

# 海底地層の自動認識に関する研究 (その 2)

—水槽実験による海底地層の音波伝播特性—

松石 秀之

原田 曉  
(本社海洋開発室)

古賀 真綱  
(本社海洋開発室)

梅谷 陽二  
(東京工業大学)

## Automatic Facies Recognition of Bottom Sediments (Part 2) —Water Tank Experimental of Acoustic Propagation Characteristics in Sea Bottom—

Hideyuki Matsuishi  
Masatsuna Koga

Akira Harada  
Yoji Umetani

### Abstract

Water tank experiments were carried out for the purpose of preparing a reflection model for distinguishing undersea Alluvium based on acoustics. Grinding powder was used to simulate various Alluvium samples.

In these experiments, the values of parameters for damping ratio, frequency, velocity, particle diameter of sample and water content in per cent of total weight of sample were measured. By means of frequency analysis, it was found that reflection waves depended on particle diameters of samples. It was ascertained that the various parameters and the mutual relationships among parameters can be estimated through water tank experiments.

### 概要

海底沖積層内の音波伝播特性を把握して、音響学的に海底沖積層を識別するための反射モデルを作成する目的で、実験室規模の水槽実験を行った。海底沖積層の各層相は研磨材を使用して模式化した。この実験により、減衰率、周波数、粒径、含水率、速度等に関するパラメータの値、及びそれら相互の関係を求めた結果、減衰定数の粒径、周波数、含水率等への依存度を把握し得た。また、粒径の異なる試料に対する受信音波を周波数解析し、受信波の立上り、立下りの過度状態が粒径に依存して変化することを明らかにした。これら一連の実験により、実際の海底沖積層中の各パラメータの値、及びそれらの関係は、水槽実験により十分推測できることが判った。

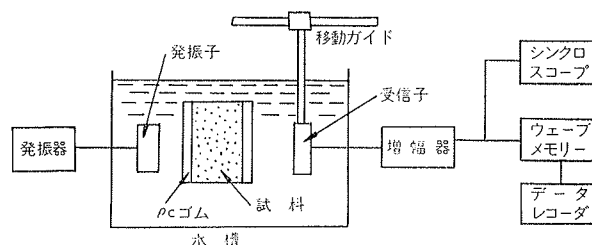
## 1. 序

海底沖積層に対して音響学的な考えを導入し、各地層内の音波伝播をモデル化して反射モデル図形を作成し、更にこれらの反射モデル図形を用いて海底沖積層を識別するためのシステムを考案した。このシステムにおいては、海中及び沖積層中の音波伝播性、特に減衰率、周波数、粒径、含水率、速度等に関するパラメータの値、及びそれら相互の関係を十分把握することがモデル作成のために必要である。このため、実験室規模の水槽実験を行い、これら音響パラメータの関係を求めた。

## 2. 実験装置

反射モデル作成に対して特に重要な因子として減衰率が考えられる。そこで減衰の現象が粒径、発振周波数、含水率等のパラメータにどの様に依存するかを

粒径の整った単一成分である研磨材（カーボランダム）を試料として実験を行った。また実験に用いた周波数は、100kHz、200kHz、300kHz、400kHz、500kHzの5種類の周波数を用いた。発振波形はパルス波を用い、パルス幅は可変とした。測定に用いた装置のブロック図を図一1に示す。



図一1 測定装置ブロック図

海底沖積層を工学的に構成粒径の立場から分類すると、JISA 1204において下記の5種に分類される。

- コロイド状……………0.001mm 以下
- 粘土……………0.001~0.005mm
- シルト……………0.005~0.075mm
- 砂(細)……………0.075~0.420mm
- 砂(粗)……………0.420~2.000mm
- 礫……………2.000mm

本実験においては、以上の分類を1つの目安として、それぞれの地質が各種成分の混合物でなく、構成粒子の大きさがある程度均一であると理想化して実施した。実験に使用した5種の研磨材の粒子径を表一1に示す。

種類	#280	#500	#1000	#3000	#8000
平均粒子径 (mm)	0.067	0.034	0.016	0.005	0.001

表一1 研磨材の平均粒子径

### 3. 測定原理

(1) 減衰定数の測定 実在の音場では音源の大きさが有限であるため、音波は広がりながら伝播する球面波となり、一般に受信点における音圧は  $\Phi = \frac{\Phi_0 l^{-\alpha x}}{x}$  で表わされる。ここで  $-l^{-\alpha x}$  は吸収減衰を表わし、元来平面波の吸収減衰の表現であるが、遠方では波面の曲率半径が、波長に比し十分大きいので、平面波の吸収減衰と考えて差支えない。

