水深約5.0 m、覆砂厚さ約0.5 mの覆砂工法が行われている実海域において海底覆砂厚探査実験を行った結果、モノパルス超音波探査装置の有用性が明らかとなった。

キーワード：覆砂，施工管理，海底探査，超音波伝搬，超音波応用計測

* 機械技術部 計測施工研究室長
** 機械技術部 計測施工研究室

5. Experiments on ultrasonic sand layer profiler system in capping constructions

Sumitaka KIHARA*
Kazuhiro SHIRAI**
Taketo SHINOHARA**

Synopsis

Measurement of the thickness of the sand layer spread over the soft mud layer at the bottom of harbors, etc. is important in such operations as capping contaminated bottom sediments and harbor construction where such a soft mud layer is present.

This paper describes the model experiments on measurement of sand attenuation constant and ultrasonic reflection from the boundary between the sand layer and the soft mud layer and the field tests where such the soft mud layer is covered with the sand layer.

The results of the study are as follows;

- 1) The comparatively low-frequency mono-pulse ultrasonic waves with sharp beam angle will be able to measure the thickness of sea floor sand layer capping bottom soft mud layer.
- 2) The ultrasonic reflection from the boundary between the sand layer and the soft mud layer, attenuation constant and propagation velocity depends on the air content in the sand.
- 3) The frequency of mono-pulse ultrasonic waves propagated in the sand layer lower at about half that source frequency.
- 4) At this field test (sea water depth of about -5.0 m, thickness of sand layer of about 0.5m), we knew that the ultrasonic sand layer profiler system is suitable for measuring sea floor sand layer capping bottom sediments.

Key Words: Capping, Construction Control, Submarine Prospecting, Ultrasonic Propagation, Ultrasonic Measurement

* Chief of the Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division.

** Member of the Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division.

目 次

要 旨	149
1. ま え が き	153
2. 超音波による砂層厚探査の原理	153
2.1 覆砂表面からの反射	154
2.2 覆砂と軟泥との境界面からの反射	154
3. 砂層探査の室内モデル実験	154
3.1 概 要	154
3.2 実 験 概 要	155
3.3 実験内容及び実験結果	158
3.4 実験結果の考察	160
4. 砂層探査の現地実験	164
4.1 実験装置の概要	164
4.2 実験内容と実験結果	165
4.3 実験結果の考察	168
5. 結 論	171
5.1 室内モデル実験のまとめ	171
5.2 現地実験のまとめ	172
6. あ と が き	172
参 考 文 献	173
記号一覧表	173
付 録	174

1. まえがき

近年、港湾内に堆積した有機汚泥に含まれる栄養塩類の溶出を抑制する目的で、堆積した汚泥上に覆砂し、封じ込める覆砂工法の研究が行われている¹⁾。

この覆砂工法において、散布する海底の地盤条件や海象条件が異なっても、常に薄層に散布すること、散布された砂層厚さを正確に把握できる計測技術など、覆砂施工管理技術の開発が要請されている。

従来、主に散布設備の開発に重点が置かれていたが、覆砂工法には覆砂厚さの把握も重要であり、覆砂厚さを正確に管理することが、覆砂効果を十分に発揮でき、かつ、砂のくい込み量の把握など経済性の追求に欠かすことの出来ない今後の重要な課題である。

覆砂工法での砂層厚さの計測は、一般に接触方法と非接触方法で行われている。接触方法には、砂散布船上の固定足場から砂散布前の水深（地盤高）と砂散布後の水深（地盤高）を円盤レッドなどで計測し、その差で砂層厚を判断している。そのほかに水圧計による方法や、潜水士による直接計測の方法もある。

非接触方法としての代表的機器は、音響測深機であって、計測方法は前項の円盤レッドの計測と大差はない。

いずれの計測方法もそれぞれ一長一短があり、覆砂後の砂層の厚さを計測したものでなく、砂の表面地盤高さと原泥地盤高さを単に計測したに過ぎない。従来の接触方式や非接触方式では、計測原理から、薄層覆砂の目的である均一な砂層の造成、管理には必ずしも十分な方法とは言い難い。

なお、最近、土質調査に用いるベーン試験の考え方を取り入れることによって、土質の相違によるベーンに働く摩擦力の違いで砂層の厚さを計測する手法が開発された²⁾。この方法は、直接砂層の厚さを計測する接触方式を用いたもので正確に計測できる利点があるが、スポット計測であるために作業能率が低く、未計測部分があり、砂層厚全体を十分に把握できるとは言えない。

そこで、スポット間の未計測部分を補間し、覆砂厚を自動的に計測記録しうるシステムの開発が望まれている。

このようなことから、計測作業の能率化、省力化、自動化を目的とした、超音波を応用した覆砂厚探査システムを開発した。このシステムは、超音波に電磁誘導型送波器³⁾⁴⁾から放射されたモノパルス超音波のエコー反射法を用いたもので、覆砂層と原泥地盤との音響インピーダンスの差によって、超音波がその境界面から反射する原理を応用したものである。

開発のための実験は、室内モデル実験と、現に覆砂工法が行われている実海域における現地実験で行われた。

室内モデル実験⁵⁾では、フライアッシュによる軟泥モデルの上に、標準砂及びふい分け砂を用いた覆砂モデルを散布した覆砂モデルを作成し、超音波としてモノパルス波と、比較のために 200kHz トーンバースト波の二種類を使用した。実験の結果、砂層と軟泥層との境界面に置けるモノパルス超音波の反射特性や、砂層中の減衰特性などの音響特性が明かとなり、覆砂厚探査には、モノパルス超音波が適していることが明かとなった。

現地実験⁶⁾では、室内実験で得られた基礎データを基に、覆砂厚探査システムの開発を図るべく、実船用のモノパルス音源と受信装置を試作し、覆砂工法が行われている実海域において海底覆砂厚探査実験を行った。

その結果、実用化の可能性が得られたので報告する。

2. 超音波による砂層厚探査の原理

海底軟弱地盤上の砂層厚さを、超音波を用いて計測するには、砂層と軟泥原地盤との境界面での超音波の反射特性と砂層中の減衰特性の究明が重要である。

図-1に、覆砂と海底軟泥原地盤に入射した超音波の反射・透過の模様を示す⁷⁾。

送波器から放射された超音波パルスは、拡散減衰しながら、覆砂表面に到達する。ここで超音波の一部は反射し一部は透過する。

いま、海水の密度 ρ_0 、音の伝搬速度を C_0 、覆砂の密度を ρ_1 、音の伝搬速度を C_1 とする。

覆砂表面における超音波の反射率 R_s は、

$$R_s = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_0 C_0}{\rho_0 C_0 + \rho_1 C_1} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_0 + Z_1} \quad (1)$$

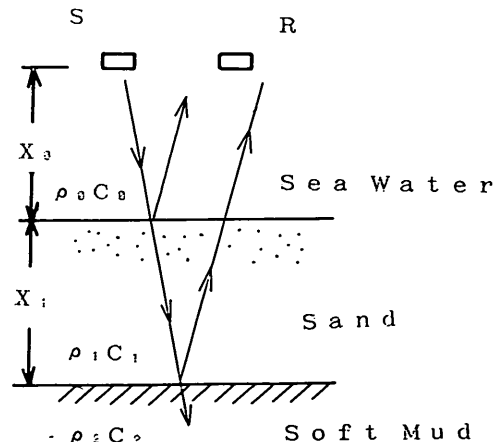


図-1 超音波による覆砂探査の原理

ここに、 Z_0, Z_1 ：海水及び覆砂の固有音響インピーダンス

反射損失は上式の数値をとり $201 \log R_s$ (dB) となる。

覆砂表面における超音波の透過率 T_s は

$$T_s = 1 - R_s^2 = 1 - \left(\frac{Z_1 - Z_0}{Z_0 + Z_1} \right)^2 \quad (2)$$

透過損失は、 $10 \log T_s$ (dB) となる。

砂層中に投入した超音波は、砂の減衰定数を α_s (dB/m) とし、減衰損失 AL_s (dB) とすると

$$AL_s = \alpha_s X_1 \text{ (dB)} \quad (3)$$

だけ減衰して軟泥表面に到達する。

軟泥表面に到達した超音波は、固有音響インピーダンスが異なるため、一部は反射し、一部は透過する。

軟泥の密度を ρ_2 、音の伝搬速度を C_2 とすると軟泥表面の超音波の反射率 R_M は、

$$R_M = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

ここに、 Z_1, Z_2 ：覆砂及び軟泥の固有音響インピーダンス

反射損失は $20 \log R_M$ (dB) となる。

軟泥表面で反射した超音波は再び砂層中を(3)式と同様の減衰をして砂層表面に到達する。

砂層表面と海水の境界面では(2)式と同様の透過率で超音波が透過し、受波器に着する。

この反射・透過の様相をソナー方程式で定量的に表してみる。

2.1 覆砂表面からの反射

覆砂表面からの反射のエコーレベル EL_s (dB) は、(1)式を用いて

$$EL_s = SL - 2TL_s - RL_s \quad (5)$$

ただし、海水の減衰損失は無視した。

ここに、 SL ：音源の送波レベル (dB) $20 \log P_s$ (dB)

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

$2TL_s$ ：音源と覆砂表面間の伝搬損失 $20 \log 2X_0$ (dB)

RL_s ：覆砂表面の反射損失 (dB)

2.2 覆砂と軟泥との境界面からの反射

覆砂と軟泥との境界面からの反射波のエコーレベル EL_M (dB) は、(2), (3), (4)式を現いて

$$EL_M = SL - 2TL_M - 2AL_s - 2T - RL_M \quad (6)$$

となる。

ここに、 $2TL_M$ ：音源と軟泥表面間の伝搬損失 $20 \log 2(X_0 + X_1)$ (dB)

$2AL_s$ ：覆砂層中の往復の減衰損失 $2\alpha X_1$ (dB)

$2T$ ：覆砂表面の往復の透過損失

RL_M ：軟泥表面の反射損失 (dB)

3. 砂層探査の室内モデル実験

3.1 概要

海底軟泥層（主としてヘドロ）上に撒き出された覆砂層を超音波を応用して測定するためには

- ① 軟泥層及び砂層の反射率、透過率、音速
- ② 軟泥層及び砂層内部の残響レベル、多重反射量
- 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。更に測定精度、分解能を向上させるためには、超音波の指向角及び超音波の発信時間を極力短くする必要があり、これらの目的を満足するものとして港湾技術研究所で開発したクロスレイ型モノパルス超音波探査装置⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾がある。

本研究は、クロスレイ型モノパルス超音波探査装置

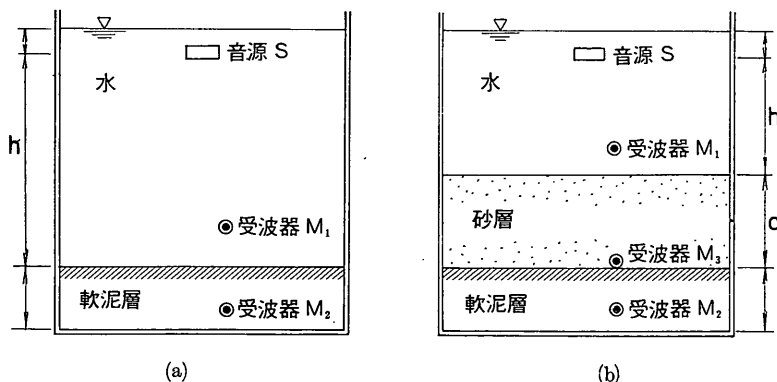


図-2 音響特性実験配置

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

による覆砂厚検測技術確立のため、上記項目についてトーンバースト方式との比較実験を行い明らかにした。

3.2 実験概要

実験は寸法が1m×1m×1mのFRP製の水槽を用い、モノパルス超音波及び200kHzトーンバースト超音波の送波レベル伝搬特性、水槽の残響レベルや多重反射等の音響特性を測定した。

先ずモノパルス波の実験は、図-2の(a)のように軟泥層中に受波器M₂を埋め込み、音源Sからの音波を水中の受波器M₁とともに受信し、軟泥中の透過波、軟泥表面の反射波の波形とレベルを測定した。

更に、図-2の(b)のように、軟泥層上に脱気した砂層の厚みを変えて同様の測定を行い、砂層の反射率、透過率、音速を求めた。又その時の受信波形から残響レベル、多重反射について測定した。上記測定方法は200kHzトーンバースト波についても同様に行った。又、砂層中の空気の含有率が音響特性に及ぼす影響について検討するため、脱気していない砂を用いて、同様の実験を行った。次に実験に使用した機材の主要諸元を示す。

(1) 実験諸元

(a) 音源

型式	周波数	送波レベル
モノパルス	25kHz	114dB—cm (ピーク値)
トーンバースト波	200kHz	159dB—cm
型式	半減半角	

モノパルス	24°
トーンバースト波	3°

(b) 計測用受波器

受波感度	M ₁ : -125dB (V/μbar)
	M ₂ : -105dB (V/μbar)
	M ₃ : -112dB (V/μbar)

(c) 供試材

- ・砂の粒度 標準砂 (50%粒径0.18mm)
ふるい分砂 (0.1~2mm)
50%粒径 (0.61mm)
- ・軟泥層の厚さ 20cm (フライアッシュ)
- ・砂層の厚さ 最大 30cm

(2) 実験計測機器構成

a) 計測ブロック図

図-3に実験に使用した計測ブロック図を示す。モノパルス波を使用する場合には、送信装置に高圧電源装置(1,500V)を、音源に電磁誘導型送波器(φ100mm, 25kHz)を使用し、トーンバースト波を用いる場合には送信装置にファンクションゼネレータとパワーアンプを、音源に円板型送波器(φ100mm, 200kHz)を使用した。音源から放射された超音波は各々受波器1~3に受波され、ろ波・増幅器に入る。

ここで適当にろ波・増幅された波形をメモリースコープで観測したり、その波形をポラロイドカメラで撮影できるようにになっている。

b) 機器の構成

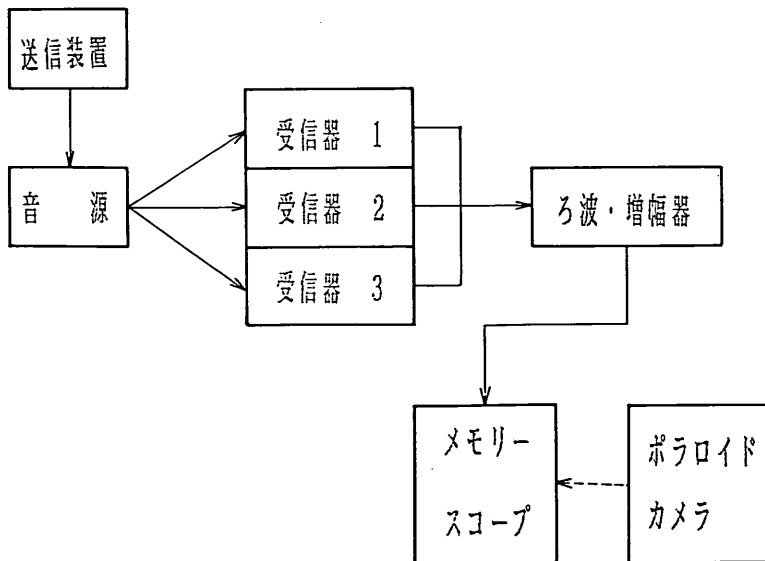


図-3 計測ブロック図

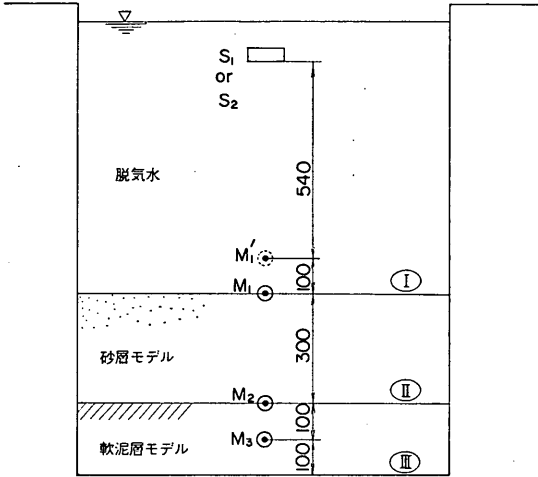


図-4 覆砂厚探查実験配置図

$M_1(M_1')$: 標準ハイドロホン

M_2 : 標準ハイドロホン

M_3 : 標準ハイドロホン

I: 水-砂境界面

II: 砂-軟泥境界面

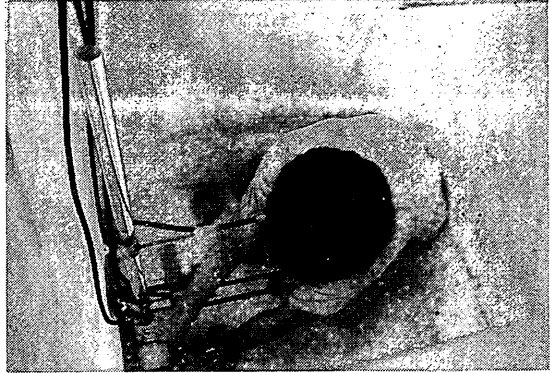


写真-1 水槽内受波器設置状況

・音源

モノパルス波 (25kHz, ϕ 100mm) 1式

パースト波 (200kHz, ϕ 100mm) 1式

・受波器 (較正用マイクロホン 10kHz~200kHz) 3個

・ろ波・増幅器 (80dB, 1kHz~80kHz) 1台

・メモリスコープ 1台

・ポラロイドカメラ 1台

(3) 送受波器の配置

送受波器の配置及び実験装置の概略図を図-4, 5に示す。写真-1に水槽内受波器設置状況, 写真-2に送波器設置状況, 写真-3に計測機器を示す。

図-4の各種記号の意味は下記に示す通りである。

S_1 : 誘導型送波器 (モノパルス)

S_2 : 円板型送波器 (トーンパースト波)

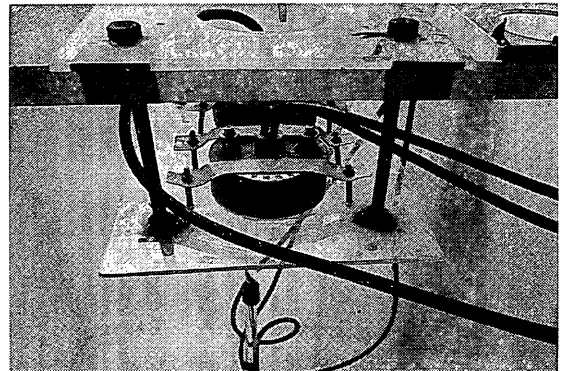


写真-2 送波器設置状況

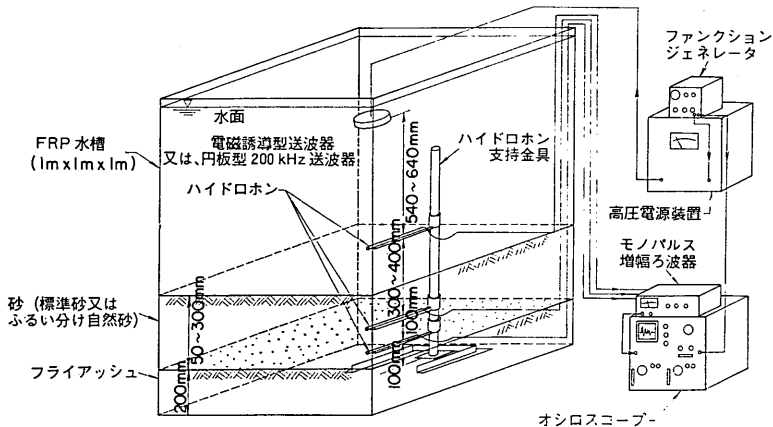
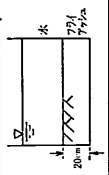
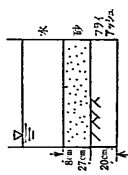
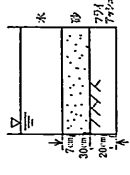


