

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

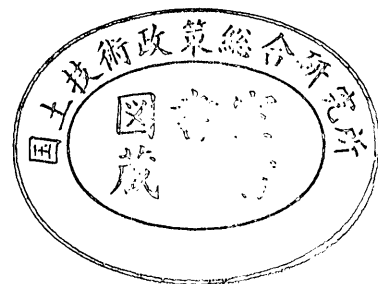
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 11

NO. 2

JUNE 1972

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第11巻 第2号 (Vol. 11, No. 2), 1972年6月 (June 1972)

目 次 (CONTENTS)

1. 直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究
..... 合田良実・福森利夫..... 3
(Laboratory Investigation of Wave Pressures Exerted upon Vertical and Composite WallsYoshimi GODA and Toshio FUKUMORI)
2. 不規則な海の波の屈折および回折の計算永井康平..... 47
(Computation of Refraction and Diffraction of Irregular SeaKohei NAGAI)
3. 横波を受ける船舶の繋船岸への衝突力に関する実験
..... 伊藤喜行・木原 力・久保正則・山本庄一.....121
(A Model Experiment on the Impact Force upon a Wharf Due to a Moored Ship Subjected to the Beam Sea
.....Yoshiyuki ITO, Tsutomu KIHARA, Masanori KUBO and Shoichi YAMAMOTO)
4. 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用伊藤喜行・千葉 繁.....137
(An Approximate Theory of Floating Breakwaters
.....Yoshiyuki ITO and Shigeru CHIBA)
5. 来島海峡潮流模型実験 (第2報)
..... 木村久雄・宮原英治・須藤 茂・柴山輝彦・浜田徳一.....167
(A Model Experiment on a Tidal Current at the Kurushima Strait (2nd Report)
.....Hisao KIMURA, Hideharu MIYAHARA, Shigeru SUDO, Akihiko SHIBAYAMA and Tokuichi HAMADA)
6. 粘土の非排水せん断強度と変形係数
..... 中瀬明男・小林正樹・兼近明男.....243
(Undrained Shear Strength and Secant Modulus of Clays
..... Akio NAKASE, Masaki KOBAYASHI and Akio KANECHIKA)
7. 沈埋トンネルの野外模型振動実験 …青木義典・土田 隆・林 聡.....261
(Out-Door Dynamic Model Test of Trench Type Tunnel
..... Yoshinori AOKI, Hazime TSUCHIDA and Satoshi HAYASHI)
8. 懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性木原純孝.....309
(Effect of Behavior of Settling Suspension Particles on Reflection and Absorption Characteristics of Ultrasonic WavesSumitaka KIHARA)
9. 平板による土の掘削抵抗について石塚浩次.....329
(A Study on Excavation Forces by a Plane BladeKoji ISHIZUKA)

8. 懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性

木 原 純 孝*

要 旨

懸濁液層の垂直濃度分布を超音波を用いて観測する装置を開発するためには、超音波周波数と懸濁粒子の粒径や懸濁液比重との関連性、水中の懸濁微粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性について究明し、かつ懸濁液層探知に適した周波数の選定をしなければならない。このような事から、7周波方式の超音波探知機を、懸濁液としてフライアッシュ懸濁液を用いて室内実験を行った。

実験結果および解析から、清水とフライアッシュの懸濁液の容積混合率が0.1~0.01%の範囲で、超音波周波数 f (kHz) と懸濁液の吸収係数 α (dB/m) との間に次のような実験式が得られた。

$$\alpha = K \cdot f^{0.5}$$

ここに K : 定数

また容積混合率が0.2%以上で比較的粒子径の大きな懸濁液の場合には、周波数 f が500~1000 kHzでほぼ f^4 に比例することがわかった。また懸濁液層の探知記録から、比較的高い周波数を用いた方が探知しやすこともわかった。

* 機材部 流体輸送研究室

8. Effect of Behavior of Settling Suspension Particles on Reflection and Absorption Characteristics of Ultrasonic Waves

Sumitaka KIHARA*

Synopsis

For the development of echo-sounder which detects efficiently the vertical density distribution of suspension layers, it is necessary for us to study into the relationships of ultrasonic frequency and acoustic characteristics to the grain size of suspension particles, suspension specific gravity and the behavior of settling suspension particles and to select the frequency suited to detection of suspension layers.

So we studied in the laboratory on the acoustic characteristics of the 7 frequencies echo-sounder in the fly-ash suspension.

Through the analysis of this experimental results, within the limits of the suspension concentration in volume (0.1~0.01%), the absorption coefficient of suspension α (dB/m) were expressed as follows;

$$\alpha = K \cdot f^{0.5}$$

where f : frequency.

The other side, in the case of the suspension which have comparatively large particles and thick density, we found out that the absorption coefficient of suspension increases in proportion to the f^4 within the limits of five hundred to a thousand kilohertz, and that the echo-sounder which used comparatively high frequency may be possible to detect efficiently it from the detective records.

* Members of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division.

目 次

要 旨	309
1. ま え が き	313
2. 懸濁液垂直濃度分布の測定方法	313
3. 実験装置および実験概要	313
3.1 実験装置および計測機器	313
3.2 実験概要	314
4. 実験結果および考察	315
4.1 懸濁微粒子の沈降挙動	315
4.2 懸濁液中の超音波の反射吸収特性	322
4.3 伝送損失および吸収損失	322
4.4 懸濁液層の探知記録	325
5. 結 論	328
6. あとがき	328
参考文献	328
記号表	328

1. ま え が き

海底附近に浮遊している泥粒子の垂直濃度分布や沈降挙動およびその厚さを調査することは、軟弱な海底地盤の浚渫や水中構造物設置のための港湾工事の設計、施工に必要なことである。

先に筆者等は、軟泥層の海底模型としてフライアッシュ懸濁液の沈積層を用いて室内実験を行い、沈積層の見掛比重が1.5のときの7周波超音波による反射および吸収特性について実験を行ない、これらのデータを用いて総合伝送損失を求めて、超音波を用いた場合の探知可能距離と泥層探知可能厚さを図式計算法により求めうることを提案した^{1, 2)}。

なお、前回の実験は土粒子が水底に完全に沈澱した状態で行なったものであるが、今回の実験は土粒子が水中を浮遊沈降しつつある過渡状態で実験を行ない、懸濁液濃度と超音波の反射吸収特性について究明した。

2. 懸濁液垂直濃度分布の測定方法

この実験を行なう際に問題になるのは、懸濁液の垂直濃度分布や沈降特性を調べる方法である。

一般に懸濁液中の固体粒子の沈降特性を求めるには、次の様な方法がある。

(1) 沈降速度を界面の移動から求め、界面沈降曲線から考察する。

(2) 各深度毎の懸濁液の垂直濃度分布を各時刻毎に測定して経時的濃度変化を求める。

(1)の方法では供試タンクが比較的小さく、水槽壁が透明で、肉眼で観察できる装置でなければならない。

(2)の方法は今回行なった実験で使用した比較的大きな水槽に用いられる方法であって濃度測定法から次のように分けることができる。

(イ) 光学式や放射線式等の水中濃度測定器の Sensor 部を水中に入れて懸濁液濃度を測定する方法。

(ロ) 採水器で各深度毎の懸濁液を採取して濃度を分析する方法。

(イ)の方法は各深度毎の懸濁液濃度を連続的に求め得る利点があるが実用上種々の難点がある。(ロ)の方法は断続的ではあるが確実な方法であり、本実験ではこの方法を用いることにした。

3. 実験装置および実験概要

3.1 実験装置および計測機器

(1) 超音波探査機^{1, 2, 3)}

a) 送信周波数 11.5, 24, 40, 100, 500, 1000 kHz
7段切換

b) 送信出力 最大 $1kW_{p-p}$ (100 Ω 抵抗負荷) 零から最大値まで連続可変

c) 受信部増幅度 150 dB 以上

d) 送受波器指向角 (半減半角) $1^{\circ} \sim 6^{\circ}$

(2) 測深実験水槽

a) 水槽寸法 高さ 10.5 m, 内径 2.4 m

b) 材 質 鋼板製 (内壁に松の吸音材付設)

c) 攪拌装置 150 mm サンドポンプ

d) 媒 質 清水 (水道水)

(3) 濁 度 計

体積濃度 1% 以下の懸濁液密度を測定するのに、秤を用いた方法では測定できないので、液の濁度で懸濁液の密度を求めるため濁度計をこの実験に使用することにし

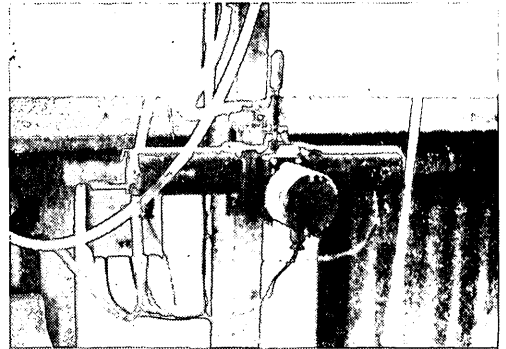


写真-1 濁度計検出部の外観

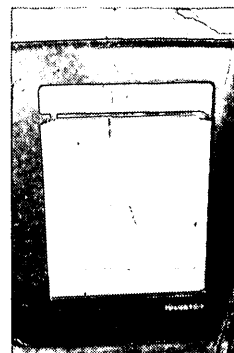


写真-2 濁度計指示記録部の外観

た。この濁度計は横河電機製 ERB 1-30-195 形濁度計であって、その原理は測定液の散乱光と透過光を濁度に比例した光電流比に変換し、この光電流比を測定して測定液の濁度を知るものである。その測定範囲は 0~1000 ppm である。