発振子から発振される音波は、水中  $\rightarrow \rho_c$  ゴム  $\rightarrow$  試料  $\rightarrow \rho_c$  ゴム  $\rightarrow$  水中と減衰を行いながら伝播し、受信子で受信される。

試料の長さ  $l$ 、 $\rho_c$  ゴムの厚さ  $l_{\rho c}$ 、発振子、試料間の水中距離  $l_1$ 、試料、受信子間の水中距離を  $l_2$  とすると、受信点における音圧  $\Phi$  は次式で表現できる。

$$\Phi = \Phi_0 \exp \{-\alpha_w (l_1 + l_2)\} \exp \{-2\alpha_{\rho c} l_{\rho c}\} \exp \{-\alpha l\} \cdot T_1 T_2 T_3 T_4 \quad \dots\dots(1)$$

但し、 $\alpha_w$  水の減衰定数

$\alpha_{\rho c}$   $\rho_c$  ゴムの減衰定数

$\alpha$  試料の減衰定数

$T_1$  水  $\rightarrow \rho_c$  ゴムの透過率

$T_2$   $\rho_c$  ゴム  $\rightarrow$  試料への透過率

$T_3$  試料  $\rightarrow \rho_c$  ゴムへの透過率

$T_4$   $\rho_c$  ゴム  $\rightarrow$  水への透過率

$T_1, T_4 = 1$

試料の長さ  $l$  を、 $l_{(3)} = 3 \text{ cm}$ 、 $l_{(5)} = 5 \text{ cm}$  とし、その時の受信音圧を  $\Phi_{(3)}$ 、 $\Phi_{(5)}$  とすると (但し、 $l_1 + l_2$  は一定)、

$$\Phi_{(3)} = \Phi_0 \exp \{-\alpha_w (l_1 + l_2)\} \exp \{-2\alpha_{\rho c} l_{\rho c}\} \exp \{-\alpha l_{(3)}\} T_2 \cdot T_3 \quad \dots\dots(2)$$

$$\Phi_{(5)} = \Phi \exp \{-\alpha_w (l_1 + l_2)\} \exp \{-2\alpha_{\rho c} l_{\rho c}\} \exp \{-\alpha l_{(5)}\} T_2 \cdot T_3 \quad \dots\dots(3)$$

(2), (3)式より

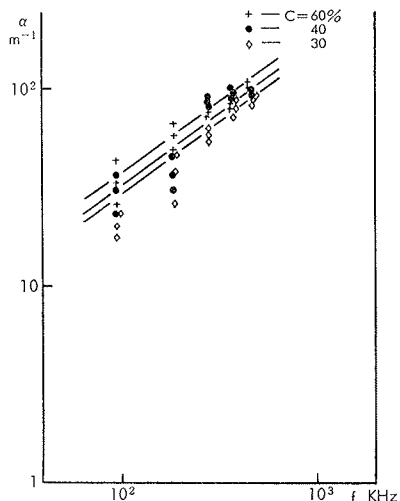
$$\frac{\Phi_{(3)}}{\Phi_{(5)}} = \exp \{-\alpha (l_{(3)} - l_{(5)})\}$$

$$\ln \frac{\Phi_{(3)}}{\Phi_{(5)}} = \alpha (l_{(5)} - l_{(3)})$$

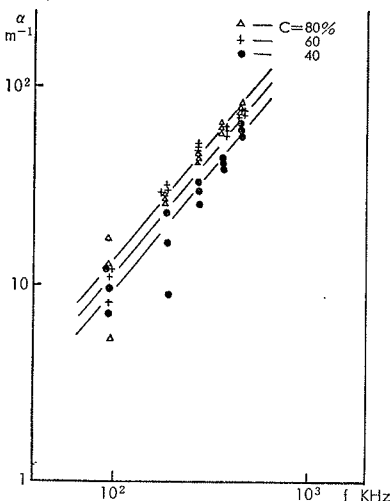
$$\therefore \frac{1}{l_{(5)} - l_{(3)}} \ln \frac{\Phi_{(3)}}{\Phi_{(5)}} = \frac{1}{0.02} \ln \frac{\Phi_{(3)}}{\Phi_{(5)}} \text{ (1/m)} \quad \dots\dots(4)$$