図-5 海底覆砂音波探查実験概略図

表-1 海底覆土砂音波探査実験の内容

供試土砂の種類	土質分析結果	土砂の投入方法	砂の厚さ	砂投入後の経過時間	測定項目	備考
水性実験					送波レベル、マイクの受波感度、水槽特性	脱気水使用
フライアッシュ軟泥層モデル	ϕ : 34 μ m ω : 50%	1時間以上煮沸による脱気の上、脱気水の中に静かに投入	20cm		軟泥中の減衰定数、反射損失(レベル) 水底反射損失(レベル) 音速度	
標準砂砂層モデル + フライアッシュ軟泥層モデル	ϕ : 0.18mm ω : 26.6%	1時間以上砂を水とともに煮沸して脱気の上、脱気水中に空気が入らないよう静かに撒くようにして投入し、既設のフライアッシュ軟泥層モデルの上に推積させる。これを厚さを変えて行う。	8cm 14.5cm 14.5cm 20.0cm 20.0cm 27.0cm 27.0cm	0H 19H 0H 20H 0H 21H	砂の減衰定数 砂面の反射損失(レベル) 軟泥面の反射損失(レベル) 水底反射損失(レベル) 砂中音速度 残響レベル	
ふるい分け砂層モデル + フライアッシュ軟泥層モデル	ϕ : 0.6mm ω : 31.4%	山砂を粒径が0.1~2mmになるようにふるい分けし、なお粗粒土を除くため、水洗いをおこなった。この砂を水槽中の脱気水の中に、撒くように投入し、既設のフライアッシュ軟泥層モデルの上に推積させる。これを厚さを変えて行った。	7cm 7cm 15cm 15cm 15cm 15cm 24cm 24cm 30cm 30cm 30cm	0H 19H 0H 45H 116H 141H 0H 164H 0H 117H 792H	同上	

ϕ : 中央粒径
 ω : 含水比

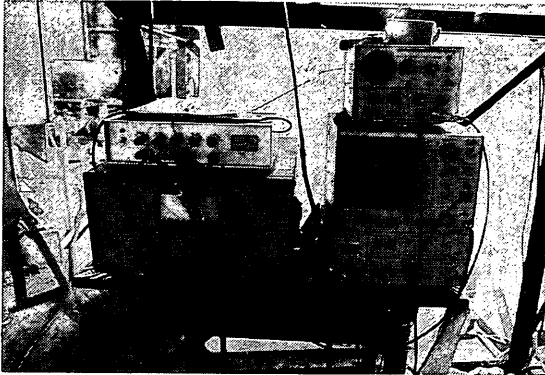


写真-3 計測機器



写真-5 覆砂モデルの設置状況

Ⅲ：軟泥—水底境界面

Ⅱ'：水—軟泥境界面

3.3 実験内容及び実験結果

(1) 実験内容

表-1に実験内容を示す。

供試土砂の種類、土質分析結果、土砂の投入方法、砂層の厚さ、砂投入後の経過時間、測定項目等を水特性実験、フライアッシュ軟泥層モデル実験、フライアッシュ軟泥層モデルの上に脱気標準砂砂層モデルを撒いて行った覆砂厚探查実験、フライアッシュ軟泥モデルの上に自然のふるい分け砂砂層モデルを撒いて行った覆砂厚探查実験の各々について記述している。

(2) 実験結果

軟泥層上に撒かれた脱気標準砂及び自然ふるい分け砂の音響特性実験結果を付表-1に示す。写真-4に実験状況、写真-5に覆砂モデルの設置状況、写真-6に軟泥層モデル投入状況を示す。

a) 脱気標準砂の音響特性実験



写真-6 軟泥層モデル投入状況

イ) 送受波器の配置と音響特性

図-4及び5に示すように実験水槽内に水底から50cmの高さに受波器 M_1 、高さ20cmに M_2 、高さ10cmに M_3 を置き、高さ114cmにモノパルス送波器 S_1 と200kHzトーンバースト波用送波器 S_2 を設置した。実験はまず、送波器の送波特性や水槽の残響特性を把握するために水特性実験を行った。その結果を図-6と図-7に示す。図-6はモノパルスの中水伝搬特性である。ただし、水底反射波の受波レベルは水底反射損失を加えた値である。受波レベルは水深が2倍の時6dB減少する直線(-6dB/oct)のカーブにのっていることがわかる。すなわち、音波の拡散は、球面波拡散(受波レベルは距離に逆比例)であることが確認できた。モノパルスの送波レベルは電源電圧1,500V、ピーク周波数33kHzで約114dB-cmであり、200kHzの送波レベルは、送信電圧140Vp-p、送信パルス幅50 μ s、繰り返し周期5msで約159dB-cmであった。またモノパルス、200kHzとも残響特性は良好であった。

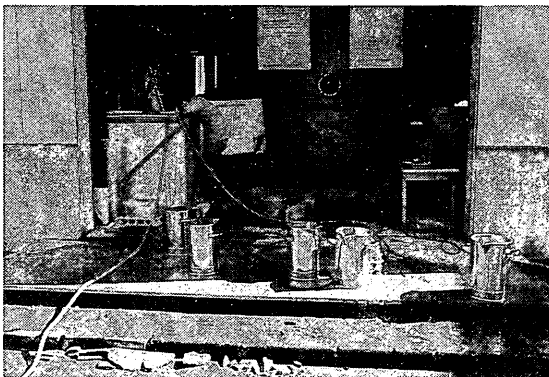


写真-4 実験状況

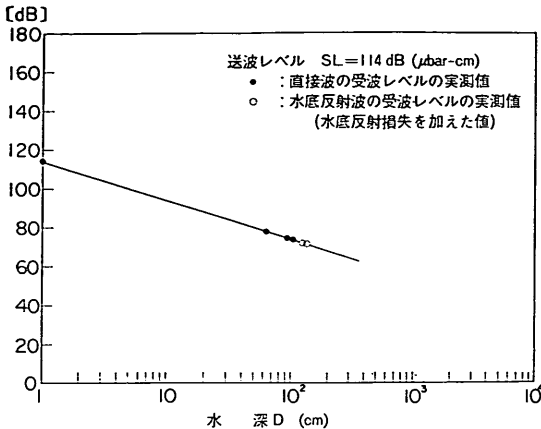


図-6 送波レベルの深度特性 (モノパルス)

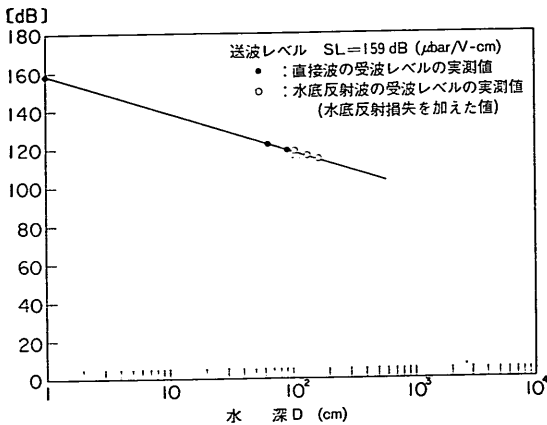


図-7 送波レベルの深度特性 (200kHz トーンバースト波)

ロ) 実験経過

海底軟泥層モデルを作成するため、粒径の細かいフライアッシュの懸濁液を加熱法にて脱気し、水槽に高さ20cmになるように投入した。次に注水、攪拌状態でモノパルス及び200kHz トーンバースト波の反射、透過特性実験を行った。

モノパルス、200kHz とも M_1 , M_2 , M_3 の反射、透過波を確認したが 200kHz の M_3 の底からの反射は得られなかった。18時間後、42時間後の2回にわたって測定したが、投入直後よりも受波レベルが大きくなっていることがわかった。114時間後にも同じ対象物で実験を行ったが、投入直後の測定と殆ど変わらなかった。

次に軟泥層の上の覆砂用の砂層モデルを作成した。使用した砂は豊浦標準砂 (50%粒径, 0.188mm) で測定標準化をはかるために加熱脱気を行った (約1時間)。また砂を水槽内に投入する際は、水槽内に脱気水をし

れ、その中へ砂を撒くように投入した。

なお砂面を平らに均した結果、砂層の厚さは8cmであった。次に200kHzとモノパルスの測定を行ったが、200kHzでは、下の受波器 M_3 が測定不能であった。モノパルスでは、 M_1 , M_2 , M_3 とも反射波、透過波とも受波できることが確認できた。4時間後再び脱気した標準砂を水中で撒くように投入し、モノパルスで測定してみた結果、多少受波レベルが減少するが、受波可能であることが確認できた。砂投入後は平らに均し、厚さ14.5cmの砂層を作成した。

この状態でモノパルスで測定した結果、 M_1 で砂面、軟泥面の反射波を、 M_2 で砂層透過波と水底反射波を、 M_3 で砂及び泥層透過波と水底反射波を受波できた。

19時間後に、砂厚14.5cm、フライアッシュ20cmの状態にて測定した結果、前日の測定結果とはほぼ同一であった。ただし200kHzでは、 M_1 , M_2 , M_3 共に受波可能であった。午後から脱気標準砂を投入し、厚さ20cmの砂層を形成し、実験を行った。実験の結果200kHz、モノパルスとも受波可能であることがわかった。20時間後に測定した結果、モノパルスでは受波可能であったが、200kHzでは、砂面の反射波以外受波不能であった。次に脱気標準砂を投入して砂厚27cmの砂層を形成した。この状態で測定実験を行った結果、モノパルスでは1kHz~5kHzのフィルターをかけることによって受波できることがわかった。200kHzは受波不能であった。

21時間後に、実験を行った結果、1kHz~50kHzのフィルターで前日より受波レベルが大きくなっていることがわかった。

b) ふるい分け砂の音響特性実験

水槽内に脱気水を入れ、底質が軟弱地盤の時のモノパルス及び200kHz トーンバースト波を用いて音響特性実験を行った。その結果、砂撤去時の攪乱等によって反射、透過損失の増加がみられた。その後、砂層モデルとして粒径が0.1~2mmのふるい分けした脱気していない自然砂をバケツに入れて水道水で水洗いした後、水槽中で撒くように投入し、砂の厚さが7cmになるようにした。この状態でモノパルス及び200kHz トーンバースト波の実験を行った。モノパルスは、送信電圧1,500V、送波周波数40kHz、パルス幅25μs、送信繰り返し周期2秒であり、音源から1cmの距離での音圧いわゆる送波レベルは114dB-cmであった。また200kHz トーンバースト波の送信電圧は140V、パルス幅50μs、くり返し周期5ms、送波レベルは159dB-cmであった。本実験においては自然のままの砂を投入しているため土粒子の間隙に含ま

れる空気の影響により標準砂の探査実験の結果と比較して、モノパルスでは砂層中の減衰定数 α_s は約20倍に増え、砂面の反射損失 RL_s は逆に約 6 dB 減じて反射がよくなっている。砂層厚さの計測に必要な軟泥層表面と砂層との境界層からの反射損失は、砂層中の減衰損失 α_s が増加したため、約 7 dB 増加している。また時間の経過による音響特性の変化を調べてみるため、約19時間経過した後測定した結果、各損失とも減少していることがわかった。一方、200kHz トーンバースト波では、脱気標準砂と比較すると増加傾向にある。なお、時間経過による特性の変化は、モノパルスの場合と異なり、殆ど変化がないことがわかった。次に、砂の厚さを 15cm にして実験を行った。砂投入直後のため、モノパルスでは、砂層中の減衰定数 α_s は 240dB/m とかなり大きく、砂層反射損失は、7 dB で小さく、軟泥面からの反射減衰損失は 17dB で、砂厚 7 cm の時と殆ど同じである。経時変化を見るため、45時間後、116時間後、141時間後に測定してみると、砂層減衰定数は減少し、最終的には 53dB/m になっている。砂面反射損失は、15dB に増大し、軟泥からの反射損失は殆ど変化しなかった。200kHz トーンバースト波では、砂層減衰定数 α_s は、砂投入後より約55dB/m 低下(16時間後)しており、砂面反射損失は殆ど変化せず、軟泥面の反射損失も殆ど変化しないことがわかった。更に砂の厚さを 24cm にして実験を行った。砂投入直後のモノパルス測定では、砂の減衰定数 α_s は 68dB/m、164時間後では、13dB/m に減少している。砂面反射損失は、逆に投入直後の 5.7dB から、18.7dB に増加している。また軟泥面の反射は 14~15dB でほぼ一定となっている。一方、200kHz トーンバースト波の測定では、砂層減衰定数 α_s は約 80dB/m で一定であり、砂面反射損失は約 17dB、軟泥面の反射も約11dBでほぼ一定であることがわかった。次に砂の厚さを30cmにして実験を行った。モノパルス実験では、砂層中の減衰定数 α_s は測定可能であった。砂投入 117時間後は 112dB/m、792時間後では、61dB/m に低下した。砂面反射損失は4.3dB から、14.3dB に増加し、軟泥面反射損失は 14~15dB でほぼ一定であった。200kHz トーンバースト波では、砂投入直後の砂層中の減衰定数は 166dB/m で、792時間後には、75dB/m に低下している。砂面反射損失は、12.7dB から 7.2dB に減少している。

c) 供試土砂の土質分析結果

実験に使用したフライアッシュ軟泥、脱気標準砂、ふるい分け砂の土質試験を行った。サンプルの採取には、直径 20mm のアクリルパイプを土砂に挿入し、引き抜

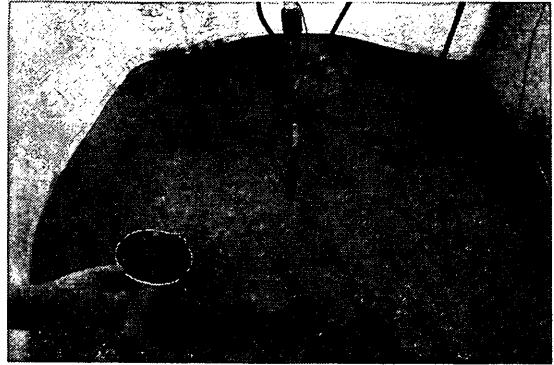


写真-7 砂のサンプル採取状況

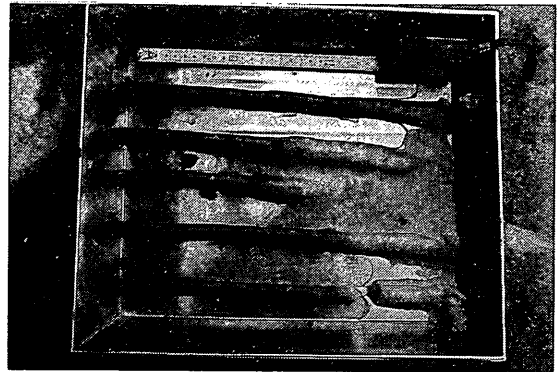


写真-8 砂と軟泥の境界のサンプル

くことによって採取した。写真-7に砂のサンプル採取状況を示し、この方法で採取した土砂のサンプルの一例を写真-8に示す。

図-8は、各種供試土砂の粒径加積曲線である。(a)が軟泥、(b)が脱気標準砂、(c)がふるい分け砂である。表-2に各種供試土砂の50%粒径 D_{50} 、含水比 ω 、見掛密度 ρ を示す。

3.4 実験結果の考察

(1) 底質の音響特性

a) 反射損失

底質による反射損失は、表面が平滑な反射面として解析した。即ち、底質面の反射損失 RL は、(5)式より

$$RL = SL - 2TL - EL = 20 \log P_s - 20 \log (2X_1 - X_0) - 20 \log P_R \quad (7)$$

砂-軟泥境界面の反射減衰損失 $RL + 2AL$ は(6)式より

$$RL + 2AL = SL - 2TL - EL = 20 \log P_s - 20 \log \{2(X_1 + X_2) - X_0\} - 20 \log P_R \quad (8)$$

ただし、砂表面の往復透過損失 $2T$ は無視した。

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

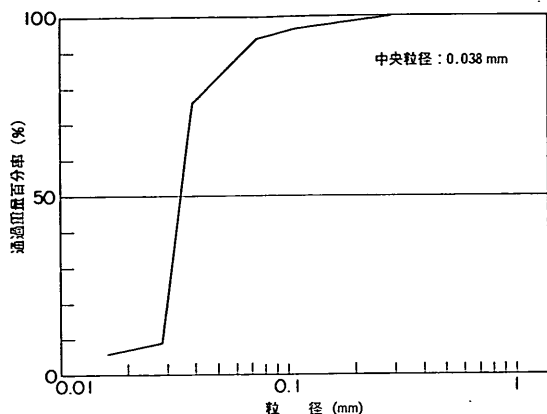


図-8(a) 軟泥の通過重量百分率

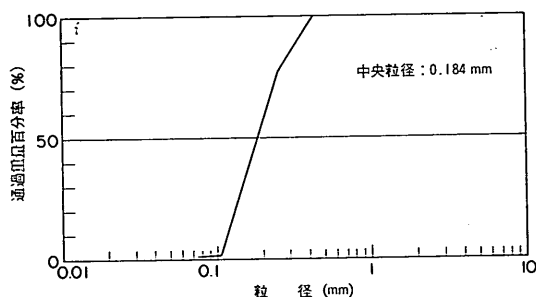


図-8(b) 標準砂通過重量百分率

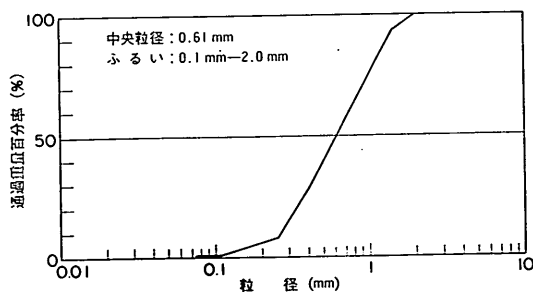


図-8(c) ふるい分砂通過重量百分率

表-2 共試土砂の土質試験結果

	中央粒径 D_{50}	含水比 ω	見掛密度 ρ
軟 泥	0.038mm	49.9%	1.59gr/cm ³
脱気標準砂	0.18	26.6	1.93
ふるい分砂	0.61	31.4	1.89

ここに、 SL : 送波音圧レベル (dB)
 TL : 伝搬損失 (dB)
 EL : 反射音圧レベル (dB)
 P_s : 送波音圧 (μ bar at/m)
 P_R : 受波音圧 (μ bar)
 X_0 : 音源からマイクまでの距離 (m)
 X_1 : 音源から砂層までの距離 (m)
 X_2 : 砂層の厚さ (m)

(7)及び(8)式を用いて各種底質のモノパルス超音波のときの反射損失(反射減衰損失)を求めた結果を表-3に示す。ただし()内の数値は、2媒質の境界へ垂直入射したときの反射の理論式即ち、反射損失は

$$RL = 20 \log R_P = 20 \log \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