(4) 計測機器およびその他の器具

各深度毎の懸濁液濃度を測定するために、懸濁液サンプル採取用の採水器 (T.S. ポケット採水器) 6 個を水槽内垂直方向 1 m 毎に吊り下げて使用した。写真-3 にその外観を示す。この採水器は、本実験用に特別に製作したものであって、採水量は 200 cc、筒の外径 40 mm、全長 290 mm、重量 1 kg で、特に筒の内部の採取水が外から肉眼で観察できるように透明なプラスチックでつくりられている。

その他、各深度毎の水温を測定するためのサーミスタ温度計、超音波パルスの波形を観測するためや出力測定のためのシンクロスコープ、反射強度や透過強度を測定するためのマージンテスト用の抵抗減衰器などがある。



写真-3 採水器の外観

図-1 は、実験装置の概略

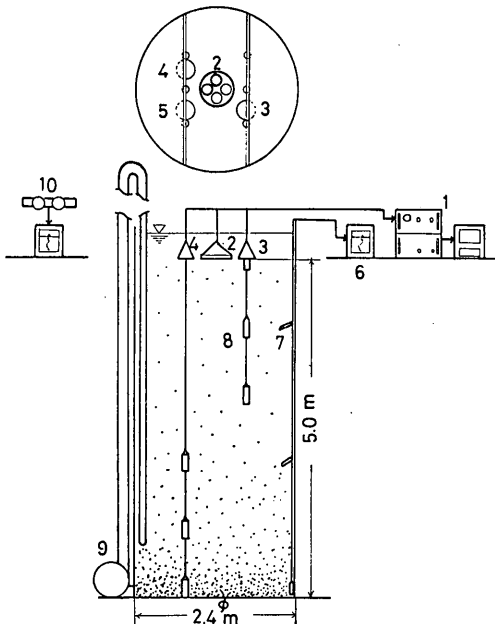


図-1 実験装置概略図

図を示す。超音波探査機の送受波器は、構造、寸法の関係から図のような位置に設置し、採水器は、水底から 1 m おきに吊り下げた。サーミスタ温度計の Sensor 部は水底から 2 m おきに吊り下げ、水温の変化を計測するようにした。

3.2 実験概要

次に実験の概要を述べる。まず懸濁液を作るために水槽の底にフライアッシュ 1920 kg を投入し、清水を水槽内に入れて攪拌用サンドポンプにて約 30 分以上、水槽中のフライアッシュと清水の混合液が均一な泥水になる

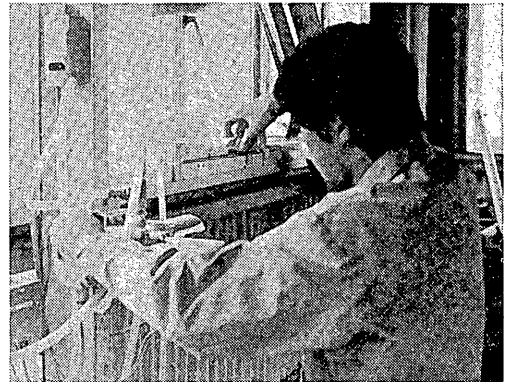


写真-4 濁度測定状況

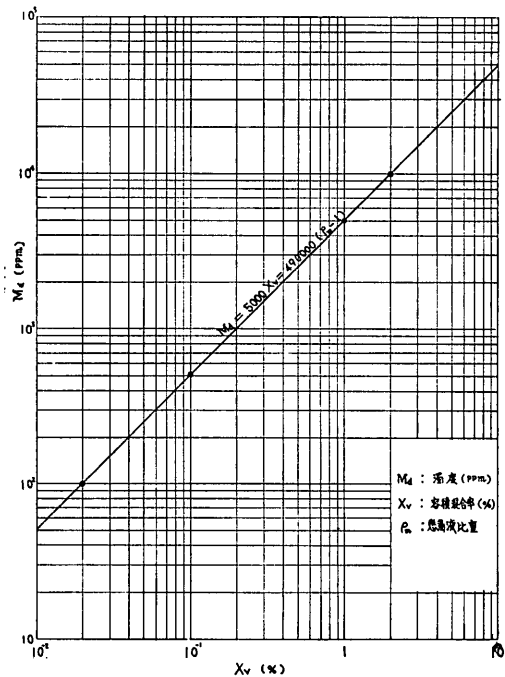


図-2 フライアッシュ懸濁液の濁度と容積混合率

懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性

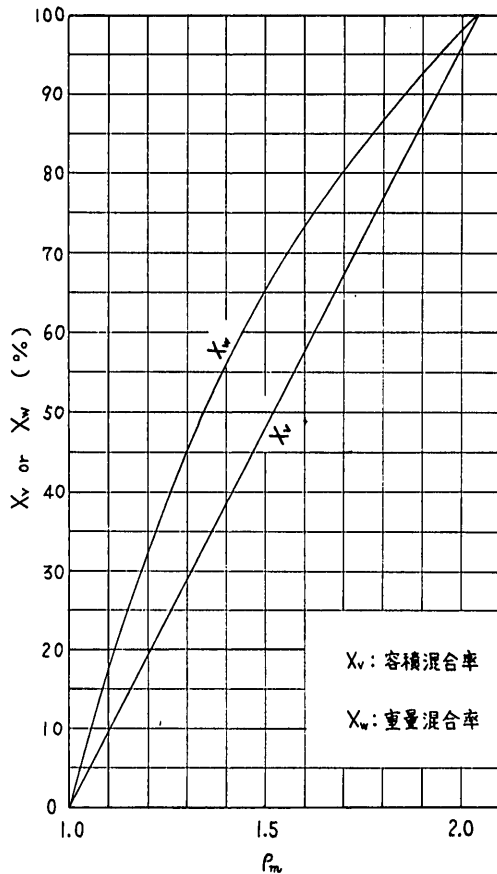


図-3 懸濁液比重と混合率

ように攪拌した。ポンプおよび注水停止後、採水器にて各深度毎の懸濁液のサンプルを採取し、かつ超音波探査機を動作させて、その反射強度をマージンテスト法で測定した。これ等の操作を一定時間毎に行なった。採取した懸濁液のサンプルは、濁度計で濁度を ppm 単位で測定し、懸濁液の濃度を求めた。図-2 にフライアッシュ懸濁液の濁度 (ppm) と容積混合率 (%) の関係を示す。図-3 に懸濁液比重と混合率の関係を示す。

4. 実験結果および考察

以上の実験を 3 回行ない、懸濁液の沈降挙動と超音波の反射・吸収の周波数特性が得られたので、次にその実験結果とその考察を記述する。

4.1 懸濁微粒子の沈降挙動

水槽内懸濁液攪拌後の懸濁微粒子の沈降挙動を調べるために、図-1 に示すように採水器を 1m 毎に垂直方向に吊し、一定時間毎に各採水器のメッセンジャーを同時

に落して採水し、それぞれ濁度計で濁度を測定した結果を表-1 に示す。また図-4 は、横軸に攪拌後の経過時間

表-1 濁度測定結果

Test No. 1 (攪拌 30 分, 注水)

測定時間 (min)	濁度 (ppm)					
	±0m	-1m	-2m	-3m	-4m	-4.5m
5	510	510	530	550	570	700
60	290	290	295	395	354	350
180	230	230	410	550	534	350
270	150	150	210	210	270	680
370	150	150	180	220	240	300
1410	80	80	130	240	520	750
1470	60	60	85	100	120	140
2880	40	40	50	60	65	80
7200	30	30	40	55	55	55
7400	20	25	28	30	32	34
8600	22	22	23	24	28	32
11500	20	20	20	20	21	22

Test No. 2 (攪拌 196 分, 注水なし)

4	355	355	360	350	355	360
10	270	270	280	290	320	410
14	310	310	290	290	330	330
1290	180	180	250	240	245	270
1500	160	160	210	220	230	260
2700	150	150	160	170	170	190
2800	150	150	160	170	170	190

Test No. 3 (攪拌 70 分, 注水)

10	710	820	840	1000	1360	
66	640	760	790	950	1260	
140	440	450	500	680	890	
200	410	410	420	520	680	1360
290	370	380	390	440	650	1240
1360	200	240	290	380	770	1600
1450	140	210	230	300	380	
1580	140	200	230	260	390	
1620	150	210	220	270	700	
1680	160	220	240	250	500	
1720	180	230	240	260	300	
3000	80	150	160	190	360	
5800	70	95	100	105	150	
11500	60	60	60	60	110	
15000	30	30	30	32	40	

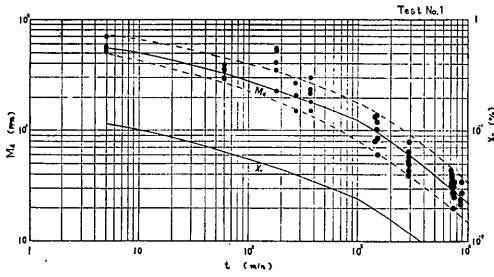


図-4(a) 沈降濃度分布曲線 (Test No. 1)