となり、(4)式より試料の減衰定数のを求めることができる。

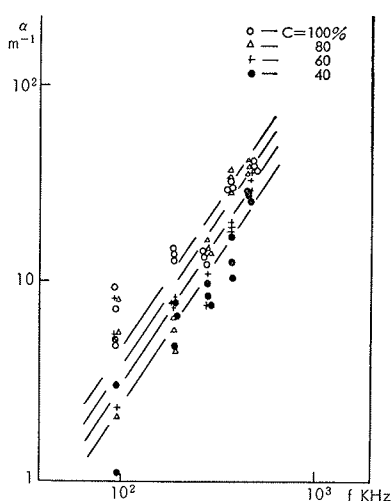
(2) 音速の測定 水中の距離  $l_1 + l_2$  を常に一定に保ち、試料 (試料長さ  $l_{(5)} = 5 \text{ cm}$ ) を入れた場合の発振、受信間距離  $L = l_1 + l_{(5)} + l_2$  と入れない場合の距離  $L' = l_1 + l_2$  における測定点から  $l$  の距離の差を発振子に加えるパルス電圧の高上りから、受信波形の立上りまでの時間を測定することにより、距離  $l_{(5)}$  に相当す



図一2 減衰定数  $\alpha$ -周波数  $f$  (#280)



図一3 減衰定数  $\alpha$ -周波数  $f$  (#1000)



図一4 減衰定数  $\alpha$ -周波数  $f$  (#8000)

る時間差  $\Delta t$  をシンクロスコープで読取り、次式において試料中を伝播する音速を求めた。

$$V = \frac{0.05}{\Delta t} \text{ (m/sec)}$$

なお、水振中における音速も同様の方法で求めた。

#### 4. 測定結果

(1) 減衰定数 $\alpha$ -発振周波数  $f$  ; それぞれの粒子径  $d$  及び含水率  $c$  に対する減衰定数  $\alpha$  と発振周波数  $f$  の関係を求めた。図-2 ~ 図-4 に #280, #1000, #8000 の場合を示す。

実験結果より、減衰定数と発振周波数  $f$  との関係は次式で表わすことができる。

$$\alpha = k_f \cdot f^{n_f}, \quad \alpha : [1/m], \quad f : [\text{kHz}]$$

上式における  $k_f, n_f$  の値を、各粒子径、含水率について表-2 に示す。

	# 280		# 500		# 1000		# 3000		# 8000	
	$k_f$	$n_f$	$k_f$	$n_f$	$k_f$	$n_f$	$k_f$	$n_f$	$k_f$	$n_f$
C=100%							$1.4 \times 10^{-2}$	1.38	$4.4 \times 10^{-3}$	1.50
80%			$7.9 \times 10^{-1}$	0.79	$5.6 \times 10^{-2}$	1.17	$1.1 \times 10^{-2}$	1.38	$3.5 \times 10^{-3}$	1.50
60%	1.3	0.72	$6.6 \times 10^{-1}$	0.79	$4.7 \times 10^{-2}$	1.17	$8.7 \times 10^{-3}$	1.38	$2.7 \times 10^{-3}$	1.50
40%	1.1	0.72	$5.6 \times 10^{-1}$	0.79	$3.9 \times 10^{-2}$	1.17	$6.9 \times 10^{-3}$	1.38	$2.1 \times 10^{-3}$	1.50
30%	1.0	0.72								

表-2  $k_f, n_f$  の値

$k_d, n_d$  の値を表-3 に示す。

$k_c, n_c$  の値を表-4 に示す。

	100 KHz		200 KHz		300 KHz		400 KHz		500 KHz	
	$k_d$	$n_d$	$k_d$	$n_d$	$k_d$	$n_d$	$k_d$	$n_d$	$k_d$	$n_d$
C = 80%	33139	0.73	13182	0.55	3396	0.39	1378	0.28	1622	0.28
60	12835	0.64	6537	0.50	4348	0.43	2815	0.36	2489	0.32
40	8786	0.64	5994	0.52	5783	0.49	7478	0.48	3955	0.38

表-3  $k_d, n_d$  の値

	# 280		# 500		# 1000		# 3000		# 8000	
	$k_c$	$n_c$	$k_c$	$n_c$	$k_c$	$n_c$	$k_c$	$n_c$	$k_c$	$n_c$
100 KHz	6.52	0.33	2.78	0.50	0.84	0.51	0.16	0.80	0.13	0.72
200	9.98	0.33	6.03	0.50	2.66	0.51	0.51	0.80	0.38	0.72
300	20.27	0.33	7.08	0.50	4.87	0.51	0.83	0.80	0.53	0.72
400	23.84	0.33	8.89	0.50	6.50	0.51	1.29	0.80	1.08	0.72
500	26.65	0.33	11.61	0.50	8.63	0.51	1.77	0.80	1.67	0.72

