

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. 10      NO. 2      June 1971

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。

報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 10 卷 第 2 号 (Vol. 10, No. 2), 1971年 6 月(June 1971)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 島堤による波の反射および回折に関する研究  
.....合田良実, 吉村知司, 伊藤正彦..... 3  
(Reflection and Diffraction of Water Waves by an Insular Breakwater  
.....Yoshimi GODA, Tomotsuka YOSHIMURA, Masahito Iro)
2. 漂砂の連続的な現地観測について  
——海底地形変動に関する一考察——  
.....入江 功, 天坂三朗..... 53  
(On the Continuous Observation of Littoral Drift in the Field  
—A Note on the Variation of the Sea Bottom Level—  
.....Isao IRIE, Mitsuaki TENSUKA)
3. 新しい方法による波動の数値計算  
——防波堤周辺の波高分布への適用——  
.....伊藤喜行, 谷本勝利..... 97  
(A New Method of Numerical Analysis of Wave Propagation  
—Application to Wave Height Distribution along Breakwater—  
Yoshiyuki Iro, Katsutoshi TANIMOTO)
4. 水面波の 2, 3 の性質について  
.....浜田徳一..... 121  
(On Some Properties of Water Surface Waves  
.....Tokuichi HAMADA)
5. 河口侵入波におよぼす河口流の効果  
.....金子安雄, 上野信行..... 147  
(Experimental Study On Wave Height Damping Effects Due to Opposing Current  
.....Yasuo KANEKO, Nobuyuki UENO)
6. 粗粒径土砂混合水による鋼材の摩耗特性について  
.....宮崎昭児, 奥出 律, 津村悦夫..... 163  
(Abrasion Properties of Steels against Coarse Solid-Water Mixtures  
.....Shoji MIYAZAKI, Tadasu OKUDE, Etsuo TSUMURA)

## 2. 漂砂の連続的な現地観測について

— 海底地形変動に関する一考察 —

入 江 功\*・天 坂 三 明\*\*

### 要 旨

荒天時の漂砂現象を連続観測するため、超音波式洗掘計、超音波式漂砂計を試作した。とくに、超音波式洗掘計による海底地形変動の現地観測結果からは、海底地形変動に時定数の概念を入れると、それが波浪特性によりうまく説明できることがわかった。その時定数の存在のため、海底地形変動量は、しけ時の最大波高、周期等のみでは定まらず、しけの期間の長さ、その間の波浪特性の時間的变化により異なることを示した。

---

\* 水工部 主任研究官

\*\* 水工部 漂砂研究室

## On The Continuous Observations of Littoral Drift in The Field

—A Note on the Variation of the Sea Bottom Level—

Isao IRIE\*

Mitsuaki TENSAKA\*\*

### Synopsis

An Ultra-sonic Type Scour Meter to observe the variation of sea bottom level and an Ultra-sonic Type Littoral Drift Meter to observe the rate of sand transport were developed. for the continuous observation of littoral drift in the field.

According to the analytical results of the field data obtained by the Ultra-sonic Type Scour Meter, it was found that the variation of sea bottom level is well explained by the characteristics of waves if the Time Constant on the variation of sea bottom level is considered. It was shown that the variation of sea bottom level depends not only on the maximum wave height, wave period during the storm but also on the duration of the storm and the characteristics of the variation of wave parameters during the storm.

---

\* Senior Research Engineer, Hydraulics Division.

\*\* Member of Littoral Drift Laboratory, Hydraulics Division.

## 目 次

1. 序	57
2. 現地用漂砂観測器械の試作	57
2-1 超音波式洗掘計の試作	57
2-2 超音波式漂砂計の試作	60
3. 観測データの解析と海底地形の変動機構	63
3-1 海底地形変動に関する時定数の概念	64
3-2 波による流れの特性	73
3-3 海底地形変動の平面的特性	77
4. あとがき	78
付 録	80
1. 超音波の減衰, 反射, 散乱について	80
2. 超音波の減衰に関する実験	82
3. 粒径効果とその基礎実験	88
4. 超音波式小型漂砂量計の試作	91

## 1. 序

最近各地の海岸で、急速な海岸侵食が大きな問題となっており、突堤、離岸堤の設置や養浜工等、これに対する対策が急がれている。また、船舶の大型化にともない、航路や港内の維持水深は深くなってきているが、それにともない維持浚渫量も増大する一方である。これらの問題は、すべて波や流れによる漂砂に起因するわけであるが、その機構が明らかにされていないため、対策樹立に際しては、技術者はいつも頭を悩まされるところである。さらにごく最近では、大規模な埋立式工業港の建設や、海洋性レクリエーション基地の開発等があり、漂砂に関する問題はあとを断たない。

漂砂の問題を解明するためには、現地における漂砂現象を、的確に把握することを第一にあげねばならない。漂砂の現地観測法としては、蛍光砂等によるトレーサー調査、深浅測量、浮遊砂調査、流況観測等があげられるであろう。これ等の方法は、対象海岸の漂砂特性を定性的あるいはマクロ的にとらえるのには非常に有効な方法である。しかし、通常行なわれているこれらの大部分の調査方法では、複雑な漂砂現象の「結果」しか見ることができない。すなわち、実際には、台風等が接近し、次第に波が高くなり、やがて波高が最大となり、以後は再び静かになるという海象の変化過程の中で、海底における漂砂現象も異った過程を経ているはずである。この過程を把握できない限り、われわれの漂砂に対する理解は進歩しないのではないと思われる。これを解決するには、荒天時でも漂砂現象を定常観測する装置を開発することである。そのような観測装置は、波力、腐食、温度変化等、厳しい現地での条件に十分耐えるものでなくてはならない。また、海底近くの漂砂現象を観測するには、検知部が、付近の流れや砂の浮遊を乱すものであってはならない。以上のような事実を考察した結果、著者らは、超音波を利用した漂砂観測がきわめて有効であろうという結論に達し、その開発に着手した。本報告は、著者らが開発した超音波式洗掘計および超音波式漂砂計により現地観測を行ない、そのデータ解析により明らかにされた海底地形の変動機構について述べたものである。とくに、海底地形変動に関しては、時定数の存在を指摘し、これによる種々の結果について述べた。また、現地用観測器を開発するまでには、超音波の浮遊砂に対する特性に対する基礎実験を行なったが、この結果を付録のところで述べておいた。

## 2. 現地用漂砂観測器械の試作

超音波は、条件を適当に選択すれば、その減衰を利用して浮遊砂の濃度を測定できる(付録)<sup>1)2)</sup>。また、ドップラー効果を利用して、流速の測定ができる。水中での音波の伝播時間を利用すれば、海底面の変動を測定することもできる。これらの性質を利用すれば、種々の漂砂観測ができるものと思われるが、ここでは、海底面の変動を荒天時においても定常的に観測する超音波式洗掘計、および、浮遊砂濃度とその移動速度を観測する超音波式漂砂計を試作したので、これらについてのべる。

### 2-1 超音波式洗掘計の試作

#### (1) 原理と構造

超音波パルスの同一媒質中の伝播時間は、その伝播距離に比例する。したがって海底に向かって超音波が発射されてから、それが海底面で反射され、それが再び送受波器へもどってくるまでの時間を測定すれば、送受波器と海底面との距離を求めることができる。図-1は、超音波式洗掘計の水中および陸上部の配置図を示したものである。水中ポールには、周波数 400 kHz と 100 kHz の二種類の送受波器、および海水温度測定用のサーミスタが取りつけてある。二種類の周波数を用いたのは、測深諸特性の周波数による相違を調べるためで、サーミスタは、測深値に対する温度の影響をみるためのものである。陸上部本体のブロックダイアグラムは、図-2に示す通りである。図のように、内部は 400 kHz と 100 kHz の送受波超音波用、および温度測定サーミスタ用の三系統の回路よりなっている。同期発生回路を 60 Hz の周波数で作動させ、それより生ずるパルスをパルス発振器に送って 400 kHz または 100 kHz の高周波パルスにする。この高周波パルスは、ケーブルによって海中の超音波送受波器に伝えられて超音波として海中へ発射される。これは海底面で反射され、送受波器を経て再び高周波パルス

表-1 超音波式洗掘計性能表

測定範囲	2.5m ± 1.5cm
測定誤差	静穏時フルスケールで ±3% 以内
表示方法	アナログ表示、6 打点式
記録紙送り速度	3 段切換 (25, 50, 100mm/H)
所要電源	AC 100V 60c/s
使用外気温度	-10°C ~ +40°C
使用定格	連続
超音波周波数	2 段切換 (100KHz, 400KHz)

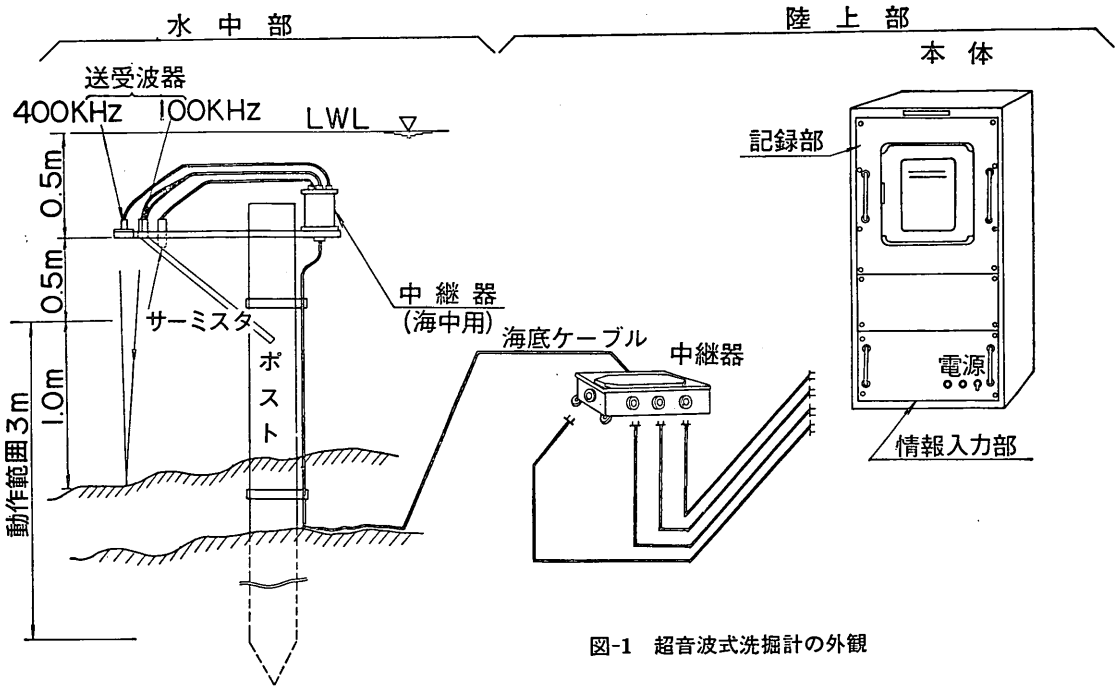


図-1 超音波式洗掘計の外観

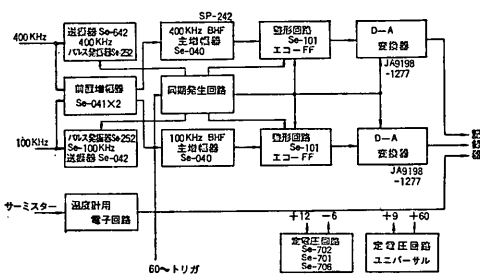


図-2 超音波式洗掘計のブロックダイアグラム

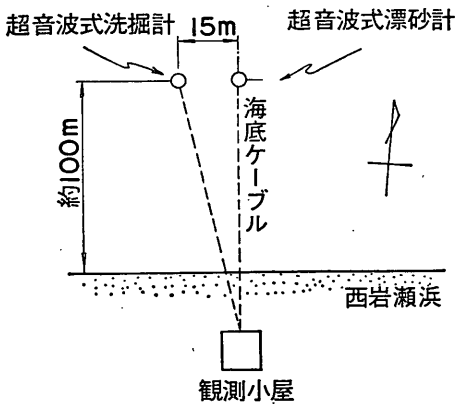


図-3 現地における設置状況

となり、陸上部の前置増幅部および主増幅部で増幅されて整形回路へ送られる。このパルスは、海水中を伝播したため、最初同期発生回路から出されたパルスに比べて

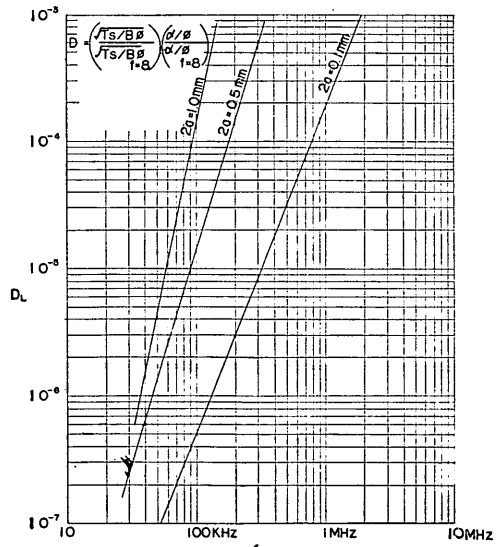


図-4 測深に対する浮遊砂の影響度  $D_L$



漂砂の連続的な現地観測について

位相が遅れている。そこで、これら二つのパルス位相差を整形回路でとらえ、D-A変換器を通じてアナログ量と

して記録する。サーミスターからの海水温度に関する情報は、これらとはまったく別の系統で記録器へ送られる。

(2) 超音波式洗掘計の現地設置と記録例

本装置は、図-3に示すように、超音波式漂砂計の設置位置から約15m東側の地点に設置された。設置時の水深は、約-2mで、海岸から約100m沖である。したが

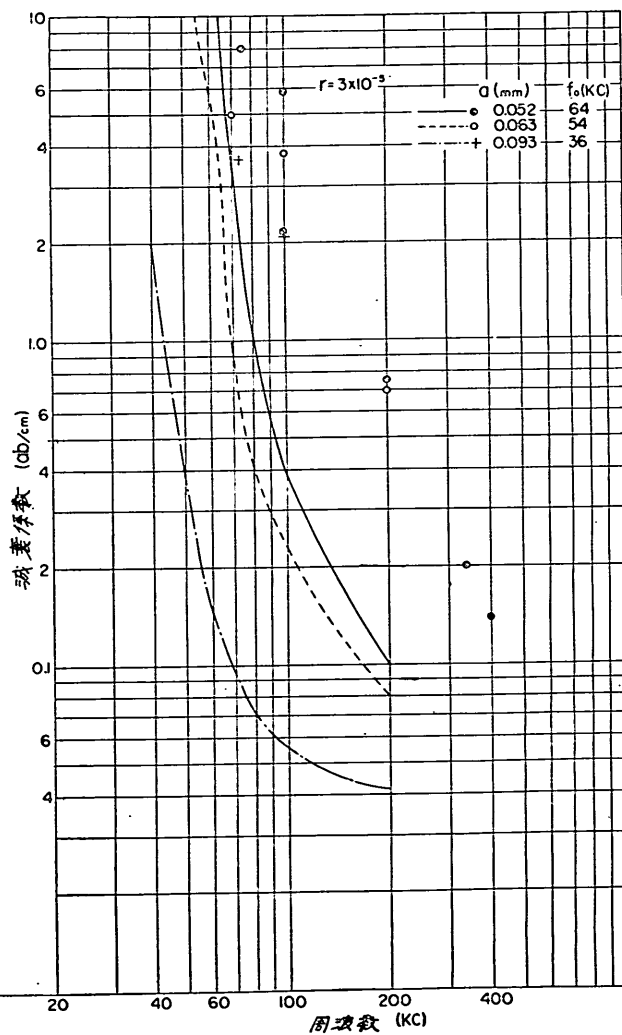
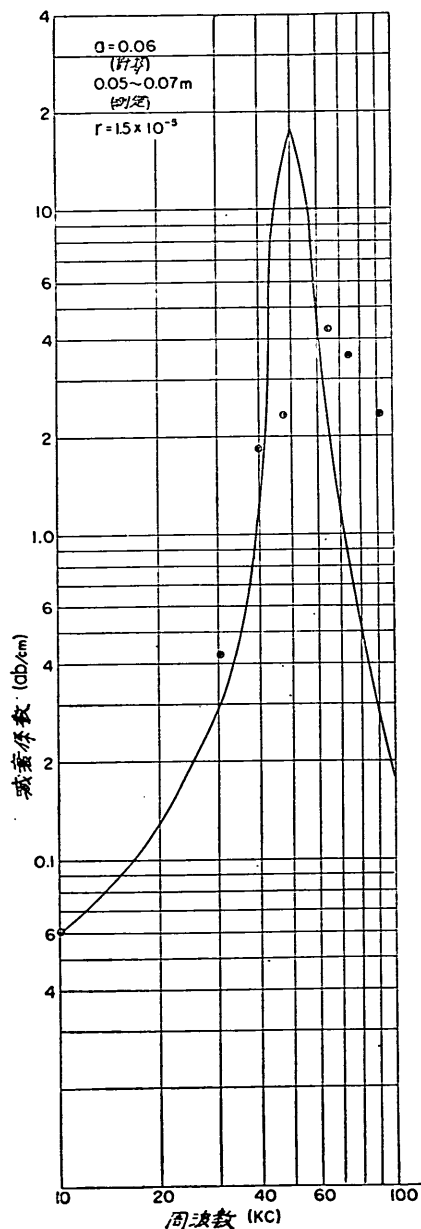


図-5 水深に対する気泡の影響  
 (a : 気泡の半径, 超音波技術便覧より)