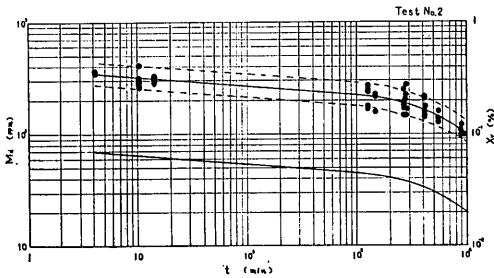


図-4(b) 沈降濃度分布曲線 (Test No. 2)

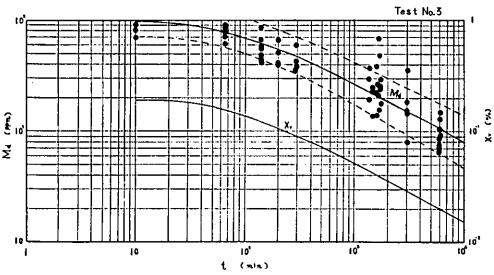


図-4(c) 沈降濃度分布曲線 (Test No. 3)

(min) を縦軸に懸濁液の濁度 (ppm) をとった沈降濃度分布曲線を示す。図中に 図-2 より求めた各深度毎の平均値の容積混合率 X_v (%) を示す。この図によれば、Test No. 1, No. 2, No. 3 とも、時間の経過と共に沈降曲線の傾斜が最初大きく徐々にゆるやかになって経過時間がほぼ 10^4 分後にある一定の値に近づく。懸濁液濃度の相違の原因として考えられるのは、ポンプ運転時間の長短と攪拌時注水の有無によるものであろう。すなわち Test No. 3 は注水しながら 70 分間ポンプ運転して攪拌したため懸濁液濃度が一番大きく Test No. 1 は注水しながら 30 分間攪拌したのでこれに次ぎ、Test No. 2 は水槽に水を入れた状態で攪拌したので比較的濃度が薄くなっている。図-5 は沈降経過時間に対する垂直濃度分布を示す。横軸に、懸濁液の濁度および容積混合率をとり、縦軸に深度をとって、沈降経過時間をパラメータとした

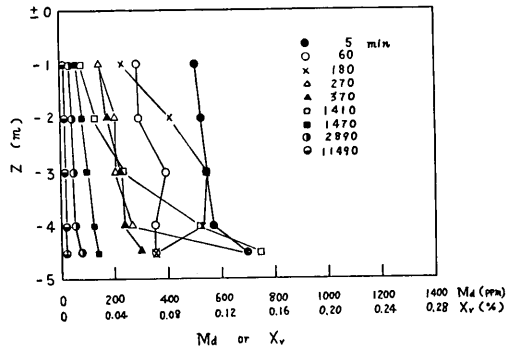


図-5(a) フライアッシュ懸濁液の濁度垂直分布 (Test No. 1)

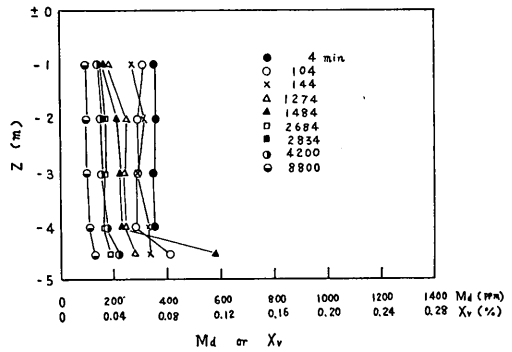


図-5(b) フライアッシュ懸濁液の濁度垂直分布 (Test No. 2)

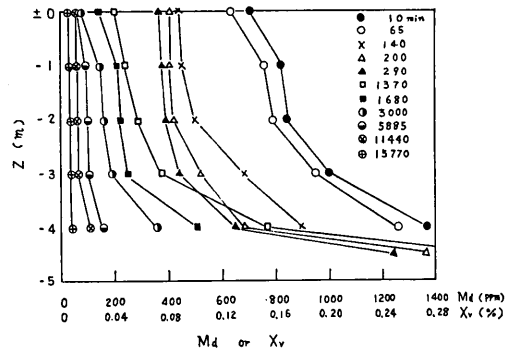


図-5(c) フライアッシュ懸濁液の濁度垂直分布 (Test No. 3)

関係曲線で示した。この図によれば、いずれも深度とともに懸濁液濃度が増加している。また各深度毎の懸濁液濃度の差は時間の経過と共に小さくなっている。

図-6 は、横軸に攪拌後の経過時間をとり、縦軸に深度 Z (m) をとって、懸濁液濃度をパラメータにして示した経過時間に対する懸濁液沈降濃度曲線である。同一濃

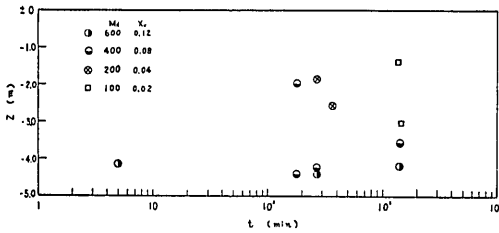


図-6(a) フライアッシュ懸濁液沈降濃度曲線 (Test No. 1)

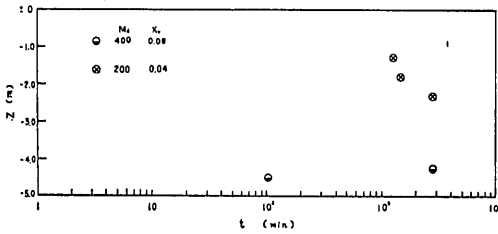


図-6(b) フライアッシュ懸濁液沈降濃度曲線 (Test No. 2)

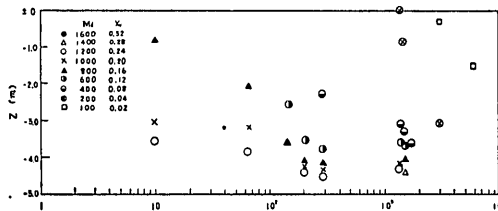


図-6(c) フライアッシュ懸濁液沈降濃度曲線 (Test No. 3)

度の層が時間の経過と共に沈降していることがわかる。

図-7は横軸に攪拌後の経過時間、縦軸に容積混合率をとり、各深度毎の懸濁液濃度の時間的変化を示したグラフである。

図-8は各深度の容積混合率の平均値と経過時間の関係を示したものであって、○は Test No. 1, △は Test No. 2, ●は Test No. 3の結果である。図-9は上記の関係を懸濁液比重で表わしたものである。

次に浮遊している粒子の量を求めるために次のような計算法を用いた。

図-10に示すように、深度 Z_B (m) 中のフライアッシュ粒子の量を求める。水平方向の懸濁液の濃度を等しいものと仮定して、ある深度における清水と、フライアッシュ懸濁液の容積混合率を X_v 、その深度の微小体積 dV 中のフライアッシュ量 dV_s は次の式で表わすことが出来る。

$$dV_s = X_v dV \quad (1)$$

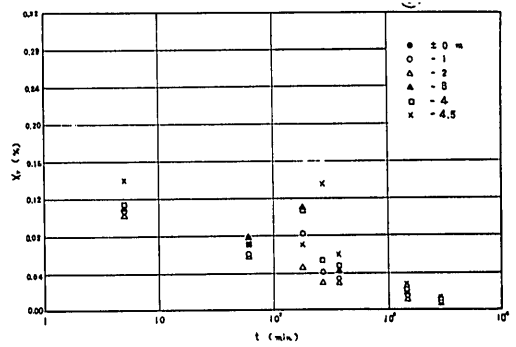


図-7(a) 各深度毎の懸濁液濃度の時間的変化 (Test No. 1)

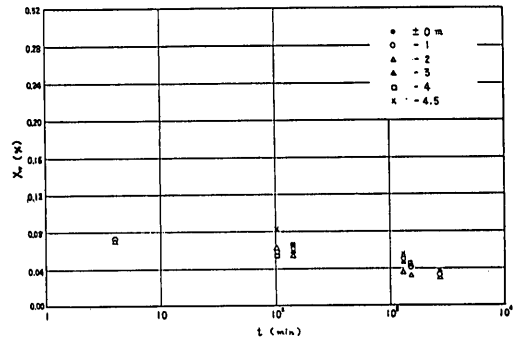


図-7(b) 各深度毎の懸濁液濃度の時間的変化 (Test No. 2)

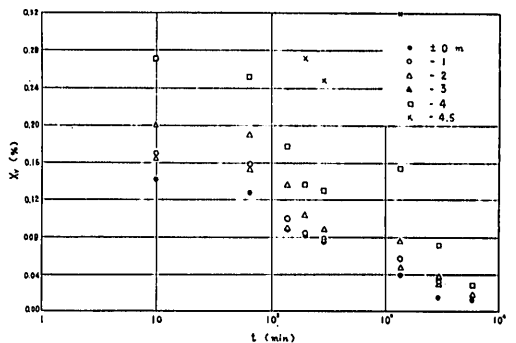


図-7(c) 各深度毎の懸濁液濃度の時間的変化 (Test No. 3)