表-4  $k_c, n_c$  の値

(2) 減衰定数 $\alpha$ -粒子径  $d$  ; 含水率  $c=80\%, 60\%, 40\%$  の場合の測定結果を図-5 ~ 図-7 に示す。

$\alpha$  と  $d$  の関係は直線で近似でき、実験式としては次の形となる。

$$\alpha = k_d \cdot d^{n_d}, \quad \alpha : [1/m], \quad d : [m]$$

(3) 減衰定数 $\alpha$ -含水率  $c$  ; #280, #1000, #8000 の場合の結果を図-8 ~ 図-10 に示す。

$\alpha$  と  $c$  は両対数軸上で直線にて近似でき、次の実験式で表わすことができる。

$$\alpha = k_c C^{n_c}, \quad \alpha : [1/m], \quad C : [\%]$$

(4) 音速  $V$ -発振周波数  $f$  ;  $V$  と  $f$  との関係を図-

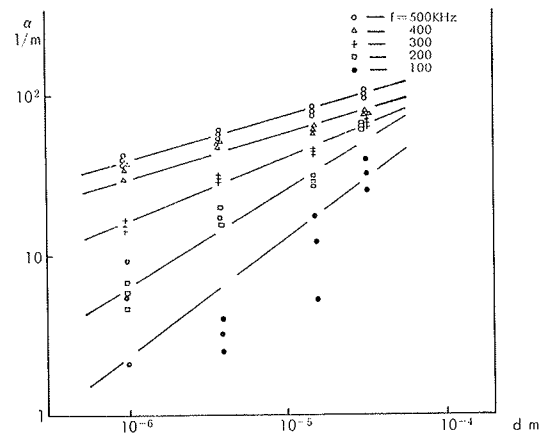


図-5 減衰定数 $\alpha$ -粒子径  $d$  (C=80%)

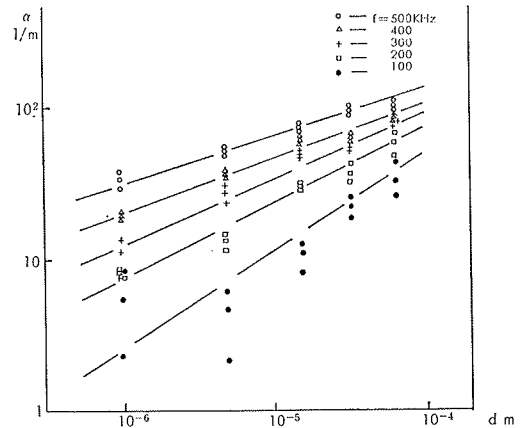


図-6 減衰定数 $\alpha$ -粒子径  $d$  (C=60%)

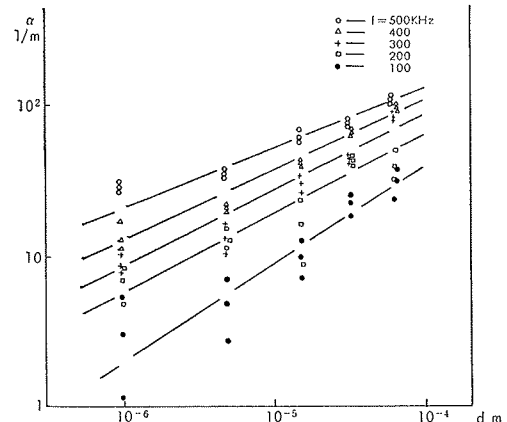


図-7 減衰定数 $\alpha$ -粒子径  $d$  (C=40%)

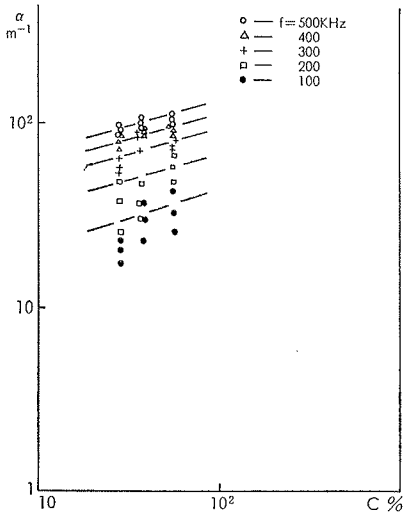


図-8 減衰定数 $\alpha$ -含水率C (#280)