って、通常のしけのときには、この地点は砕波帯内に入ることになる。実際の記録例は、超音波式漂砂計の記録例とともに、図-11 に示してある。図で400 kHz の超音波に対する水深の記録は、17日 05 時頃から急にフルスケールに達している。波高がこの頃から急に大きくなっていることから、この水深記録の振り切れの原因としては、砕波による浮遊砂濃度の増大か、あるいは砕波によって生じた気泡が考えられる。浮遊砂による影響は、超音波の浮遊砂による減衰と、超音波の浮遊砂による反射により生ずる。超音波の浮遊砂による減衰は、減衰定数  $\alpha/\phi$  で定まり、また浮遊砂による反射強さは、Target Strength を用いた  $\sqrt{T_s/B\phi}$  によって定められる。(付録)<sup>2)</sup>そこで、たとえば、周波数  $f=8$  MHz のときのこれらの値を基準にして、

$$D_L = \left[ \frac{\sqrt{T_s/B\phi}}{(\sqrt{T_s/B\phi})_{f=8}} \right] \cdot \left[ \frac{\alpha/\phi}{(\alpha/\phi)_{f=8}} \right] \quad (1)$$

を計算すれば、この  $D_L$  は、超音波が浮遊砂により、影響される割合を示し、この値が小さいほど、浮遊砂による影響が少ないことになる。そこで、 $D_L$  と周波数との関係を各粒径に対して示すと、図-4 のようになる。これより、測深に際しての浮遊砂による影響は、超音波の周波数が小さいほど少ないことがわかる。ところが、本回試作した洗掘計は、 $f=100$  kHz と  $f=400$  kHz の二つの周波数を用いたが、 $f=100$  kHz の方が、 $f=400$  kHz に比べてより低い波高のときに振り切れた。これは、図-4 の結果と矛盾するものであり、図-11 の水深記録の振り切れは、他の原因によるものと考えられる。図-5 は、気泡を含む水中を伝播する超音波の減衰<sup>3)</sup>に関する理論と実験値を示したものである。気泡の存在による超音波の減衰は、超音波の周波数が大きくなると、急速に少なくなる。図-4 の振り切れは、周波数の低い  $f=100$  kHz の場合において容易にあらわれたから、この振り切れの原因は、砕波時に水中にまき込まれた気泡によるものと思われる。したがって、超音波式洗掘計用の超音波周波数は、 $f=400$  kHz より大きいものを選ぶべきであることがわかる。しかし、図-4 から、周波数が高いと、浮遊砂による影響が大きくなるので、周波数を上げるにもおのずから限度があることになる。

### 2-2 超音波式漂砂計の試作

#### (1) 流速、浮遊砂濃度の測定

まず、本装置の流速測定の原理について述べる。図-6 のように、送波器 S から B の方へ向かって超音波が発射される場合を考える。超音波は、途中で浮遊している砂

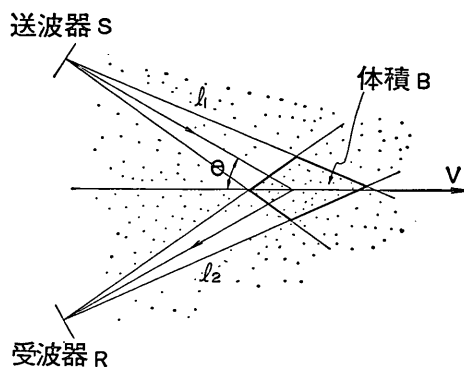


図-6 超音波のドップラー効果を利用した流速測定

により反射散乱しつつ進むわけであるが、もし、図のように指向性のある受波器 R を B の方向へ向けて置いたとすると、B の領域において、BR の方向へ反射された超音波のみが受波されることになる。砂の流速  $v$  は、発射時の超音波周波数  $f$  と受波時の周波数との差  $\Delta f$  がわかれば、ドップラー効果により次式で求まる。

$$v = \frac{C \cdot \Delta f}{2f \cos \theta} \quad (2)$$

表-2 超音波式漂砂計性能表

移動速度	速度範囲	10~500cm/S 流速100cm/S以下±10% 流速100cm/S以上±5%
	測定方向性	直角2方向 3段切換
濃度	砂粒子大きさ	0.1~0.2mmφを対象
	濃精度	反射レベル-40~-60db 範囲 ±20% 3段切換
定格	追従性	0.1~0.2mmφを対象
	粒子の大きさ	
記録紙	使用超音波周波数	約500KHz 1MHz
	送受波器間隔	50cm
電源	入射および反射角	30度
	被測定範囲	約8cm立方体
	送受波器指向幅	1EMHz用 約4度, 500KHz 用約8度
	記録方式	打点式
	記録用出力	電磁オンロに接続
	型紙幅	ER6-10 200mm
	目盛速度	0~10mV DC180mm 25mm/h 50Hz
	送り速度	
電源		AC100V 50Hz

ここに、 $C$ は水中での音速、 $\theta$ は、入射、反射角である。

つぎに、本機構を用いたときの、浮遊砂濃度測定に対する特性については、奥島により<sup>1)</sup>、つぎのように求められている。図-6において、送信器 $S$ を、 $P_S$ の音圧で発射された超音波は、 $l$ なる距離を伝播してゆくにつれ体積濃度 $\phi$ の浮遊砂により減衰を受け、 $B$ に到達したときは音波 $P_{Ei}$ になったとする。この超音波は、 $B$ なる空間に含まれる砂粒子により反射されるわけであるが、それらのうち、 $BR$ の方向へ向かう超音波の音圧を $P'_R$ 、途中で減衰を受けて受波器 $R$ へ到達したときの音圧を $P_R$ とする。浮遊砂による減衰定数を、 $\alpha$ [dB/cm]とすれば、定義により<sup>1)</sup>、

$$20 \log \frac{P_S}{P_{Ei}} = \alpha l \quad \dots\dots(3)$$

$$20 \log \frac{P'_R}{P_R} = \alpha l \quad \dots\dots(4)$$

$B$ の領域の砂粒子による反射の量的表現は、Target Strength(標的の強さ) $T_S$ により、反射波の $B$ の仮想中心から $1\text{ m}$ の点の反射波強度と、 $B$ の領域に入射する超音波強度の比として表わされる。すなわち、

$$T_S = \frac{\frac{P_R'^2}{l^2}}{\frac{P_{Ei}^2}{l^2}}$$

これより

$$P_R' = P_{Ei} \frac{1}{l} \sqrt{T_S} \quad \dots\dots(5)$$

したがって

$$20 \log \frac{P_R'}{P_{Ei}} = 20 \log \sqrt{T_S} - 20 \log l \quad \dots\dots(6)$$

(3)、(4)、(6)より

$$\begin{aligned} 20 \log \frac{P_R}{P_S} &= -20 \log l - 2\alpha l + 20 \log \sqrt{T_S} \\ &= -20 \log l - 2\alpha l + 20 \log \sqrt{\frac{T_S}{B\phi}} \\ &\quad + 20 \log \sqrt{B} + 20 \log \sqrt{\phi} \\ &= A + D \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

とおき

$$A = -20 \log l + 20 \log \sqrt{B} \quad \dots\dots(8)$$

$$D = -2\alpha l + 20 \log \sqrt{\frac{T_S}{B\phi}} + 20 \log \sqrt{\phi} \quad (9)$$

とすれば、 $A$ は送受器の配置、超音波の周波数が与えら

れば定まるもので、浮遊砂濃度には関係しないが、 $D$ は、浮遊砂濃度、粒径に直接関係するものである。したがって、ドップラー方式による浮遊砂濃度測定に関する特性を調べるには、 $D$ の値の諸条件に対する特性を調べればよいことになる。ここで、 $l=50\text{ cm}$ 、 $B=10^3\text{ cm}^3$ と仮定し、さらに $\phi=0.1, 0.03, 0.01, 0.003$ と与えて、(9)式の $D$ の代りに、

$$D' = -2\alpha l + 20 \log \sqrt{\frac{T_S}{B\phi}} \quad \dots\dots(10)$$

としたときの種々の浮遊砂粒径に対する特性について計算された結果を図-7(1)、(2)、(3)、(4)に示す。これらの図から、ターゲット(標的)までの伝播距離 $l$ が一定のときは、濃度が小さいとき( $\phi$ が小さいとき)は、受波の音波レベルは、浮遊砂による反射によってほとんど決まるが、濃度が増大するにつれ、伝播減衰が大きく影響するようになる。

以上のように、本機構により受波される超音波の強度は、浮遊砂による反射能、減衰により定まるが、それらの影響する割合は、浮遊砂の濃度、粒径により複雑に変化する。したがって、浮遊砂濃度を測定するには、二つの異った周波数の超音波を用いる必要がある。これにより、浮遊砂の反射、減衰に関する二つの異った情報を得れば、粒径効果をなくした濃度測定が可能となる。

## (2) 超音波式漂砂計

本装置のブロックダイアグラムを図-8に示す。海中局として、送受波器、情報入力部があり、陸上局として、情報処理部、及び記録器があって両者を海中ケーブルで接続している。図で $U$ 方向が $500\text{ kHz}$ 、 $V$ 方向が $1\text{ MHz}$ を使用している。その動作原理の概要を述べると、情報入力部送信器で送波器を駆動し、超音波信号を測定範囲に向けて発射し、その反射波を受波器で受け、電気信号に変換して情報入力部へ送る。情報入力部では、受波器からの電気信号を増幅し、インピーダンス変換してケーブルにて陸上局の情報処理部へ送る。陸上局では、情報入力部からの電気信号を増幅し、一定レベルにした後に混合回路にて発振周波数との差を取り出し、砂の移動速度に比例したドップラー変位周波数を取り出して、流速出力として記録器へ送る。同時に、受波周波数と発振周波数との大小を比較して、流向を表示する。また、増幅器からの出力を直流に変換し、濃度の出力として、記録器に送る。

超音波式漂砂計の実際の外観は図-9のようである。水深約 $-2\text{ m}$ の海底に鉛管を立て、海底面上約 $50\text{ cm}$ 高さの位置に、2対の送受波器を取り付けた。この漂砂計の

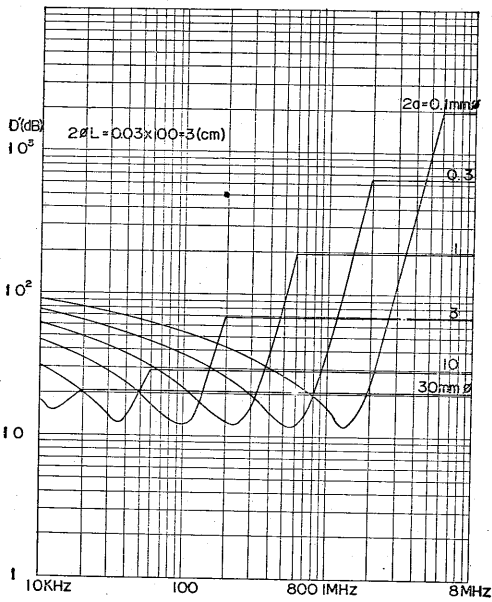
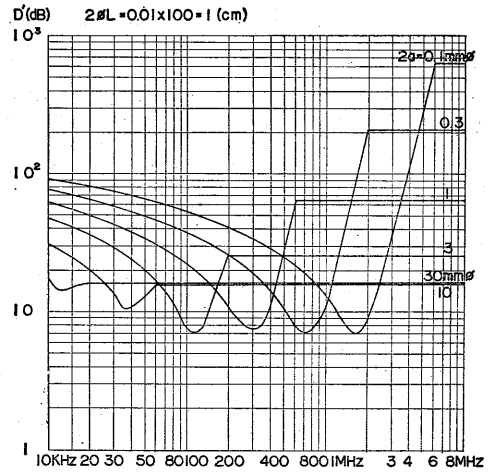
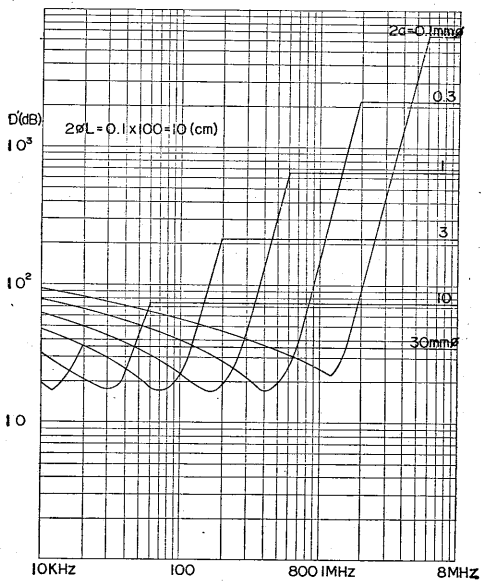


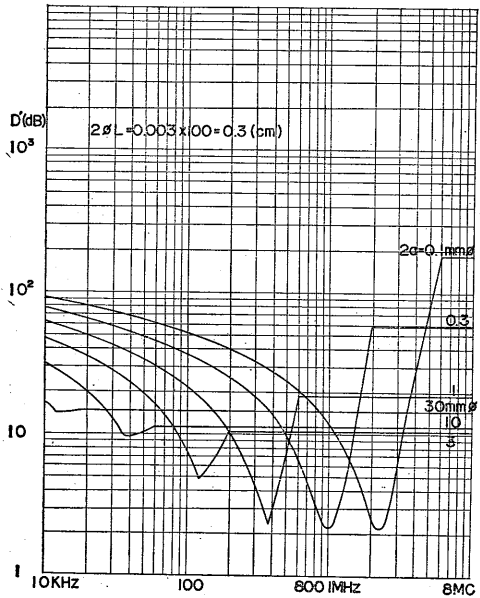
図-7(1) ドップラー方式による受波の減衰  $\phi=0.1$  (奥島による)



(3) ドップラー方式による受波の減衰  $\phi=0.01$  (奥島による)



(2) ドップラー方式による受波の減衰  $\phi=0.03$  (奥島による)



(4) ドップラー方式による受波の減衰  $\phi=0.003$  (奥島による)

漂砂の連続的な現地観測について

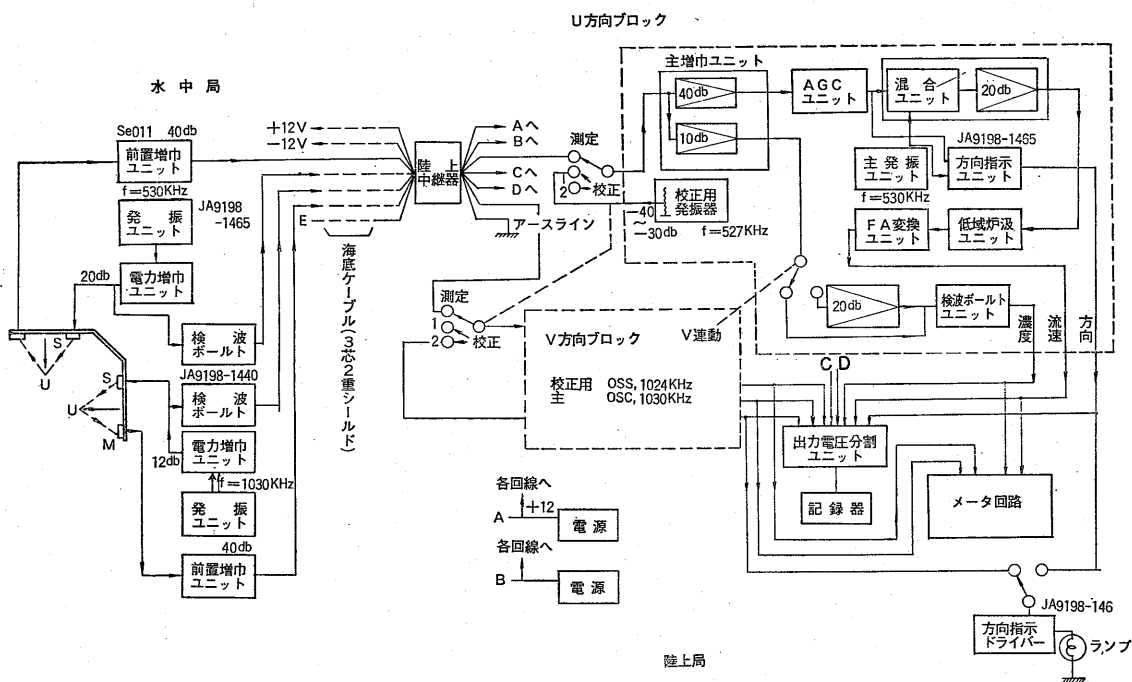


図-8 超音波式漂砂計のブロックダイヤ

現地での設置方向は、図-10 のようである。U方向は、ほぼ海岸線に平行であり、V方向は直角方行なので、前者は沿岸流速、後者は離岸流を測定することになる。情報出力の記録は、打点式記録器により、時定数30secで記録した。図-11は、本装置による記録例である。流速U、Vおよび濃度2成分(500kHz、1MHz)は、最下線を零位として表示され、UVの流向は図-10の符号に従って、記録紙上方にある⊕⊖線の上にプロットされる。図に例示したのは、昭和44年11月17日の記録であるが、11月17日午前05時頃から西向き沿岸流⊖U、および岸向きの向岸流⊖Vの流速が増大している。濃度の記録は、500kHzの場合U、Vが増大しているにもかかわらず、05時頃から急に減少しているが、これは、さきに述べたように、ドップラー方式による濃度測定においては、浮遊砂濃度によって、受波される超音波の減衰機構が異なるためと思われる。浮遊砂濃度が低いときは、受波の強さは砂粒子の反射によって定まっているが、濃度が高くなるにつれ、超音波伝播中の砂粒子による減衰により支配されるようになる。このため、図-11に見られるように、浮遊砂濃度がある程度以上になったときに、逆に濃度の出力が減少することもあり得る。しかし、二種類の周波