ここに、 Z_1 : 1の媒質の音響インピーダンス $= \rho_1 c_1$
 Z_2 : 2の媒質の音響インピーダンス $= \rho_2 c_2$

$$R_P = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

ρ : 密度 g/cm³
 c : 音速 m/s

によって求めたもので脱気標準砂の反射損失は、この(9)式の理論式で求めた値とよく一致する。

砂-軟泥境界面の反射減衰損失 $RL+2AL$ は、脱気標準砂で 11.3dB、ふるい分砂で 14.2~18.7dB で両方の砂とも十分探知可能なレベルである。いま、実験データである、この反射減衰損失を用いて、実用性の可否を検討してみる。

即ち、反射伝搬損失は砂-軟泥境界面までの距離によって変化するが、距離(水深)10mの場合、拡散損失 $2TL=66dB$ となり送波レベル①-拡散損失②-反射減衰損失③=エコーレベル $\geq 20dB$ において

$$\text{脱気標準砂 } ①-②-③ = 114 - 26 - 11.3 = 76.7dB$$

$$\text{ふるい分砂 } ①-②-③ = 114 - 26 - (14.2 \sim 18.7)$$

$$= 73.8 \sim 69.3dB$$

となる。以上はモノパルスを使用した場合であるが、200kHz トーンバースト波における、標準砂での反射減衰損失は 12dB でモノパルスとはほぼ同じである。

ふるい分砂では、7.2~12.7dB であるが、オシロスコープ波形観測によると S/N が悪く、反射波と判別が困難であった。

b) 減衰定数及び伝搬速度

各底質の超音波の減衰定数 α (dB/m) を、軟泥層や砂層中に埋設したマイク M_3 や M_2 によって測定した結果、表-3に示すように軟泥層や脱気標準砂では、ほぼ一

表-3 供試土砂の音響特性測定結果（モノパルス超音波）

		反射損失 RL ($RL+2AL$)	減衰定数 α	伝搬速度 c
軟泥層 (厚さ 20cm)		11.0dB(12.2)	18.8dB/m	1,483m/s
脱気標準砂 (厚さ 15, 20, 27cm)	砂層	10.6(9.4)	10.4	1,508
	砂と泥の境界	11.3		
ふるい分砂 (厚さ 15, 24, 30cm)	砂層	4.3~18.7	238.7~12.4	564~1,960
	砂と泥の境界	14.2~18.7		

注1) () 内は理論値

注2) 砂と泥の境界の反射損失は反射減衰損失 ($RL+2AL$) を示す。

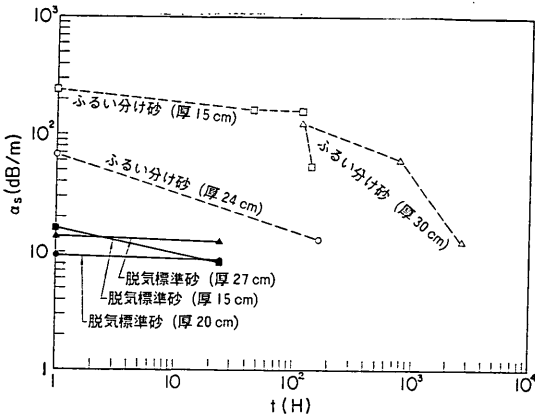


図-9(a) 減衰定数 α_s の時間経過による変化（モノパルス）

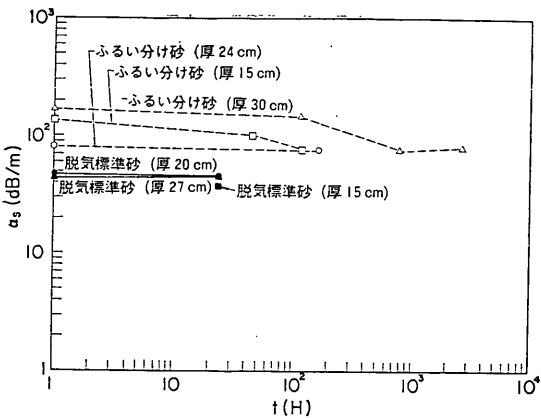


図-9(b) 減衰定数 α_s の時間経過による変化（トーンバースト）

定値であるが、ふるい分砂では、時間の経過によって測定値にばらつきがあることがわかった。

図-9に各底質の減衰定数 α_s の時間経過による変化を示す。() 内の数値は、砂層の厚さを示す。脱気標準砂は時間の経過に関係なくほぼ一定値を示すことがわかる。ふるい分砂は、時間の経過によって減衰定数 α (dB/m) 値の変化が大きく、最終的には、脱気標準砂と同じ値になることがわかる。これらの理由として砂中の空気含有率が大きく関係しているものと考えられる。砂中の伝搬速度 C (m/s) は、脱気した軟泥層や標準砂ではほぼ一定値 (約1,500m/s) であるが、ふるい分砂は、砂投入時と時間の経過後とでは約3倍の変化があった。減衰定数同様砂中に含まれる空気の影響であると考えられる。

(2) オシロスコーブ観援による反射波形

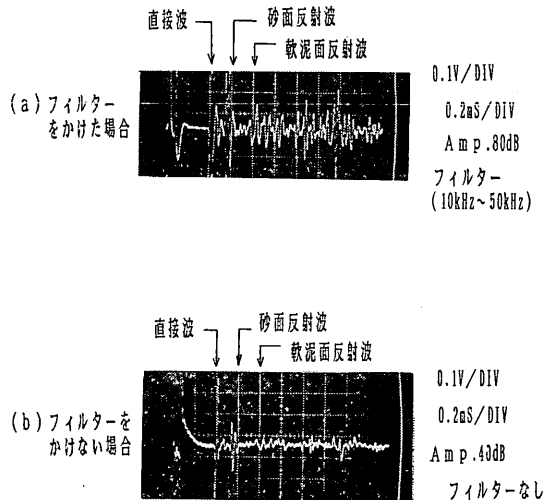


図-10 ふるい分砂の受信波形

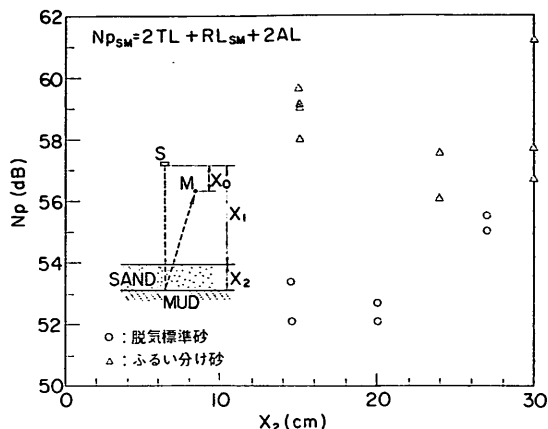


図-11 砂層厚 (X_2) と伝搬損失 (N_p) の関係

図-10-(a)は、マイク M_1 で得られたオシロスコープによる受信波形である。アンプの増幅度は 80dB、フィルターは 10kHz~50kHz である。底質は、厚さ 30cm のふるい分砂で、砂投入直後のオシロスコープ波形である。図-10-(b)には、参考のためにフィルターをかけない場合の波形を示す。フィルターをかけたほうがノイズレベルが低くなり、見やすい波形となっている。

また、軟泥面からの受信波形の周波数 f_R は、送信周波数 f_S に比べて約 1/2 に低下していることがわかった。

(3) 砂層厚さと伝搬損失

図-11のように、横軸に砂層厚さ X_2 (cm)、縦軸に伝搬損失 N_p (dB) をとり、脱気標準砂、ふるい分砂それぞれの値をプロットした。

その結過、標準砂は、砂層厚 27cm の時、約 55.5dB、ふるい分砂では、砂層厚 30cm の時、伝搬損失 N_p (dB) は、約 61dB 以下であり、100dB 以下であるため、砂、泥境界面探知は、十分可能であることがわかった。

なお、伝搬損失は下記式で表される。

$$N_{PSM} = 2TL + RL_{SM} + 2AL$$

ここに、 $2TL$: 往復の拡散損失 (dB) $20 \log 2 (X_1 + X_2)$ (dB)

X_1 : 音源から砂面までの距離 (m)

X_2 : 砂層厚さ (m)

RL_{SM} : 砂・泥境界面の反射損失 (dB)

$2AL$: 砂層中の往復の減衰損失 (dB) $= 2\alpha X_2$ (dB)

α : 減衰定数 (dB/m)

X_2 : 砂層厚 (m)

(4) 砂、泥境界面における反射周波数特性

砂層中をモノパルス超音波が進行した場合の受波周波

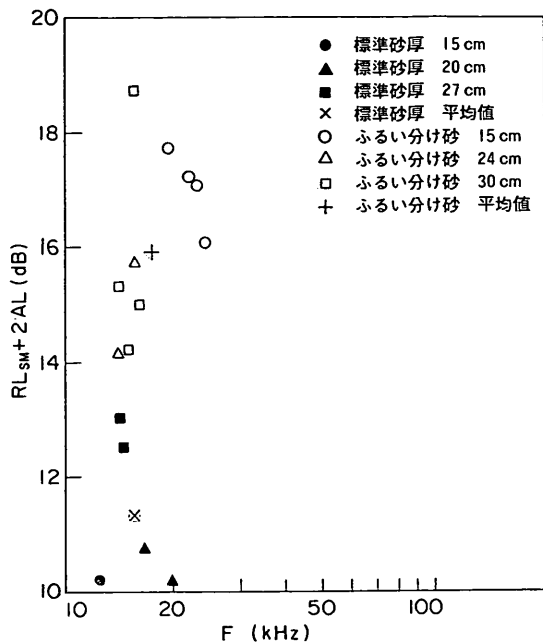


図-12 受波周波数 F (kHz) と砂・泥境界面反射減衰損失の関係

数 f_R (kHz) と、砂、泥境界面の反射、減衰損失 $RL_{SM} + 2AL$ (dB) の関係を求めるために、図-12 に示すように、横軸に受波周波数 f_R (kHz)、縦軸に砂、泥境界面の反射、減衰損失 $RL_{SM} + 2AL$ (dB) をとり、標準砂、ふるい分砂それぞれ砂層厚毎にプロットした。その結果、標準砂で受波周波数 f_R は、送信周波数に対して 12.5kHz~20kHz、平均 15.5kHz に低下している。また $RL_{SM} + 2AL$ は、標準砂で 10.2dB~13dB、平均 11.3 dB である。

ふるい分砂では、受波周波数 f_R は 14kHz~25kHz 平均 17kHz に低下している。 $RL_{SM} + 2AL$ は、14.2dB~18.7dB、平均 15.9dB である。

ふるい分砂においても砂層中の受波周波数 f_R は、送信周波数 f_S が 33kHz であるので約 1/2 に低下していることがわかる。従って、送信周波数の約 1/2 の周波数をピークで放射する音源を製作する必要がある。

また、砂、泥境界面の反射損失は、最高がふるい分砂で 18.7dB、平均 15.9dB で十分探知可能な値であることがわかる。

(5) 探査可能距離の算定

実験結果から、水深が 2 m、5 m、10m のときの砂層厚さ 30cm までの伝搬損失 N_p を算定したグラフを図-13 に示す。この図から砂層厚さ 30cm のふるい分砂で

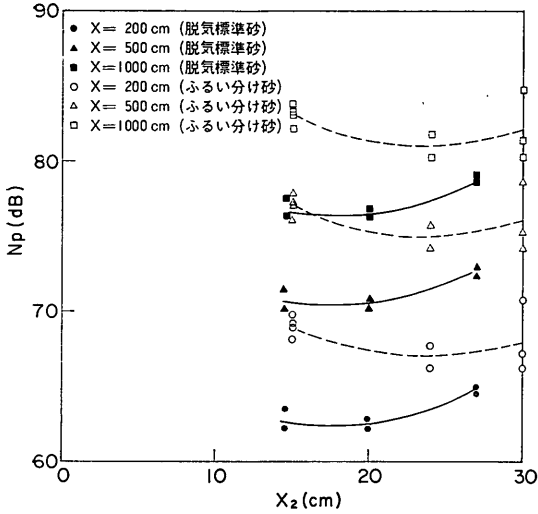


図-13 砂層厚さと伝搬損失

水深 10m のとき N_P が約 85dB となり 100dB 以下の
ため十分に探査可能である。

4. 砂層探査の現地実験

本実験は、覆砂技術開発の一環として、軟泥層上の覆砂厚を超音波を用いて計測するシステムの開発のため、実船用に製作した実験装置を使用し、モノパルス超音波特性、へどろ探査、覆砂厚検測、海域環境条件の測定を行い、実用化のためのデータを得ることを目的として行われた。

4.1 実験装置の概要

港研所有の海底沈埋異常物探査実験装置の一部を改造して現地実験用のモノパルス超音波実験装置とした。

図-14に実験装置のブロック図を示す。改造内容とし

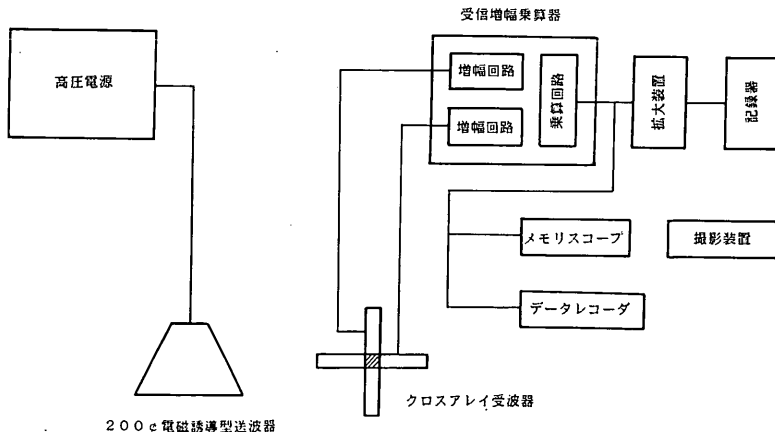


図-14 実験装置のブロック図

ては、主として次のようである。

(1) 送信モノパルス幅を長くした。即ち、送波ピーク周波数を低くして砂層中の超音波の減衰を小さくして、砂層厚探査における砂層と、軟泥地盤の境界面からの反射波を得やすいようにした。

(2) 送波器の送波出力を増大した。即ち、受信超音波のレベルが高くなり、多少の雑音があっても十分に高いレベルで受信波が得られ、砂層厚検測が容易となった。

(3) 水平分解能を高めて検測精度を向上させるために、受波器をクロスアレイとして受波の指向性を鋭くした。

(4) クロスアレイ受波器で得られた受信出力は、それぞれ各アレイの受信出力を増幅した後、乗算回路でかけ算して感度を向上させ、分解能を高めた。

(5) 砂層厚さを読み取り易くするため、砂層厚をモノパルス超音波で検測した結果を放電破壊記録器に記録した。

(6) 受波レベルやパルス幅等音響データを後日解析できるように、データレコーダで受波波形を記録した。

本装置の主な仕様は次のとおりである。

- (1) 周波数帯域 1 kHz~100kHz (モノパルス)
- (2) 海底下砂層測定厚さと分解能

目標値として砂層厚 2m 以内の時、分解能は 10cm 以下 (高圧電源のみ) とし、砂層厚 2m~5m の時、分解能は 30cm 以下 (コンデンサボックス付加) とした。

なお、底質によって伝搬損失が変化するので、測定可能な限り高域成分 (高い周波数) で測定することが分解能の点から有利である。従って探査すべき覆砂厚の大小によって周波数を選択することが必要となる。

- (3) 電磁誘導型送波器

従来よりも送波レベルが高いものを製作した。

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

- ・送波音圧：86.6dB—m, at 1,000V, 6 μ F
98.0dB—m, at 2,000V, 6 μ F

- ・モノパルス幅：48 μ S, at 6 μ F

(4) クロスアレイ受波器

受波感度 (Km)：-85.6dB, at 20kHz, 1 m

(5) 乗算増幅器の増幅度：+60dB, at 20kHz, 1 m

(6) 受信系総合特性

クロスアレイ受波器受波感度 (-85.6dB) + 乗算増幅器増幅度 (+60dB) = -25.6dB

(7) 送受波器の指向性

試作した 200 ϕ 電磁誘導型送波器, 及びクロスアレイ受波器と受信増幅乗算器で構成される受信系の指向性を求めた結果を, 図-15 に示す。指向半減半角は送波器で18度, 受信系で1.8度であることがわかる。

4.2 実験内容と実験結果

(1) 概 要

61年度に行われた覆砂厚検測実験の結果, 軟泥層モデルと砂層モデルの反射, 透過特性などの音響特性が明らかとなり, 実用化の可能性を得た。そこで62年度に実用システム設計のためのデータを得るため, 現地実験用としてのモノパルス超音波実験装置を製作し, 海底軟泥層の上に撒き出された覆砂厚を測量船で走航しながら超音波により測定するシステムの実証現地実験を行った。実船用の覆砂厚検測用超音波システムを開発するためには,

- ① 現地軟泥層における超音波の反射, 透過特性や探査記録特性の把握。
- ② 覆砂表面の超音波の反射と探査記録特性。
- ③ 軟泥層と覆砂層との境界面からの超音波の反射と探査記録特性。
- ④ 船体動揺が探査記録特性に及ぼす影響。
- ⑤ 船の走航速度が探査記録特性に及ぼす影響。

等を明らかにする必要がある。

本研究は, クロスアレイ型モノパルス超音波探査装置による覆砂厚検測技術確立のための, 上記項目について実船用の超音波実験装置を製作し, 覆砂実海域で実証実験を行い明らかにした。

(2) 河和港沖覆砂海域における実証実験

実船用に製作したモノパルス超音波実験装置を使用し, モノパルス超音波特性, 軟泥層探査, 覆砂厚検測, 海域環境条件の測定を, 河和港沖覆砂海域において行い, 実用化のデータを得た。