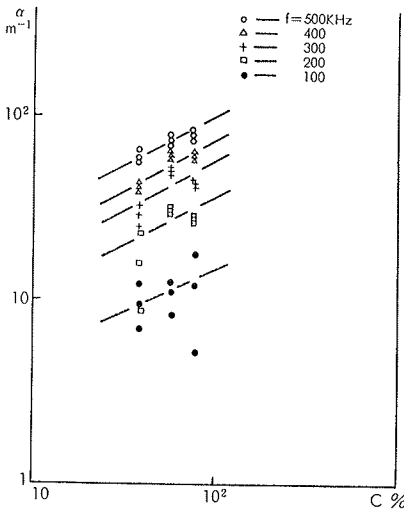


図-9 減衰定数 $\alpha$ -含水率C (#1000)

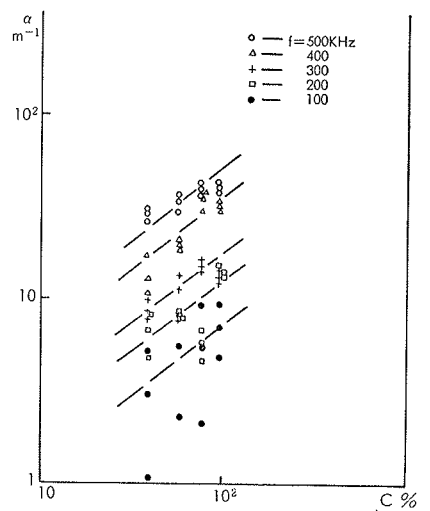


図-10 減衰定数 $\alpha$ -含水率C (#8000)

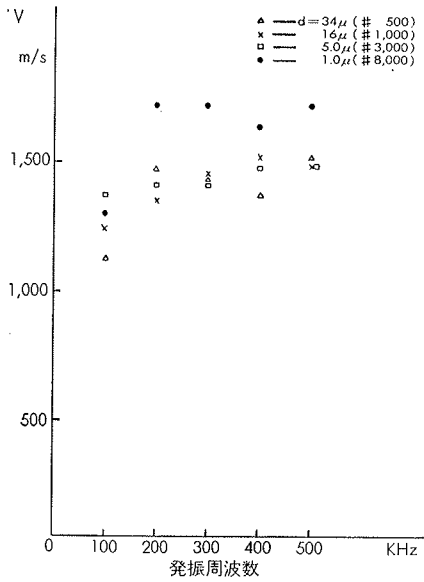


図-11 試料中の Speed V (含水率C=80%)

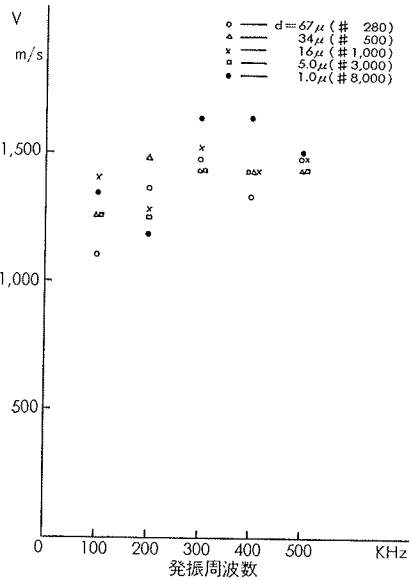


図-12 試料中の Speed V (含水率C=60%)

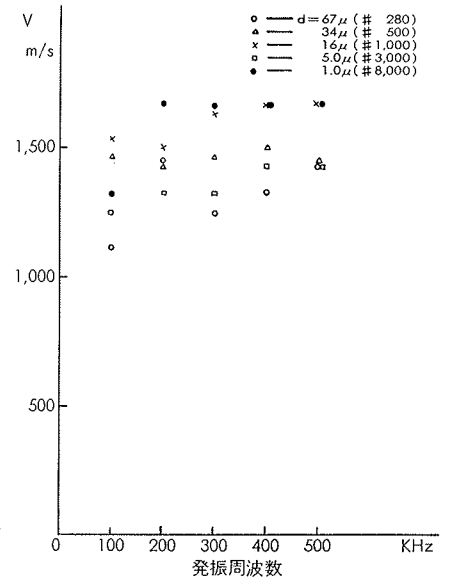


図-13 試料中の Speed V (含水率C=40%)