数の超音波による濃度出力を用いれば、浮遊砂濃度は、一意的に定まる。今回の現地テストでは、0.5MHzと1MHzを用いたが、0.5MHzの濃度出力が容易にスケールアウトしたこと、および、検知部に急速に貝類が付着したことなどのため、浮遊砂濃度に関する十分信頼できる情報は得ることができず、砂移動速度のみを観測するにとどまった。このように、浮遊砂濃度等をアナログ的に観測する装置に対する貝類付着に対しては、今後検討する必要がある。

3. 観測データの解析と海底地形の変動機構

今回試作した超音波式洗掘計および超音波式漂砂計は、富山湾西岩瀬海岸のほぼ同じ場所に設置された。観測は、昭和44年11月から12月にかけて、ほぼ2カ月にわたって行われ、沿岸流や海底地形変動に関する時間連続的なデータが測得された。超音波式洗掘計による観測結果からは、海底地形変動に関しては、通常の計測器学における同じ意味での時定数が存在し、これが海底地形の変動をみる上に非常に重要であることが明らかになった。超音波式漂砂計は、浮遊砂濃度の測定はできず、波による流れのみが観測できた。しかし、この流れの記録

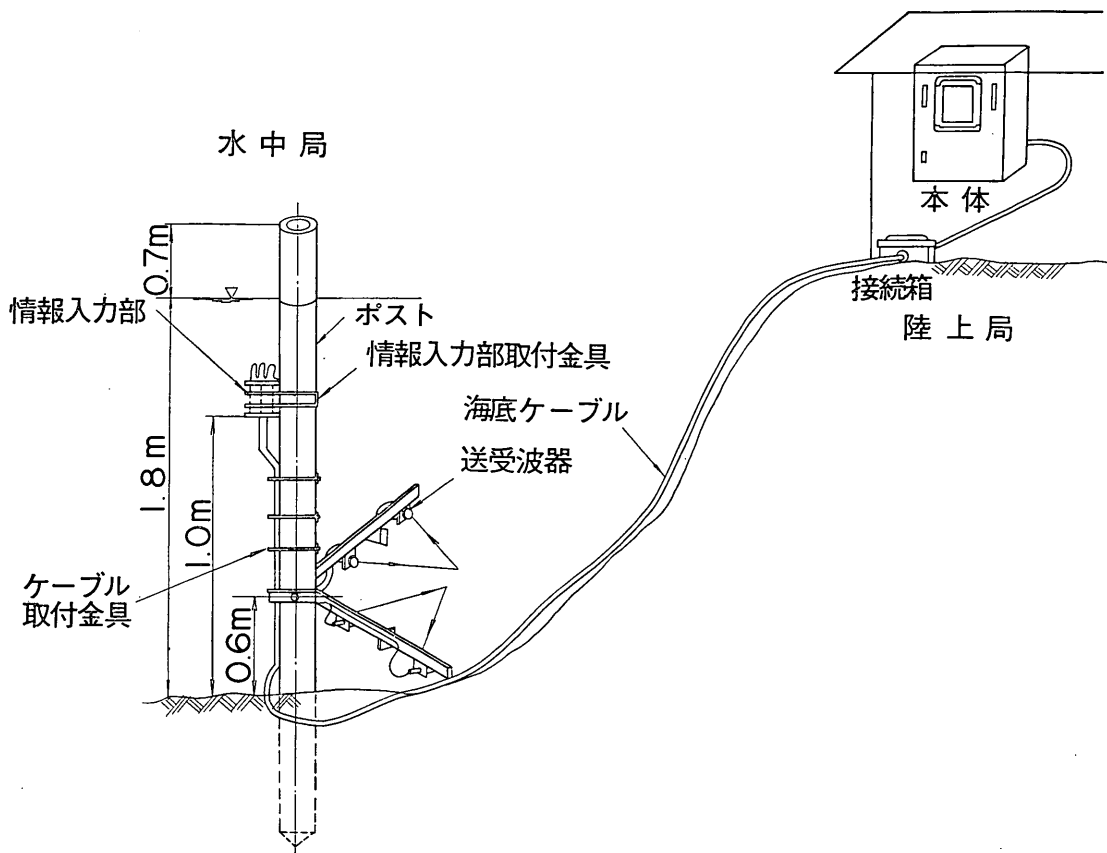


図-9 漂砂計の外観

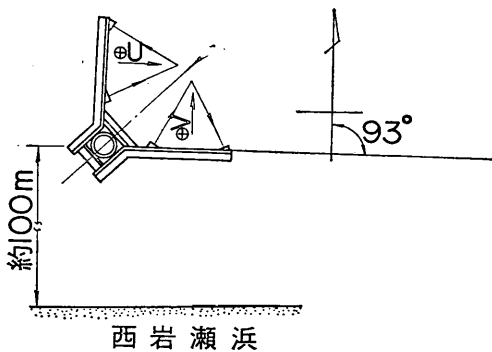


図-10 現地での設置状況

と、ささの海底地形変動の記録から、海底地形の変動機構について、いくつかの事実を明らかにすることができた。以下、これらについて述べる。

### 3-1 海底地形変動に関する時定数の概念

#### (1) 海底地形変動に関する諸量

海底地形変動に関する諸量としては、波浪特性、潮位、海底地形の初期条件等があげられる。波浪特性のうち、波向きは、海底地形変動に重要な要素であると思われるが、超音波洗掘計による観測期間中には、波向きは観測されなかった。そこで、風向と波向きとは、密接な関係があると思われたので、ここでは風速成分について、かなり細かい取扱いをした。図-13のように、方位角  $\theta$  で吹く風に対し、その N-S, NE-SW, E-W, SE-NW 方向の風速成分を考える。図中の方向を表わす番号を  $I$  とすれば、 $I$  方向の風速成分は、風速計記録値を  $v$  として

$$U_I = v \cos \left\{ \frac{\pi}{4}(I-1) - \theta \right\} \quad (11)$$

で表わされる。風速成分を考える方向が  $180^\circ$  回転する

漂砂の連続的な現地観測について

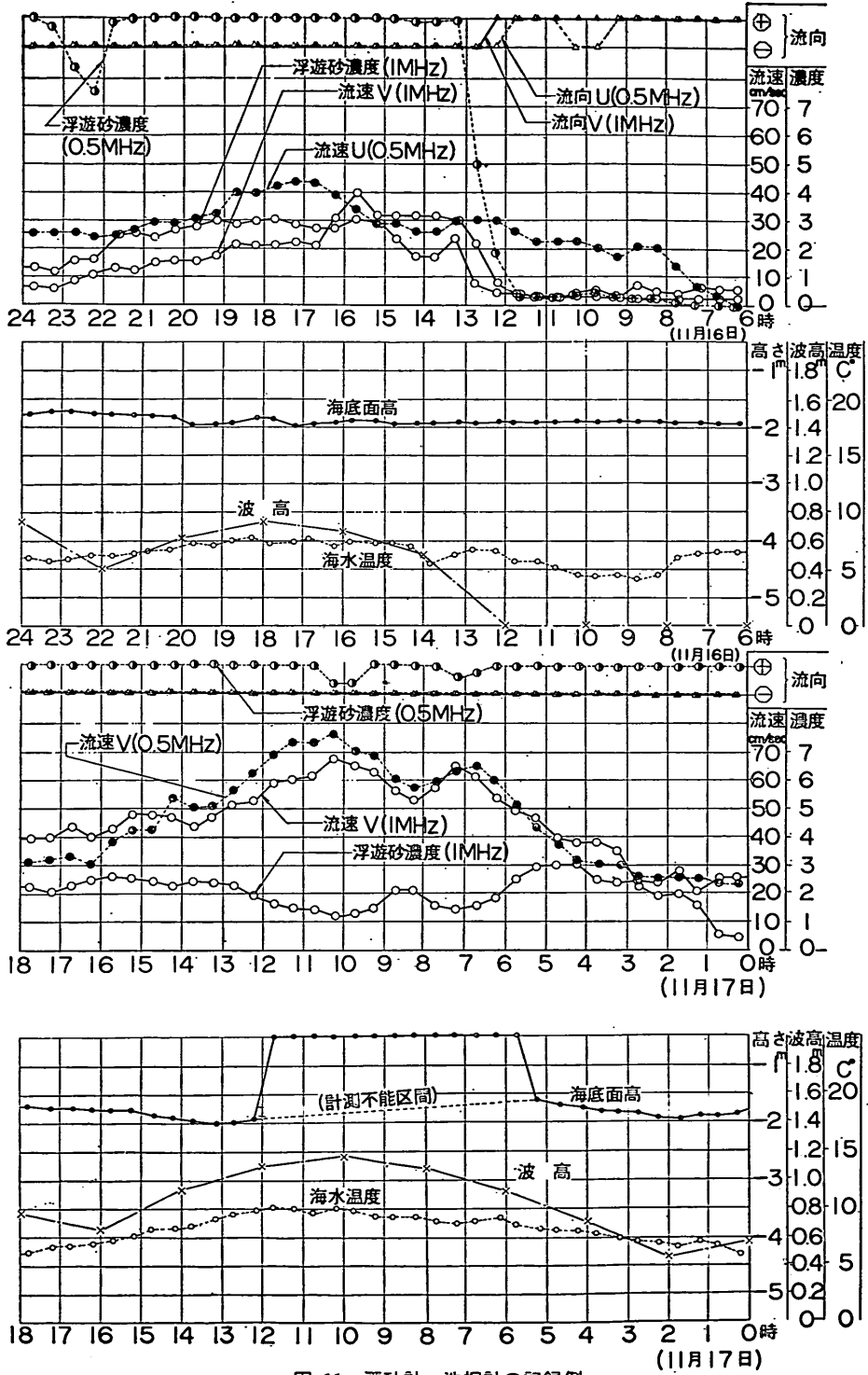


図-11 漂砂計，洗掘計の記録例

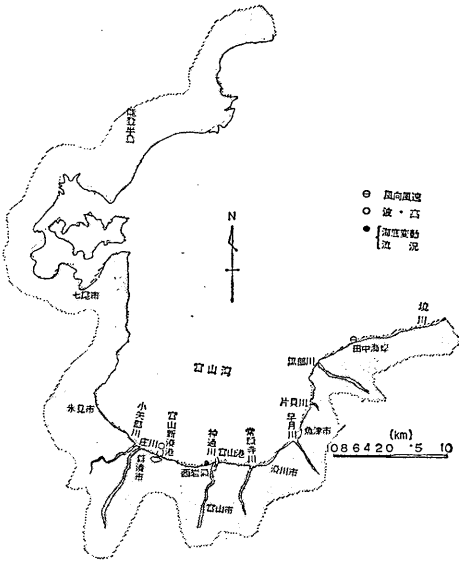


図-12 観測地点の配置

と、(11)式の符号が変わるだけであるから、考えねばならぬのは、4方向、すなわち、1-5、2-6、3-7、4-8の風速成分  $U_{15}$ 、 $U_{26}$ 、 $U_{37}$ 、 $U_{48}$  だけである。

海底地形変動に関する諸量は、結局つぎのようになる。

波高	$H_0$
周期	$T$
潮汐	$e$
波形勾配	$H_0/L_0$
波のエネルギー	$E = \frac{1}{16} w_0 \frac{g}{2\pi} H_0^2 T$
	$w_0 = 1t/m^3, g = 9.8m/sec^2$

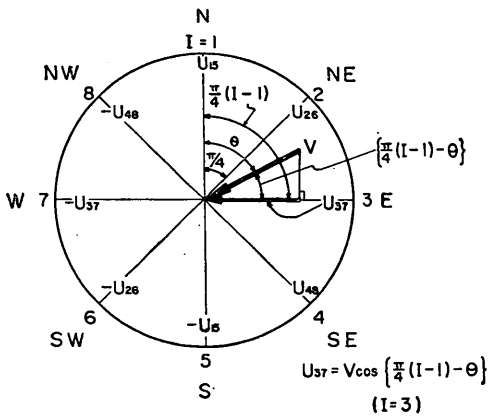


図-13 風速ベクトルの取扱い

$$\begin{aligned}
 \text{風速 N-S} & U_{15} = v \cos \theta \\
 \text{// NE-SW} & U_{26} = v \cos \left( \frac{\pi}{4} - \theta \right) \\
 \text{// E-W} & U_{37} = v \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \\
 \text{風速 SE-NW} & U_{48} = v \cos \left( \frac{3}{4} \pi - \theta \right) \\
 \text{初期水深} & h_0
 \end{aligned}$$

そこで、これらの諸量と海底変動率  $\Delta h$  との相関を調べるため、両者の共分散を計算する。 $X$ と $Y$ との共分散  $v_{XY}$  は、

$$v_{XY} = \overline{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})} \quad (21)$$

で表わされる。以下、電子計算機による解析を容易ならしめるため、上記諸量を、平均値が零、標準偏差が1となるよう次式によって正規化した。

$$X \text{ の正規数} = \frac{X - \bar{X}}{\sigma_X} \quad (13)$$

$$Y \text{ の } \text{ // } = \frac{Y - \bar{Y}}{\sigma_Y} \quad (14)$$

ここに

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{N}{N-1}} \cdot S_X, \quad \sigma_Y = \sqrt{\frac{N}{N-1}} \cdot S_Y$$

$n$  はデータ数で、

$$S_X = \sqrt{\overline{(X - \bar{X})^2}}, \quad S_Y = \sqrt{\overline{(Y - \bar{Y})^2}}$$

である。 $X$ 、 $Y$ が正規化された場合は、 $S_X = S_Y = 1$  となるから、共分散  $v_{XY}$  は、相関係数とも等しくなる。すなわち

$$\text{相関係数 } r_{XY} = \frac{v_{XY}}{S_X S_Y} = v_{XY} \quad (15)$$

波、潮位、風の資料としては、図-12 に示したように、沿岸流の観測をおこなった西岩瀬海岸に近い所での観測値を用いた。波の観測は富山新港沖 -11mの地点、潮位は富山港、風は田中海岸にてそれぞれ観測された2時間毎のデータを使用した。海岸に作用する波と風との間には、Time lag があることに注意する必要がある。図-14は、富山新港で観測された波高と田中海岸での風速との相互相関係数を示したものである。図によると、Time lag が18時間のところにピークがある。これは、この海岸では風が強くなっては18時間後に波高も大きくなることを示すものである。そこで、この解析では、風速、風



標砂の連続的な現地観測について

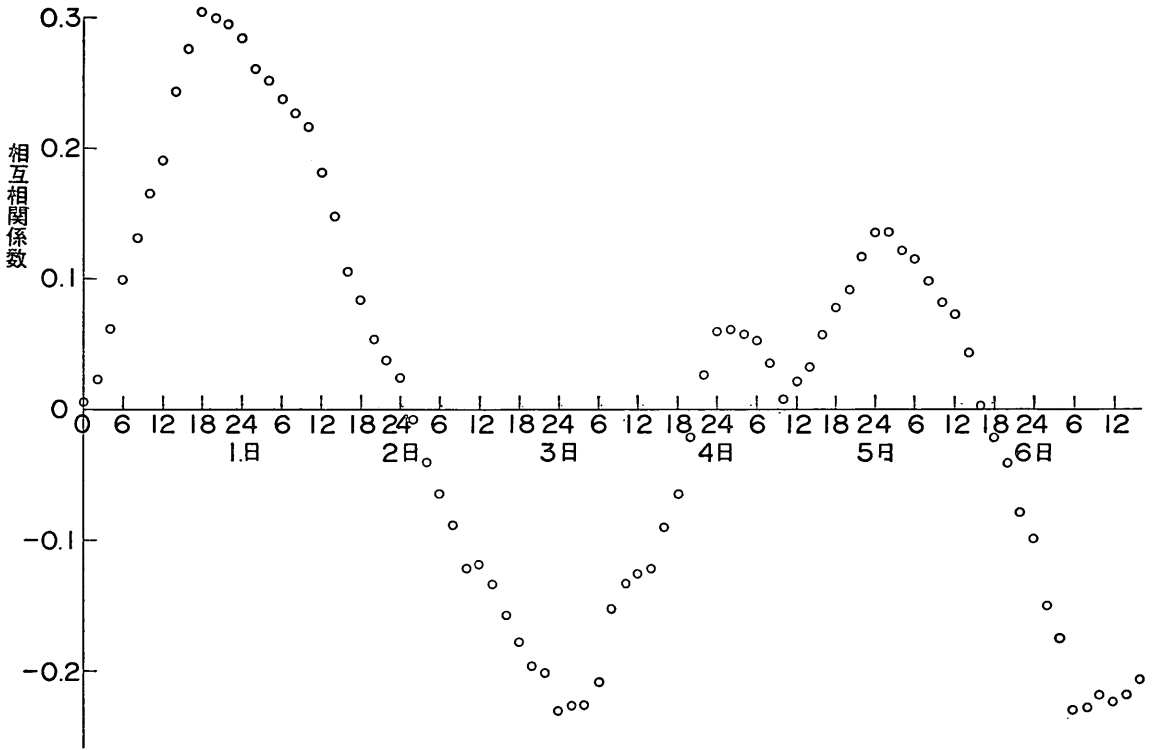


図-14 田中海岸での風速と富山新港での波高との相互相関

向のデータは、波のデータより18時間だけ前のものを用いることにした。海底変動率  $\Delta h$  としては、2時間毎に、前後1時間あたりの海底変動量をとった。観測期間は、昭和44年11月16日～12月31日まで、データ数  $N=552$  であった。表-3は、各要素間の共分散を計算した結果である。この標本相関係数  $r$  から、母相関係数  $\rho$  を、標本数  $N=552$  とし、信頼限界95%として海底変動率  $\Delta h$  と相関の大きいものから順に並べると、つぎのようになる<sup>4)</sup>。