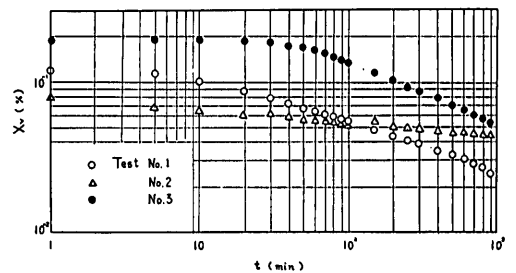


図-8 平均容積混合率と経過時間

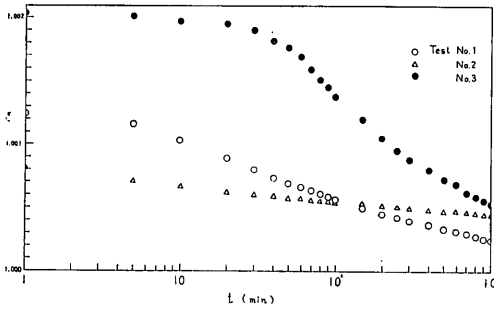


図-9 懸濁液比重と経過時間

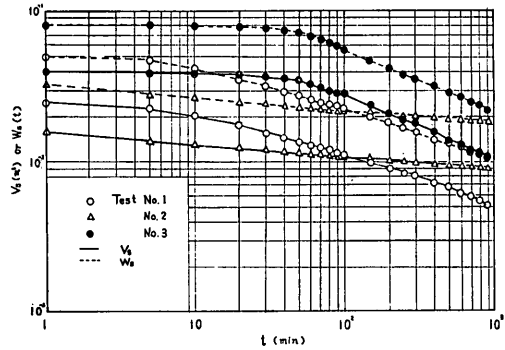


図-11 浮遊粒子の量

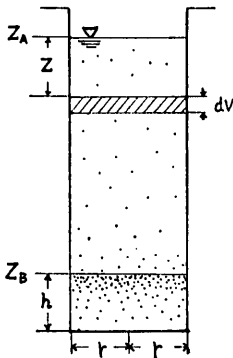


図-10 浮遊懸濁粒子量の計算

したがって、深度 Z_B (m) 中のフライアッシュ全量 V_s (m^3) は

$$V_s = \int_{Z_A}^{Z_B} X_v \cdot dV \quad (2)$$

ここで、深度 Z (m) に対するフライアッシュ懸濁液の容積混合率 X_v の関係曲線から得られた実験式を

$$X_v = Ke^{az} \quad (3)$$

ただし K, a は定数

微小体積 dV は、

$$dV = \pi r^2 \cdot dz \quad (4)$$

ただし r : 水槽の半径

dz : 微小深度

したがって(4)式の全量 V_s は次の式で表わすことができる。

$$V_s = \pi r^2 \cdot K \int_{Z_A}^{Z_B} e^{az} \cdot dz \\ = \frac{a}{\pi r^2 \cdot K} (e^{aZ_B} - e^{aZ_A}) \quad (5)$$

(5)式を使って各時刻毎の懸濁粒子の V_s (m^3) 量を求め、また V_s にフライアッシュの真比重を掛けて懸濁粒子の重量を求めて示したのが図-11 である。

次に懸濁粒子の沈降速度から粒子直径 d (mm) を求めてみよう。周知の通り、静止した無限の広がりをもつ水中に、1個の球が落下していく沈降速度 v (cm/sec) は、Stokes の法則により⁴⁾

$$v = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)g}{18\mu} \cdot d^2 \quad (6)$$

で表わされる。

ただし γ_s : 土粒子の単位体積重量 (g/cm^3)

γ_w : 水の単位体積重量 (g/cm^3)

μ : 水の粘性係数(ポアーズ)($dyne \cdot sec/cm^2$)

d : 粒子の直径 (cm)

g : 重力加速度 (cm/sec^2)

(6)式より、粒子の落下速度はその直径の2乗に比例するので沈降速度 v を何らかの方法で測れば、粒子の直径を求めることが出来る。今粒子の直径を d (mm) とし、(6)式を実用的に便利な単位にして d を求める式に変換すると

$$d = \sqrt{\frac{30\mu}{980(\rho_s - 1)\gamma_w} \cdot \frac{dz}{t}} \quad (7)$$

ただし d : 粒径 (mm)

μ : 水の粘性係数 ($dyne \cdot sec/cm^2$)

ρ_s : 土粒子の比重

dz : 沈降距離 (cm)

t : 距離 dz を沈降する期間 (min)

次に t 時間後 z の深さでの懸濁液単位体積重量を γ とし、懸濁液全体の容積を V 、懸濁液中の土の乾燥重量を W_s とすれば、 d より小さな粒子の重量と土全体の重量の比 N は、

$$N = \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} \cdot \frac{V}{W_s} (\gamma - \gamma_w) \quad (8)$$

となる⁴⁾。 N は d より小さな粒子の割合を示しているから N を求めることは粒度加積曲線上の点を求めるこ

懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性

とになる。

そこで本実験から浮遊微粒子の粒径のおおよその値を求めするために、沈降距離 d_z を深度の半分にとり、その位置における単位体積重量と、ポンプ攪拌停止時の浮遊粒子の重量を W_s として(8)式の N を求めた。その時

刻における粒径 d (mm) は(7)式を用いて算出した。その結果を表-2 に示す。またこれらの結果を粒径加積曲線で示したのが図-12 である。この図によれば 60% 粒径は Test No. 2 が 0.013 mm で一番小さく、Test No. 3 が 0.0214 mm でそれに次ぎ、Test No. 1 が 0.042 mm

表-2 各濃度における粒径

Test No. 1

t (min)	M_d (ppm)	X_v (%)	ρ_m	V_s (m ³)	W_s (t)	$N=801.26(\rho_m-1)$	d (mm)= $0.257 \sqrt{1/t}$
1	600	0.120	1.001248	0.02441664	0.0498099	100.0	0.257
5	560	0.112	1.0011648	0.022789	0.0464896	93.33	0.115
10	502	0.1004	1.0010442	0.0204286	0.0416743	83.67	0.0812
20	433	0.0867	1.0009017	0.0176410	0.0359876	72.25	0.0576
30	388	0.0776	1.0008070	0.0157894	0.0322104	64.66	0.0468
40	358	0.0716	1.0007446	0.0145686	0.0297199	59.66	0.0406
50	335	0.0670	1.000697	0.0136326	0.0278100	55.85	0.0363
60	320	0.0640	1.000666	0.0130222	0.0265653	53.36	0.0332
70	306	0.0612	1.0006365	0.0124525	0.0254031	51.00	0.0307
80	294	0.0589	1.0006126	0.0119845	0.0244484	49.09	0.0288
90	284	0.0568	1.0005907	0.0115572	0.0235767	47.33	0.0270
100	275	0.0550	1.0005720	0.0111910	0.0228296	45.83	0.0257
150	242	0.0484	1.0005034	0.0098480	0.0200899	40.34	0.0209
200	220	0.0440	1.000458	0.0089528	0.0182637	36.70	0.0182
250	206	0.0412	1.000429	0.0083830	0.0171013	34.37	0.0162
300	194	0.0388	1.0004035	0.0078947	0.0161052	32.33	0.0148
400	177	0.0354	1.000368	0.0072029	0.0146939	29.49	0.0129
500	164	0.0328	1.0003411	0.0066739	0.0136148	27.33	0.0115
600	153	0.0306	1.000318	0.0062262	0.0127014	25.48	0.0105
700	142	0.0284	1.0002954	0.0057786	0.0117883	23.67	0.00971
800	134	0.0268	1.0002787	0.0054530	0.0111241	22.23	0.00910
900	126	0.0252	1.0002621	0.00512749	0.0104601	21.00	0.00856
1000	119	0.0238	1.0002475	0.0048426	0.0098789	19.83	0.00812
1500	97	0.0194	1.0002018	0.0039474	0.00805270	16.17	0.00663
2000	78	0.0156	1.0001622	0.0031742	0.0064754	13.00	0.00576
2500	67	0.0134	1.0001394	0.0027265	0.00556206	11.17	0.00514
3000	59	0.0118	1.0001227	0.002401	0.00489804	9.83	0.00468
4000	47	0.0094	1.00009776	0.0019126	0.00390170	7.83	0.00406
5000	39	0.0078	1.00008112	0.0015871	0.00323768	6.50	0.00363
6000	34	0.0068	1.00007072	0.0013836	0.00282274	5.67	0.00332
7000	30	0.0060	1.0000624	0.0012208	0.0024904	5.00	0.00307
8000	27	0.0054	1.00005616	0.0010987	0.00224135	4.50	0.00288
9000	24.6	0.00492	1.000051168	0.0010011	0.00204224	4.10	0.00270
10000	22.8	0.00456	1.000047424	0.0009278	0.00189271	3.80	0.00257
11000	21	0.00420	1.00004368	0.0008546	0.00174338	3.50	0.00245
12000	19.5	0.00390	1.00004056	0.0007935	0.00161874	3.25	0.00232