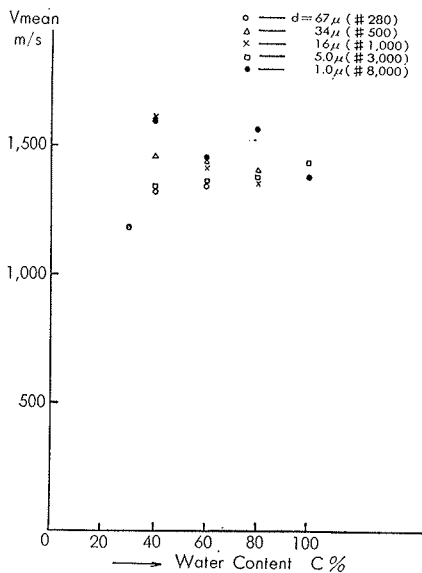


図-14  $V_{mean}$  と含水率の関係

11~図-13に示す。音速は周波数が高く、粒子径が大きくなる程増す傾向があるが、測定精度の点から考えるとやや信頼性に欠ける。

(5) 音速V-含水率c ; Vとcとの関係を図-14に示す。含水率cによる有意な傾向は認められない。

## 5. 考察

一般に液体と微粒子の集合体の様な物質中を音波が伝播して行く際の減衰の原因は、大きく分けて媒質自身の減衰、試料自身の内部摩擦による減衰、及び散乱による減衰が考えられる。具体的これらの減衰の原因として、次の様なものが考えられる。

- 1) 媒質自体の減衰： $\alpha_w$
- 2) 粒子自体の内部損失によるもの： $\alpha_k$
- 3) 粒子と媒質とが同位相で振動しないため、粒子

と媒質の境界におけるずり粘性によるもの： $\alpha_v$

4) 粒子近傍での乱流性摩擦によるもの： $\alpha_t$

5) 粒子相互の接触部分のすべりや粘性流動によるもの： $\alpha_p$

6) 粒子の散乱によるもの： $\alpha_s$

従って、本実験において得られた減衰はこれらの和によるものと解釈される。

$$\alpha = \alpha_w + (\alpha_k + \alpha_v + \alpha_t + \alpha_p) + \alpha_s$$

(1) 減衰定数  $\alpha$  と周波数  $f$  ; 周波数が高くなると減衰が大きくなる原因としては散乱によるものが支配的と思われる。特に Rayleigh 領域では散乱による減衰が  $\alpha_s \propto d^3 f^4$  で表わされ  $\alpha_s$  は  $f^4$  に比例して増大する。高周波では低周波に比べて粒子が媒質と同位相で振動しにくくなり、粒子と媒質との相対速度が増すことによる粒子境界面でのずり粘性による減衰が考えられ、又、これら一般に粘性による減衰は  $f^2$  に比例することが確認されている。

(2) 減衰定数  $\alpha$  と粒子径  $d$  ; 粒子径が大きくなると、粒子の慣性が増加し、媒質と同位相で振動しなくなり、相対速度が増し、ずり粘性による減衰が大きくなる。更に散乱による減衰  $\alpha_s$  は  $d^3$  に比例して大きくなり、これら2要因が粒子径の大きい場合に最も影響を及ぼすものと思われる。これと反対に、粒子径が小さい場合は上記の減衰要因による影響がうすれ、前述した6つの減衰要因が平均して、わずかに減衰に対して影響を及ぼすのではないかと考えられる。

(3) 減衰定数  $\alpha$  と含水率  $C$  ; 含水率が高くなると、試料の単位体積あたりの粒子個数が減ることにより、媒質中を伝播する距離が増す。このことから含水率  $C$  が高くなると減衰が大きくなる要因としては、媒質の減衰 ( $\alpha_w$ ) がある程度大きく、また、粒子と媒質の乱流性摩擦 ( $\alpha_t$ ) や、ずり粘性 ( $\alpha_v$ ) による減衰が増すためであろう。逆に含水率  $c$  が低い場合には粒子自体の減衰 ( $\alpha_k$ )、粒子相互の接触による減衰 ( $\alpha_p$ ) が支配的となるが、減衰が小さいことから、これらの要因による減衰のレベルは小さいと考えられる。