風	NE $U_{26}$	0.018	-0.5~0.8
初期水深	$h_0$	0.001	-0.6~0.8

これより、海底変動率  $\Delta h$  に相関が大きいのは、当然のことながら、波に関する諸量である。なかでも波形勾配  $H_0/L_0$  が最も大きい。とは言っても、相関係数は、高々1.8であり、海底地形変動に関する主要因というには弱いようである。この理由の1つとして、海底地形変動の外力(波、流れなど)に対する応答速度が遅いことが考えら

標本相関係数 $r$	母相関係数 $\rho$ (信頼限界 95%)	
波形勾配 $H_0/L_0$	0.114	0.4~1.8
波高 $H_0$	0.108	0.3~1.8
波のエネルギー $E$	0.073	0~1.4
風 NW $U_{45}$	-0.069	0~-1.4
潮位 $e$	0.068	0~1.4
周期 $T$	-0.063	0~1.4
風 N $U_{15}$	0.053	-0.2~1.3
風 W $U_{37}$	-0.034	0.3~-1.0

表-3 海底変動率に関する諸量の共分散

	$H_0$	$T$	$h_0$	$e$	$H_0/L_0$	$E$	$U_{15}$	$U_{26}$	$U_{27}$	$U_{37}$	$\Delta h$
$H_0$	1.000										
$T$	0.003	1.000									
$h_0$	-0.269	0.170	1.000								
$e$	0.031	0.164	0.133	1.000							
$H_0/L_0$	0.754	0.492	0.332	0.022	1.000						
$E$	0.933	0.138	0.227	0.039	0.572	1.000					
$U_{15}$	0.164	0.273	0.211	-0.036	0.314	0.117	1.000				
$U_{26}$	0.122	0.291	0.216	0.124	0.305	0.053	0.823	1.000			
$U_{27}$	0.012	0.169	0.119	-0.097	0.145	0.010	0.206	0.726	1.000		
$U_{37}$	-0.132	0.116	0.097	0.013	-0.166	-0.094	-0.716	-0.192	0.536	1.000	
$\Delta h$	0.106	0.063	0.001	0.068	0.114	0.073	0.053	0.018	0.234	-0.069	1.000

れる。もしそうであれば、表-3のような解析を行なっても、外力との間に高い相関が得られないであろう。しかし、表-3から、海底地形変動に最も相関が強いのは、波形勾配  $H_0/L_0$  であると考えられることができるようである。

(2) 海底地形変動特性の解析

海底地形変動と外力との関係を考えるとき、外力が作用する前の水深  $h_0$  は、やはり重要な要素だと考えられる。表-3において、初期水深  $h_0$  と海底変動率  $\Delta h$  との相関は最下位であったが、波に関する諸量以外の要素と  $\Delta h$  との相関係数が非常に低いこと、海底地形変動の外力に対する応答特性が特異である可能性があることを考えて、ここでは、別の解析を行なってみる。Thompson<sup>5)</sup> らは、米国カリフォルニア州モントレー海岸の砂浜にレーンを立てて1太陰時毎に海底面高を測定して、波形勾配、波のエネルギーおよび初期水深との関係を解析し、海底地形変動の説明を巧妙に行なった。先の相関分析によれば、海底変動率に対する相関は、波のエネルギーに比べて波形勾配の方がはるかに高かった。そこで、ここでは、波形勾配  $H_0/L_0$  を外力とし、初期水深  $h_0$  と海底変動率  $\Delta h$  との関係を、Thompsonの場合よりやや詳細に分析してみる。解析データとしてつぎのような値をとった。

$\overline{H_0/L_0}$ : 時刻  $t_i$  から、24時間後までの波形勾配の平均値

$h_0$ : 時刻  $t_i$  における水深

$\Delta h$ : 時刻  $t_i$  における水深と、それより24時間後の水深との差

時刻  $t_i$  の変化は、12時間毎とした。波形勾配  $\overline{H_0/L_0}$ 、海底変動率  $\Delta h$  を、24時間ごとに計算した理由は、後に示す図-16の海底地形変動の推定において、この時間ごとに計算した方が最も誤差を少なくすること分できたからである。こうしてとった値を解析して、初期水深  $h_0$  と波形勾配  $\overline{H_0/L_0}$  との関係を、海底変動率  $\Delta h$  をパラメータとして最小二乗法による回帰曲線であらわすわけであるが、近似曲線としては、Thompsonが1次直線を用いたのに対し、今回は、2次放物線を用いることにした。すなわち、

$$\Delta h = X, \log(\overline{H_0/L_0}) = U, h_0 = V$$

としたとき、2次曲線が

$$Y = a + bU + cV + dU^2 + eUV + fV^2 \dots\dots(16)$$

で表わされるとすれば、これらの係数は、最小二乗法によって得られる次元により求められる。

$$\begin{matrix} \left[ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} \right] \begin{matrix} N & SU & SV & SU^2 & SUV & SV^2 \\ SU & SU^2 & SUV & SU^3 & SU^2V & SU^2V^2 \\ SV & SUV & SV^2 & SU^2V & SUV^2 & SV^3 \\ SU^2 & SU^3 & SU^2V & SU^4 & SU^3V & SU^2V^2 \\ SUV & SU^2V & SUV^2 & SU^3V & SU^2V^2 & SUV^3 \\ SV^2 & SUV^2 & SV^3 & SU^2V^2 & SUV^3 & SV^4 \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} SX \\ SUX \\ SVX \\ SU^2X \\ SUVX \\ SV^2X \end{matrix} \right] \dots\dots(17)$$

ただし  $N$  は標本数、 $S$  は  $\Sigma$ (シグマ) と同じ意味を持つもので、 $Y$  が  $X$  の推定値に相当する。この計算結果は、 $Y = -0.441U + 0.116V + 0.179U^2 + 0.057UV - 0.021V^2$  となりこれを図示したのが、図-15である。図中には、 $\Delta h = X$  の実測値も同時にプロットしてあるが、 $Y=0$  の曲線により、 $X$  の値の符号が変わっているのがわかる。この図によれば、一般に、初期水深  $h_0$  が浅いと、海底が洗掘される傾向があり、深いと推積される傾向があり、また、波形勾配  $\overline{H_0/L_0}$  が大きくなると、むしろ堆積される傾向にあることがわかる。各波形勾配に対して  $Y=0$  の曲線が与える水深  $h_0$  は、もし、水深がその値になればもはや変化しないという平衡水深に相当する。もし、水深が、この平衡水深より浅ければ、図-15のその

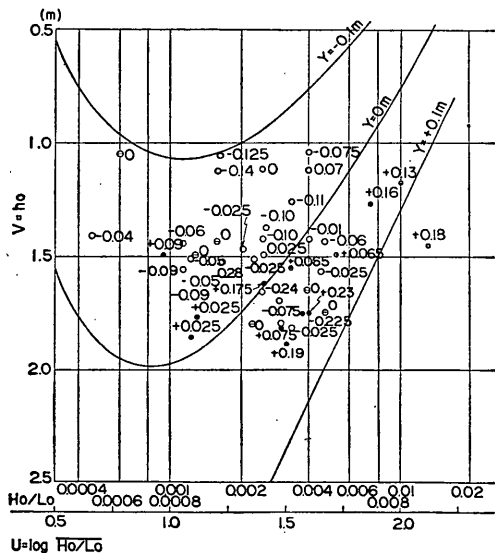


図-15 最小二乗法により求めた海底地形変動の特性

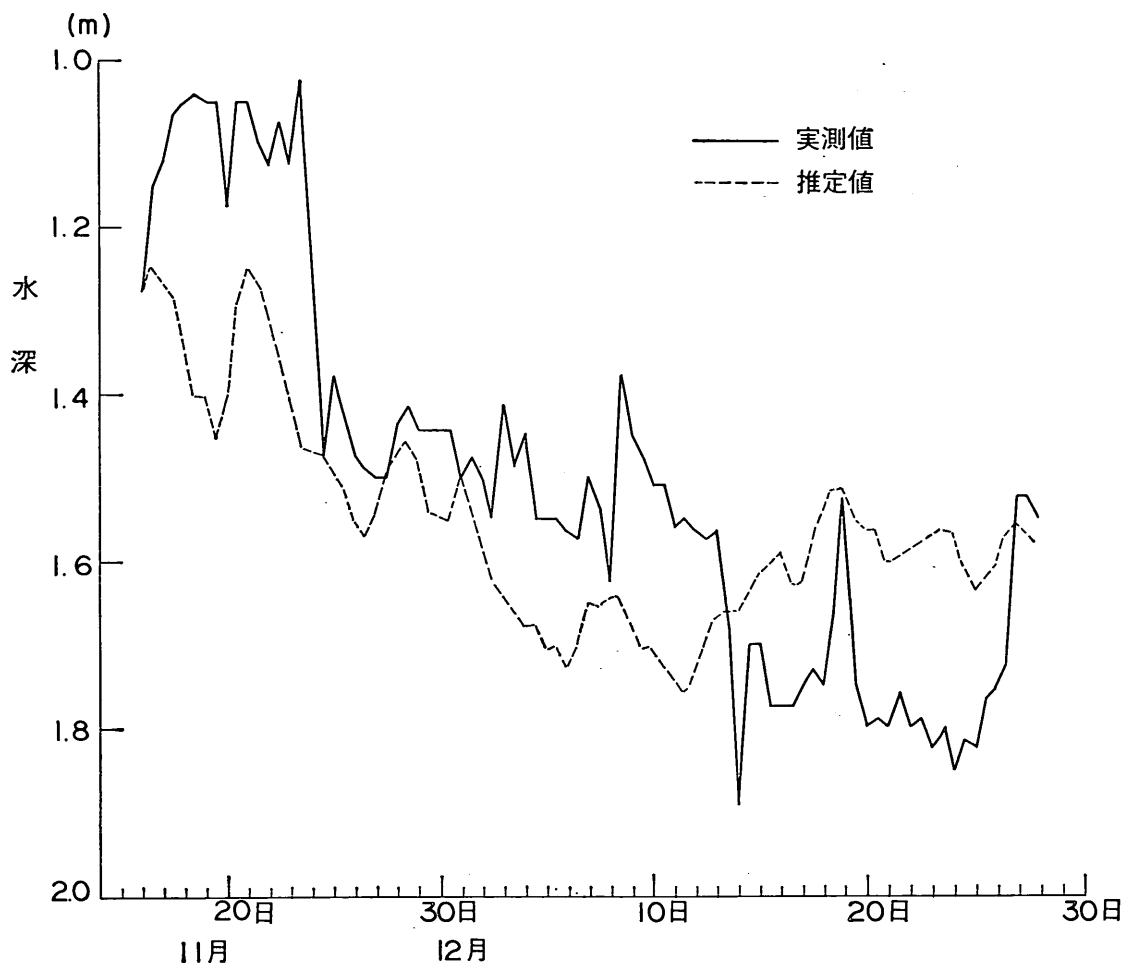


図-16 海底地形変動の推定値と実測値の比較

水深位置における $Y$ の値だけ、つぎの24時間以内に洗掘されると考えることができ、その逆の場合も同様である。この方法を用いれば、ある時刻における初期水深 $h_0$ と、それ以後における24時間毎の波形勾配 $\overline{H_0/L}$ を計算することにより、水深の時間的変化を追跡できる。このようにして追跡した海底地形変動と、その実測値を示したのが図-16である。このように、実際の海底地形変動は、波形勾配のみでは説明できないところも多分にあるが、全体的な傾向は、両者の間ではほぼ一致している。自然海浜は、作用する外力の特性によって、堆積、欠壊をくり返しているわけであるが、図-15は、そのような海浜変形の動的特性を示したものである。

(3) 海底地形変動の応答特性

計測器等の電気的応答特性を調べるには、非常に単純な特性の電気的パルスを与え、そのときの応答を調べることがよく行われる。ここでも、ある波形勾配の波を長時間作用させて平衡海浜をつくり、つぎに、異なる波形勾配の波を作用させ、海浜の変動過程を調べることにより、海底地形変動の応答特性について調べてみる。

まず、現地データにもとづく図-15を用いて、ある平衡状態から波形勾配が急に変化したときの海底地形変動を、いくつかの波形勾配に対して追跡すると、図-17のようになる。外力たる波形勾配が変化した直後は、海底地形変動率が非常に大きいですが、時間がたつにつれて減少し、やがては新しい水深にて平衡状態に達する。これらの変化は、通常の計測器、温度計等によく見られるもの

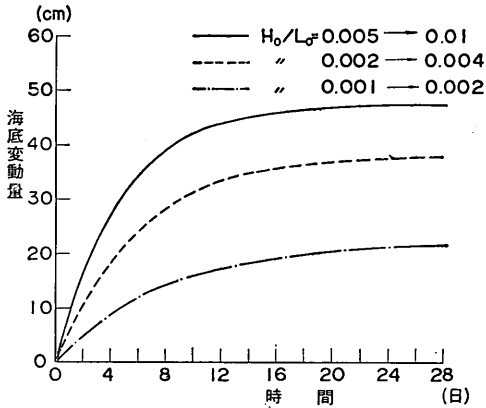


図-17 波形勾配が急に変化したときの海底地形変動の応答 (現地)

である。もし、海底地形変動がそれらと同様の性質をもっているものとするれば計測器学における時定数 (Time Constant) の概念をそのまま適用できる。時定数とは、外力が変化した瞬間から平衡状態に達するまで変化する総量の0.632倍だけ変化した時までの時間をいう。図-17によれば、現地における海底変動の時定数は、4~6日程で、水深に比して波高が小さい場合ほど時定数が長くなっているが、これは図-17において、波形勾配が小さいほど(波高が小さいほど)放物線の間かくが広がっているからである。これは、水深約-2mの地点における時定数であるが、水深と時定数との関係はどうであろうか。これを模型実験により調べてみた。まず、中央粒径0.22mmの砂でできた初期勾配1/10の模型浜に、波高 $H_0=10$ m、周期 $T=2.5$ sec、波形勾配 $H_0/L_0=0.01$ の波を長時間作用させて平衡勾配をつくった。つぎに、波高

$H_0=10$ cm、周期 $T=1.5$ sec、波形勾配 $H_0/L_0=0.03$ の波を作用させて、各水深における海底地形変動を調べた。結果は図-18(1)、(2)のようになり、その変動特性、図-17とよく似ていることがわかる。そこで、この結果から、先の定義に従って時定数を求め、水深との関係をプロットすると図-19のようになる。これによると、海底変動の時定数は、砕波帯内と沖浜帯とは非常にちがっており、沖浜帯におけるそれがはるかに大きいことがわかる。さきの現地観測地点は、水深-2mであったが、この観測期間中は、むしろ沖浜帯と考えられた。したがって、観測により得られた4~6日という時定数は、沖浜帯の長い方に属し、砕波帯内では、もっと短いものと思われる。Thompsonの観測によれば、砕波帯内では、時定数20~24時間が得られている。

(4) 海底地形変動のモデル化とその特性

海底地形の変動は、温度計や通常の電気的計測器等の指示値の変化と特性が非常に似ており、その時定数は数日かかることがわかった。ここでは、この変動特性を単純な式で表わし、海底地形変動の応答特性について、いまま少し調べてみる。図-17の現地海底変動の応答曲線によれば、時定数は、一定水深の下においてもある程度変化した。しかし、ここでは、考察を容易にするため、水深が変われば時定数は変化するとしても、一定の水深の下では変わらないと仮定する。

まず、図-20のように、外力 $F_0$ (波形勾配等)に対して、水深が $h_0$ で平衡状態に達していたとする。0点において、外力は急に $F_0$ から $F_1$ に変化すれば、それにもなって、水深も変化する。すなわち、外力が、A O B Cと変化したとき、水深は、 $h_0$ から、 $\widehat{OE}$ と変化しやが

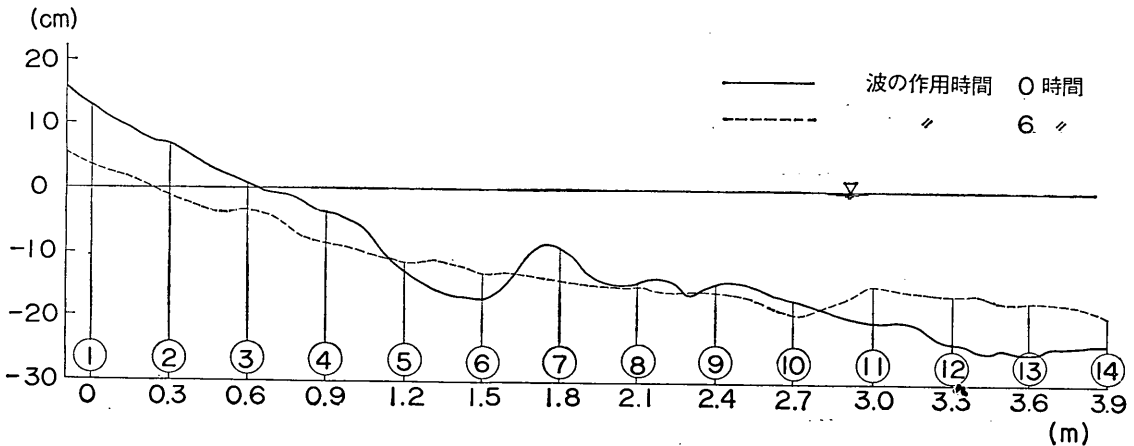


図-18 (1) 断面の変化

て、 $\Delta h_f$  だけ変化して、外力  $F_1$  の下で新しい平衡状態に入るであろう。ここで、以後の式を簡単にするため、

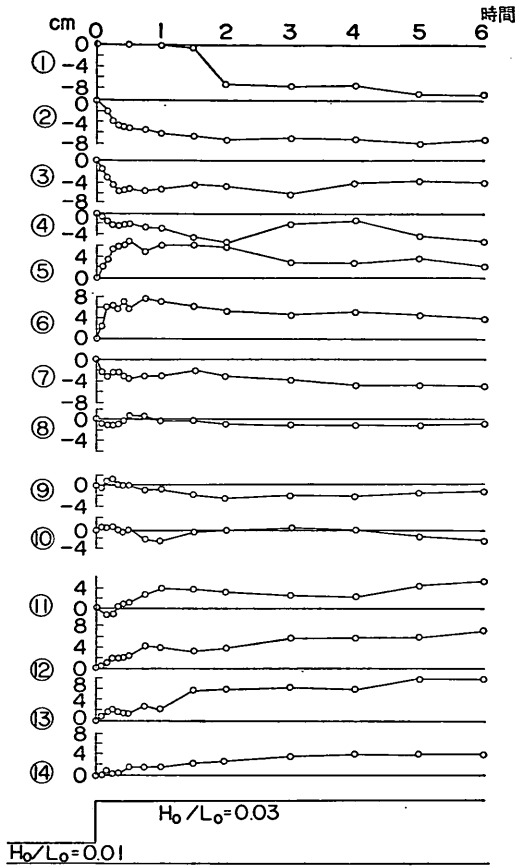


図-18 (2) 波形勾配が急に变化したときの海底地形変動の応答 (模型実験)