木原純孝

Test No. 2

t (min)	M_a (ppm)	X_v (%)	ρ_m	V_s (m ³)	W_s (t)	$N=1217.13(\rho_m-1)$	d (mm)= $0.257\sqrt{1/t}$
1	395	0.0790	1.0008216	0.016074	0.0327910	100.00	0.257
5	340	0.0680	1.0007072	0.0138361	0.0282256	86.08	0.115
10	322	0.0644	1.00066976	0.0131036	0.0267313	81.52	0.0812
20	302	0.0603	1.00062712	0.012269	0.0250288	76.33	0.0576
30	294	0.0588	1.00061152	0.0119642	0.0244070	74.43	0.0468
40	288	0.0576	1.00059904	0.011720	0.0239088	72.91	0.0406
50	280	0.0561	1.00058344	0.011415	0.0232866	71.01	0.0363
60	278	0.0556	1.00057824	0.011313	0.0230785	70.38	0.0332
70	274	0.0548	1.00056992	0.0111503	0.0227466	69.37	0.0307
80	270	0.0539	1.00056056	0.0109671	0.0223729	68.23	0.0288
90	268	0.0536	1.00055744	0.010906	0.0222482	67.85	0.0270
100	265	0.0531	1.00055224	0.010804	0.0220402	67.21	0.0257
150	258	0.0516	1.00053664	0.010499	0.0214180	65.32	0.0209
200	250	0.0500	1.000520	0.0101736	0.0207541	63.29	0.0182
250	246	0.0492	1.00051168	0.0100108	0.0204220	62.28	0.0162
300	242	0.0484	1.00050336	0.009848	0.0200899	61.27	0.0148
400	237	0.0473	1.00049192	0.009624	0.0196330	59.87	0.0129
500	231	0.0462	1.00048048	0.0094004	0.0191768	58.48	0.0115
600	230	0.0460	1.0004784	0.009360	0.0190944	58.23	0.0105
700	226	0.0452	1.00047008	0.009197	0.0187619	57.21	0.00971
800	223	0.0446	1.00046384	0.009075	0.0185130	56.46	0.00910
900	220	0.0440	1.0004576	0.008953	0.018264	55.70	0.00856
1000	219	0.0438	1.00045552	0.008912	0.0181805	55.44	0.00812
1500	212	0.0424	1.00044096	0.008627	0.0175991	53.67	0.00663
2000	206	0.0412	1.00042848	0.008383	0.0171013	52.15	0.00576
2500	202	0.0404	1.00042016	0.0082203	0.0167694	51.14	0.00514
3000	200	0.0400	1.00041600	0.008139	0.0166036	50.63	0.00468

Test No. 3

t (min)	M_a (ppm)	X_v (%)	ρ_m	V_s (m ³)	W_s (t)	$N=490.5(\rho_m-1)$	d (mm)= $0.257\sqrt{1/t}$
1	980	0.196	1.0020384	0.03988	0.0813552	99.98	0.257
5	970	0.194	1.0020167	0.03947	0.0805188	98.96	0.115
10	950	0.190	1.001976	(0.03995) 0.03866	0.0788664	96.92	0.0812
20	940	0.188	1.0019552	0.03825	0.0780300	95.90	0.0576
30	920	0.184	1.0019136	0.03744	0.0763776	93.86	0.0468
40	880	0.176	1.0018304	0.03581	0.073024	89.78	0.0406
50	850	0.170	1.001768	0.03459	0.0705636	86.72	0.0363
60	820	0.164	1.0016952	0.03337	0.0680748	83.15	0.0332
70	770	0.154	1.0016016	0.03133	0.0639132	78.56	0.0307
80	730	0.146	1.0015184	0.02971	0.0606084	74.47	0.0288
90	700	0.140	1.0014560	0.02849	0.0581196	71.42	0.0270
100	670	0.134	1.0013936	0.02727	0.0556308	68.36	0.0257
150	580	0.116	1.0012064	0.02360	0.0481440	59.17	0.0209

懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性

Test No. 3

t (min)	M_a (ppm)	X_v (%)	ρ_m	V_s (m ³)	W_s (t)	$N=450.5(\rho_m-1)$	d (mm)= $0.257\sqrt{1/t}$
200	510	0.102	1.0010608	0.02075	0.0423300	52.03	0.0182
250	460	0.0921	1.0009578	0.01874	0.0382296	46.98	0.0162
300	430	0.0860	1.0008944	0.01750	0.03570000	43.87	0.0148
400	390	0.0780	1.0008112	0.01587	0.0323748	39.79	0.0129
500	350	0.0700	1.0007280	0.01424	0.0290496	35.71	0.0115
600	330	0.0660	1.0006864	0.01343	0.0273972	33.67	0.0105
700	300	0.0600	1.0006240	0.01221	0.0249084	30.61	0.00971
800	285	0.0570	1.0005928	0.01160	0.0236640	29.08	0.00910
900	270	0.0540	1.0005616	0.01099	0.0224196	27.55	0.00856
1000	260	0.0520	1.0005408	0.01058	0.0215832	26.53	0.00812
1500	215	0.0430	1.0004472	0.00875	0.0178500	21.94	0.00663
2000	185	0.0370	1.0003848	0.00753	0.0153612	18.87	0.00576
2500	165	0.0330	1.0003432	0.00671	0.0136884	16.83	0.00514
3000	150	0.0300	1.0003120	0.00610	0.0124440	15.30	0.00468
4000	130	0.0260	1.0002704	0.00529	0.0107916	13.26	0.00406
5000	114	0.0228	1.00023712	0.00464	0.0094656	11.63	0.00363
6000	104	0.0208	1.00021632	0.00423	0.0086292	10.61	0.00332
7000	95	0.0190	1.0001967	0.00387	0.0078948	9.69	0.00307
8000	88	0.0176	1.00018304	0.00358	0.0073032	8.98	0.00288
9000	82	0.0164	1.00017056	0.00334	0.0068136	8.37	0.00270
10000	77	0.0154	1.00016016	0.00313	0.0063852	7.86	0.00257
11000	73	0.0146	1.00015184	0.00297	0.0060588	7.45	0.00245
12000	68	0.0136	1.00014144	0.00277	0.0056508	6.94	0.00232
13000	63	0.0126	1.00013104	0.00256	0.0052224	6.43	0.00225
14000	58	0.0116	1.00012064	0.00236	0.0048144	5.92	0.00217
15000	52	0.0104	1.00010816	0.00212	0.0043248	5.31	0.00210
16000	40	0.0080	1.0000832	0.00163	0.0033252	4.08	0.00203

で一番大きい。これは Test No. 1 は注水しながらポンプ運転を 30 分間つづけて攪拌したため比較的大きな粒子が浮遊したためであろう。Test No. 2 は、満水の状態でポンプ運転を長時間行なって攪拌したため、比較的粒径の小さな粒子が浮遊したためであろう。また Test

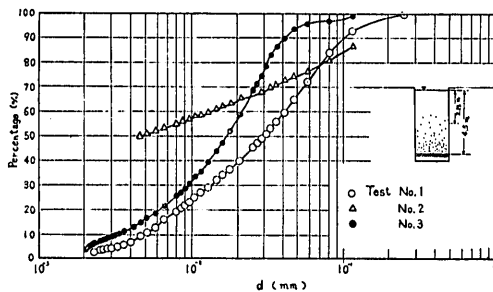


図-12 懸濁粒子の粒径加積曲線

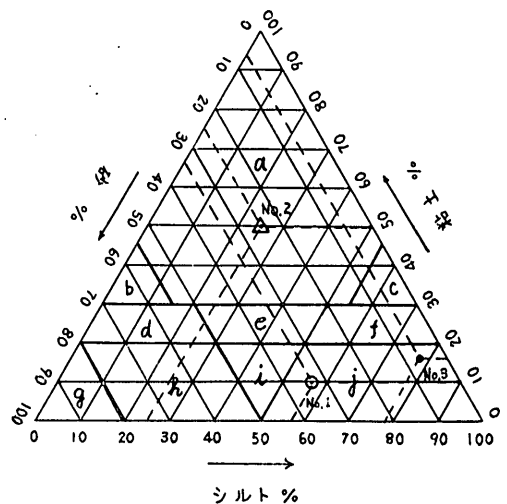


図-13 懸濁粒子の粒度試験結果

No. 3 は、注水しながら Test No. 1 に比較して長時間ポンプ運転して攪拌したので比較的粒子直径の大きい粒子が沈降してしまい、Test No. 1 に比して小さな粒子が浮遊したためであろう。

図-13 は、図-12 の粒径加積曲線より求めたフライアッシュ懸濁粒子の粒度試験結果⁴⁾である。この試験の結果 200 番フルイ (直径 0.075 mm) 以下の粒子がほぼ 80% 以上含まれていることがわかる。

4.2 懸濁液中の超音波の反射吸収特性

測定時の気温、水温、湿度は表-3 の通りである。ただしこれらの値は各実験毎の平均値を示す。

表-3 実験時の温度と湿度

Test No.	温度 湿度 (°C)	水 温 (°C)		湿度 (%)	延測定 時間 (hr)
		水 温	底質温度		
1	25.54	21.14	21.52	60	191.57
2	18.04	15.99	16.11	65	183.30
3	17.60	13.26	13.25	66	250.00
平均	20.39	16.80	16.96	64	

図-14 は攪拌後の経過時間と底質における超音波の反射マージンを周波数毎に示した。この図によれば高周波ほど反射強度の変化の大きいことがわかる。特に 1 MHz の変化が著しく大きい。このことは懸濁液中の超音波の吸収係数が高い周波数ほど大きいことから理解できる。一番変化の大きい時刻は 1~100 min の間で、100~1000 min の間では変化が緩やかとなり、10000 min 以上になるとほとんど変化がなくなりほぼ一定となる。