### 6. 実際の海底地層における音波伝播への適用

次元解析の立場から、音波伝播において特に重要な定数である減衰定数に関して、これに顕著に影響を及ぼす物理量として、層の密度  $\rho$ 、粒子径  $d$ 、周波数  $f$ 、波長  $\lambda$ 、音速  $V$ 、含水率  $C$ 、弾性率  $M$  を与えると、これらの現象は基本方程式として、

$$\phi(\alpha, \rho, d, M, V, \lambda, f, c) = 0 \quad \dots\dots(1)$$

が考えられ、次元マトリクスは

$$L \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots(2)$$

このマトリクスは rank=3、従って無次元積の数としては5個になり、

$$\phi\left(\alpha\lambda, \frac{\alpha}{\lambda}, c, \frac{V^2}{M/S}, \frac{V}{f\lambda}\right) = 0 \quad \dots\dots(3)$$

なる式が得られる。

そこで式(3)の関係を考慮し無次元項  $d\lambda, d/\lambda$  について含水率  $C$  をパラメータとして表わすと、図-15~図-17が得られる。ここで  $d\lambda$  は1波長当りの減衰量、 $d/\lambda$  は波長と粒径の比、即ち、1波長当りの粒子の数の逆数となる。図-15~図-17において、それぞれの含水率  $C$  における  $d\lambda, d/\lambda$  の関係はほぼ直線で近似可能であり、次式で表わすことができる。

$$d\lambda = k(d/\lambda)^n \quad \dots\dots(4)$$

$k, n$  の値を表-5に示す。

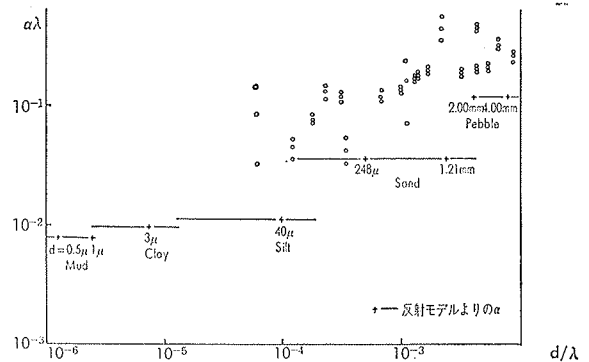


図-15 減衰定数の無次元表示 含水率  $C = 80\%$

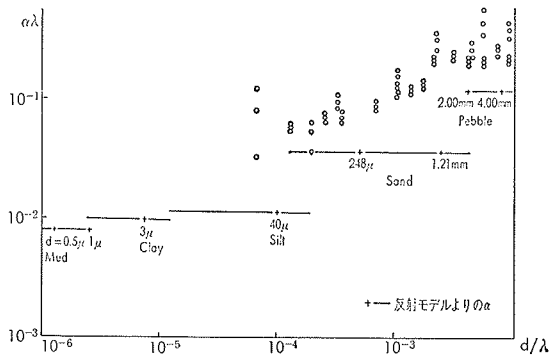


図-16 減衰定数の無次元表示 含水率  $C = 60\%$

	$C = 40\%$	$60\%$	$80\%$
$n$	0.43 (0.43~0.54)	0.43 (0.40~0.56)	0.43 (0.43~0.54)
$k$	1.7 (0.95~3.5)	2.2 (1.8~5.1)	2.9 (2.1~5.9)

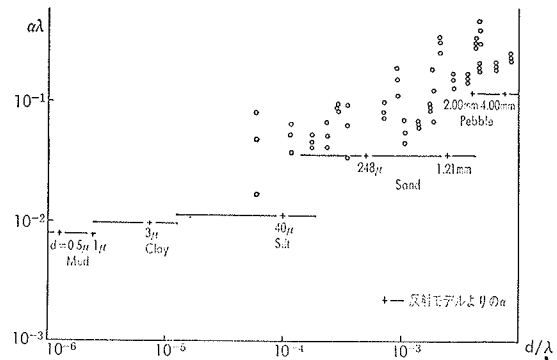
( ) 中の数値は、取り得る可能な値であり、上部の数値は最も妥当であると思われる値である。

表-5  $k, n$  の値

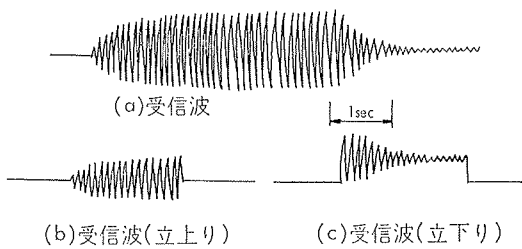
図-15~図-17における+印は、先の研究において反射モデル図形作成の際に用いた数値を無次元化した