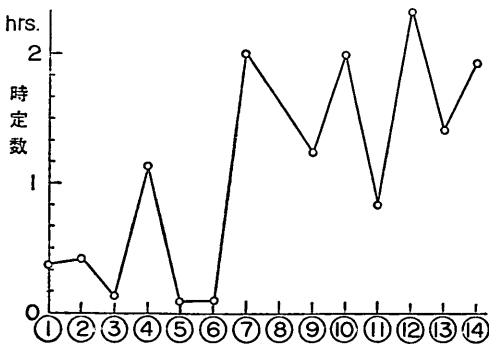


図-19 海底地形変動の時定数の海浜断面のに沿う変化

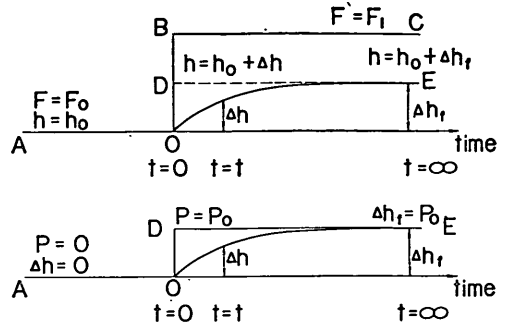


図-20 外力の変化に対する海底面の応答

外力の変化幅と水深の変化幅が等しくなるように、

$$P = (F - F_0) \cdot \left( \frac{\Delta h_f}{F_1 - F_0} \right) \quad (18)$$

として、 $P$  を外力として取扱うことにする。そうすれば図-20 の下に示したように、 $t < 0$  では外力

$$P = 0, \quad h - h_0 = \Delta h = 0$$

であったが、 $t = 0$  にて急に  $P$  だけ変化し、それにとまって海底面は、 $\widehat{OE}$  と変化する。平衡水深  $\Delta h_f$  と外力  $P$  の値とは等しい。初期水深と波形勾配の関係を、海底変動量をパラメーターにして示した図-15 によれば、与えられた波形勾配に対して海底変動率

$$\frac{d}{dt}(\Delta h)$$

は、水深  $\Delta h$  と平衡水深  $\Delta h_f (= P)$  との差にほぼ比例しているのがわかる。そこで、海底地形変動を表わす式をつぎのように仮定する。

$$(P - \Delta h) = \tau \cdot \frac{d}{dt}(\Delta h) \quad \dots\dots(19)$$

ここに、 $\tau$  は、比例定数であり、計測器学上は時定数と呼ばれるものである。(19) 式は、

$$\tau \frac{d}{dt}(\Delta h) + \Delta h = P \quad \dots\dots(20)$$

そこで、 $t < 0$  において  $\Delta h = P = 0$ 、 $t \geq 0$  において  $P = P_0$  として (20) 式を積分すれば

$$\frac{\Delta h}{P_0} = 1 - e^{-(t)/\tau} \quad \dots\dots(21)$$

(21) 式を用いて  $\Delta h/P_0$  と  $t/\tau$  との関係プロットすると図-21 のようになり、これは、海底地形変動の応答特性を調べた図-17 とよく似ている。図から、 $t = \tau$  (時

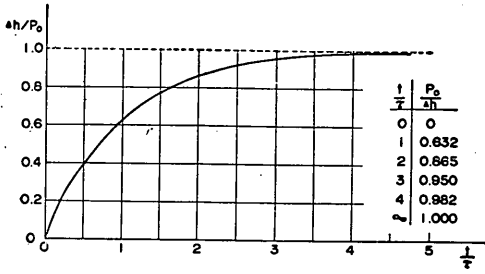


図-21 モデル化した海底変動の応答

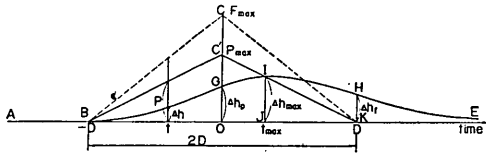


図-22 外力が三角形に変化したときの海底変動

定数) のときは、 $\Delta h/P_0=0.623$  であることがわかる。

実際の海は、図-20 のように、海況が急に変化することはあり得ない。来襲する波が台風によるものであろうと、冬期季節風によるものであろうと、最初静かな状態から、次第に波高が高くなり、最大値に達したあと、再び次第に静穏になって行く。考察を簡単にするため、ここでは図-22 のように、外力  $F$  が  $A B C K E$  と三角形に変化するものと仮定する。(18)式の定義を用いて、外力  $\dots F$  の代わりに  $P$  で表わせれば、 $P$  は、 $A B C K E$  のように変化し、水深は、 $A B G I H E$  のように変化するのであろう。図において、 $B K=2D$  は、海上がしける期間に相当する。また、海底変動量  $\Delta h$  は、外力が最大するとき(図で  $t=0$  のとき)必ずしも最大値をとらず、それより小さい値  $G O=\Delta h_P$  をとる。 $\Delta h$  の最大値は、これよりある時間遅れて、 $t=t_{max}$  で  $I J=\Delta h_{max}$  をとる。この  $\Delta h_{max}$  は、海底地形変動の時定数に直接関係している。海上は、次第におさまり、それにともなって、海底変動量  $\Delta h$  も次第にもとへ復旧してゆき、完全におさまった  $t=D$  においては、 $H K=\Delta h_f$  なる変動量だけが残留することになる。海底地形変動の基本式は、(20)式であらわされるものとする。

ここで、外力の条件をつぎのように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} P &= \Delta h = 0 & t &\leq -P \\ P &= at + P_0, \quad \alpha = P_0/D & -D \leq t \leq 0 \\ P &= -at + P_0 & 0 \leq t \leq D \\ P &= 0 & D \leq t \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

まず、(20)式に(22)の条件を入れて積分すれば  $-D \leq t \leq 0$  に対して、

$$\Delta h = at + \alpha \tau e^{-\frac{t+D}{\tau}} + \alpha(D-\tau) \dots (23)$$

図-22 の  $\Delta h_P$  は、上式で  $t=0$  のときに相当するから

$$\Delta h_P = P_0 + (P_0/D)\tau e^{-D/\tau} - P_0(\tau/D)$$

あるいは

$$\Delta h_P/P_0 = 1 + (\tau/D)e^{-D/\tau} - (\tau/D) \dots (24)$$

となる。

$t \geq 0$  に対しては  $t=0$  のとき  $\Delta h = \Delta h_P$  と、(22)の条件を用いて、(20)式を積分すれば、

$$\Delta h = (\Delta h_P - P_0 - \alpha \tau)e^{-t/\tau} + P_0 - \alpha(t - \tau) \dots (25)$$

図-22 で、 $\Delta h_{max}$  を求めるには、 $\frac{d}{dt}(\Delta h) = 0$  として

$$t_{max} = -\tau \ln \frac{\alpha \tau}{P_0 - \Delta h_P + \alpha \tau} \dots (26)$$

これを(26)式に代入すれば、

$$\begin{aligned} \Delta h_{max} &= P_0 + P_0 \left( \frac{\tau}{D} \right) \left\{ \ln \frac{(\tau/D)}{1 + (\tau/D) - \Delta h_P/P_0} + 1 \right\} \\ &\quad - P_0 \left( 1 + (\tau/D) - \Delta h_P/P_0 \right) e^{\ln \frac{(\tau/D)}{1 + (\tau/D) - \Delta h_P/P_0}} \end{aligned} \dots (27)$$

$t=D$  において

$$\Delta h_f = (\Delta h_P - P_0(\tau/D) - P_0)e^{-\tau/D} + P_0(\tau/D) \dots (28)$$

ここで、簡単にするため、

$$\begin{aligned} X &= D/\tau \\ Y_P &= \frac{\Delta h_P}{P_0} \\ Y_{max} &= \frac{\Delta h_{max}}{P_0} \\ Y_{fin} &= \frac{\Delta h_{fin}}{P_0} \end{aligned}$$

なる無次元量を用いることにすれば、(24)、(27)、(28)式はつぎのように表わされる。

$$Y_P = 1 - \frac{1 - e^{-X}}{X} \dots (29)$$

$$\begin{aligned} Y_{max} &= 1 - \left\{ \left( 1 + \frac{1}{X} - Y_P \right) e^{\ln \frac{1/X}{1 + 1/X - Y_P}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{X} \left( 1 + \ln \frac{1/X}{1 + 1/X - Y_P} \right) \right\} \end{aligned} \dots (30)$$

$$Y_{fin} = 1/X + (Y_P - 1/X - 1)e^{-X} \quad \dots\dots(31)$$

ここに  $X = D/\tau$  は、しけの期間の 1/2 と海底地形変動の応答時定数との比である。

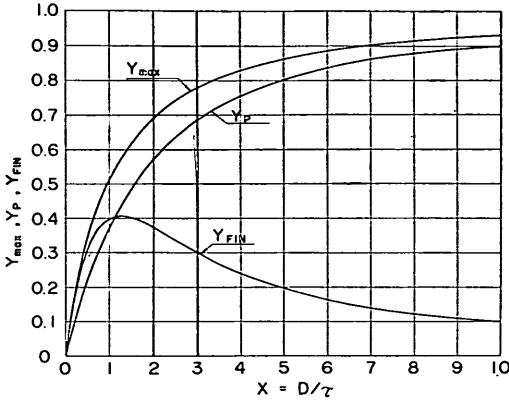


図-23  $Y_P, Y_{max}, Y_{fin}$  と  $X$  との関係

そこで、(29)、(30)、(31)式を用いて、 $Y_P, Y_{max}, Y_{fin}$  と  $X = D/\tau$  との関係を示すと図-23 のようになる。

$Y_P, Y_{max}, Y_{fin}$  は、たとえば、しけが無限に長く続いた場合には、1 に近づく量である。しかし、通常の海岸におけるように、外力の変化が三角形状に変化するときは、図-23 のように種々の値をとる。 $Y_P$  は、外力が最大になったときの海底変動量を示すものであるが、海底地形変動の時定数に比して、しけの期間  $2D$  が長くなるにつれ、増大している。この傾向は、海底地形変動の最大値を示す  $Y_{max}$  の場合も同じである。これは、同じ大きさの外力が作用しても、しけの期間が長いか短いにより、海底の変動量が異なることを示すものであり、従来の外力の大きさと海底変動量とを直接結びつけるという方法に疑問を与えるものである。さきの超音式洗掘計による記録解析から、富山湾西岩瀬海岸の水深  $-2m$  における時定数は、 $\tau = 4 \sim 6$ 日と推定された。この海岸に来襲するしけは、ほとと2日～1週間と種々あるが、この場合、 $X = D/\tau$  は広い範囲で変化する。したがって、海底地形変動は、しけの期間によっても大きく左右されると考えねばならない。 $Y_{fin}$  は、しけが完全におさまったときの残留海底変動量を示すものである。図のように、 $X = 1.1$  で最大値  $Y_{fin} = 0.4$  をとるのみで、それ以上大きくなることはない。通常、深淺測量や洗掘観測は、しけが過ぎ去った直後に行われる。したがって、このとき観測される海底変動量は、 $Y_{fin}$  に相当する。そこで、

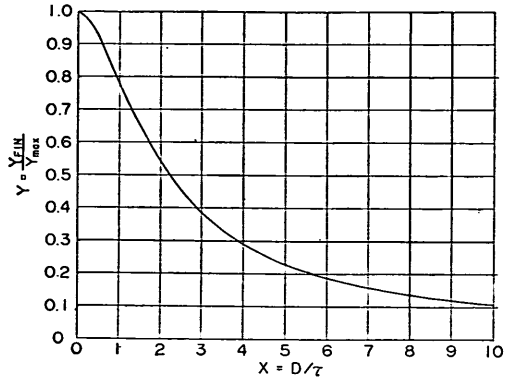


図-24  $Y_{fin}/Y_{max}$  と  $X$  との関係

あるしけの間に生じた最大海底変動量のうち、何割位が、しけの直後残留しているか、すなわち、 $Y_{fin}/Y_{max}$  と  $X$  との関係を示したのが、図-24 である。これを見ると、しけの期間  $2D$  に比して、時定数  $\tau$  が長いときは、( $X = D/\tau$  が小さいときは)、最大海底変動量のほとんどが、しけの直後に残留しているが、時定数が相対的に短くなるにつれ、しけの直後の残留率が少なくなることがわかる。図-19 の、水深と時定数との関係についての実験結果によれば、水深が大きいくほど、時定数が大きくなる傾向があった。とすれば、あるしけが通過した後に深淺測量や洗掘調査を行なった場合、深いところほど、しけがの海底の最大変動量に近い値が観測でき、浅いところでは、彼が小さくなったことによる埋戻しなどにより、最大変動量は観測できないことになる。このことをよりくわしく知るには、現地の海岸における水深別の海底地形変動に関する時定数を知る必要がある。また、解析を簡単にするため、外力の変化は、三角形状と仮定した。しかし、実際にはもっと複雑な形をとるものと思われる時、これらについては今後の研究に依らねばならない。

以上、超音波洗掘計による記録結果から、海底地形変動に時定数が存在することを指摘し、それが及ぼす種々の影響について述べてきたが、深淺測量、洗掘調査、汀線測量等の結果から、洗掘、堆積、あるいは海岸侵食等についてより精度の高い評価をするには、この時定数等について、さらに調査研究がなされねばならない。そのためには、海底地形変動を連続観測する必要があるが、今回試作した超音波式洗掘計は、その目的に十分かなうものと思われる。

### 3-2 波による流れの特性

#### (1) 沿岸方向の流れに関する諸量

図-10 に示したように、標砂計は、水深約-2mの地点に設置された。この地点は、波高が大きいときは碎波帯内に入るが、観測期間中の波は、富山新港での観測で、有義波高1.5m、周期7~8秒程度が大きい方であり、ほとんどの場合、波高は1m以下であったので、観測された流れは碎波帯外におけるものであったと考えられる。標砂計は、互いに直角な2成分の流れを観測したが、これらのうち、沿岸方向成分の流れを沿岸方向の流れとよび、直角方向の流れを、沖岸方向の流れとよぶことにする。碎波帯のすぐ外側の流れは、碎波帯内の流れと密接な関係があるものと思われるので、測得された沿岸方向の流れに関する諸量としては、一応、沿岸流に関係する諸量が、そのまま、あげられるであろう。それは3-1(1)であげた、海底地形変動に関する諸量のうち、初期水深 $h_0$ を除いたすべての要素があげられる。そこで、3-1(1)の場合と同様に、すべての要素を正規化して、各要素間の相関係数を計算すると、表-4 のようになる。表中Uは沿岸流速である。

	$H_0$	T	e	$H_0/L_0$	E	$U_{15}$	$U_{26}$	$U_{37}$	$U_{48}$	U
$H_0$	1.000									
T	0.247	1.000								
e	0.113	-0.203	1.000							
$H_0/L_0$	0.770	-0.245	0.175	1.000						
E	0.920	0.239	0.143	0.572	1.000					
$U_{15}$	0.126	-0.291	0.191	0.305	0.135	1.000				
$U_{26}$	0.101	-0.231	0.161	0.271	0.114	0.868	1.000			
$U_{37}$	0.012	-0.024	0.034	0.084	0.026	0.230	0.684	1.000		
$U_{48}$	-0.110	0.256	-0.156	-0.230	-0.109	-0.785	-0.374	0.422	1.000	
U	0.711	0.079	0.115	0.541	0.725	0.158	0.078	-0.080	-0.198	1.000

表-4 沿岸方向の流れに関する諸量の共分散

このとき使用したデータ数は、 $N=130$ であった。沿岸方向の流れに相関の大きいものから順にならべると、つぎのようになる<sup>4)</sup>。

標本相関係数 $r$	母相関係数 $\rho$ (信頼限界 95%)
波のエネルギー $E$	0.73      0.61~0.80
波高 $H_0$	0.71      0.61~0.78
波形勾配 $H_0/L_0$	0.54      0.41~0.65
風 NW $U_{48}$	-0.20      -0.02~-0.41
風 N $U_{15}$	0.16      0.0~0.32
潮位 $e$	0.12      -0.06~0.28
風 E $U_{37}$	0.08      -0.08~0.26
周期 $T$	0.08      -0.08~0.26
風 NE $U_{26}$	0.08      -0.08~0.26