実験場所としては, 現に海底の覆砂が行われている三河湾河和港沖覆砂海域 (水深-5 m) である。

海底条件として①未投砂海底 (軟泥層海底), ②覆砂

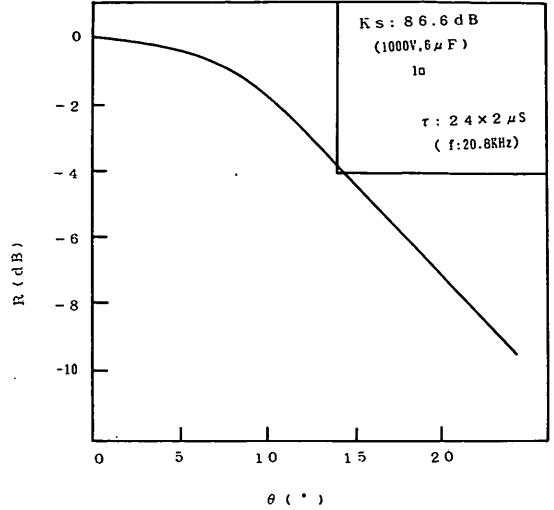


図-15-(a) 電磁誘導型送波器の指向性

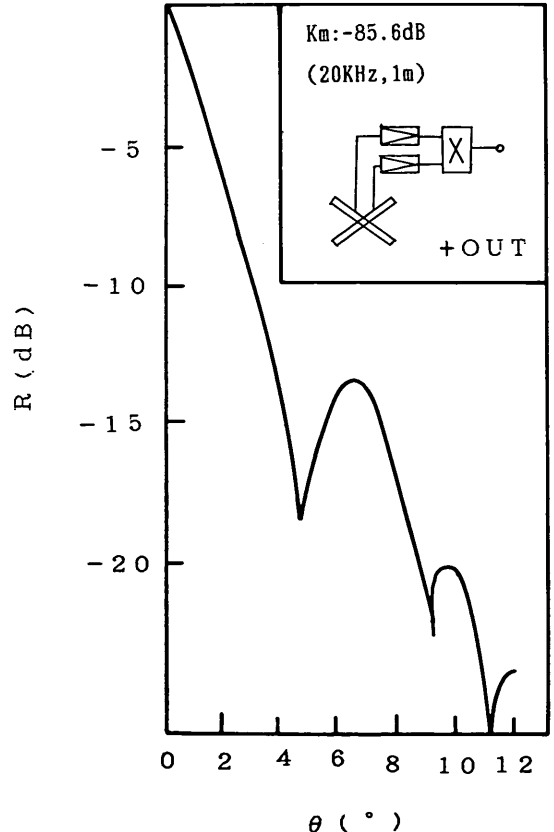


図-15-(b) 受信系の指向性

海底の二条件とした。

また、調査船としては第五港湾建設局の借り上げ船を使用した。

実験は昭和62年9月7日～9月9日の3日間行われた。

使用した実験装置は、

- ① モノパルス超音波実験装置
- ② 標準マイク
- ③ 音圧計
- ④ 200kHz 音響測深機等である。

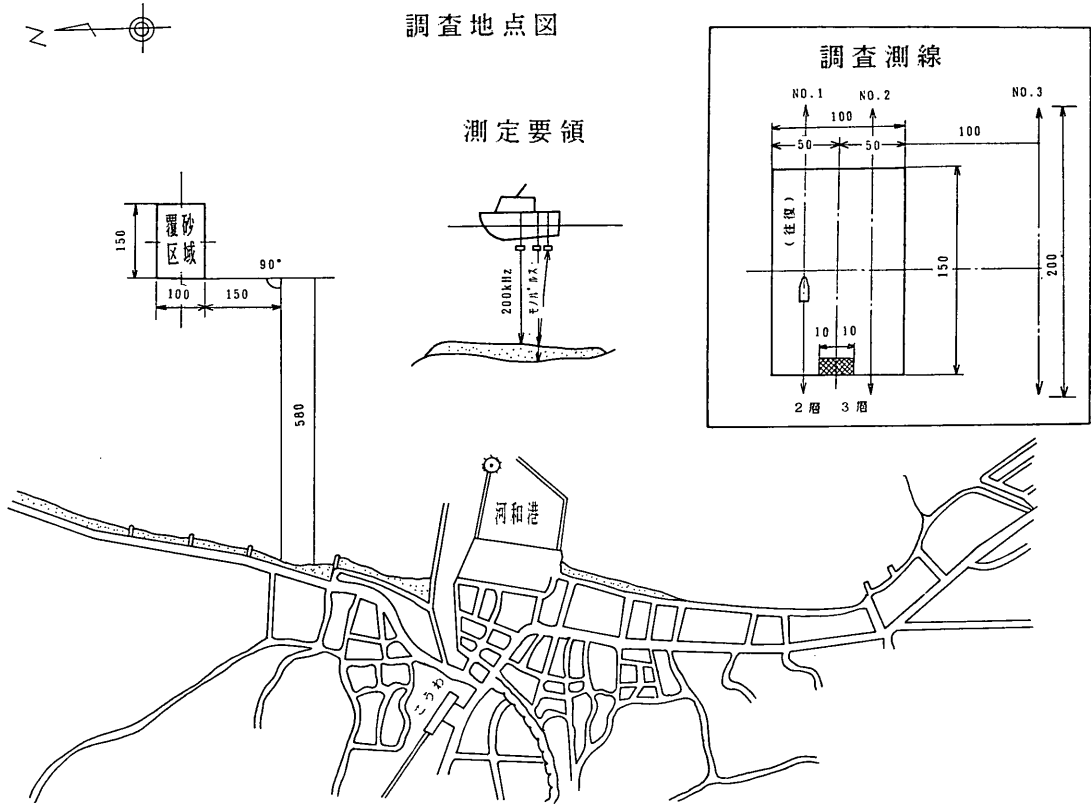


図-16 実験場所

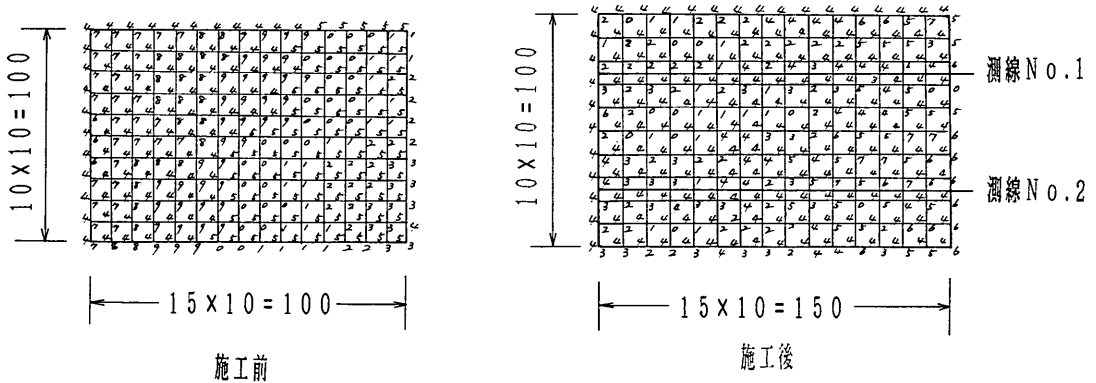


図-17 覆砂海域の水深

次に実験概要を述べる。

イ) 実験海域の状況

実験を行った場所は、図-16に示すように河和港沖580mの位置に100m×150mの範囲に覆砂した海域である。実験海域の海底地盤は軟泥で、その上に盛砂したものである。水深は図-17に示すように覆砂海域で、4.1m～4.7mで原地盤が4.5m～5.4mだから、覆砂厚は40cm～70cmである。測定コースは、図-16に示すように、覆砂海域を東西にNo.1とNo.2の2コースとし、往復走航するようにした。

また、比較のためNo.3として軟泥層を東西に走航するコースを設定した。

ロ) 実験装置の測量船への装備

図-18及び写真-9に示すように、測量船の後部右舷にモノパルス超音波実験装置の電磁誘導型送波器とクロスアレイ受波器を装備した。また、船体の中央部左舷に200kHz音響測深器の送受波器を装備して、測深記録の比較実験ができるようにした。

ハ) 実験内容

9月7日機材を実験船に搭載し、調整を行ったが電氣的誘導が多く、且つ送信出力が小さかった。

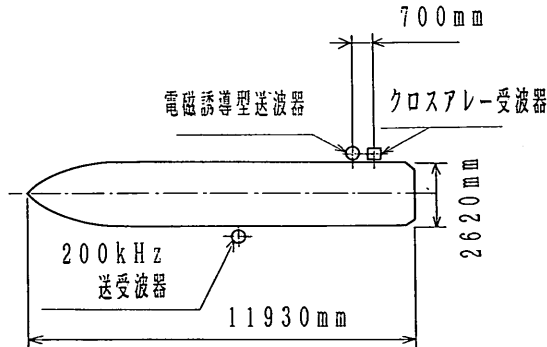


図-18 送受波器の装備



写真-9 実験装置取付状況

9月8日再検討を加えた結果、電氣的誘導については、アース点の選定により軽減された。また、送波音圧については、送波器ドーム内の空気によって感度低下が生じたものと考えられ、舷測に送波器を取り付ける際に空気を抜くようにした結果、送波出力は正常になった。

実験のために出航したが、風波が高く船の上下動は50cm程度生じ且つ、ローリング、ピッチングも激しく検測実験を行うには不適な環境条件であった。

すなわち覆砂厚30cm～70cmの検測に対し分解能を向上させるため低周波でビーム幅を狭くしたため(半減半角1.8度)船の動揺の受け方が200kHz測深機(半減半角3度)に比較して非常に大であった。また、海底面下の層を分解するためのパルス幅を狭くしたため反射レベル変動が大で欠測を多く生じる結果となった。

ちなみにパルス幅は200kHz測深機で100μs～200μs、モノパルス超音波実験装置で50μsである。さらに海底面下の探査のため、低周波としたため送受波器の形状が大きく風波による海中雑音、船の動揺による衝撃音、さらに水中に巻き込まれる気泡の影響が大であった。

停船中に比べて走航中ではこれらの影響が一層強く完全なデータを得ることでできなかった。

① 原地盤海底(軟泥層海底)の測定

図-16に示すように軟泥層海底である原地盤海底のNo.3のコースを東西方向に往復走航して測定を行った。

付図-1-1にアナログ記録を示す。

走航のスタート、ストップのマーカ点の深度は表-4の通りであり、探査機と測深機両者の送受波器の深度差を考慮するとよく合致している。

② 覆砂海底(Bブイに係留して測定)

図-16に示す覆砂海域にあるブイに船に係留して停船した状態で測定を行った。付図-1-2の原地盤の水深は5m～5.2mであり、その上に約40cm～60cm投砂が行われ、且つ原地盤にはほぼ平行に覆砂していることが明瞭に示されている。

付図-1-3は3層撒きの海底で一部をのぞいて3層の状態がわかる。

③ 覆砂海底(No.1, No.2コースの走航実験)

表-4 現地盤海底のカット線位置の深度

	東 側		西 側	
	往	復	往	復
探査機	m 5.3	m 5.4	m 4.55	m 4.6
測深機	5.8	5.8	5.0	4.9

表-5 覆砂海底 (No. 1 コースの走航実験カット線位置の深度)

	東 側		西 側	
	往	復	往	復
探査機	4.55(4.9) ^m	4.85(5.2) ^m	4.3(4.55) ^m	— ^m
測深機	4.9	4.3	4.3	4.9

表-6 覆砂海底 (No. 2 コースの走航実験カット線位置の深度)

	東 側		西 側	
	往	復	往	復
探査機	4.5(4.9) ^m	4.4(4.8) ^m	4.2(4.5) ^m	4.05(4.5) ^m
測深機	4.9	4.3	4.9	4.8

表-7 覆砂海底 (A, B 地区均し地点) の走航実験カット線位置の深度

	東 側		西 側	
	往	復	往	復
探査機	4.55(4.9) ^m	4.85(5.2) ^m	4.3(4.55) ^m	— ^m
測深機	4.9	5.6	4.3	4.9

表-8 走試験時のカット線位置の深度

	2ノット		4ノット		6ノット	
	東	西	東	西	東	西
探査機	4.7 ^m	4.2(4.5) ^m	4.7 ^m	4.5 ^m	4.5 ^m	4.5 ^m
測深機	5.3	4.6	5.1	5.0	5.3	5.0

覆砂海底上を東西に走航して検測したが、走航による影響を強く受けた。付図-1-4のアナログ記録は5ノット走航で付図-1-5は3ノットでNo. 2 コースを走航したものである。

5ノット走航では殆どデータが不明確であるが、3ノット走航では十分データが判読できる。これは送受波器の深度が大きさに比べて浅く、船体の動揺によって送受波器部分が海上に浮き上がることもあって欠測し、且つ送受波器自信も気泡を発生させているものと考えられる。

カット線位置の深さは表-5に示す通りである。

同様に No. 1 測線を測定したものが付図-1-6である。カット船位置の深度については表-6に示す。

④ 覆砂海底 (A, B 地区均し地点)

A, B 地区均し地点を3ノットで走航しながら検測したアナログ記録が付図-1-7~8である。

風波が次第に強く走航の影響を受け記録は不明確になっている。カット線位置の深度を表-7に示す。

⑤ 走航試験

覆砂海底の中央部上を船速2, 4, 6ノットで走航した記録が付図-1-9~11である。6ノットになると記録が不明確となり、覆砂厚の判断が不可能になってくる。これは探査装置のせいではなく、送受波器深度が浅いため船体動揺により、送受波器が海上に上がってくるため空気が混入し、且つ発生する気泡のため送波出力、及び受波出力が低下したものと考えられる。送受波器の吊り下げ深度を深くしたり送受波器に整流覆をつける等、気泡の発生を極力防ぐ対策を考慮する必要がある。

カット線位置の深度を表-8に示す。

4.3 実験結果の考察

実証実験で得られたアナログ記録や、データレコーダで得られた波形記録データを解析し、且つ実験海域、海底の水温、塩分、底質等の環境データを参考にして、覆砂におけるモノパルス超音波特性(砂中音速度、砂中透過周波数、反射、伝搬損失等)を考察してみる。

(1) 実験海域の環境条件

実験時の実験海域の水質、底質等の海域環境条件を調査した。図-19に調査地点を示す。図中のNo. 1~No. 13はそれぞれの調査地点を示す。

a) 水温、塩分測定結果

付表-2に実験時(昭和62年9月8日)の水温、塩分測定結果を示す。No. 5は覆砂区域の中央部、No. 10は西側、No. 11は北側、No. 12は東側、No. 13は南側の海域の水温、塩分を深度毎に示したものである。平均水温が約27℃、平均塩分が29‰であることがわかる。これらのデータから、この海域の水中音速 1,534m/s である。

b) 底質調査結果

付表-3に底質調査結果を示す。この中で音響特性に影響を及ぼす単位体積重量と含水比について検討する。

付表-3-1と2はNo. 2 測線のデータで、3と4はNo. 1 測線のデータである。いずれも覆砂海底のデータである。

覆砂表面、及び覆砂層-原地盤層境界面の単位体積重量が小さく含水比が大きいことがわかる。

付表-3-5は均し面Aのデータで、6は均し面Bのデータである。1~4のデータと比較して単位体積重量が大きく、含水比が小さくなっていることがわかる。

均したことによって圧密されたものと考えられる。付

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

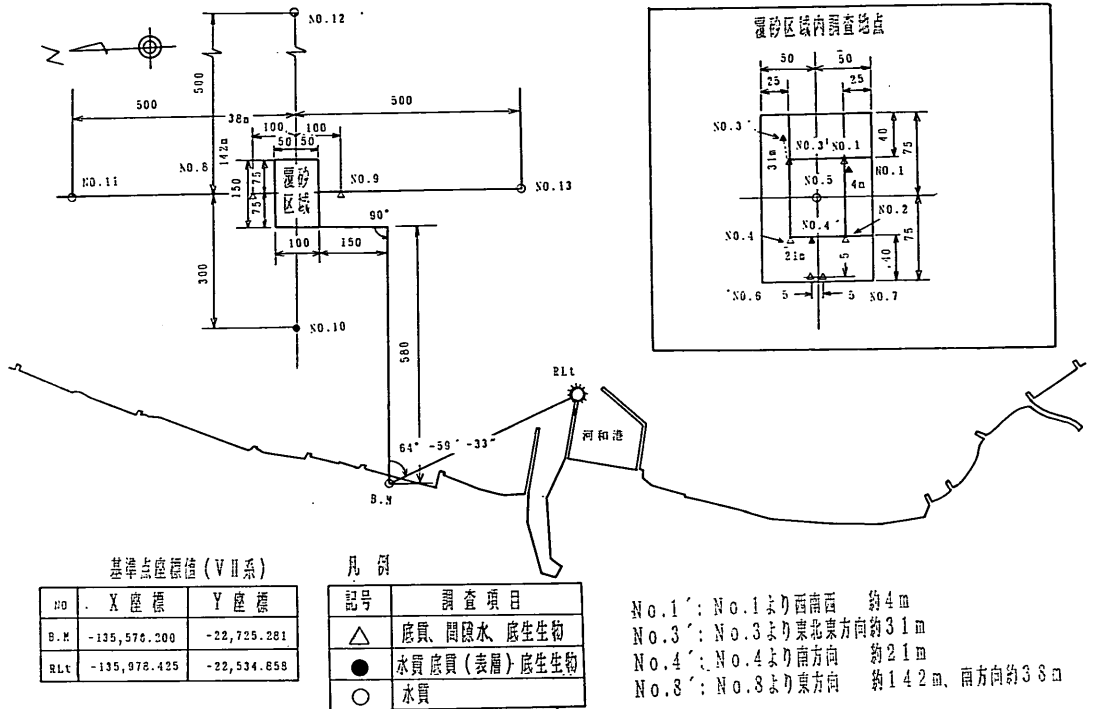


図-19 水質・底質調査地点図

表-3-7は、原地盤(覆砂区域の北側100m)のデータで、3~8は原地盤(覆砂区域の南側100m)のデータで9は原地盤(覆砂区域の西側300m海岸寄り)のデータでこれらと比較すると9の単位体積重量は7, 8よりも小さく、且つ含水比は大きくなっている。9の方が海底が軟弱であることがわかる。付図-2に底質の船直分布を示す。図中の実線は覆砂前の5月調査時のデータ、点線は覆砂直後の7月調査時のデータ、一点鎖線は9月実験時のデータである。覆砂後時間経過により、砂が固まっていることがわかる。

c) 底質分析結果

付表-4には採取した調査地点の試料底質の分析結果を示す。測線 No. 1, No. 2 の粒度組成の分析結果を見ると、覆砂層では砂分と礫分が半々、層によっては礫分が多いところもあるし、砂分の多いところもあって一様ではなく複雑な層を形成している。原地盤はほとんどが砂分で、粘土分、シルト分、礫分の順に粒度が組成されているが、層によっては、シルト分と粘土分の順位が入れ替わっているところもある。

均し面A及びBでは覆砂層では圧倒的に礫分が多く、原地盤層では均し面Aで砂分が-20~30cm層をのぞいて多く、粘土分、シルト分、礫分の順となっている。

均し面Bでは最下層を除いて砂分が一番多く、礫分がその次で粘土分、シルト分の順となっている。

未投砂区域では、覆砂区域の西側を除いて砂分が61%~79%で一番多く、粘土分、シルト分、礫分の順となっている。覆砂区域の西側では、表層データしかないが、シルト分が56%で多く、砂分、粘土分、礫分の順となっている。

付表-5は底質土粒子の50%中央粒径を示したもので、覆砂層で0.059mm~7.9mm、原地盤層で0.0042mm~0.66mmの範囲の粒径の土粒子で各層が形成されていることがわかる。

d) 底質調査分析結果の平均値

付表-1, 付表-2, 付表-3, 付表-4の底質調査分析結果のデータを平均すると次の表-9の通りとなる。

(2) 受信波形データの解析

覆砂厚検測記録は、調査船上でのオシロスコープによる波形の読み取りと写真撮影及び、アナログ記録器とデータレコーダによる連続記録の予定であったが、受波波形の変動、ノイズが大きくオシロスコープによる測定が不可能であったため、アナログレコーダによる連続記録のみとなり、データレコーダの記録は、研究室において受波波形データを解析することとした。

表-9 底質調査分析結果の平均値

項目	水温 (°C)	塩分 (‰)
測点 No. 5	26.9	29.5
No. 10	27.0	29.1
No. 11	26.9	29.6
No. 12	26.4	30.3
No. 13	26.6	30.0

層 (cm)	項目 測点No.	50%中央粒径 (mm)	単位体積重量 (g/cm ³)	含 水 比 (%)	粒 度 組 成 (%)				比 重
					礫 分	砂 分	シルト分	粘土分	
覆砂層	No. 1	1.552	2.090	29.40	40.00	46.60	10.80	4.60	2.619
	No. 2	3.340	2.252	11.80	61.40	35.54	2.40		2.655
	No. 3	2.798	2.442	11.40	54.60	42.60	2.80		2.654
	No. 4	1.250	2.264	14.20	33.60	62.20	4.20		2.654
	No. 5	—	—	—	—	—	—	—	—
	No. 6	3.660	2.356	7.40	64.80	30.20	5.00		2.652
	No. 7	4.075	2.510	4.25	76.00	20.00	1.25		2.654
	No. 8	—	—	—	—	—	—	—	—
	No. 9	—	—	—	—	—	—	—	—
	No. 10	—	—	—	—	—	—	—	—
原地盤層	No. 1	0.098	1.658	51.57	6.00	34.25	26.50	31.25	2.675
	No. 2	0.282	1.910	30.25	8.75	69.25	13.00	9.00	2.657
	No. 3	0.315	1.803	30.00	10.00	60.75	16.00	15.25	2.654
	No. 4	0.140	1.828	39.75	5.00	46.00	24.75	24.25	2.654
	No. 5	—	—	—	—	—	—	—	—
	No. 6	0.201	1.758	43.75	6.25	47.25	20.75	25.75	2.643
	No. 7	0.326	1.793	38.00	17.00	42.25	16.75	24.00	2.550
	No. 8	0.303	1.755	47.25	6.50	66.00	11.25	16.25	2.552
	No. 9	0.263	1.825	36.50	3.25	72.25	10.00	14.50	2.576
	No. 10※	0.019	1.410	113.00	2.00	29.00	56.00	13.00	2.470