表示したものである (実際の探査に用いた周波数は約 3.8kHzとして計算した)。—+—印は、海底沖積層の5種の地層が取り得る粒子径dの範囲を示す。

なお、反射モデル図形作成に用いた値は含水率Cが不明であるが、一般に粒子径Cが小さい程、含水率Cが高い値をとることが想定される。そこで含水率C=60%, 80%の場合の実験式からへドロ、粘土の減衰定数を求めてみると、反射モデル図形作成に用いた値とほぼ一致する。砂、礫に関しては、実際の含水率Cが30~40%程度であるため、本実験結果の方が高い値を示していることは妥当と思われる。



図一17 減衰定数の無次元表示 含水率C=40%



図一18 受信波形

従って、立上りの波形を  $\varphi_A(t)$ , 立下りの波形を,  $\varphi_B(t)$ , 振幅をAとすると  $\varphi_A(t)$ ,  $\varphi_B(t)$  は次式で示される。

$$\varphi_A(t) = A_0 e^{j(\omega t + \phi)} (1 - e^{-\frac{T}{T_A} t}) \quad \dots\dots(1)$$

$$\varphi_B(t) = A_0 e^{j(\omega t + \phi)} e^{-\frac{1}{T_B}(t - t_e)} \quad \dots\dots(2)$$

但し、 $T_A$ ,  $T_B$  は定時数、 $t_e$  は定常状態の後端までの時間である。各資料に対する  $T_A$ ,  $T_B$  の値を表一6に示す。

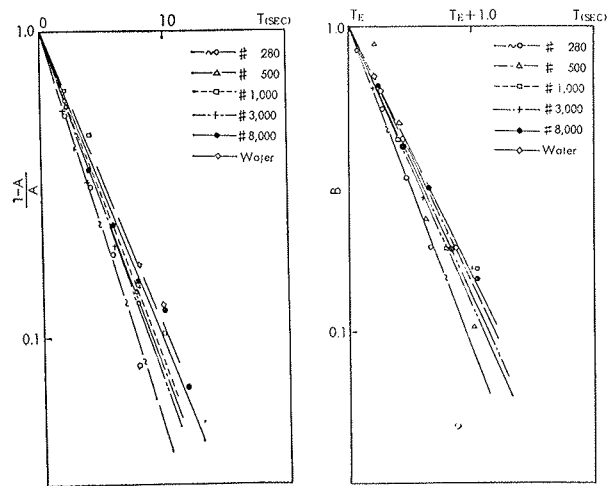
	#280	#500	#1000	#3000	#8000	WATER
$T_A$	0.337	0.388	0.410	0.400	0.435	0.444
$T_B$	0.402	0.472	0.493	0.493	0.532	0.513

表一6 時定数

発振子から、アンプまでの一連の系を1つの Black Box と考えると、このシステムにおける応答は、一次遅れ要素で近似可能である。この場合の時定数  $T_A$ ,  $T_B$  は表一6から明らかなように試料の影響を受け、粒子径が大きくなる程小さくなる傾向がある。従ってこの違いを特徴としてとらえることは、識別を行う上で、何らかの役割を果すであろう。

### 7. 受信器の過渡状態の解析

周波数解析に用いた受信波について立上り、立下りの過渡状態の解析を行った。図一18の受信波形において定常状態の振幅をIとし、各時間tに対する振幅比



図一19 受信波の解析(立上り) 図一20 受信波の解析(立下り)

を対数グラフに表わすと直線で近似できる (図一20, 図一21)。

### 8. 結論

- (1) 実際の海底地層中の音波伝幅に関する各パラメータの値、及びそれらの関係が、水槽実験により推測できる可能性を見出した。
- (2) 反射モデル図形作成、及び海底地層中の音波伝播に最も影響を及ぼすと考えられる減衰定数が粒子径、周波数、含水率等に如何に依存しているかを把握した。
- (3) 識別を行うための特徴抽出として、粒子径の異なる試料に対する受信波を周波数解析した結果、周波数分布の差異はあまり顕著に現われなかった。しかし受信波の立上り、立下りの過渡状態が粒子に依存して異なることが判明し、これを特徴としてとらえることができた。

### 9. 謝辞

この研究を発表するに当たり、精力的に実験を推めて頂き、積極的に御指導頂いた、東京工業大学機械物理工学科の森山助手に深謝致します。