沿岸方向の流れは波向きと密接に関係しているわけで

あるが、上の結果では、波向を含まない波浪特性との間に非常に高い相関がある。これは、この海岸に作用する波の波向が、ほぼ定まっていることによるものであろう。沿岸方向の流れは、ほとんどすべてが、図-10に示す $\ominus$ の方向、すなわち、西向きであった。これは、西岩瀬海岸では波が東寄りの方向から主として作用していることを意味するものである。沿岸方向の流れと田中海岸での風向成分との相関係数を、表-4の結果からプロットすると、図-25 のようになる。沿岸流は、田中海岸でのN~NWの風と相関しており、この方向からの風が吹くと、18時間後に西岩瀬海岸での西向きの流れが強くなる確率が多いことを示している。

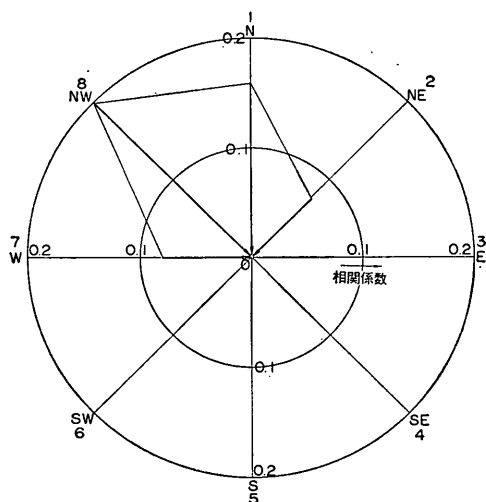


図-25 西岩瀬海岸における沿岸流と田中海岸での風との風方向別相関係数

(2) 沿岸方向の流れを推定する式

表からわかるように、沿岸方向の流れUに関する要素はたくさん挙げられるわけであるが、それらの要素同志は必ずしも互いに独立ではない。ここでは、それらの要素の中から、互いに独立で、しかも沿岸方向の流れUに関係の深い要素だけを統計解析的に選び出し、回帰分析により沿岸方向の流れを表わす式をつくってみる。これには、Screening Procedure<sup>8)</sup>という方法があるが、まず、これについて簡単に述べる。

$$\begin{aligned}
 \text{いま、} & \quad \text{沿岸方向の流れ } U=Y \\
 & \quad \text{波高 } H_0=X_1 \\
 & \quad \text{周期 } T=X_2 \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \quad \quad \quad \vdots
 \end{aligned}$$



$$\begin{matrix} \vdots & \vdots \\ \text{というふうに、実際に観測された値}Y\text{と、それに関係あ} \\ \text{ると思われる要素}X_i\text{とを考える。もし、これらの値の} \\ \text{ゼロ点を移動させて} \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} \sum X_i &= 0 \\ \sum Y &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots(32)$$

となるようにすれば、回帰式を用いてたつぎのよ  
 うに表わすことができる。

$$Y = \frac{\sum X_i Y}{\sum X_i^2} \cdot X_i + e \quad \dots\dots(33)$$

ここに、 $e$ は、回帰式により求めた $Y$ の値と、実際に観  
 測された $Y$ の値との差である。この両辺を2乗して、平  
 均すれば、

$$\overline{Y^2} = \frac{\overline{X_i Y^2}}{\overline{X_i^2}} + \overline{e^2} \quad \dots\dots(34)$$

$i$ は、 $Y$ に関係すると思われる諸量の番号であり、それ  
 ぞれの変量に対して上式が計算されるわけであるが、も  
 し、 $i=k$ において、 $\frac{\overline{X_i Y^2}}{\overline{X_i^2}}$ の項が最大になったとすれ  
 ば、 $X_k$ が、最も $Y$ に関係しているということになる。説  
 明を容易ならしめるため、たとえば $k=1$ で上の項が最大  
 であったとすれば、 $X_1$ を用いて(33)式と同じ考え方で、

$$Y = \frac{\overline{X_1 Y}}{\overline{X_1^2}} \cdot X_1 + Y^{(1)} \quad \dots\dots(35)$$

$$X_i = \frac{\overline{X_1 X_i}}{\overline{X_1^2}} \cdot X_1 + X_i^{(1)} \quad \dots\dots(36)$$

上式において、 $Y^{(1)}$ は、 $Y$ のうち $X_1$ では説明できな  
 い部分であり、同様に $X_i^{(1)}$ は、 $X$ のうち $X_1$ で説明で  
 きない部分からなっている。右肩の( )内の数字は、  
 $Y$ に関係する要素を順次挙げていく過程の回数を示す。  
 そこで、(35)と(36)を掛け合わせて平均をとると、

$$\begin{aligned} \overline{X_i Y} &= \left( \frac{\overline{X_1 X_i}}{\overline{X_1^2}} \cdot X_1 + X_i^{(1)} \right) \left( \frac{\overline{X_1 Y}}{\overline{X_1^2}} \cdot X_1 + Y^{(1)} \right) \\ &= \frac{\overline{X_1 X_i} \overline{X_1 Y}}{\overline{X_1^2}} + \overline{X_i^{(1)} Y^{(1)}} \end{aligned}$$

これより

$$\overline{X_i^{(1)} Y^{(1)}} = \overline{X_i Y} - \frac{\overline{X_i X_1} \overline{Y X_1}}{\overline{X_1^2}} \quad \dots\dots(37)$$

このように、 $X_i$ 、 $Y$ のうち、 $X_1$ では説明できない量、  
 $X_i^{(1)}$ 、 $Y^{(1)}$ による共分散が、 $X_i$ 、 $Y$ の観測値から求ま  
 る。そこで、(34)式の場合と同様、

$$\frac{\overline{X_i^{(1)} Y^{(1)2}}}{(\overline{X_i^{(1)}})^2}$$

を最大にする要素  $i=1$  をさがせば、 $X_i$ は、 $X_2=X_1$   
 に次いで2番目に $Y$ に関係した量で、 $X_1$ とは互いに独  
 立している。便宜上、 $i=2$ とすれば、(37)式と全く同  
 様に、今度は、 $X_1$ 、 $X_2$ の効果を含まない新しい  
 共分散が求まる。

$$\overline{X_i^{(2)} Y^{(2)}} = \overline{X_i^{(1)} Y^{(1)}} - \frac{\overline{X_i^{(1)} X_2^{(1)} \overline{Y^{(1)} X_2^{(1)}}}}{(\overline{X_2^{(1)}})^2} \quad \dots\dots(38)$$

このようにして、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $\dots\dots X_N$ 個の要求が選出さ  
 れたとすれば、

$$\overline{Y X_j} = \sum_{k=1}^N \overline{X_j X_k} a_k \quad \dots\dots(39)$$

により、

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots\dots + a_N X_N \quad \dots\dots(40)$$

なる式が求まる。選出すべき要素の数 $N$ は、予想値と実  
 積測値の差が小さくなるよう決定すべきである。

変数の数 $N$	沿岸方 向の流 れ( $Y$ )	波のエネ ルギー- $E$ ( $X_1$ )	波形勾配 $H_0/L_0$ ( $X_2$ )	西からの風 ( $-U_{37}$ ) ( $X_3$ )
1	$Y = 0.725 \cdot X_1$			
2	$Y = 0.617 \cdot X_1 + 0.189 \cdot X_2$			
3	$Y = 0.614 \cdot X_1 + 0.200 \cdot X_2 + 0.112 \cdot X_3$			

ただし、すべての変数は、正規化されたものである。

表-5 沿岸方向の流れを推定する式

表-4の共分散を用いて、以上の計算を $N=3$ まで行  
 なった結果を表-5に示す。沿岸方向の流れ $U$ を、互い  
 に独立した要素で表わすと、波のエネルギー $E$ 、波形勾  
 配 $H_0/L_0$ 、風速の $W$ 方向成分の順となり、それらよりは  
 るかに $U$ との相関度が高かった他の要素は、波のエネル  
 ギー $E$ 等との相関が強かったため、消去されている。実  
 際に観測された沿岸方向の流速 $U$ と、表-5式を用いて  
 計算した沿岸方向の流速とを、昭和44年11月16日~18  
 日、11月28日~30日の場合を、 $N=1, 3$ に対してプロッ  
 トすると、図-26、27のようになる。 $N=1$ とは、変数  
 として、波のエネルギー $E$ のみを用いたもので、 $N=3$   
 とは、波のエネルギー $E$ 、波形勾配 $H_0/L_0$ 、風速の $W$ 方  
 向成分を用いた場合である。図のように、沿岸方向の流  
 速の計算値は、 $N=3$ の方が $N=1$ の場合に比べてかな  
 り実際の観測値に近いことがわかる。しかし、 $N=1$ か

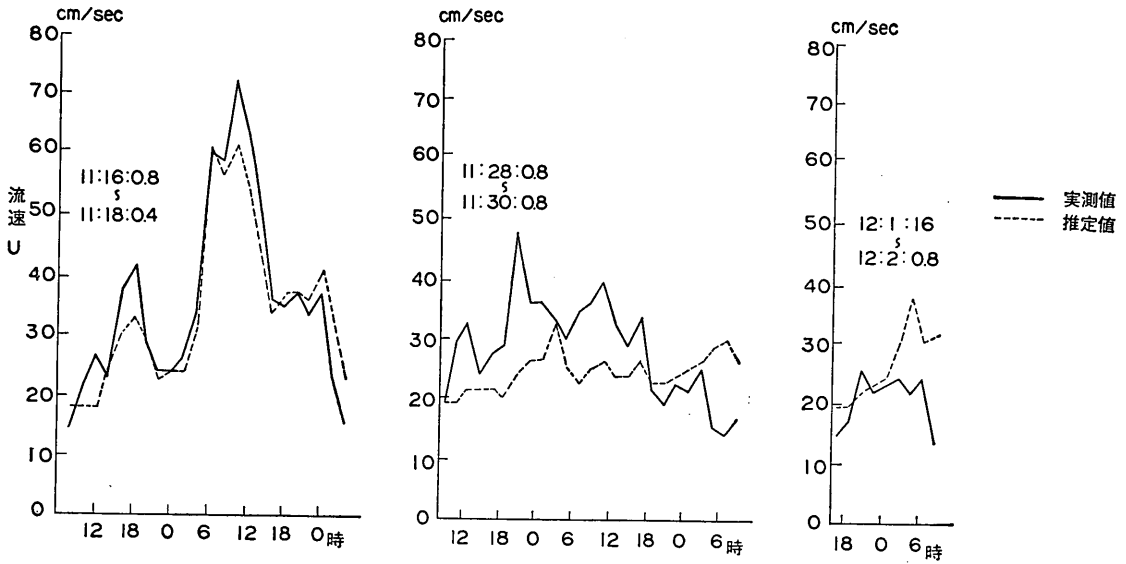


図-26 沿岸流速Uの推定値と実測との比較（1変数の場合）

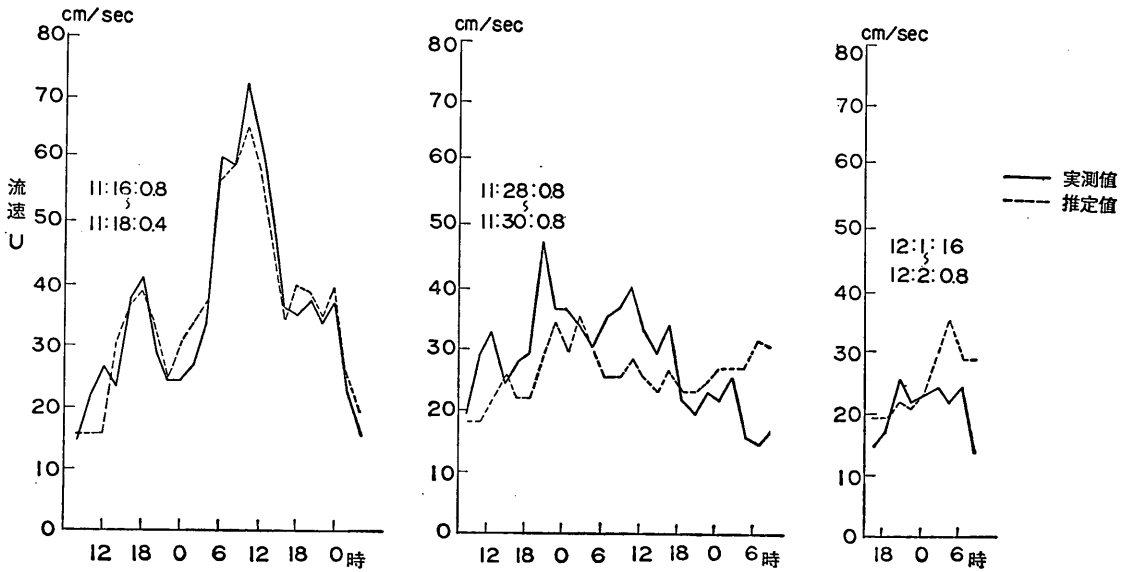


図-27 沿岸流速Uの推定値の実測との比較（3変数の場合）

ら  $N=3$  と変数を増加しても、それほど極端には良くならないのはこの海岸の沿岸流と波のエネルギーとが非常に高い相関をもつことによるものである。また同時に、しけ時の波向が、ほぼ一定しているためでもあろう。図-28 は、波のエネルギー  $E$  と、沿岸流  $U$  との関係を示したものであるが、波向を考慮しない波のエネルギーの絶対値と沿岸方向の流れとがよく相関している。

(3) 沿岸方向の流れと沖岸方向の流れとの相関

海岸線に直角方向の流速成分、すなわち沖岸方向の流れは、沿岸方向の流れと同時に観測された。その観測デ

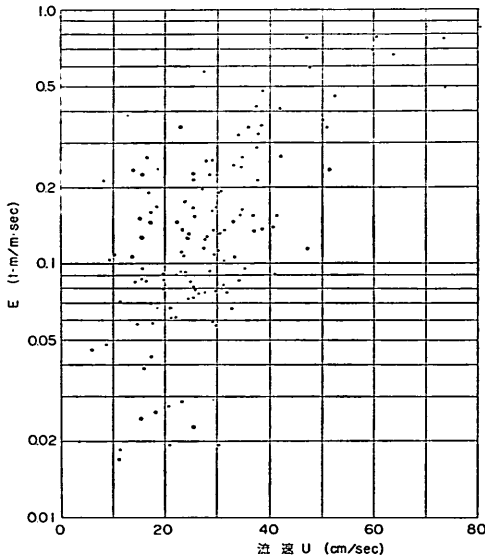


図-28 波のエネルギーと沿岸方向の流れとの関係

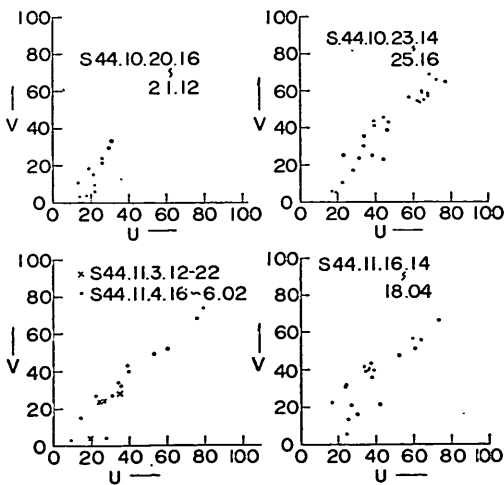


図-29 沿岸方向の流れと沖岸方向の流れとの関係

ータのほとんどが、図-10 において、 $\ominus V$  の方向、すなわち岸向きの流れが観測された。各しけ時における沿岸方向の流れと、沖岸方向の流れとの関係をプロットすると、図-29 のようになる。沿岸方向の流れが沖岸方向の流れに比べてやゝ大きめであるが、両者はほぼ等しいようである。このことは、この観測地点では、波のエネルギーが増大するにつれ、海岸へ斜めに向かう流れが強くなることを示すものである。波により生ずる流れの向きがこのような特定の方向に固定しているのは興味深い。

3-3 海底地形変動の平面的特性

図-10 に示したように、今回試作した超音波式漂砂計と超音波式洗掘計は、富山湾西岩瀬海岸の互いに近接した 2 地点に設置され、観測も同時に行なわれた。また、この時期には、1 年に 4 回周辺の深浅測量も行なわれた。そこで観測データから総合的に、この周辺の海底地形変動の平面的な特性について述べることにする。超音波式洗掘計の記録解析から、洗掘計設置位置の海底変動特性については明らかになったのでこの地点と他の地点との海底変動の相関を調べてみる。そのために、海岸地形線方向に 400m の区間をとり、50m 毎に海岸線に直角沖方向に 9 本の測線を設定する。 $i$  番目の測線上で ( $i=1\sim 9$ )、水深 ( $-j$ )m の等深線までの距離を  $X_{ij}$  m とする。超音波式洗掘計の設置位置は、 $i=4$  の測線上で、水深  $-2$ m であるから、基線からの距離は  $X_{42}$  で表わされる。超音波式洗掘計の設置位置 ( $4, 2$ ) と他の地点 ( $i, j$ ) との間の等深線の変化に関する相関係数は、つぎのように表わされる。

$$r_{ij} = \frac{(X_{42} - X_{42})(X_{ij} - X_{ij})}{\sqrt{(X_{42} - X_{42})^2} \sqrt{(X_{ij} - X_{ij})^2}} \dots (41)$$