※ No. 10はデータ数1個

a) 解析方法

研究室において、データレコーダに記録した受信信号をデジタルメモリによりAD変換（サンプリング速度4μs）して、パーソナルコンピュータに入力し、帯域フィルター（3～40kHz）による雑音の除去後、受信波の到着時間、電圧、パルス幅を測定した。

受信波の到着時間から水深を求め、横軸を調査船の進行に伴う時間の経過、縦軸を水深としたグラフに、任意の基準電圧以上の受波電圧の水深をプロットした。

この基準電圧を徐々に上げ、プロット点が減少し、各層毎に集中するようになった時点で表示している各点を線で結び、この上下10cm以内の水深の測定点を層の反射とみなし各層を表示した。以上の処理方法により決定した各層からの反射波の水深、層厚、電圧、パルス幅を求めた。

層厚は下の層の水深から上の層の水深を引いて求めた。電圧は1サイクルの正負それぞれのピーク値を、パルス幅は1サイクルの時間とした。（図-20）

なお、補正值は200kHz 測深機とモノパルス探査機の喫水を合わせるため各測定ごとに測深機と探査機の水深の平均値を求め、この差をさらに平均した値0.374mを測深機の水深からひいたものである。

b) 解析結果

付表-6に、各測線毎の水深、層厚、受波電圧、パルス

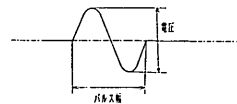


図-20 電圧とパルス幅

幅 200kHz 測深機による水深を示す。

付図-3はデータレコーダで記録した検測受波波形データを解析した結果得られた図である。測深図の縦軸は水深、横軸は調査船の航行に伴う経過時間を示す。

☞ 測深図-a は基準電圧を変えて決めた各層の測定水深と、200kHz 測深機による測定水深を示す。

☝ また、覆砂海域は、覆砂地区の始めと終わり（カット線の始めと終わり）の海底原地盤の測定水深を結んだ線を示す。測深図-b は第5港湾建設局による覆砂前後の測線 No. 1, No. 2 付近の測量結果とモノパルス探査機による測深結果を示す。

イ) 未投砂海域

測線 No. 3 に沿って往復し測定した。付図-3-1及び付図-3-2 に示すように、200kHz 測深機とモノパルス探査機の測深結果はほぼ一致している。

ロ) 覆砂海域

① B ブイ停船 (3 層まき)

付図-3-3 と付表-5 より、平均 30~40cm の厚さの層が 3 層あるのがわかる。平均電圧が 0.69V と低くなっているが覆砂の斜面上に停船したものと考えられる。

② 覆砂海底 (測線 No. 2, 3 層まき)

測線 No. 2 に沿って測定した。200kHz 測深機とモノパルス探査機による覆砂表面の測深値は付表-6 より平均値 4.35m と 4.384m (補正值) 標準偏差 0.196m と 0.206m とよく一致している。層厚は平均 40.3cm と 21.4cm の 2 層が測定された。カット線の合図前後に測定された原地盤を結んだ破線の下上に点が集中していることから原地盤が測定されたものと考えられ覆砂前後の測量と比較すると、覆砂前の平均水深は 5.014m、探査機では 4.881m でその差は 0.133m、覆砂後の水深は 4.492m、探査機では 4.350m でその差は 0.142m で殆ど同じであり、覆砂前後の測量による砂層の平均厚さは 0.588m で探査機による平均水深の差より求めた砂層の厚さは 0.531m でほぼ一致している。

③ 覆砂海底 (測線 No. 1, 2 層まき)

測線 No. 1 に沿って往復して測定した。200kHz 測深機とモノパルス探査機による覆砂表面の測深値の平均値は、付表-6 より 200kHz 測深機が 4.32m と 4.321m (補正值)、モノパルス探査機が 4.311m と 4.294m とよく一致している。層厚は各測線毎に 39.4cm と 45.7cm の 1 層が測定され、原地盤を結んだ砂線上に測定点が集中していることから、原地盤が測定されたものと考えられる。覆砂前後の測量と比較すると、覆砂前の平均水深は 4.906m、探査機では 4.683m と 4.881m でその差は 0.180m と 0.223m、覆砂後の平均水深は 4.332m、探査

機では 4.311m と 4.294m でその差は 0.011m と 0.028m である。

覆砂前後の測量による砂層の平均厚さは、0.584m で探査機による平均水深の差より求めた砂層の厚さは 0.394m と 0.457m で 0.2m 近が差がある。

④ 覆砂海底 (均し面 A, B 2 層まき)

均し面 A, B 上を 2ノットの速度で航行して測定した。200kHz 測深機とモノパルス探査機による覆砂表面の測深値の平均値は、付表-6 より 200kHz 測深機が均し面 A 4.358m、均し面 B 4.261m (補正值)、モノパルス探査機が均し面 A 4.370m、均し面 B 4.258m とよく一致している。

層厚は、均し面 A が 0.439m、均し面 B が 0.364m の 1 層が測定された。均し面 A は、破線上に測定点が集中し、原地盤を測定したと考えられるが、均し面 B は、測定の後半破線から外れる測定点が多い。

これはノットの合図後も調査線が連続している覆砂面上に進入し航行するため、原地盤の深度が不明で覆砂海底の終点の原地盤の深度に合わせて破線を引いたため、破線が原地盤の深さを正しく示していないものと考えられる。

⑤ 航行速度テスト (覆砂海底中央部)

2, 4, 6ノットと調査船の速度を変えて覆砂海底中央部を東西に同一測線上を測定した。各スピードとも表層の水深は 200kHz 測深機と、モノパルス探査機で平均値、標準偏差ともによく一致している。

2 層目の測定点は、砂線上に集中しており原地盤を示していると考えられる。航行速度による差は速度が上がると雑音が増し、反射波の識別がつきにくくなることである。これは、送受波器が大きいため航行により気泡を巻き込んだり、船体動揺以外に、流体抵抗により送受波器自体が振動するためと考えられる。

5. 結 論

5.1 室内モデル実験のまとめ

本実験の結果をとりまとめてみると次のようになる。

1) 海底覆砂厚探査に重要な砂、泥境界面からの反射特性は、モノパルス波では十分反射レベルが得られるが、200kHz トーンバースト波では減衰定数が 80dB/m と大きく、かつ S/N が悪く、境界探知は不可能である。従って覆砂厚探査には低周波で、分解能がよく、周波数帯域幅の広いモノパルス波が適していることがわかった。

2) 砂、泥境界面からの反射特性や砂中の減衰定数、伝搬速度は、砂中の空気含有量に依存する。

3) 砂層中を伝搬するモノパルス超音波の周波数は、送信周波数(33kHz)が17kHzに低下することがわかった。従って、17kHz付近の周波数のモノパルス超音波探査装置を開発する必要がある。

4) 実験の範囲内の覆砂厚30cm程度では、水深10mとしたとき、送波レベルが114dB/cmのモノパルス超音波によって十分探知可能であることがわかった。

5.2 現地実験のまとめ

本実験は、大変悪い海象条件の実験であったが取りまとめてみると次のようになる。

- (1) 未投砂海底では200kHz測深機とモノパルス探査機の測定深度はほぼ一致している。
- (2) Bブイ停船での測定では、3層まきの状況が測深記録に表示されている。
- (3) 覆砂海底のNo.2測線における測定では、覆砂前後の測量による砂層の平均厚さは、探査機で求めた値とほぼ一致している。
- (4) 覆砂海底のNo.1測線における測定では、覆砂前後の測量による砂層の平均厚さは探査機で求めた値の方が、約0.2m小さくなっている。
これは今回の実験が覆砂前後の測量による測線のメッシュの中間を航行して測量したために生じた差と考えられる。
- (5) 均し面の覆砂海底における測定では、探査機で覆砂厚をほぼ検出していることがわかった。
- (6) 航行速度テストでは速度が上がると雑音が増え、反射波の識別がつけにくくなることがわかった。送受波器の構造と船体取付方法を今後検討する必要がある。
- (7) この実海域実証実験によって、モノパルス超音波探査システムが覆砂厚計測に有用性があることが明らかとなった。

6. あとがき

本研究は第五港湾建設局の依頼により行われたものである。開発試験「ドラグサクソン船「清電丸」覆土技術模型実験」のうち「覆土厚検出技術模型実験及び現地実験」を当研究室が担当した。海底軟弱地盤上に覆砂された土厚を超音波パルス反射法で検出する技術は、わが国はもちろん諸外国でも始めてのことであり、未開拓の分野である。

自然海底の地層の音波探査に関するデータは多々あるが、覆砂という人工の海底を超音波で探査した例は見当たらない。特に砂を海上から投入することによる空気の混入に伴う気泡の発生、砂の舞い上がりによる浮遊砂の

影響等のデータは皆無である。このことから今回の開発実験は探査システム開発のためには貴重なデータが得られ、かつ実用化のための端緒が得られたものと考えられる。

このシステムを実用化するには、結論で述べたような検討課題が残されている。すなわち、測量船走航中のノイズ増大対策としての送受波器の構造と船体取付方法の検討がある。また覆砂施工中の土厚検出システムの開発も今後検討する必要がある。

本研究の覆砂厚さの検出技術の開発では、覆砂施工後に超音波探査で覆砂厚さを検出する手法の開発であるが、覆砂施工中にリアルタイムで覆砂厚さの検出が行える覆砂施工の監視システムの開発も要望されている。

このシステムの開発には、海底への砂投入による浮遊砂や、気泡が海中を伝搬する超音波パルスの伝搬特性に影響を及ぼすので、これらの特性を定量的に把握する必要がある。

浮遊砂による超音波の減衰定数 α は、超音波周波数 f の4乗に比例し、土粒子の半径 a の3乗に比例する¹²⁾。従って土粒子の半径 a が一定とすれば、周波数 f が減衰定数 α に大きく影響を及ぼすこととなるので超音波の周波数の選定は特に重要である。

また、水中気泡の超音波伝搬への影響は、気泡の半径 a と超音波周波数 f とが密接な関連をもっている⁷⁾。すなわち気泡の共振周波数 f_0 は気泡の半径 a に逆比例する。ちなみに水中に継続的に存在しうる気泡は15~100kHz位の共振周波数を持つので、この範囲以外の周波数の超音波を使用した実験を行って最適周波数を求める必要がある。

なお、水中気泡が海面付近に上昇してきて、送受波器の超音波送受波面に付着して感度を低下させることもあるので防護等も検討する必要がある。

なお、今回の覆砂厚探査システム開発のための現地実験は一地域の、しかも短期間に行われただけでデータも十分に得ることができず、かつ海象条件の非常に厳しいときに行ったものである。場所、実験期間とも回数を重ねてデータの把握に努めれば、もっと確実なデータが得られるものと考えられる。今後ともデータの集積を重ねることが肝要であろう。

このシステムの応用例として、覆砂工事の他、地盤改良の敷砂・置砂等の砂層厚検出にも活用できるものと考えられる。

最後に、本研究は第五港湾建設局のドラグサクソン船覆土技術開発の一環として行ったものである。現地実験に当り終始御協力頂いた第五港湾建設局機械課、三河

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

港工事事務所の関係各位に感謝の意を表する次第である。

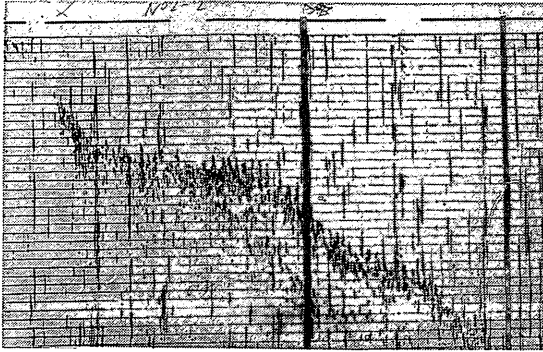
参考文献

- 1) ドラグサクション船覆土技術開発試験報告書, 第五港湾建設局, 1987年3月。
- 2) 西川 豊: 砂層厚計測装置の開発, 作業船, No. 177, 1988年5月, pp. 41~47。
- 3) 奥島基良・本岡誠一: 電磁誘導型送波器による水中強力パルス音波の発生, 電気通信学会超音波研究会資料, 1966年。
- 4) 本岡誠一・奥島基良: 電磁誘導型集束音源を用いた砂中の探知, 電子通信学会, 1980年。
- 5) 木原純孝: モノパルス超音波による海底土厚計測に関する基礎実験, 日本音響学会講演論文集, 1987年3月, pp. 765~766。
- 6) 木原純孝・白井一洋・篠原丈人: モノパルス音源による海底覆土厚探査実験, 日本音響学会講演論文集, 1988年3月, pp. 825~826。
- 7) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦: 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 1978年。
- 8) 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年度港湾技術研究所講演会講演集, 1982年12月, pp. 227~286。
- 9) 木原純孝・白井一洋: 大水深施工検査・海底探査技術の開発(第2報)―海底沈埋異常物探査技術の開発研究一, 港湾技術研究所報告 Vol. 23, No. 4, 1984年12月, pp. 95~114。
- 10) 木原純孝: 狭ビームモノパルス超音波による海底埋設物探査実験, 日本音響学会講演論文集, 1983年3月, pp. 703~704。
- 11) 木原純孝: 海洋超音波による海底探査技術の現状と開発の動向, 昭和62年度港湾技術研究所講演会講演集, 1987年12月, pp. 257~308。
- 12) 奥島基良: 砂による濁水中での超音波の反射と減衰についての計算, 日本音響学会昭和44年度秋季研究発表会講演論文集, 1969年10月, pp. 22~28。

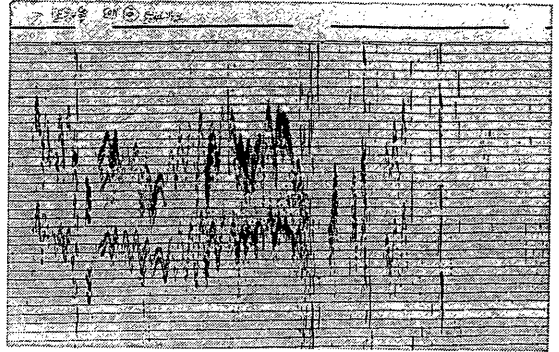
記号一覧表

- 2AL : 砂層中の往復の減衰損失 (dB)
 AL_s : 砂の減衰損失 (dB)
 c : 音の伝搬速度 (m/s)

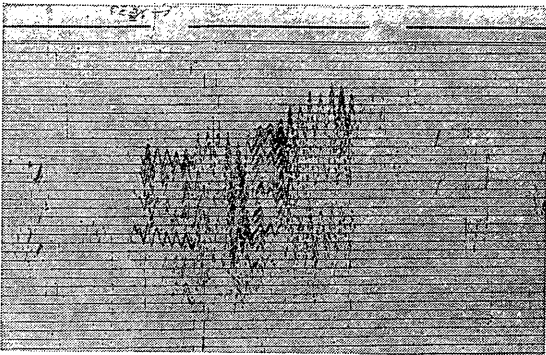
- c₀ : 海水の音の伝搬速度 (m/s)
 c₁ : 覆砂の音の伝搬速度 (m/s)
 c₂ : 軟泥の音の伝搬速度 (m/s)
 EL : 反射音圧レベル (dB)
 EL_M : 覆砂と軟泥の境界面の反射波のエコーレベル (dB)
 EL_s : 覆砂表面からの反射のエコーレベル (dB)
 f_R : 受波周波数 (kHz)
 f_s : 送信周波数 (kHz)
 N_P : 砂層中の伝搬損失 (dB)
 N_{psm} : 砂・泥境界面の伝搬損失 (dB)
 p_R : 受波音圧 (μ bar)
 p_S : 送波音圧 (μ bar at/m)
 R_M : 軟泥表面の反射率
 R_S : 覆砂表面の反射率
 RL : 底質面の反射損失 (dB)
 RL_M : 軟泥表面の反射損失 (dB)
 RL_S : 覆砂表面の反射損失 (dB)
 RL_{sm} : 砂・軟泥境界面の反射損失 (dB)
 SL : 音源の送波レベル (dB)
 T : 覆砂表面の超音波の透過率
 TL : 拡散損失 (dB)
 2TL_M : 音源と軟泥表面間の拡散損失 (dB)
 2TL_S : 音源と覆砂表面間の拡散損失 (dB)
 X₀ : 音源からマイクまでの距離 (m)
 X₁ : 音源から砂層までの距離 (m)
 X₂ : 砂層厚さ (m)
 Z₀ : 海水の固有音響インピーダンス (μ bar/cm/s)
 Z₁ : 覆砂の固有音響インピーダンス (μ bar/cm/s)
 Z₂ : 軟泥の固有音響インピーダンス (μ bar/cm/s)
 α : 減衰定数 (dB/m)
 α_s : 砂の減衰定数 (dB/m)
 ρ : 密度 (g/cm³)
 ρ₀ : 海水の密度 (g/cm³)
 ρ₁ : 覆砂の密度 (g/cm³)
 ρ₂ : 軟泥の密度 (g/cm³)



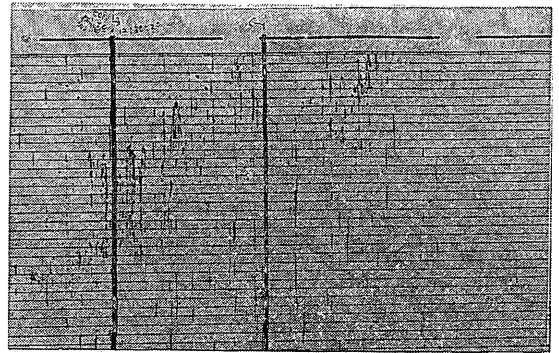
付図-1-1 原地盤海底のアナログ記録



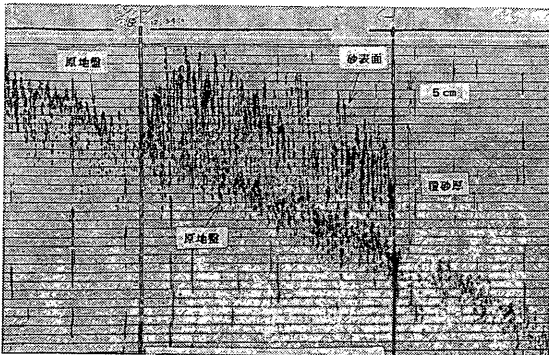
付図-1-2 原地盤海底のアナログ記録 (Bプイ停船)