図-15 は、図-4 の攪拌後の経過時間 t (min) とフライアッシュ懸濁液の容積混合率 X_v (%) との関係曲線と、図-14 の攪拌後の経過時間 t (min) と底質のマージン M (dB) の関係曲線から作成したフライアッシュ懸濁液の容積混合率 X_v (%) と底質におけるマージン M (dB) との関係曲線を示す。この図によれば、容積混合率 X_v が 10^{-2} (%) 以下のとき、底質からの反射マージン M (dB) はほぼ一定値になっている。これは懸濁液の濃度が非常に薄いため、超音波の吸収係数が小さく、吸収損失が減少したためであろう。 X_v が 10^{-2} から 10^{-1} の間では各周波共急激に M が変化している。特にこの変化は高い周波数ほど著しく大きい。これは懸濁液の濃度が非常に濃くなって超音波の吸収係数が大きくなり、吸収損失が増加したためであると考えられる。

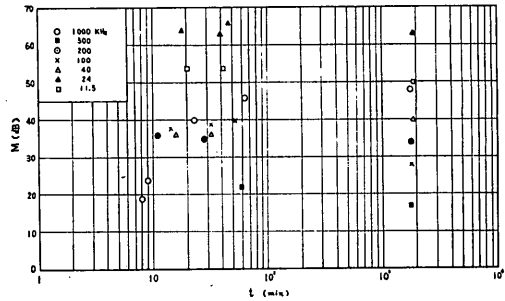


図-14(a) 軟底質における反射マージン (Test No. 1)

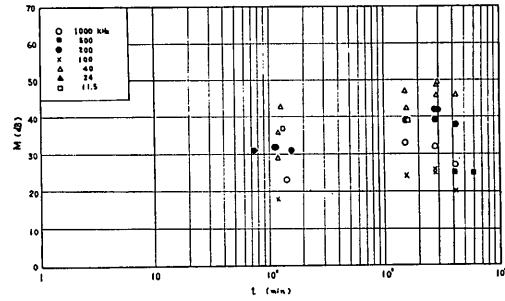


図-14(b) 軟底質における反射マージン (Test No. 2)

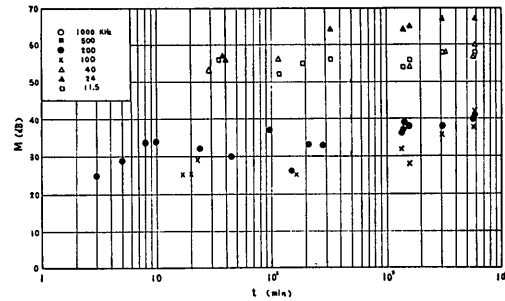


図-14(c) 軟底質における反射マージン (Test No. 3)

4.3 伝送損失および吸収損失

図-15 の結果から伝送損失および吸収損失を求めてみよう。

図-16 において実線にかいた曲線はフライアッシュ懸濁液のマージン特性曲線で、一点鎖線は水槽の底が超音波完全反射面の場合のマージン・レベルであって、点線は完全反射面の場合のマージン・レベルから水底が見掛比重 1.5 のときのフライアッシュ軟底質の反射損失を引いたマージン・レベルである。したがって総合伝送損失 L_T は、

$$L_T = (\text{水底が完全反射面の場合のマージン } M_0) - (\text{ライアッシュ懸濁液のときのマージン } M_F)$$

またフライアッシュ懸濁液中の往復伝搬の吸収損失 A は、

懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性

$A = (\text{水底が完全反射面の場合の マージン } M_0) - (\text{フライアッシュ懸濁液のときの マージン } M_F) - (\text{水底が見掛比重 1.5 のときのフライアッシュ軟底質の反射損失 } L_m) = (\text{総合伝送損失 } L_T) - (\text{水底が見掛比重 1.5 のときのフライアッシュ軟底質の反射損失 } L_m)$ となる。

上記のような方法でフライアッシュ懸濁液における伝

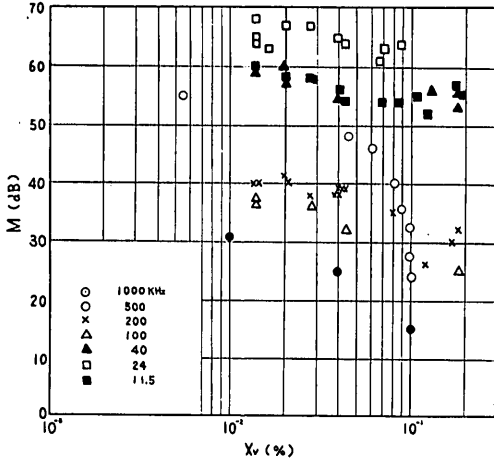


図-15 容積混合率とマージンの関係

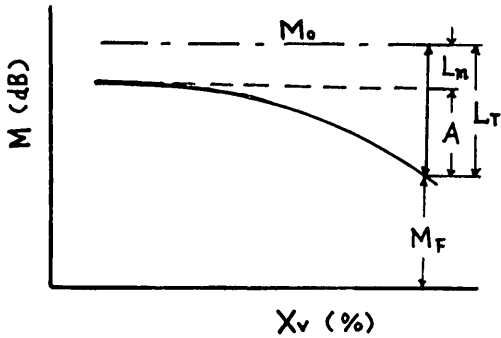


図-16 伝送損失と吸収損失

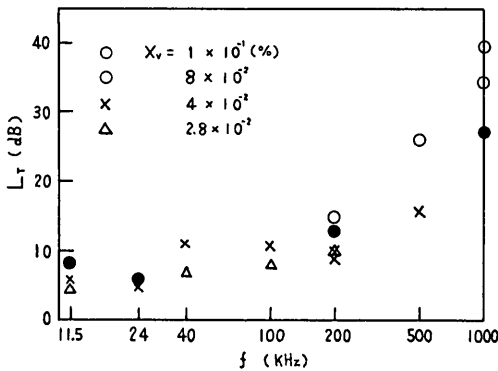


図-17 懸濁液中の総合伝送損失

送損失 L_T の周波数特性を求めてグラフに示したのが図-17 である。この図で懸濁液の容積混合率 X_v をパラメータにして示している。 X_v が大きい程、各周波とも伝送損失 L_T が大きいことがわかる。また周波数が高い程伝送損失 L_T が大きくなることもわかる。図-18 は横軸に懸濁液の容積混合率 X_v をとり、縦軸にフライアッシュ懸濁液の伝送損失 L_T をとって、周波数をパラメータにして示した関係曲線を示す。この図からも懸濁液の濃度が濃い程、周波数が高い程伝送損失が大きいことがわかる。またフライアッシュ懸濁液中の往復伝搬の吸収損失 A (dB) を上記方法で求めてみると、図-19 に示すようになる。この図も伝送損失と同じような傾向の曲線が得られる。

次にこの吸収損失から単位距離当りの吸収損失、すなわち吸収係数を求めてみる。往復の伝搬距離は 9m であるから、吸収係数 α (dB/m) は、吸収損失 A (dB) を 9m で割ればよい。この結果を図-20 に示す。実線は下

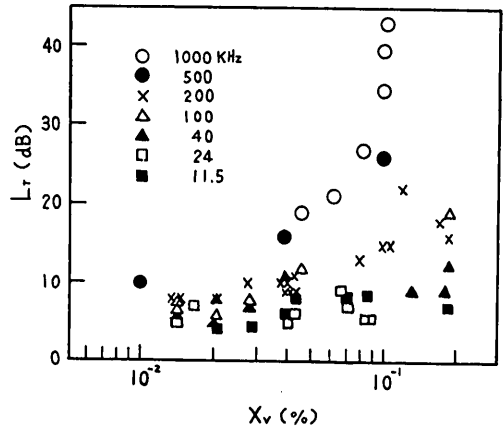


図-18 容積混合率と総合伝送損失

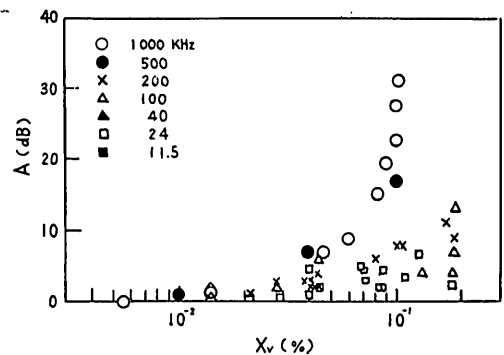


図-19 懸濁液濃度と吸収損失

記の Sewell の理論式³⁾を用いた計算値である。

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_v + \alpha_s$$

$$= n\pi R^2 \left[\frac{3(2\eta\omega)^{1/2}}{c} + \frac{6\eta}{CR} + \frac{2}{9} \left(\frac{\omega R}{c} \right)^4 \right] \quad (9)$$

- ここに α : 媒体自身の吸収を除いた吸収係数 (cm⁻¹)
- α_1 : 粒子のすぐ近傍での乱流性の摩擦による損失 (cm⁻¹)
- α_v : 流線的な流れによる損失 (cm⁻¹)
- α_s : 散乱による損失 (cm⁻¹)
- n : 1 cm³ 中の懸濁粒子の数
- R : 粒子半径 (m)
- c : 音速度 (cm/sec)
- η : 運動粘性 (= μ/ρ) (dyne·sec·cm/gr)
- ω : $2\pi f$ (rad)

この理論式を用いて周波数 f が 7 周波のとき、および粒子直径が 10 μ , 100 μ のときの懸濁液濃度を変化させた場合の吸収係数を図-20 の直線で示した。この図によれば実測値と計算値は曲線の傾斜ではほぼ一致しているが、粒子径よりみた場合、計算値よりも実測値の方がやや大きいようであった。また測定値のばらつきは低周波