ただし、 $j=0, 1, \dots, 10_m$

このようにして計算した結果を図-30 に示す。図において、点の領域は、相関係数  $r_{ij} > 0$  であり、斜線の領域は  $r_{ij} < 0$  である。超音波式洗掘計の設置位置では、当然  $r_{ij} = 1.0$  となる。この図は、超音波式洗掘計の設置地点 ( $4, 2$ ) で堆積が起きれば、点で示した領域は堆積し、斜線で示した領域は欠壊する確率が多いことを示すものである。図を見ると、欠壊と堆積の場所が、いくつかの集団に分かれているのがわかる。この欠壊堆積に関する平面的相関の模様を、深浅測量期間の平均的深浅図に落としてみると、図-31 のような、欠壊堆積のパターンが出来上がる。図のように、海底地形変動を平面的にみた場合、同一水深図においても決して一様ではなく、非常に複雑なパターンを示している。図の点線で示した領域は、

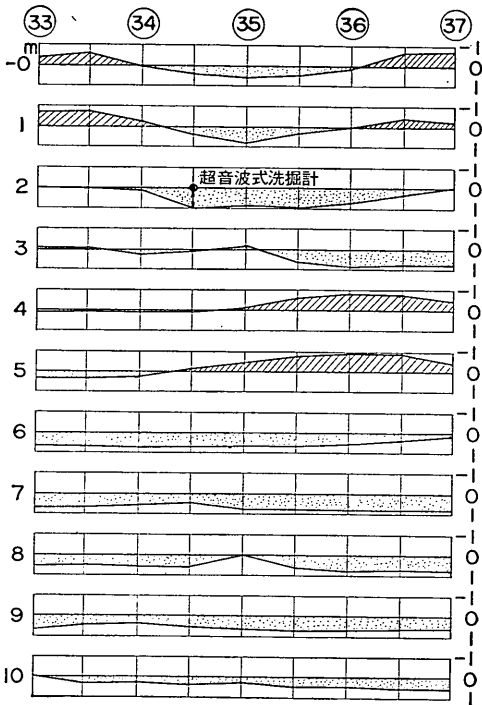


図-30 超音波式洗掘計設置位置とその他の地点との海底地形変動に関する相関係数

超音波式洗掘計の設置地点(4, 2)と同じ挙動をするわけであるが、さきの記録解析結果によれば、この海浜に作用する波の波形勾配が大きいほど、あるいは、波高が高いほど、この地点は、堆積しがちであった。したがって、図-31において、この海岸に波(波高~1.5m)が来襲したときは、点線の領域は堆積し、斜線の領域は欠壊しがちであることになる。一般に、海浜に高い波が来襲すると、前浜は欠壊し、底質は沖方向へ運ばれ堆積する。図-31において、 $i=1, 2$ 、および  $i=8, 9$ の測線上では、このような一般的傾向が見られるが、 $i=3\sim 7$ の測線上、 $i=0, -1, -2\text{m}$ の領域が異常に堆積が著しい。図-31には、超音波式漂砂計の設置位置と、その記録解析にもとづく、その地点でのしけ時の卓越流向も示してあるが、これによると、波が高いときは、さきの  $i=3\sim 7$ の区間での異常な堆積を示した方向へ向かってほとんどの異常な流れがあることがわかる。すなわち、この区間の異常な堆積は、攪乱浮遊した底質が、この領域へ向かって運ばれて来ることによるものでないかと思われる。以上のように、海浜断面地形の変化を見るときは、決して二次元的な考察だけでは不十分で、三次元的な、平面的な海底地形変動についても同時に考察せねばならない。この場合、平面的海底地形の変動と、砕波帯内で平面的に見た流れのパターンとは、密接な関係がある。

#### 4. あとがき

本報告の結論は、つぎのようになる。

- 1) 漂砂計による現地観測において、浮遊砂濃度をアナログ的に検知するには、検知部への貝類付着に対する対策を講ずる必要がある。しかし、ドップラー効果を利用して、周波数変化を検知し、流速を測ることは、今回の方式で十分使用に耐える。
- 2) 洗掘計は、海底地形変動の連続的観測に使用できる。この場合、砕波帯内の気泡の発生、浮遊砂が多いところでは、使用超音波周波数の選択に注意する必要がある。今回の実験では、500kHz以上、1MHzの範囲が適当ではないかと思われる。
- 3) 海底は、波浪条件の時間的変化に対して、ある時間、遅れをもって変動している。この遅れを、海底地形変動に対する時定数とよんだ。
- 4) 水深-2mの地点での現地観測によれば、沖浜帯における海底地形変動の時定数は4~6日であった。
- 5) 模型実験によれば、時定数は、砕波帯内で短かく沖浜帯ではかなり長い。

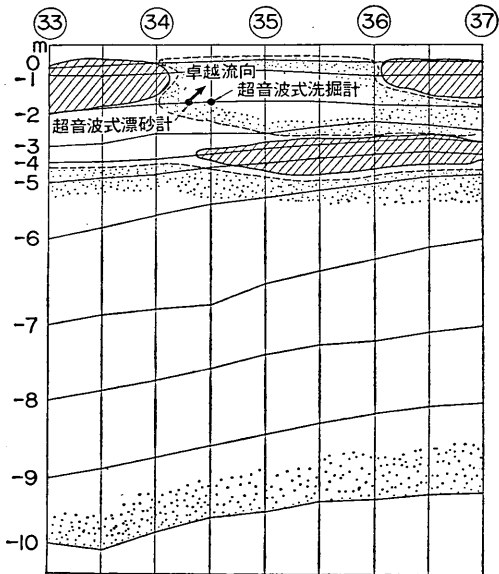


図-31 荒天時における海底地形変動の平面的パターン

## 漂砂の連続的な現地観測について

6) この時定数の存在のため、海底変動量は、波高、周期等の波浪特性のみでは説明できず、しけの期間、その間の波浪の時間的な変化も考慮されねばならない。

7) 海底地形の変化は、自然海浜の場合であっても、二次元的考察のみでは不十分であり、三次元的考察も入れねばならない。その際、波により生ずる流れの平面的パターンは、有用な資料となる。

本報告において提案した海底地形変動に関する時定数は、底質粒径、海浜に作用する波の規模、海底勾配等により異なるものと思われる。海底地形の変動をより正確にとらえるには、荒天時を含めた海底地形変動に関する定常的観測をさらに実施してこの時定数の特性を明らかにする必要がある。

### 謝 辞

本研究の実施、および報告書とりまとめに際しては、佐藤昭二漂砂研究室長からたびたび有意義な助言、指導をいただいた。また、本研究当初において、超音波による洗掘観測についての考え方は、新潟調査設計事務所、田中則男次長（当時、漂砂研究室勤務）に負うところが大きい。また、データ解析に際しては、漂砂研究室堀江毅、佐々木古博、新保修技官の協力を得た。ここに、各位に対し深く感謝の意を表する次第である。

また、本研究で用いた超音波式の観測器械の製作は、沖電気工業株式会社の請負の下に実施されたが、終始熱気意をもって仕事を遂行されたことに対し、関係者各位にあわせて謝意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) 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”, 日本音響学会講演論文集, 昭和44年10月
- 2) 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 1966年9月
- 3) 実吉・津田音響学会論文集, 昭和32年5月
- 4) S. S. ウィクリス (林 周二, ほか訳) „初等統計解析“, 東京大学出版会
- 5) Warren C. Thompson, “The Effect of Waveh on the Profile of a Natural Beach“, Proc of 11ts Conf on Coastal Engineering, 1968.
- 6) W. C. Krumbin, “Trend Surface Analysis of Contour-Type Maps with Irregular Control-Point Spacing“, Journal of Geophysical Research, Vol. 64, No. 7, July, 1959.
- 7) Ernest O. Doecelin, “Measurement Systems : Application and Design“, Mc Graw-Hill Book Company.
- 8) Wyman Harrison, “Predictor Equations For Beach Process and Responses“, Journal of Geophysical Research, Vol. 70, No. 24, 1965, page 6103-6109

(1971. 3. 31 受付)

## 漂砂の連続的な現地観測について

### ——海底地形変動に関する一考察——

#### 付 録

#### 1. 超音波の減衰, 反射, 散乱について

##### 1-1 超音波の減衰

浮遊砂を含んだ水中を伝播する超音波の減衰は、浮遊砂粒子のために純粋の水に比べてはるかに多くなる。これは、超音波のエネルギーが、途中に浮遊している砂粒子により散乱あるいは吸収されるためで、その割合は、砂粒子の大きさと、超音波の波長との相対比で定まる。もし、超音波の波長が、砂粒子の直径に比べて十分小さいときは、砂粒子に突き当たる超音波はすべて反射散乱するか吸収されるから、超音波の入射強度に砂粒子の投影面積を乗じたパワーが、砂粒子による散乱吸収強度になる。逆に超音波の波長が、砂粒子の直径より充分大きいときは、砂粒子により妨げられる面積は著るしく小さくなり、したがって砂粒子による散乱吸収強度は著るしく小さくなる。このように、砂粒子が障害となってきた面積を、超音波の減衰に寄与する等価断面積とよび、これは、主として、散乱断面積および吸収断面積よりなっている。

いま、この等価断面積を  $C$  とし、単位容積中に含まれる砂粒子の数を  $N$  とすれば、超音波の減衰の割合は、

$$\frac{DI}{Dx} = -CN \cdot I \quad \dots\dots(1)$$

ここに  $I$  は、超音波の強度 [ $W/cm^2$ ] である。

(1) より、 $x=0$  [cm] における超音波強度を  $I_0$  [ $W/cm^2$ ] として、

$$I = I_0 e^{-CNx} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

$$\alpha' = \frac{1}{2} CN \quad \dots\dots(3)$$

とおき、 $\alpha'$  を減衰定数 [neper/cm] とよぶ。すなわち、減衰定数を知ることができれば、任意の点での超音波強度がわかることになる。

超音波の減衰量は、通常ネーパー (Neper) またはデシベル (Decibel) で表わされる。

$$1 \text{ Neper} = \ln \sqrt{I/I_0}$$

$$1 \text{ Decibel} = 10 \log_{10} I/I_0 = 8.7 \text{ Neper}$$

したがって、減衰定数  $\alpha$  を、[dB/cm] で表わせば、

$$\alpha [\text{dB/cm}] = \frac{20}{\ln 10} \alpha' [\text{neper}]$$

となる。

浮遊砂を含んだ水中を超音波が伝播するときの減衰定数は、奥島<sup>1)</sup>により理論計算されている。

まず、水は粘性流体とし、

$$\text{密度 } \rho_1 = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{体積弾性率 } k_1 = 2.15 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$$

$$\text{音速 } C_1 = 1470 \text{ m/s}$$

$$\text{粘性係数 } \eta = 1.15 \times 10^{-2} \text{ f/cm} \cdot \text{s}$$

とし、砂粒子は完全弾性体で球形とし、

$$\text{密度 } \rho_2 = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{体積弾性率 } k_2 = 10^{12} \text{ dyne/cm}^2$$

$$\text{音速 } C_2 = 6100 \text{ m/s}$$

とする。したがって、 $\rho = \rho_2/\rho_1$ ,  $k_1/k_2 = 0.0215$  である。

このとき、砂粒子1個に対する散乱断面積  $C_{sca}$  は、

$k_1 a \ll 1$  ( $\omega = \frac{2\pi}{f}$ ,  $f$  は周波数) と砂粒子の半径  $a$  の

積  $k_1 a$  の値により、つぎのように与えられる。

$k_1 a \gg 1$  のとき

$$C_{sca}/\pi a^2 = 1 \quad \dots\dots(4)$$

$k_1 a \ll 1$  のとき

$$\frac{C_{sca}}{\pi a^2} = 0.52(k_1 a)^2 \quad \dots\dots(5)$$

これより、 $C_{sca}/\pi a^2 = 0.52(k_1 a)^2 = 1$  となる  $k_1 a$  は  $k_1 a = 0.52^{-1/2} = 1.178$  となる。さらに、 $k_1 a \ll 1$  のときは、水の粘性による減衰、すなわち、吸収断面積を考える必要がある。つぎに、砂粒子1個あたりの吸収断面積

$C_{abs}$  は,

$$y = K'a, \quad K' = \sqrt{\frac{\omega \rho_1}{2\eta}} = 16.53\sqrt{f} \text{ として,}$$

$y \gg 1$  のとき

$$\frac{C_{abs}}{\pi a^2} = 2.20 \times 10^{-6} \sqrt{f} \quad \dots\dots(6)$$

$y \ll 1$  のとき

$$\frac{C_{abs}}{\pi a^2} = 2.00 \times 10^{-2} a^3 f^2 \quad \dots\dots(7)$$

このとき、減衰に寄与する等価断面積は  $k_1 a \geq 1.178$  のとき

$$C/\pi a^2 = C_{sca}/\pi a^2 = 1 \quad \dots\dots(8)$$

$k_1 a < 1.178$  のとき

$$C/\pi a^2 = C_{sca}/\pi a^2 + C_{abs}/\pi a^2 = 0.52(k_1 a)^4 + C_{abs}/\pi a^2 \quad \dots\dots(9)$$

となり、 $k_1 a \leq 1.178$  のときは、吸収断面積が加算されることになる。

ここで、水の全体積中に占める砂粒の体積の割合を、体積率  $\phi$  で表わすと、(3)より

$$\alpha' [\text{neper/cm}] = \frac{1}{2} CN = \frac{1}{2} C \frac{\phi}{\frac{4}{3}\pi a^3} = \frac{C}{\pi a^2} \frac{3}{8} \frac{\phi}{a} \quad \dots\dots(10)$$

したがって

$$\alpha [\text{dB/cm}] = \frac{20}{\ln 10} \alpha' = \frac{C}{\pi a^2} + 3.26 \frac{\phi}{a} \quad \dots\dots(11)$$

(8)~(11)を用いると、各々の場合に対する減衰定数が、つぎのように求まる。

$k_1 a \geq 1.178$  のとき

$$\frac{\alpha}{\phi} = \frac{3.26}{a} = \frac{6.51}{2a} \quad \dots\dots(12)$$

$k_1 a \leq 1.178$  のとき

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\phi} &= 0.52(k_1 a)^4 \times \frac{3.26}{a} + \frac{3.26}{a} \cdot \frac{C_{abs}}{\pi a^2} \\ &= 0.712 \times 10^{-18} f^4 (2a)^3 + \frac{3.26}{a} \frac{C_{abs}}{\pi a^2} \quad \dots\dots(13) \end{aligned}$$

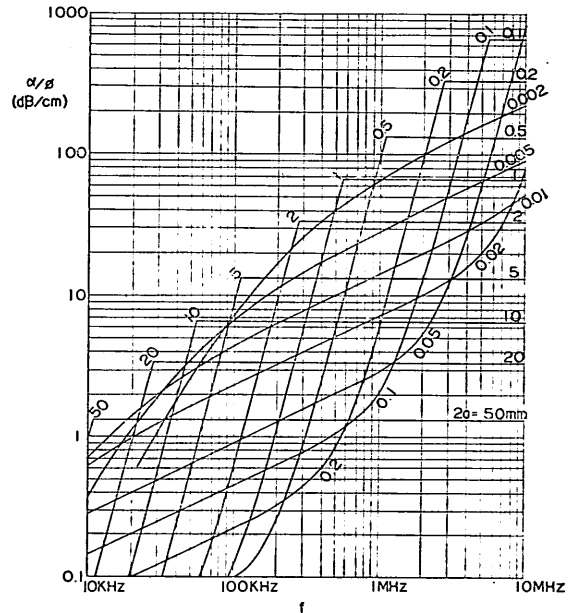
ここに、(6)、(7)を用いると  $y \gg 1$  のとき

$$\alpha/\phi = 0.712 \times 10^{-18} f^4 (2a)^3 + 1.433 \times 10^{-5} \sqrt{f}/2a \quad \dots\dots(14)$$

$y \ll 1$  のとき

$$\alpha/\phi = 0.712 \times 10^{-18} f^4 (2a)^3 + 1.628 \times 10^{-2} f^2 (2a)^2 \quad \dots\dots(15)$$

そこで、(12)、(14)、(15)を用いて、横軸に周波数  $f$  をとり (縦軸に減衰定数  $\alpha [\text{dB/cm}]$ ) をとって、砂粒子の直径  $2a [\text{mm}]$  をパラメータにして図化する、図A-1のようになる。この図から、音超波の浮遊砂に対する



図A-1 理論計算による超音波の減衰定数 [dB/cm] (奥島による)

減衰特性は、超音波の周波数、砂粒子の大きさに大きく影響されることがわかる。超音波の減衰率は、その周波数が大きくなるにつれて増加する。砂粒子の大きさによる影響は、超音波周波数が大きいときは砂粒子の直径が小さいほど超音波の減衰率が大きくなるが、超音波周波数が小さいときは、砂粒子の直径が大きいくほど超音波の減衰率が大きくなる。このように、超音波の減衰特性は、砂粒子の大きさによって、複雑に変化する。

### 1-2. 超音波の反射

浮遊砂を含んだ水中に発射された超音波の一部は、途中で浮遊砂粒子に反射されて再び超音波送受波器へ帰ってくる。この反射波強度の量的表現には、Target-Strength (標的の強さ) が用いられるが、その定義は、

$T_s =$

反射波の仮想中心からの単位距離の点の反射波強度  
障害物のある点の入射波強度

$dB$  表現では、 $10 \log_{10} T_s (dB)$

で与えられ、単位距離としては、日本では 1 m が用いられる。水中に浮遊する砂粒子を、不動の剛球としたときの送受波器方向の Target Strength も、理論的に求められている。

水と砂粒子に対する物理定数が、先にも与えられたものと同じとしたとき、水中に散在する不動の剛球の Target Strength は、送受波器が同一方向の場合、つぎのように与えられる。