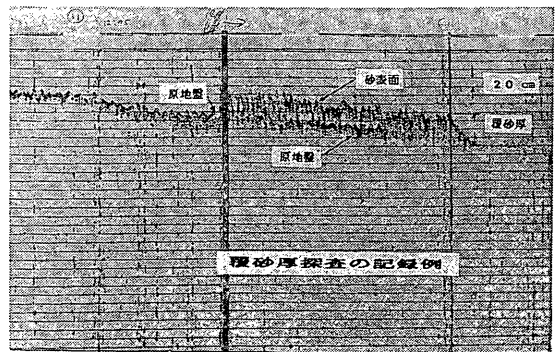
付図-1-3 原地盤海底のアナログ記録 (Bプイ停船)



付図-1-4 覆砂海底のアナログ記録 (測線 No. 2, 5ノット走航)

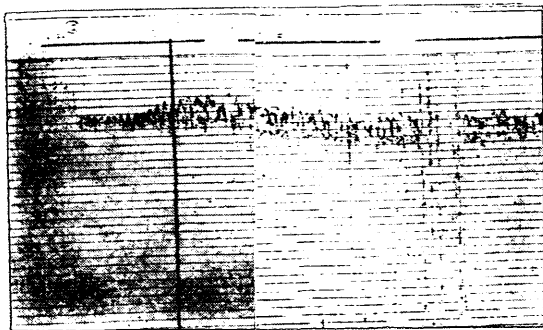


付図-1-5 覆砂海底のアナログ記録 (測線 No. 2, 3ノット走航)

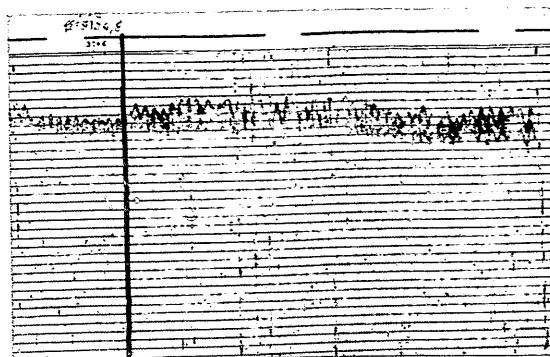


付図-1-6 覆砂海底のアナログ記録 (測線 No. 1, 3~4ノット走航)

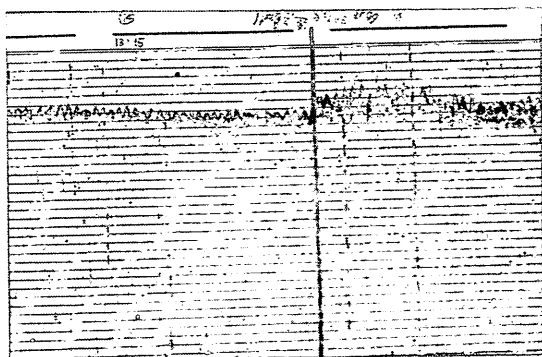
覆砂工法における砂層探査装置に関する実験



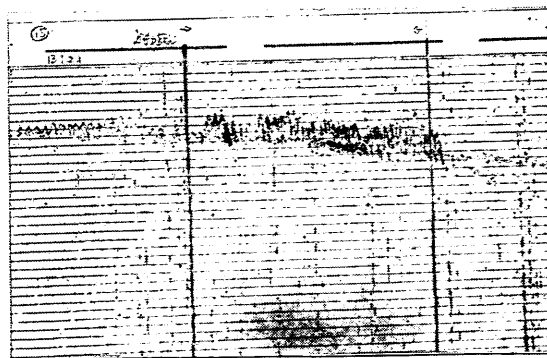
付図-1-7 覆砂海底のアナログ記録 (均し地区A'
3ノット走航)



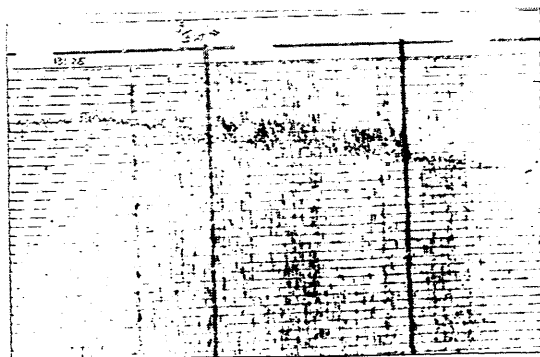
付図-1-8 覆砂海底のアナログ記録 (均し地区B'
3ノット走航)



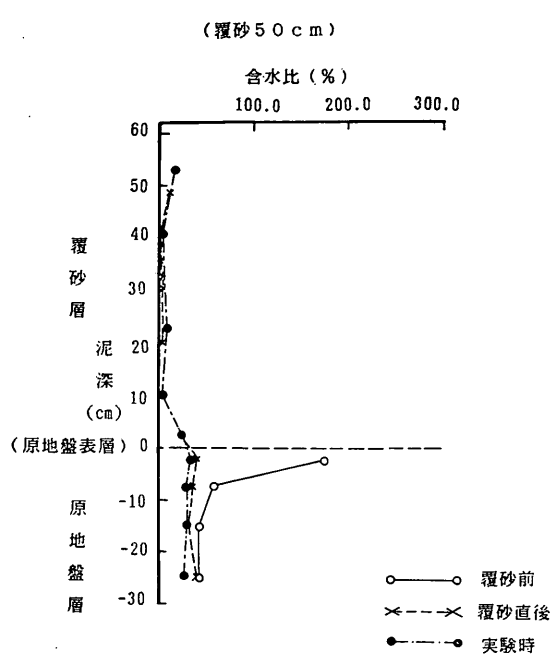
付図-1-9 走航試験のアナログ記録 (2ノット走航)



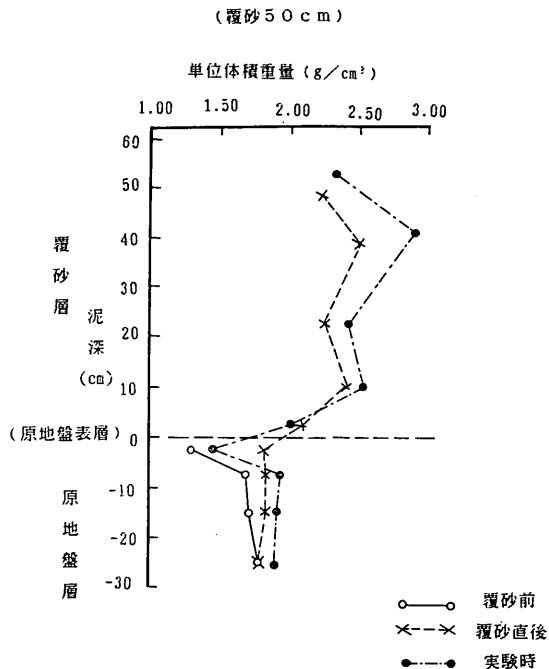
付図-1-10 走航試験のアナログ記録 (4ノット走航)



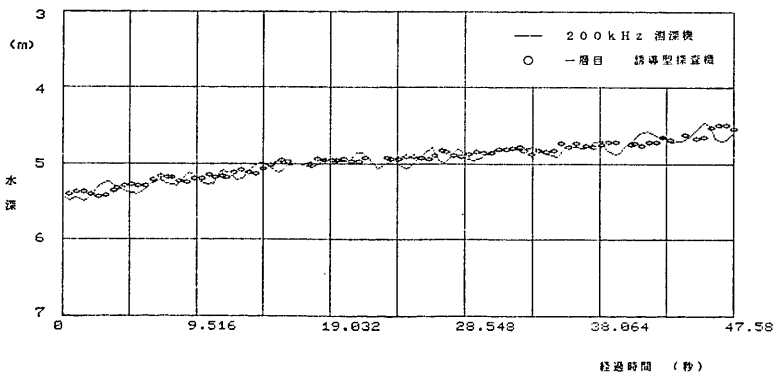
付図-1-11 走航試験のアナログ記録 (6ノット走航)



付図-2-1 実験海底の各深度毎の含水比



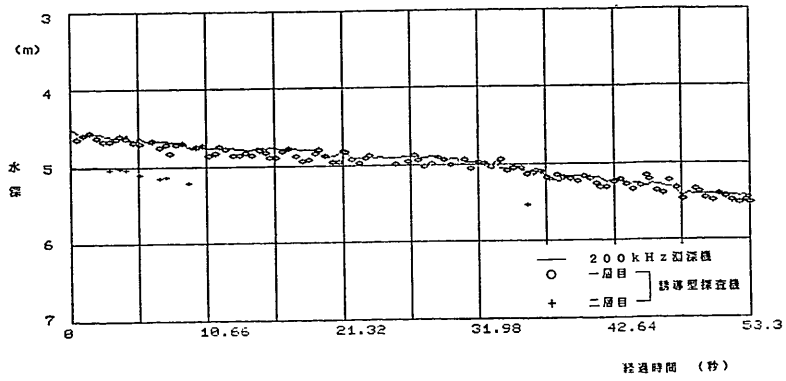
付図-2-2 実験海底の各深度毎の単位体積重量



測深図-a

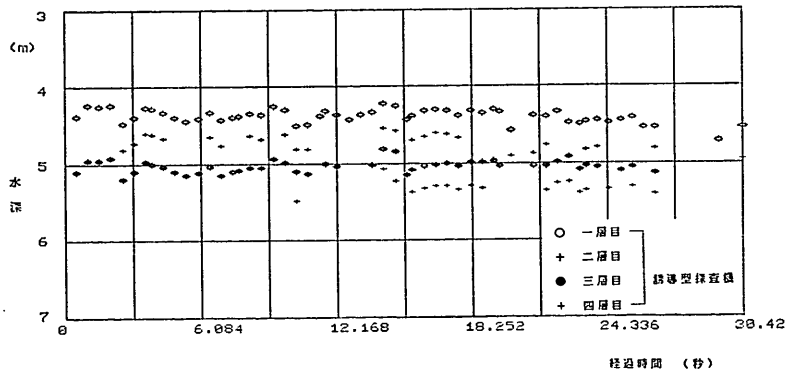
付図-3-1 へどろ面航行(往路)の測深図

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験



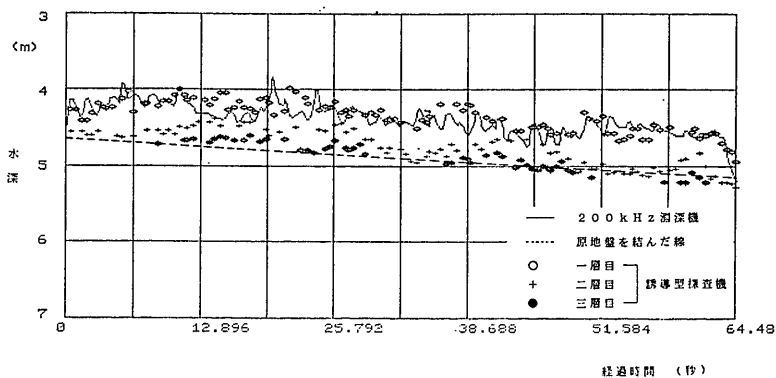
測深図-a

付図-3-2 へどろ面航行(復路)の測深図



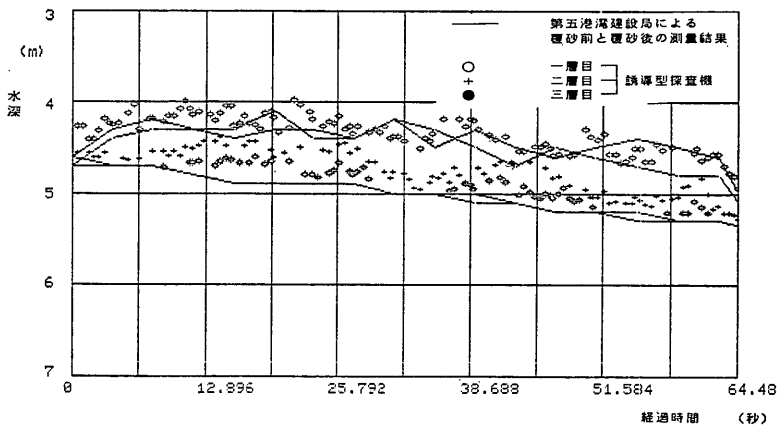
測深図-a

付図-3-3 Bパイ停船(三層まき)の測深図



測深図 - a

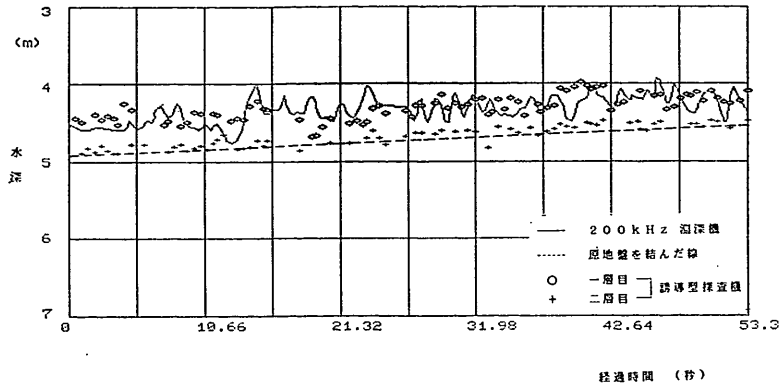
付図-3-4 測線 No. 2 航行 (三層まき) の測深図(a)



測深図 - b

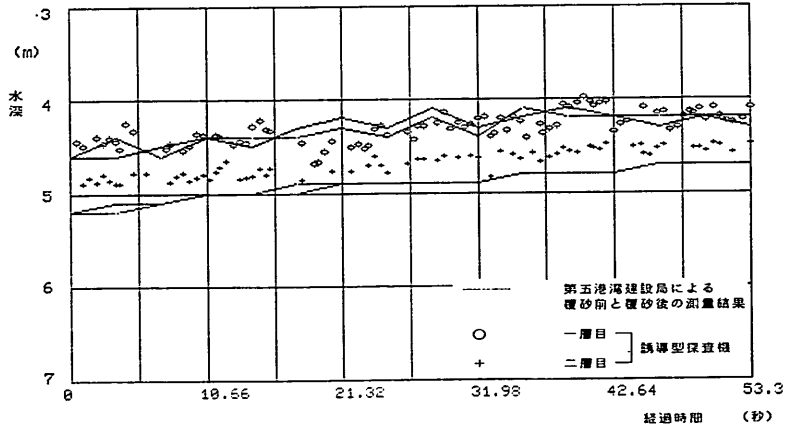
付図-3-5 測線 No. 2 航行 (三層まき) の測深図(b)

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験



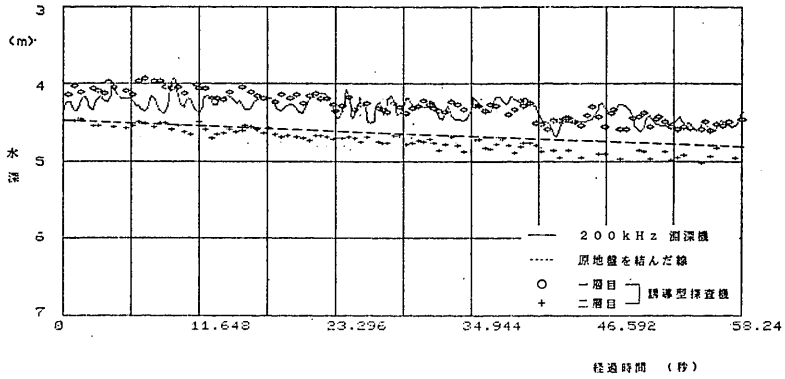
測深図-a

付図-3-6 測線 No. 1 (二層まき) 往路の測深図(a)



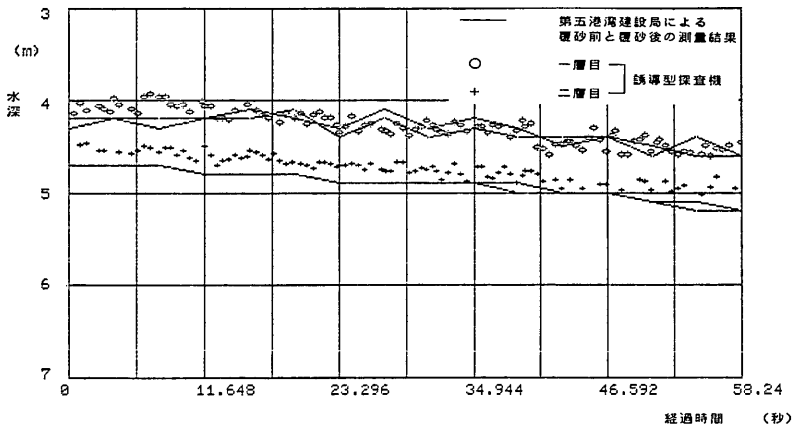
測深図-b

付図-3-7 測線 No. 1 (二層まき) 往路の測深図(b)



測深図-a

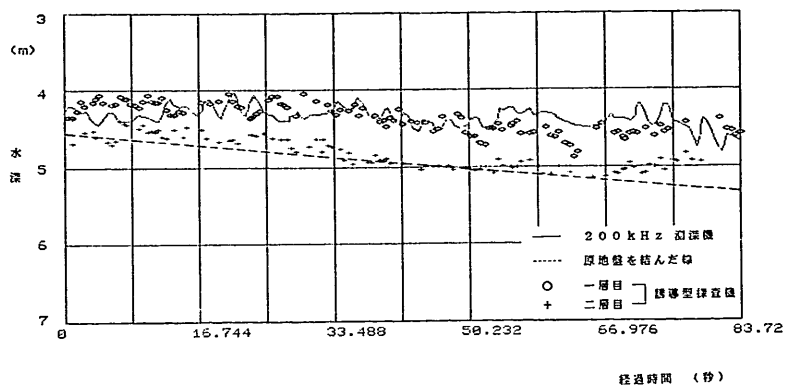
付図-3-8 測線 No. 1 航行 (二層まき) 復路の測深図(a)



測深図-b

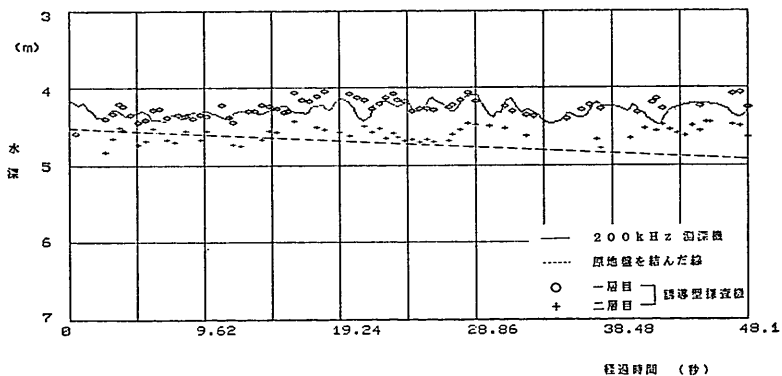
付図-3-9 測線 No. 1 航行 (二層まき) 復路の測深図(b)