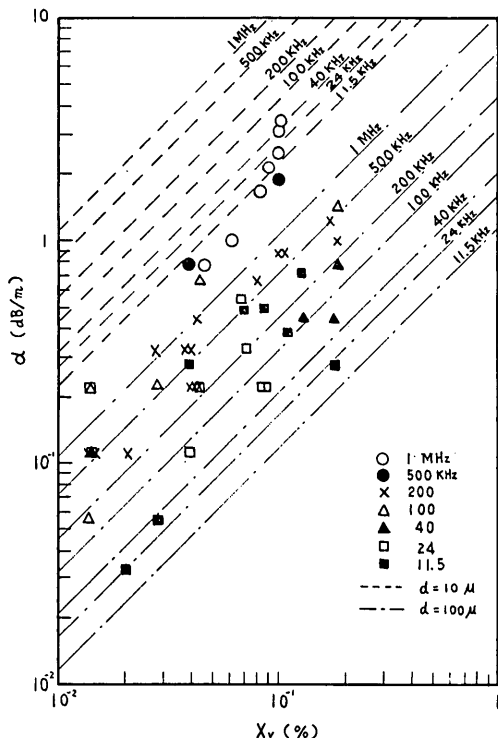


図-20 フライアッシュ懸濁液の吸収係数

ほど大きくなっており、高周波特に 1 MHz ではほとんどないことがわかる。

図-21 は、懸濁液の容積混合率 X_v をパラメータとして示した吸収係数 α (dB/m) の周波数特性である。実線は(9)式の理論式で求めた計算値であり、○印は X_v が 0.1(%) のとき、×印は X_v が 0.05(%) のとき、●印は X_v が 0.01(%) のときの吸収係数の実測値である。これらの曲線から最小自乗法により実験式を求めると次のようである。

$$X_v = 0.1(\%) \text{ のとき} \quad \alpha = 0.0622 f^{0.552} \quad (10)$$

$$X_v = 0.05(\%) \text{ のとき} \quad \alpha = 0.034 f^{0.495} \quad (11)$$

$$X_v = 0.01(\%) \text{ のとき} \quad \alpha = 0.00701 f^{0.518} \quad (12)$$

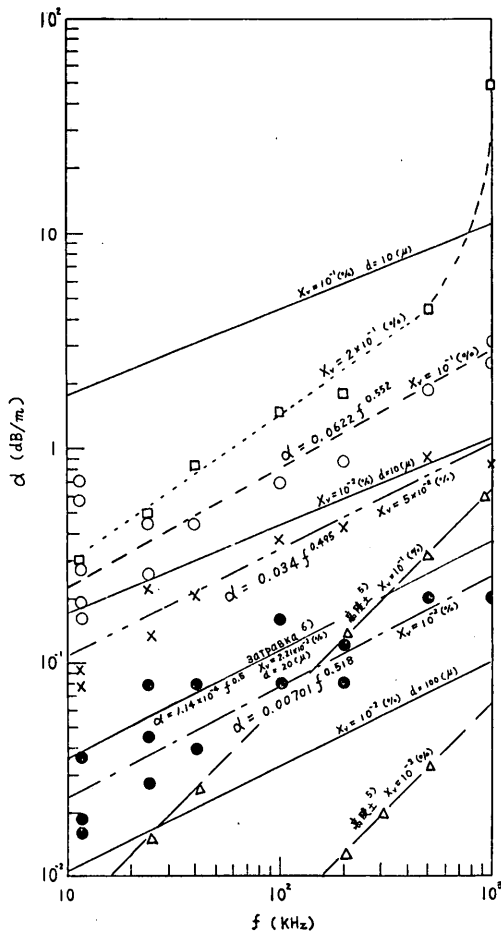


図-21 吸収係数の周波数特性

ここに α : 懸濁液の吸収係数 (dB/m)
 f : 超音波周波数 (kHz)

上記の実験式よりフライアッシュ懸濁液の容積混合率 X_v が 0.1~0.01(%) で、その吸収係数はほぼ $f^{1/2}$ に比例して増加することがわかる。容積混合率 X_v が 0.2(%) 程度で比較的粒子径の大きな懸濁液の場合には、図の□印で示すように 11.5 kHz~500 kHz までは $f^{1/2}$ に比例して吸収係数 α は増加するが、500~1000 kHz にかけて急に増加し、ほぼ f^4 に比例して増しているようである。これは、理論式 (9) に示すように、攪拌停止直後の比較的濃度が大きく、粒子直径の大きい懸濁液のときには、周波数 f が大きいと、散乱の吸収損失が増えて f^4 に比例した吸収係数となる。また攪拌停止後相当時間が経過して懸濁液の濃度が薄くなり、粒子直径も小さくなると、理論式 (9) の第 1 項の粒子近傍での乱流性による摩擦による損失 α_1 が増えて全体として $f^{1/2}$ に比例した吸収係数になるものと思われる。図-22 は、理論式 (9) を用い、粒径が 100 μ 、懸濁液濃度 1% のときの吸収損失 α_1 、 α_v 、 α_s を計算して図に示したものである。この図が

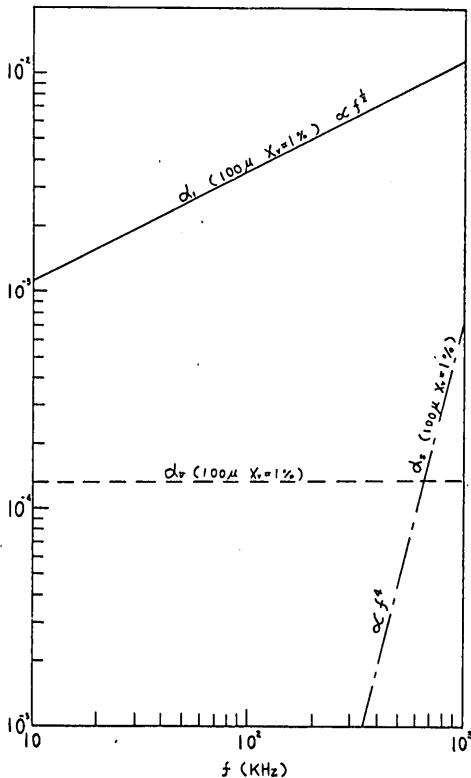


図-22 吸収損失 α_1 、 α_v 、 α_s の周波数特性

らも散乱による損失 α_s が f^4 に比例するため、 f が 1000 kHz 以上で大きくなるのがわかる。

4.4 懸濁液層の探知記録

図-23 は、200 kHz 以上の超音波周波数を用いた懸濁液層の探知記録の一例を示したものであって、上の線は発振音の記録、中間の濃淡記録は浮遊懸濁粒子群からの散乱波による反響記録で記録に濃淡があるのは浮遊懸濁濃度が各深度によって異なっているため散乱波の強度が夫々異なり、記録に濃淡があらわれたものであろう。1 MHz の記録をみると記録紙一面黒く雑音のように記録されているが、これは懸濁粒子群からの散乱波が低周波に比して非常に大きいためであろう。深度 1 m 近くに反響の特に強いところがあるが、図-5 のフライアッシュ懸濁液の濁度垂直分布曲線から深度 1 m の懸濁液濃度を求めてみると X_v が 0.12% であることがわかる。200 kHz では同じ時刻で深度 1.3 m 附近 (X_v が 0.13%) から反射している。これは周波数が高い程散乱強度が大きいためであると考えられる。このことから懸濁液層の比較的薄い濃度を探知するには高い周波数を用いる方がよいと思われる。また同じ濃度では周波数が高い程懸濁液層の反射損失が小さいことがわかった。40 kHz 以下では、平均濃度 X_v が 0.2% 以下では探知することは出来なかったが、これも理論と一致する。したがって高周波で懸濁液層の表面を探知し、低周波で下層の比較的濃度の高い層を探知して、その差で懸濁液層の厚さが探知出来るものと思われる。

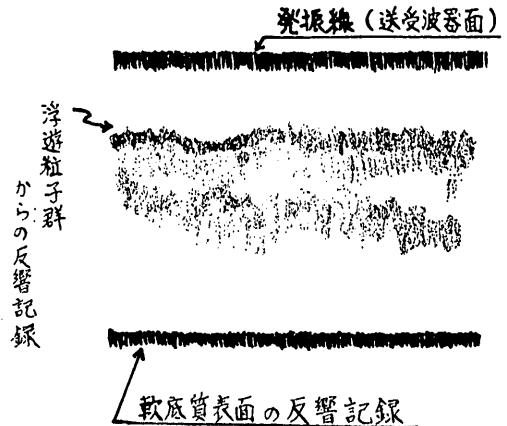


図-23 懸濁液層探知記録

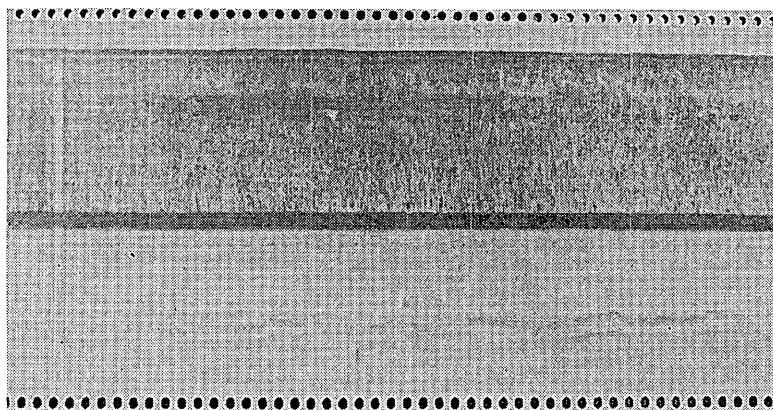


写真-5(a) 懸濁液層探知記録例 (1000 kHz)