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験



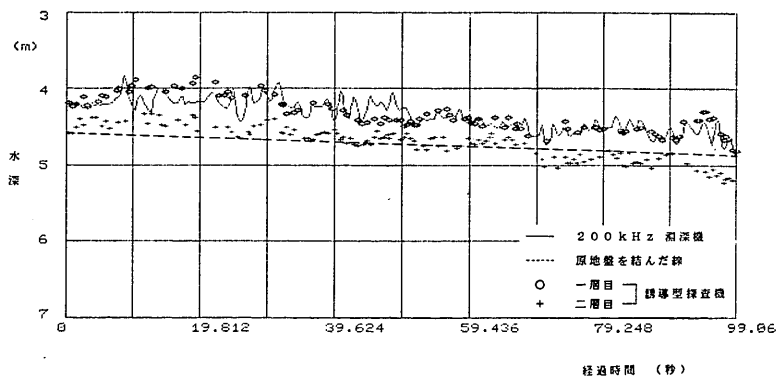
測深図-a

付図-3-10 均し面 A'2 ノット航行 (二層まき) の測深図



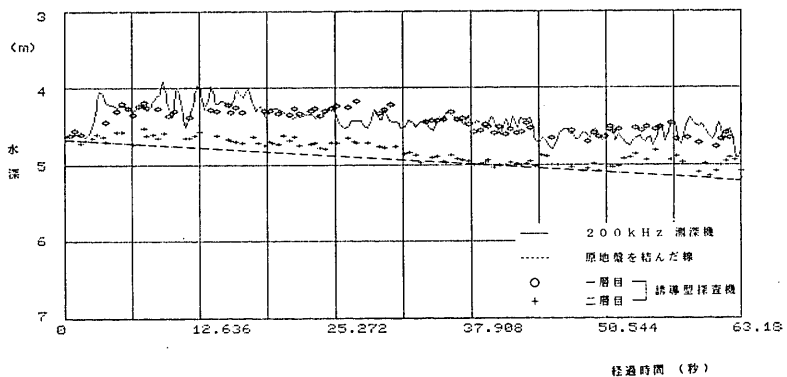
測深図-a

付図-3-11 均し面 B'2 ノット航行 (二層まき) の測深図



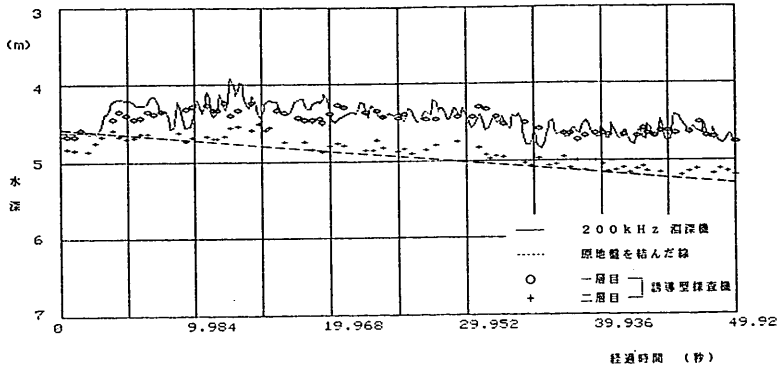
測深図-a

付図-3-12 覆砂面2ノット航行(スピードテスト)の測深図



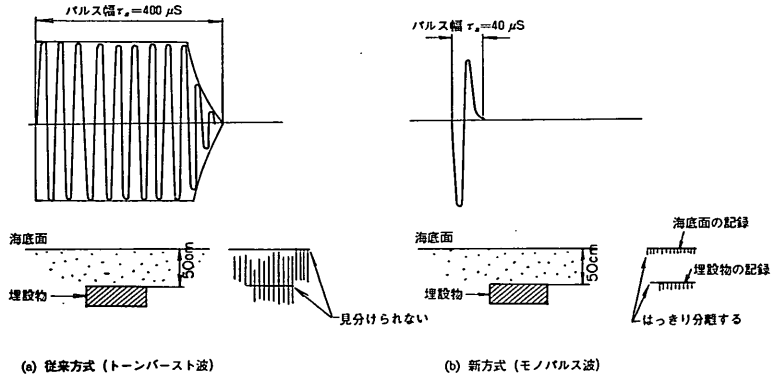
付図-3-13 覆砂面4ノット航行(スピードテスト)の測深図

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験



測深図-2

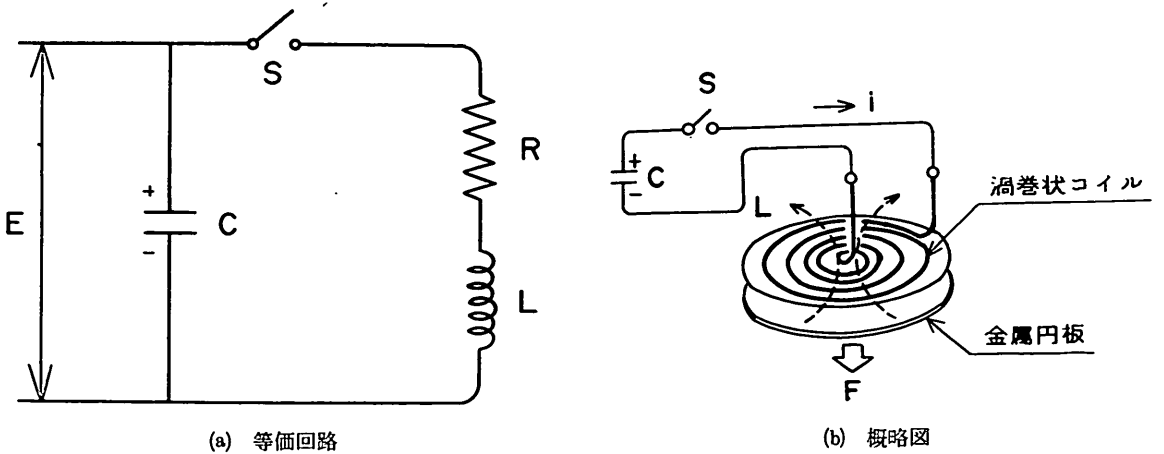
付図-3-14 覆砂面6ノット航行(スピードテスト)の測深図



(a) 従来方式(トーンバースト波)

(b) 新方式(モノパルス波)

付図-4-1 従来方式(トーンバースト波)と新方式(モノパルス波)の比較



(a) 等価回路

(b) 概略図

付図-4-2 モノパルス波の音源

付表-1 室内実験結果

(a) モノパルス波探査実験 (脱気フライアッシュ 20 cm)

	OH	18H後	42H後	114H後	平均	音波の経路 (図-3参照)
脱気フライアッシュ軟泥層 (厚さ20cm)	dB/m					
減衰定数 α	18.1	13.1	25.0	19.0	18.8 $\sigma=4.2267$	S1-M3
" α/f	0.76	0.52	1.0	0.76	0.76 $\sigma=0.1697$	
" f	23.82kHz	25.19	25.0	25.0	24.75kHz ± 0.54	
" 反射損失	11.5	9.0	11.5	11.9	10.98 $\sigma=1.1519$	S1-II'-M1
" 水中音速度	1448.0	1454.6	1454.6	1428.6	$\bar{X}=1446.45$ $\sigma=10.6521$	
" フライアッシュ音速度	1485.7	1485.7	1485.7	1475.2	$\bar{X}=1483.08$ $\sigma=4.5466$	

(脱気標準砂+脱気フライアッシュ 20 cm)

	OH	4H後	24H後	28H後	48H後	52H後	73H後	平均	音波の経路
砂 厚	8cm	14.5cm	14.5cm	20cm	20cm	27cm	27cm		
砂の減衰定数 a_s (dB/m)	31.3	15.9	8.3	9.5	8.5	13.7	12.2	10.44 $\sigma=2.1425$	S1-M2
" α/f	1.25	0.64	0.33	0.38	0.34	0.55	0.55	0.43 $\sigma=0.0994$	
" f (kHz)	25.0	24.8	25.2	25.0	25.0	24.9	22.2	24.59 ± 0.98	
砂面反射損失 RL_s (dB)	14.3	8.6	7.8	10.9	11.4	11.8	10.9	10.56 $\sigma=1.4207$	S1-I - $\begin{cases} M1 \\ M1' \end{cases}$
軟泥面反射損失 RL_M (dB)+2AL	11.5	11.5	10.2	10.2	10.8	12.5	13.0	11.34 $\sigma=1.1825$	S1-II - $\begin{cases} M1 \\ M1' \end{cases}$
" α (dB/m)	72.0	39.7	35.2	25.5	27.0	23.1	24.1	26.98 $\sigma=4.3153$	
" α/f			2.8	1.28	1.62	1.62	1.69	1.802 $\sigma=0.5191$	
" f (kHz)			12.6	19.9	16.7	14.3	14.3	15.56 ± 2.53	
水中音速度	1454.6	1454.6	1454.6	1391.3	1422.2	1421.1	1421.1	$\bar{x}=1431.36$ $\sigma=22.423$	S1-M1
砂層音速度	1516.1	1492.1	1492.1	1516.1	1516.1	1516.5	1516.1	$\bar{x}=1508.08$ $\sigma=11.3373$	S1-M2

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

(ふるい分け砂7 cm+脱気フライアッシュ20 cm)

	OH	19H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数 α (dB/m)	66.7	(19H後) 450		S1-M2
" α/f	10.5	14.2		
" f (kHz)				
砂面反射損失 RL_S (dB)	8.6	5.9		S1-I-M1
軟泥面反射損失 RL_M (dB)	18.9	17.4		S1-II-M1
" α (dB/m)	135	124		
" α/f	7.9	3.6		
砂中音速度 C_S (m/s)	1493.8	621.0	$\bar{x}=1057.40$ $\sigma=436.40$	S1-M2
水中音速度 C_W (m/s)	1499.6	1499.9	$\bar{x}=1499.75$ $\sigma=0.15$	

(ふるい分け砂15 cm+脱気フライアッシュ20 cm)

	OH	45H後	116H後	141H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数 α_S (dB/m)	238.7	(45H后) (2700m) 160	(116H后) (6960m) 159.3	(141H后) (8460m) 53.3		S1-M2
" α/f	7.9	8.8	5.4	2.2	25.53±4.82	
" f (kHz)	30.2	18.2	29.5	24.2		
砂面反射損失 RL_S (dB)	6.8	15.0	15.3	14.7		
軟泥面反射損失 RL_M (dB)+2AL	17.2	17.7	17.1	16.1	17.0	S1-II-M1
" α (dB/m)	57.3	59	57	53.7		
" α/f	2.6	3.1	2.5	2.2		
" f (kHz)	22.0	19.0	22.8	24.4	22.05±1.96	
砂中音速度 C_S (m/s)	970.6	1960.6	1329.2	1503.0	$\bar{x}=1440.85$ $\alpha=356.2315$	S1-M2
水中音速度 C_W (m/s)	1500.7		1500.9	1500.4	$\bar{x}=1500.67$ $\sigma=0.2055$	

(ふるい分け砂24cm+脱気フライアッシュ20cm)

		0 H	164H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数	α_S (dB/m)	67.5	(164H後) (9840m) 12.9	33.3±5.3	S1-M2
"	α/f	1.75	0.46		
"	f (kHz)	38.6	28.0		
砂面反射損失	RL_S (dB)	5.7	18.7	15.0	S1-I-M1' S1-II-M1'
軟泥面反射損失	RL_M (dB)	14.2	15.7		
"	α (dB/m)	29.6	32.7	14.85±0.75	S1-M2
"	α/f	2.1	2.1		
"	f (kHz)	14.1	15.6		
砂中音速度	C_S (m/s)	1528.5	1448.7	$\bar{x}=1488.60$ $\sigma=39.9$	S1-M2
水中音速度	C_W (m/s)	1498.3	1492.9	$\bar{x}=1495.60$ $\sigma=2.7$	S1-M2

(ふるい分け砂30cm+脱気フライアッシュ20cm)

		0 H	117H後	792H後	2664H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数	α_S (m/s)		(117H後) (7020m) 122.0	(792H後) (47520m) 61.0	(2664H後) (159840m) 12.4	23.85±3.85	S1-M2
"	α/f			2.2	0.62		
"	f (kHz)			27.7	20.0		
砂面反射損失	RL_S (dB)	4.3	5.4	14.3	11.6	15.7dB -全平均15.9dB	S1-I-M1' S1-II-M1'
軟泥面反射損失	RL_M (dB)	14.5	15.3	14.2	18.7		
"	α (dB/m)	24.2	25.5	23.7	31.2	15.18±0.73 →全平均17.4	S1-M2
"	α/f	1.5	1.8	1.6	2.0		
"	f (kHz)	16.1	14.2	14.8	15.6		
砂中音速度	C_S (m/s)		564.2	1524.7	1538.46	$\bar{x}=1044.45$ $\sigma=480.25$	S1-M2
水中音速度	C_W (m/s)	1490.4	1494.3	1469.7	1438.62	$\bar{x}=1484.80$ $\sigma=10.7954$	

(b) トーンバースト波 200kHz (脱気フライアッシュ20cm)

		0 H後	18H後	42H後	114H後	平均	音波の経路
軟泥層減衰定数	α (dB/m)	85	72.6	89.0	131	94.4	S2-M3
"	α/f	0.43	0.36	0.45	0.66	0.48	
軟泥層反射損失	RL_M (dB)	9.2	9.6	10.6	8.1	9.4	S2-M1
軟泥層音速度	C_M (m/s)	1575.8	1552.2	1575.8	1540.7	$\bar{x}=1561.13$ $\sigma=15.2278$	
水中音速度	C_W (m/s)	1523.8	1561.0	1561.0	1531.1	$\bar{x}=1544.23$ $\sigma=16.9724$	

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

(脱気標準砂 [8~27cm] + 脱気フライアッシュ 20cm)

	0 H	4 H後	24H後	28H後	48H後	52H後	73H後	平均	音波の経路
砂 厚	8cm	14.5cm	14.5cm	20cm	20cm	27cm	27cm		
砂層の減衰定数 α_S (dB/m)	61.3		37.2	46.5	45.0	44.1	44.8	$\bar{x}=43.52$ $\sigma=3.255$	S2-M2
α/f	0.31		0.19	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	
砂面反射損失 RL_S (dB)	13.3		9.3	9.5	9.5	14.4	15.9	11.7	S2-I- $\left\{ \begin{array}{l} M1 \\ M1' \end{array} \right.$
軟泥面反射損失 RL_M (dB)	7.0		12.1	8.6	9.2	14.5	15.5	$\bar{x}=12.0$ $\sigma=2.753$	S2-II- $\left\{ \begin{array}{l} M1 \\ M1' \end{array} \right.$
α (dB/m)	43.8		41.7	21.5	23.0	26.9	28.7	28.4	
α/f	0.22		0.21	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	
水中音速度	1542.2		1523.8	1523.8	1531.1	1529.87	1521.1	$\bar{x}=1528.63$ $\sigma=7.0116$	
砂層音速度	1566.7		1566.7	1566.7	1593.2	1606.8	1593.2	$\bar{x}=1582.22$ $\sigma=16.1653$	

(ふるい分け砂 7cm + 脱気フライアッシュ 20cm)

		0 H	19H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数 α (dB/m)		149	159	154	S2-M2
α/f		0.75	0.8	0.78	
砂面反射損失 RL_S (dB)		13.6	14.8	14.2	S2-I-M1
軟泥面反射損失 RL_M (dB)		10.3	10.6	10.5	S2-II-M1
α (dB/m)		73.6	16.6	45.1	
α/f		0.37	0.083	0.027	
砂中音速度 C_S (m/s)		3630.5	3608.4	$\bar{x}=3619.45$ $\sigma=11.05$	
水中音速度 C_W (m/s)		1499.6	1499.9	$\bar{x}=1499.75$ $\sigma=0.15$	

(ふるい分け砂 15cm + 脱気フライアッシュ 20cm)

		0 H	45H後	116H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数 α (dB/m)		135	(45H后) 100 (2700 _{min})	(116H后) 80.7 (6960 _{min})	105.2	S1-M2
α/f		0.68	0.5	0.4	0.53	
砂面反射損失 RL_S (dB)		11.3	10.4	10.6	10.8	S2-I-M1
軟泥面反射損失 RL_M (dB)		8.9	10.4	9.7	9.7	S2-II-M1
α (dB/m)		29.7	34.7	32.3	32.2	
α/f		0.15	0.17	0.16	0.16	
砂中音速度 C_S (m/s)		1819.7	1631.6	1716.9	$\bar{x}=1722.73$ $\sigma=76.9022$	
水中音速度 C_W (m/s)		1543.5	1546.1	1533.4	$\bar{x}=1541.0$ $\sigma=5.4778$	

(ふるい分け砂24cm+脱気フライアッシュ20cm)

		0 H	164H後	平均	音波の経路
砂層減衰定数	α_S (dB/m)	80.0	(164H後) (9840 _{min}) 75.8	77.9	S2-M2
"	α/f	0.4	0.38	$\sigma=2.1$ 0.39	
砂面反射損失	RL_S (dB)	16.9	16.9	16.9	S2-I-M1'
軟泥面反射損失	RL_M (dB)	11.3	10.8	11.05	S2-II-M1'
"	α (dB/m)	23.5	24.5	$\sigma=0.01$ 24.0	
"	α/f	0.12	0.12	$\sigma=0.25$ 0.12	
砂中音速度	C_S (m/s)	1667.2	1701.1	$\sigma=0$ $\bar{x}=1684.45$	S2-M2
水中音速度	C_W (m/s)	1566.5	1516.8	$\sigma=16.95$ $\bar{x}=1541.65$	S2-M2
				$\sigma=24.85$	

(ふるい分け砂30cm+脱気フライアッシュ20cm)

		0 H	117H後	792H後	平均		音波の経路
砂層減衰定数	α_S (m/s)	166	(117H後) (7020 _{min}) 142.3	(972H後) (47520 _{min}) 75.0	127.8	78.5	S2-M2
"	α/f	0.83	0.71	0.38	0.64		
砂面反射損失	RL_S (dB)	7.0	9.3	7.8	8.0	11.6	S2-I-M1'
軟泥面反射損失	RL_M (dB)	12.7	12.4	7.2	10.8	13.0	S2-II-M1'
"	α (dB/m)	21.2	20.7	12.0	18.0	21.7	
"	α/f	0.11	0.1	0.06	0.09		
砂中音速度	C_S (m/s)	1775.8	1756.8	1836.4	$\bar{x}=1789.66$	1484.1	S2-M2
水中音速度	C_W (m/s)	1477.0	1483.0	1485.9	$\sigma=33.9436$ $\bar{x}=1481.97$		
					$\sigma=3.7062$		

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

付表-2 水温、塩分測定結果

9月8日調査

水深 (m)	水 温 (°C)					塩 分 (%)				
	No. 5	No. 10	No. 11	No. 12	No. 13	No. 5	No. 10	No. 11	No. 12	No. 13
0	26.9	27.1	27.0	26.7	26.5	29.0	29.1	29.3	28.9	29.3
0.5	27.0	27.1	27.0	26.8	26.9	19.1	29.1	29.3	29.5	29.3
1	27.0	27.0	27.0	26.8	26.9	29.1	29.1	29.3	29.5	29.3
2	26.9	27.0	27.0	26.8	26.9	29.4	29.2	29.3	29.5	29.3
3	26.9	26.9	26.9	26.8	26.8	29.4	29.2	29.4	29.6	29.5
4	26.8	26.8	26.8	26.8	26.6	29.7	30.1	29.6	30.2	30.4
5	26.6		26.7	26.5	26.1	30.6		30.8	30.6	31.4
6				26.4	25.7				31.5	31.7
7				25.0					32.0	
8				25.0					32.0	

備考 No. 5 覆砂中央 No. 10 " (" W側300m
 No. 1 測線 No. 2 (E) No. 6 均し面A' No. 11 " (" N側500m
 No. 2 " (W) No. 7 " B' No. 12 " (" E側500m
 No. 3 測線 No. 1 (E) No. 8 原地盤 (覆砂区域のN側100m No. 13 " (" S側500m
 No. 4 " (W) No. 9 " (" S側100m

付表-3-1 底質調査結果 (No.2 測線)

9月 No. 1

項目	単位体積 重 (g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
覆砂層	30~33	2.11	12	0.7	+149	0.8	<0.01	96	55	1.6
	25~30	2.40	6	0.2	+222	0.6	<0.01	86	33	1.0
	15~25	2.38	7	0.3	+214	0.8	<0.01	99	30	1.1
	5~15	2.10	18	2.2	+119	1.0	0.02	109	251	2.0
	0~5	1.46	104	31.8	-49	6.8	1.67	346	1732	18.5
原地盤層	0~-5	1.56	69	19.4	-98	4.7	0.48	240	1103	13.2
	-5~-10	1.70	49	12.1	-87	3.9	0.17	164	590	11.5
	-10~-20	1.65	46	9.5	+32	4.4	0.06	157	474	5.9
	-20~-30	1.72	43	3.8	+88	4.9	0.02	89	284	4.8

付表-3-2 底質調査結果 (No.2 測線)

9月 No. 2

項目	単位体積 重 (g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
覆砂層	57~60	2.51	4	0.8	+222	0.8	<0.01	83	41	1.1
	30~57	2.09	13	0.5	+161	0.7	<0.01	91	40	0.7
	15~30	2.21	10	0.1	+231	0.9	<0.01	81	28	0.3
	5~15	2.53	3	0.2	+175	0.5	<0.01	55	29	0.8
	0~5	1.92	29	7.4	-66	1.9	0.31	146	441	1.4
原地盤層	0~-5	1.86	30	8.5	-99	2.1	0.17	123	388	3.6
	-5~-10	1.93	30	8.7	+21	1.6	0.03	127	246	2.5
	-10~-20	1.90	26	5.5	-79	1.6	0.04	105	270	2.8
	-20~-30	1.95	35	5.9	-80	1.8	0.04	100	223	2.0

付表-3-3 底質調査結果 (No.1 測線)

9月 No. 3

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P μg/g	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
覆砂層	51~54	2.33	17	7.3	+253	0.9	<0.01	103	80	0.7
	30~51	2.91	3	0.6	+241	0.6	<0.01	83	63	0.5
砂層	15~30	2.42	8	0.1	+243	0.7	<0.01	82	45	0.9
	5~15	2.53	3	0.1	+230	0.7	<0.01	71	19	0.8
	0~5	2.02	26	0.7	-88	1.9	0.16	139	343	4.3
原地盤層	0~-5	1.44	33	7.9	-33	2.5	0.09	129	432	5.0
	-5~-10	1.95	30	6.9	-64	2.5	0.02	113	296	3.5
	-10~-20	1.92	31	6.7	-12	2.8	0.03	131	259	3.8
	-20~-30	1.90	26	4.1	-3	1.4	0.02	77	163	2.2

付表-3-4 底質調査結果 (No.1 測線)

9月 No. 4

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
覆砂層	40~43	2.20	13	0.6	+227	0.8	<0.01	80	76	1.4
	30~40	2.35	8	0.3	+263	0.6	<0.01	90	39	0.7
砂層	15~30	2.41	8	0.3	+250	0.8	<0.01	82	431	1.6
	5~15	2.39	7	1.5	+250	0.8	<0.01	96	131	0.8
	0~5	1.97	35	8.3	-125	2.3	0.18	143	495	5.7
原地盤層	0~-5	2.00	29	6.1	+121	2.0	0.03	104	351	3.9
	-5~-10	1.90	30	7.8	+202	2.4	0.03	99	334	3.4
	-10~-20	1.73	46	10.4	+100	3.4	0.08	92	342	3.4
	-20~-30	1.68	54	10.8	+102	4.2	0.04	91	306	3.8

付表-3-5 底質調査結果

9月 No. 6

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
覆砂層	39~42	2.18	10	0.9	+206	0.8	<0.01	72	74	0.7
	30~39	2.48	3	0.3	+265	0.6	<0.01	74	28	0.6
砂層	15~30	2.53	2	0.2	+249	0.6	<0.01	73	13	0.7
	5~15	2.51	3	0.2	+214	1.6	<0.01	84	23	1.1
	0~5	2.08	19	5.0	-130	1.5	0.19	133	313	6.4
原地盤層	0~-5	1.87	39	10.6	+181	3.1	0.10	158	610	6.2
	-5~-10	1.85	34	9.1	+83	2.5	0.05	147	459	4.6
	-10~-20	1.69	47	14.2	+28	3.5	0.02	103	395	5.0
	-20~-30	1.62	55	15.6	-34	5.0	0.01	110	389	5.2

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

付表-3-6 底質調査結果

9月 No. 7

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
覆砂層	36~39	2.54	6	0.2	+301	0.8	<0.01	75	36	1.5
	15~36	2.55	3	0.2	+273	0.7	<0.01	64	30	0.9
	5~15	2.50	3	0.2	+261	0.6	<0.01	100	21	0.7
	0~5	2.45	2	0.8	+242	1.0	<0.01	61	15	2.5
原地盤層	0~-5	1.88	30	10.7	-51	2.7	0.25	154	684	7.2
	-5~-10	1.85	34	11.2	+79	2.9	0.06	153	503	6.4
	-10~-20	1.80	28	9.1	-29	2.1	0.05	116	379	4.7
	-20~-30	1.64	60	16.3	+211	5.7	0.01	112	408	4.5

付表-3-7 底質調査結果

9月 No. 8

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
原地盤層	0~-5	1.50	82	18.1	+1	4.6	0.58	284	1052	10.7
	-5~-10	1.75	44	11.2	-29	2.9	0.21	156	611	4.5
	-10~-20	1.83	36	14.6	-27	2.5	0.08	100	433	4.2
	-20~-30	1.94	27	7.0	+49	2.5	0.04	99	279	1.8

付表-3-8 底質調査結果

4月 No. 9

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T-S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
原地盤層	0~-5	1.72	44	12.7	-34	3.2	0.33	179	658	7.9
	-5~-10	1.77	43	11.8	+29	3.2	0.21	167	586	5.9
	-10~-20	1.93	28	5.5	-12	1.8	0.08	85	287	2.1
	-20~-30	1.88	31	8.2	+122	2.2	0.06	109	342	2.7

付表-3-9 底質調査結果

9月 No. 10

項目 層(cm)	単位体積 重(g/cm ³)	含水比 (%)	COD (mg/g)	ORP (mV)	IL (%)	T/S (mg/g)	T-P (μg/g)	T-N (μg/g)	TOC (mg/g)	
原地盤層	0~-5	1.41	113	36.1	-209	7.8	3.62	369	1504	18.3

付表-4-1 底質分析結果

9月 No. 1

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
覆砂層	30~33	47	50		3	2.655
	25~30	63	35		2	2.657
	15~25	52	45		3	2.652
	5~15	27	71		2	2.660
	0~5	11	32	44	13	2.469
原地盤層	0~-5	7	51	21	21	2.638
	-5~-10	12	49	22	17	2.666
	-10~-20	4	23	32	41	2.691
	-20~-30	1	14	31	54	2.706

付表-4-2 底質分析結果

9月 No. 2

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
覆砂層	57~60	70	21		9	2.653
	30~57	54	46		0	2.656
	15~30	47	53		0	2.657
	5~15	91	9		0	2.656
	0~5	45	48		7	2.649
原地盤層	0~-5	15	69	6	10	2.651
	-5~-10	6	82	5	7	2.654
	-10~-20	7	55	29	9	2.663
	-20~-30	7	71	12	10	2.660

付表-4-3 底質分析結果

9月 No. 3

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
覆砂層	51~54	13	82		5	2.655
	30~51	83	17		0	2.654
	15~30	66	34		0	2.656
	5~15	74	24		2	2.659
	0~5	37	56		7	2.648
原地盤層	0~-5	17	75		8	2.643
	-5~-10	8	57	16	19	2.645
	-10~-20	11	54	20	15	2.648
	-20~-30	4	57	20	19	2.680

付表-4-4 底質分析結果

9月 No. 4

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
覆砂層	40~43	24	70		6	2.655
	30~40	53	44		3	2.654
	15~30	22	77		1	2.656
	5~15	52	46		2	2.659
	0~5	17	74		9	2.648
原地盤層	0~-5	8	58	14	20	2.643
	-5~-10	11	56	11	22	2.645
	-10~-20	0	44	41	15	2.648
	-20~-30	1	26	33	40	2.680

付表-4-5 底質分析結果

9月 No. 6

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
覆砂層	39~42	40	56		4	2.654
	30~39	60	33		7	2.652
	15~30	94	4		2	2.657
	5~15	84	13		3	2.655
	0~5	46	45		9	2.644
原地盤層	0~-5	0	64	14	22	2.621
	-5~-10	0	68	10	22	2.639
	-10~-20	25	46	19	10	2.655
	-20~-50	0	11	40	49	2.657

付表-4-6 底質分析結果

9月 No. 7

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
覆砂層	36~39	80	20		0	2.655
	15~36	86	12		2	2.653
	5~15	67	22		0	2.656
	0~5	71	26		3	2.651
	原地盤層	0~-5	34	42	8	16
-5~-10		20	56	10	14	2.567
-10~-20		13	62	8	17	2.577
-20~-30		1	9	41	49	2.505

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

付表-4-7 底質分析結果

9月 No. 8

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
原地盤層	0~-5	7	63	11	19	2.549
	-5~-10	5	61	17	17	2.572
	-10~-20	6	69	11	14	2.573
	-20~-30	8	71	6	15	2.515

付表-4-8 底質分析結果

9月 No. 9

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
原地盤層	0~-5	4	62	19	15	2.560
	-5~-10	3	72	7	18	2.530
	-10~-20	3	76	8	13	2.611
	-20~-30	3	79	6	12	2.602

付表-4-9 底質分析結果

9月 No. 10

項目 層(cm)		粒度組成(%)				比重
		礫分	砂分	シルト分	粘土分	
原地盤層	0~-5	2	29	56	13	2.470

付表-5 底質土粒子の50%中央粒径

昭和62年度 三河湾覆砂効果追跡調査

9月期調査 50%中央粒径

測点 No. 1

層 (cm)		中央粒径 (mm)
覆砂層	30~33	1.9
	25~30	2.8
	15~25	2.3
	5~15	0.70
	0~5	0.059
原地盤層	0~-5	0.18
	-5~-10	0.20
	-10~-20	0.0076
	-20~-30	0.0042

測点 No. 2

層 (cm)		中央粒径 (mm)
覆砂層	57~60	3.3
	30~57	2.6
	15~30	1.7
	5~15	7.7
	0~5	1.4
原地盤層	0~-5	0.29
	-5~-10	0.27
	-10~-20	0.098
	-20~-30	0.47

測点 No. 3

層 (cm)		中央粒径 (mm)
覆砂層	51~54	0.44
	30~51	4.7
	15~30	3.1
	5~15	5.0
	0~5	0.75
原地盤層	0~-5	0.45
	-5~-10	0.24
	-10~-20	0.28
	-20~-30	0.29

測点 No. 4

層 (cm)		中央粒径 (mm)
覆砂層	40~43	0.70
	30~40	2.4
	15~30	0.58
	5~15	2.2
	0~5	0.37
原地盤層	0~-5	0.23
	-5~-10	0.25
	-10~-20	0.070
	-20~-30	0.011

測点 No. 6

層 (cm)		中央粒径 (mm)
覆砂層	39~42	1.3
	30~39	3.0
	15~30	7.9
	5~15	4.6
	0~5	1.5
原地盤層	0~-5	0.24
	-5~-10	0.23
	-10~-20	0.33
	-20~-30	0.0053

測点 No. 7

層 (cm)		中央粒径 (mm)
覆砂層	36~39	4.6
	15~36	4.7
	5~15	3.3
	0~5	3.7
原地盤層	0~-5	0.66
	-5~-10	0.33
	-10~-20	0.31
	-20~-30	0.0051

測点 No. 8

層 (cm)		中央粒径 (mm)
原地盤層	0~-5	0.34
	-5~-10	0.28
	-10~-20	0.28
	-20~-30	0.31

測点 No. 9

層 (cm)		中央粒径 (mm)
原地盤層	0~-5	0.23
	-5~-10	0.31
	-10~-20	0.26
	-20~-30	0.25

測点 No. 10

層 (cm)		中央粒径 (mm)
原地盤層	0~-5	0.019

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

付表-6-1

(a) 五建測量による覆砂前、覆砂後のデータ

測定地点		水深 m	層厚 m	
測線 No. 1 (FILE NAME 138.3- 114-)	平均	4.322	0.584	
	標準偏差	0.149	0.097	
	最大	4.600	0.800	
	最小	4.100	0.400	
	平均	4.906		
	標準偏差	0.152		
	最大	5.200		
	最小	4.700		
測線 No. 2 (FILE NAME 86-)	平均	4.492	0.588	
	標準偏差	0.279	0.139	
	最大	4.600	0.900	
	最小	4.100	0.300	
	平均	5.014		
	標準偏差	0.221		
	最大	5.400		
	最小	4.600		

(b) 実証実験による測定結果

測定地点		水深 m	層厚 m	電圧 V	パルス幅 mS	200kHz 測深機による水深 m (補正值)	
FILE NAME 12- へドロ航行	平均	4.962		1.56	0.137	5.377 (5.003)	
	標準偏差	0.233		0.51	0.019	0.252	
	最大	5.434		2.96	0.192	5.878 (5.504)	
	最小	4.489		0.52	0.092	4.843 (4.469)	
FILE NAME 35.5- へドロ航行 一層目	平均	5.010	0.399	2.09	0.122	5.334 (4.960)	
	標準偏差	0.252	0.018	0.67	0.021	0.262	
	最大	5.513	0.424	5.00	0.172	5.825 (5.451)	
	最小	4.559	0.362	0.92	0.076	4.894 (4.520)	
	二層目	平均	5.157		0.94	0.129	
		標準偏差	0.156		0.29	0.024	
		最大	5.535		1.40	0.156	
		最小	5.029		0.40	0.088	
FILE NAME 61- B ブイ停船 三層まき 一層目	平均	4.390	0.332	0.69	0.133		
	標準偏差	0.097	0.042	0.55	0.018		
	最大	4.728	0.494	3.20	0.176		
	最小	4.231	0.276	0.12	0.088		

(補正值 = 水深 - 0.374m)

測定地点		水深 m	層厚 m	電圧 V	パルス幅 mS	200kHz 測深機による水深 m (補正值)			
二層目	平均	4.723	0.340	0.50	0.125				
	標準偏差	0.107	0.064	0.23	0.024				
	最大	4.955	0.420	1.20	0.184				
	最小	4.547	0.154	0.12	0.084				
三層目	平均	5.040	0.304	0.45	0.139				
	標準偏差	0.075	0.035	0.20	0.023				
	最大	5.194	0.380	1.24	0.184				
	最小	4.823	0.252	0.20	0.084				
四層目	平均	5.321		0.31	0.120				
	標準偏差	0.083		0.05	0.015				
	最大	5.483		0.44	0.140				
	最小	5.075		0.20	0.092				
FILE NAME 86— 測線 No. 2 航行 三層まき	一層目	平均	4.350	0.403	3.94	0.106	4.758 (4.384)		
		標準偏差	0.196	0.132	1.94	0.016	0.206		
		最大	4.937	0.660	8.96	0.140	5.575 (5.201)		
		最小	3.988	0.141	0.84	0.072	4.217 (3.843)		
	二層目	平均	4.775	0.214	2.96	0.101			
		標準偏差	0.242	0.065	1.20	0.023			
		最大	5.286	0.329	7.52	0.164			
		最小	4.381	0.095	0.96	0.056			
	三層目	平均	4.881		3.10	0.107			
		標準偏差	0.184		1.17	0.022			
		最大	5.222		6.92	0.168			
		最小	4.608		0.64	0.064			
	FILE NAME 114— 測線 No. 1 航行 二層まき	一層目	平均	4.311	0.394	2.20	0.126	4.694 (4.320)	
			標準偏差	0.153	0.069	1.40	0.023	0.158	
			最大	4.688	0.525	6.92	0.180	5.142 (4.768)	
			最小	3.982	0.214	0.24	0.056	4.311 (3.937)	
二層目		平均	4.683		1.81	0.117			
		標準偏差	0.132		0.89	0.035			
		最大	4.903		5.68	0.228			
		最小	4.476		0.52	0.048			
		FILE NAME 138.3— 測線 No. 1 航行 二層まき	一層目	平均	4.294	0.457	3.23	0.117	4.695 (4.321)
				標準偏差	0.177	0.067	1.60	0.018	0.139
最大	4.602			0.598	7.04	0.160	5.067 (4.693)		
最小	3.933			0.276	0.80	0.076	4.313 (3.939)		
二層目	平均		4.726		2.97	0.119			
	標準偏差		0.139		0.99	0.030			
	最大	5.022		5.24	0.196				
	最小	4.470		1.12	1.068				

(補正值 = 水深 - 0.374m)

覆砂工法における砂層探査装置に関する実験

測定地点		水深 m	層厚 m	電圧 V	パルス幅 mS	200kHz 測深機による水深 m (補正值)	
FILE NAME 164— 均し面A' 2ノット航行 二層まき	一層目	平均	4.370	0.439	2.82	0.106	4.732 (4.358)
		標準偏差	0.194	0.095	1.58	0.019	0.144
		最大	4.875	0.604	7.56	0.176	5.189 (4.815)
		最小	4.050	0.199	0.52	0.068	4.400 (4.026)
	二層目	平均	4.831		1.90	0.099	
		標準偏差	0.210		1.00	0.025	
		最大	5.157		8.80	0.192	
		最小	4.403		0.60	0.064	
FILE NAME 198— 均し面B' 2ノット航行 二層まき	一層目	平均	4.258	0.364	3.33	0.116	4.665 (4.291)
		標準偏差	0.110	0.092	1.88	0.020	0.082
		最大	4.596	0.546	7.80	0.164	4.858 (4.484)
		最小	4.044	0.181	0.64	0.076	4.466 (4.092)
	二層目	平均	4.596		1.78	0.110	
		標準偏差	0.092		1.09	0.023	
		最大	4.829		6.76	0.160	
		最小	4.430		0.48	0.064	
FILE NAME 217— 2ノット航行	一層目	平均	4.352	0.379	2.46	0.099	4.718 (4.344)
		標準偏差	0.221	0.139	1.55	0.016	0.201
		最大	4.823	0.779	7.04	0.148	5.273 (4.899)
		最小	3.857	0.110	0.48	0.068	4.216 (3.842)
	二層目	平均	4.713		2.18	0.090	
		標準偏差	0.211		1.14	0.020	
		最大	5.225		7.36	0.148	
		最小	4.329		0.48	0.056	
FILE NAME 258— 4ノット航行	一層目	平均	4.440	0.412	2.81	0.118	4.781 (4.407)
		標準偏差	0.152	0.084	1.92	0.023	0.204
		最大	4.768	0.561	8.60	0.184	5.294 (4.920)
		最小	4.182	0.111	0.76	0.068	4.301 (3.927)
	二層目	平均	4.841		2.41	0.111	
		標準偏差	0.160		1.21	0.028	
		最大	5.160		7.96	0.188	
		最小	4.535		0.72	0.064	
FILE NAME 288— 6ノット航行	一層目	平均	4.486	0.387	2.72	0.110	4.822 (4.448)
		標準偏差	0.147	0.107	1.49	0.020	0.196
		最大	4.771	0.586	8.32	0.168	5.221 (4.847)
		最小	4.237	0.135	0.56	0.060	4.288 (3.914)
	二層目	平均	4.880		2.14	0.114	
		標準偏差	0.198		1.06	0.027	
		最大	5.200		5.56	0.192	
		最小	4.510		0.84	0.072	

200kHz 測深機と誘導型測深機の水深差の平均 0.374m

(補正值 = 水深 - 0.374m)