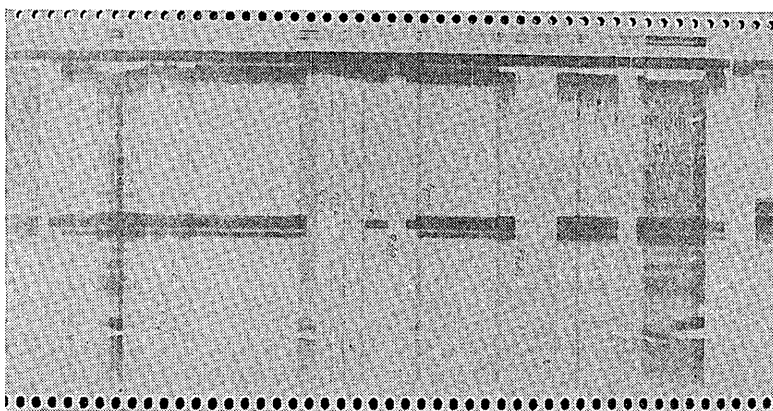


写真-5(b) 懸濁液層探知記録例 (500 kHz)

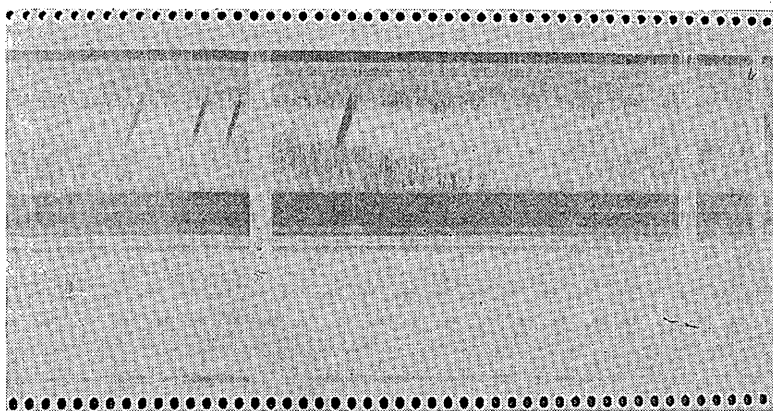


写真-5(c) 懸濁液層探知記録例 (200 kHz)

懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性

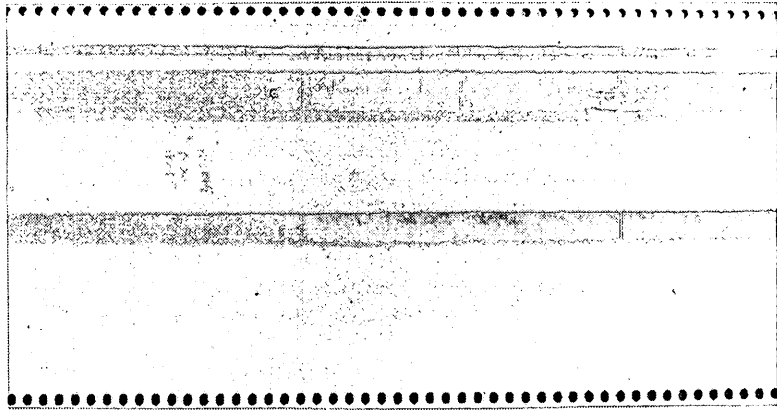


写真-5(d) 懸濁液層探知記録例 (100 kHz)

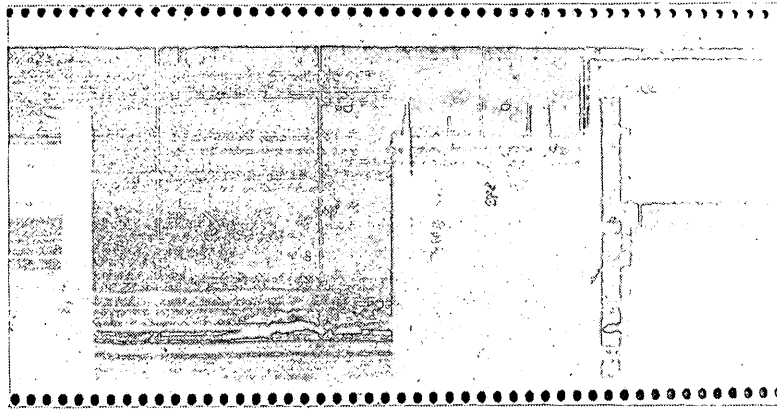


写真-5(e) 懸濁液層探知記録例 (40 kHz)

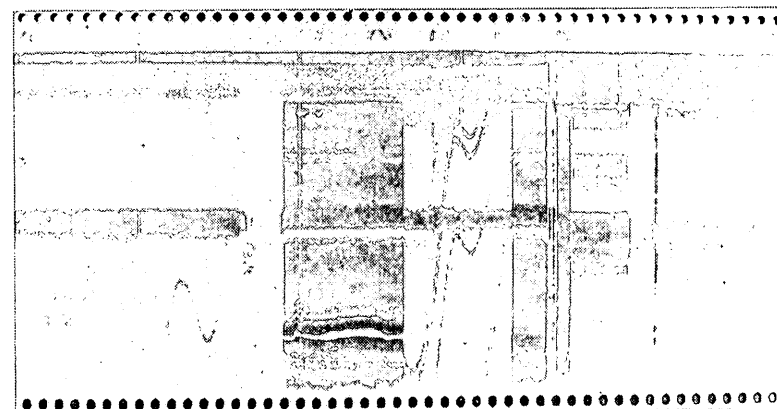


写真-5(f) 懸濁液層探知記録例 (24, 11.5 kHz)

5. 結 論

以上の実験結果および考察によって明らかになった事項を要約すると次のようになる。

- (1) 懸濁液を垂直方向に吊した採水器で一定時間毎に採取し、濁度計で濁度を測定することによって、懸濁粒子の沈降挙動を観察することができる。
- (2) 懸濁液中の総合伝送損失や吸収損失は懸濁液の濃度が大きい程、周波数が高い程増大する。
- (3) フライアッシュ懸濁液の容積混合率 X_0 が 0.1~0.01% で、その吸収係数は $f^{0.5}$ に比例して増加する。また容積混合率 X_0 が 0.2% 程度で比較的粒子径の大きな懸濁液の場合には、その吸収係数は 11.5~500 kHz までは $f^{0.5}$ に比例し、500~1000 kHz にかけて急に増加し、ほぼ f^4 に比例して増大する。
- (4) 懸濁液層の探知記録から、高い周波数は低い周波数に比べて探知しやすい。これは懸濁液層の反射損失が超音波周波数の増大とともに減小するからである。
- (5) 高周波で懸濁液層の表面を探知し、低周波で下層の比較的濃度の高い層を探知してその差で懸濁液層の厚さが探知出来る。

6. あとがき

懸濁液層としてフライアッシュ懸濁液を用い、その沈降挙動と超音波周波数との音響的関連性について究明した室内実験について述べたが、この実験の結果懸濁粒子の粒径並びに濃度と超音波の伝送損失および吸収損失が定量的に求められた。また 0.2% 以下の比較的濃度の薄い懸濁液層を探知するのに 1MHz 以上の超音波周波数を使用した方が良いこともわかった。なお今後は、超音波発振周波数、発振出力と反響記録特性との関連性について究明し懸濁液層探知機実用化のためのデータを得る必要があろう。

(1972年 3月31日 受付)

参 考 文 献

- 1) 第7回港湾技術研究所研究発表会講演概要1969年
- 2) 木原純孝:「軟底質における超音波の反射透過特性」港研報告第9巻第1号 1970年

- 3) 木原純孝:「音響測深機に関する研究」港研報告第8巻第1号 1969年
- 4) 渡辺 隆:「土質調査および土質試験」技報堂 1963年
- 5) 実吉ほか:「超音波技術便覧」日刊工業新聞社 昭和41年改訂新版
- 6) Г. М. Кузнецов, Л. И. Евстюнина, Н. Г. Лебедева, Л. П. Маркова: 'Прибор для измерения концентрации затравки.' измерительная Техн 1969.

記 号 表

A :	吸収損失
c :	音の伝搬速度
D :	水槽の直径
d :	懸濁粒子の直径
e :	自然対数の底
f :	周波数
g :	重力加速度
h :	底質の厚さ
L_m :	軟底質の反射損失
L_T :	懸濁液中の総合伝送損失
L_F :	懸濁液層表面の反射損失
n :	1 cm ³ 中の懸濁粒子の数
M :	反響余裕値
M_a :	濁度
R :	粒子半径
t :	攪拌後の経過時間
V :	懸濁液全体の容積
V_s :	懸濁液中の粒子の量
v :	懸濁液子の沈降速度
W_s :	懸濁液中の粒子の乾燥重量
X_v :	懸濁液の容積混合率
z :	水深
Δz :	沈降距離
α :	吸収係数
γ :	単位体積重量
η :	運動粘性
μ :	水の粘性係数
π :	円周率
ρ :	比重