直径  $2a$  [cm]、体積  $Q = \frac{4}{3}\pi a^3$  の 1 個の剛球について  $ka \leq 1$  のとき

$$\delta T_s \approx \frac{25}{64} \frac{k^4 Q^2}{\pi^2} \quad (ka \leq 0.775) \dots\dots(16)$$

$ka \geq 1$  のとき

$$\delta T_s \approx a^2/4 \quad (ka \geq 0.775) \dots\dots(17)$$

この両者の一致するところは、

$$\frac{25}{64} \frac{k^4 Q^2}{\pi^2} = \frac{a^2}{4}$$

とおいて、 $ka = 0.775$  を得る。

つぎに、水容積  $B$  の中に存在する全砂粒子についての Target Strength を求めてみる。

浮遊砂の体積含有率  $\phi$ 、水と砂との混合体の体積  $B$  [cm<sup>3</sup>] とすれば、砂の体積  $= B\phi$ 、砂粒の数  $N = B\phi/Q$ 、全体の Target Strength  $T_s = N\delta T_s$  ( $\phi \neq 0$  とする) であるから、

$ka \leq 0.775$  に対し

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{25}{64} N \frac{k^4 Q^2}{\pi^2} \\ &= \frac{25}{64} \cdot B\phi / \left( \frac{4}{3}\pi a^3 \right) \cdot \frac{\left( \frac{2\pi f}{C} \right)^2 \left( \frac{4}{3}\pi a^3 \right)^2}{\pi^2} \\ &= B\phi (6.38 \times 10^{-20}) (2a)^3 f^4 \quad \dots\dots(18) \end{aligned}$$

$ka \geq 0.775$  に対し

$$\begin{aligned} T_s &= N \frac{a^2}{4} = B\phi / \left( \frac{4}{3}\pi a^3 \right) \cdot \frac{a^2}{4} \\ &= B\phi \cdot 0.1192 \frac{1}{2a} \quad \dots\dots(19) \end{aligned}$$

そこで、超音波に対する浮遊砂の Target Strength を、

横軸に超音波の周波数、縦軸に  $\sqrt{T_s/B\phi}$  [cm<sup>-3/2</sup>]、として、砂粒子の直径  $2a$  [mm] をパラメータとして図示したのが図 A-2 である。この場合も、図-1 の超音波の減

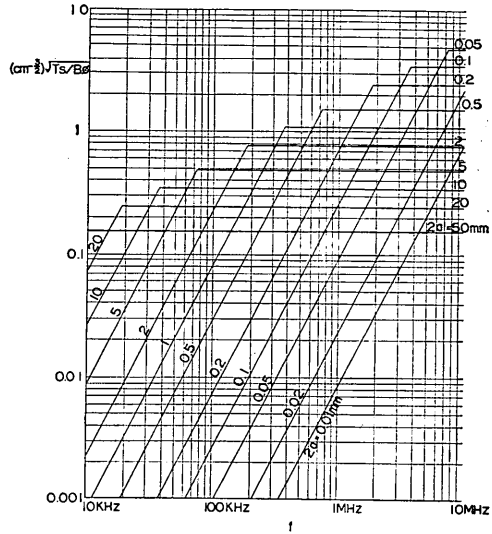


図 A-2 理論計算による浮遊砂粒子の Target Strength [cm<sup>-3/2</sup>]

衰の場合ほど複雑ではないが、砂粒子の大きさ、超音波の周波数に大きく影響されているのがわかる。超音波が、浮遊砂に反射されて帰って来る率、すなわち Target Strength は、超音波の周波数がある境界値より小さくなると急速に減少し、その境界値は、浮遊砂の粒径によって異なる。超音波の周波数が大ききときは、浮遊砂粒子の直径が小さいほど反射されやすいが、周波数が小さいときは、浮遊砂粒子の直径が大ききほど、より反射されやすくなる。

## 2. 超音波減衰に関する実験

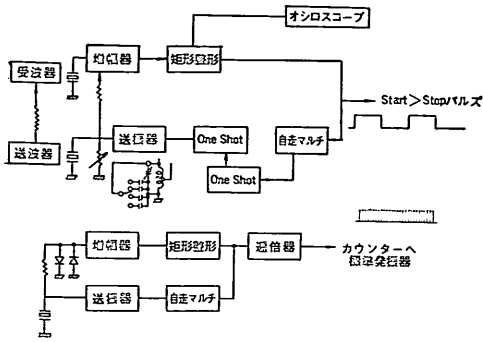
超音波の浮遊砂に対する減衰特性は、超音波の周波数、砂粒子の大きさによって複雑な影響を受けることが、理論解析から明らかになったわけであるが、これを、実際の浮遊砂について、確認するため、いくつかの基礎実験を行なった。以下これについて述べる。

### 2-1 実験装置と方法

超音波の発生機構には、シングルアラウンド方式を用いた。その原理は、送波器の中から水中に発射された超音波パルスが、受波器で受けられ、電氣的に増幅されて再び送波器にかけられて水中に超音波パルスとして発射されるという具合に、電氣的、または超音波パルスが、送



漂砂の連続的な現地観測について



図A-3 超音波発生装置のブロックダイヤグラム

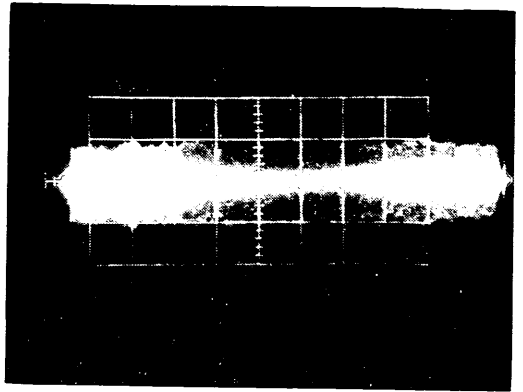
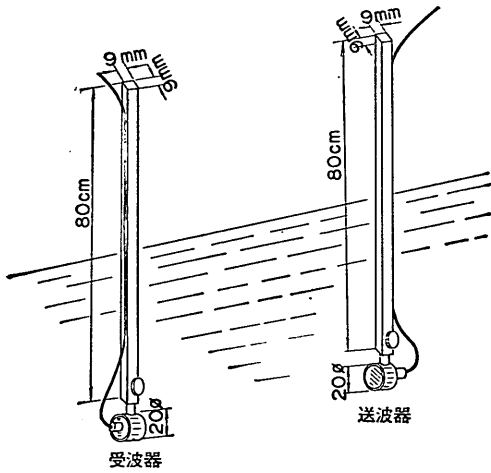
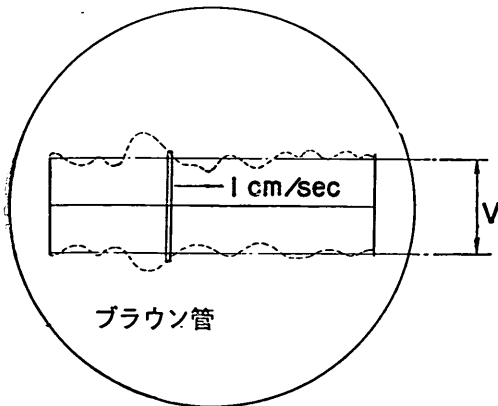


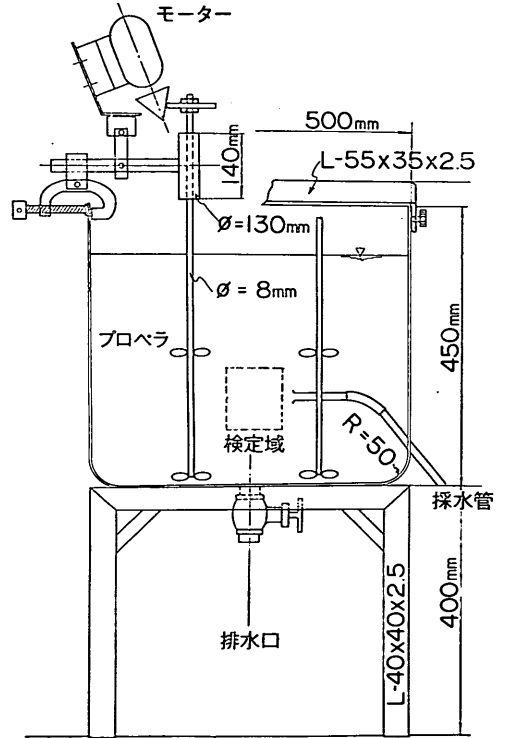
写真-1



図A-4 基礎実験用送受波器



図A-5 オシロスコープのブラウン管掃引映像

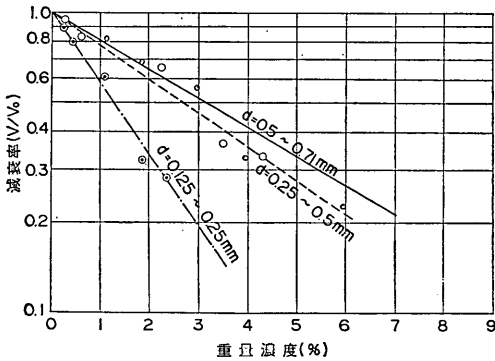


図A-6 濁度発生装置

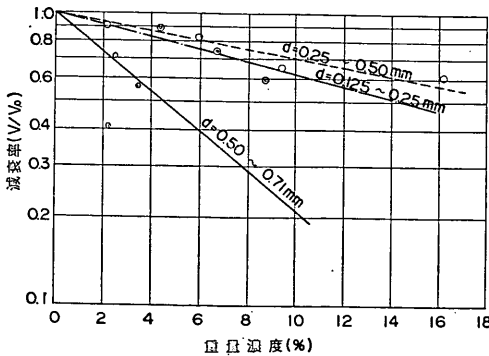
波器—水中—受波器—増幅器—送信器と何回もぐるぐる廻るものである。図A-3に、本装置のブロックダイヤグラムを示す。自走マルチ出力が、One Shot回路をトリガーし、単一のパルスが発生し、これがつぎのブロックに送られて送信器をトリガーする。送信器は、パルスのある間だけ発振するので、送られてきたパルスを高周波パルスに変換し、これが送信器に送られ水中に超音波パルスとし

て発射される。この超音波パルスは、受波器へ帰ってきて、電気的高周波パルスに変換され矩形整形されて自走マルチ回路に戻ってきてこれをトリガーする。このようにして、くり返し、超音波を水中に発射し、受波器に帰ってきた超音波を受けては処理するわけであるが、この受波の振幅の減少量は、水中の浮遊砂の濃度と密接な関係があるはずである。そこで、水中の浮遊砂粒子の直径や濃度を種々に変化させた時の受波パルスの振幅をオシロスコープごととらえることにより、超音波の減衰特性を調べた。図A-4は、実験に用いた超音波送受波器を示したもので、超音波発振板の直径はφ20mmである。受波の振幅の測定は、オシロスコープのブラウン管映像を写真撮影し、写真板上の振幅を直定接差で測定することによった。浮遊砂濃度の乱れによる変化がはげしいので、写真撮影の際は、図A-5のように受波の映像を、約1cm/secの速さで掃引させ、カメラのシャッターを開放して撮影した。(写真-1)

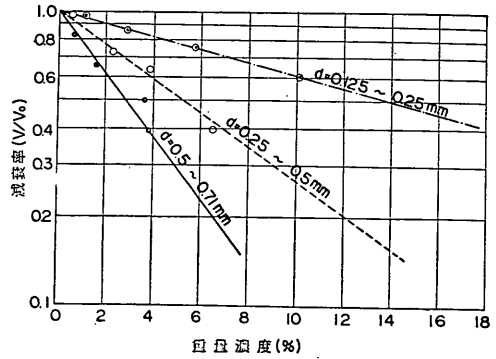
浮遊砂は、図A-6に示すような濁度発生装置を用い



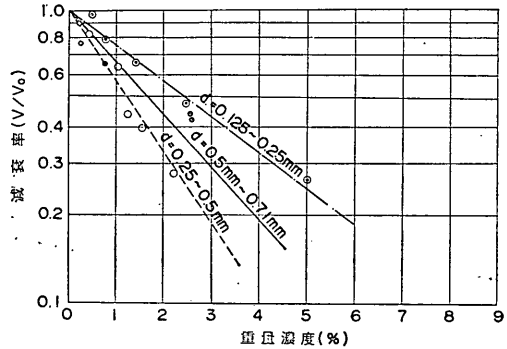
図A-7 超音波の減衰曲線  $l=2\text{ cm}$ ,  $f=10\text{ MHz}$



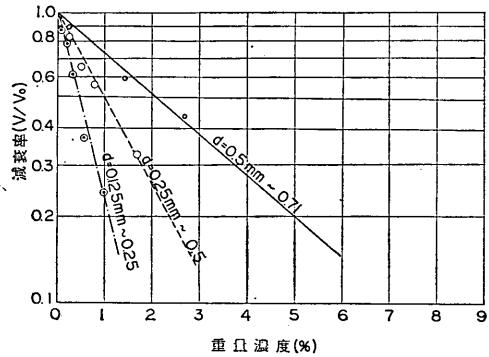
図A-8(1) 超音波減衰曲線  $l=4.5\text{ cm}$ ,  $f=1\text{ MHz}$



図A-8(2) 超音波減衰曲線  $l=4.5\text{ cm}$ ,  $f=2\text{ MHz}$



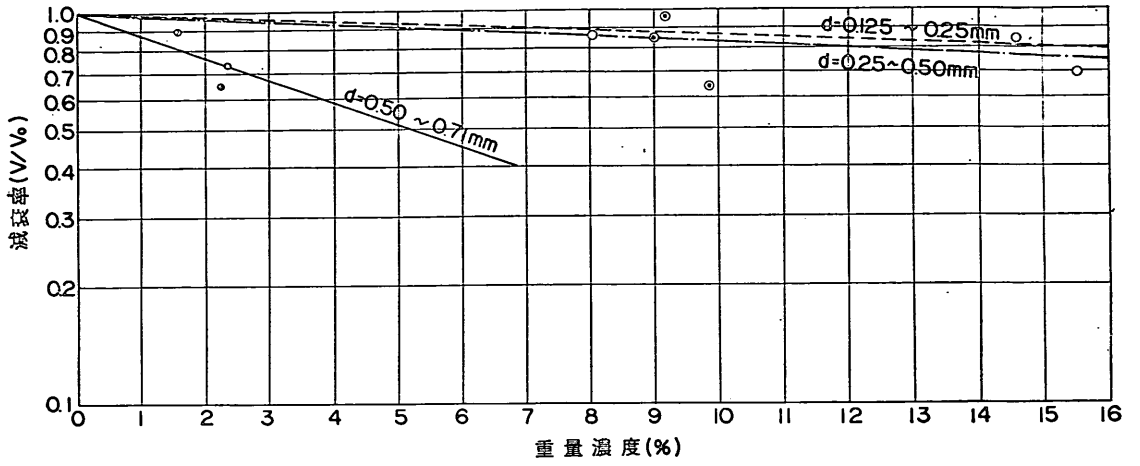
図A-8(3) 超音波減衰曲線  $l=4.5\text{ cm}$ ,  $f=4\text{ MHz}$



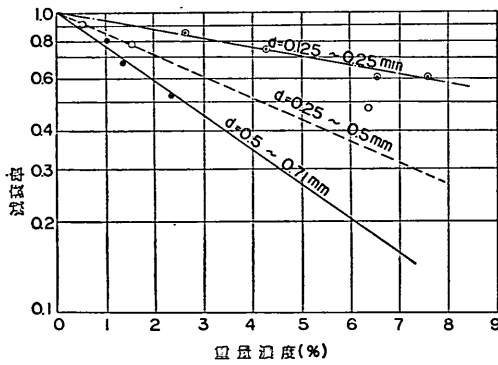
図A-8(4) 超音波減衰曲線  $l=4.5\text{ cm}$ ,  $f=10\text{ MHz}$

た。内容積 50cm×50cm×50cm の容器の四隅にφ5cmのプロペラを取付けて攪拌し、容器の中央に送受波器、反射板を置いて、測定した。超音波のパルス振幅影響と同時に(約10秒間、のシャッターを開放)、図A-4の採水孔から浮遊砂を含んだ水を一定の速度で採取し、水容積と砂重量を測って浮遊砂濃度の実際の値を求めた。こ

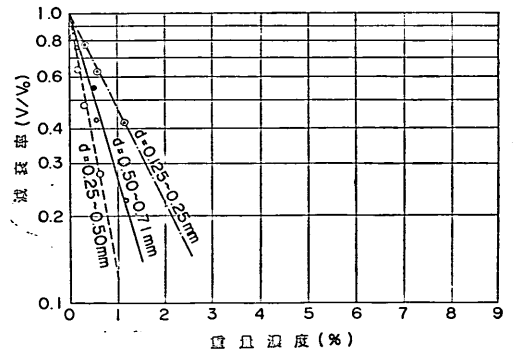
漂砂の連続的な現地観測について



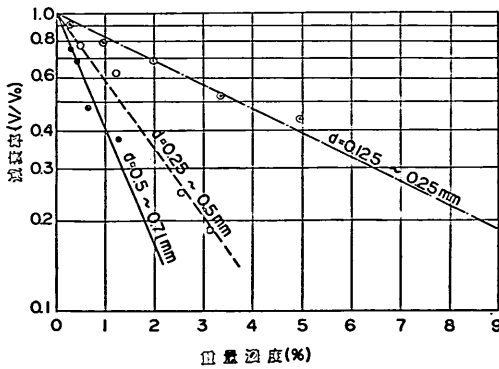
図A-9-(1) 超音波減衰曲線  $l=9\text{cm}$ ,  $f=500\text{KHz}$



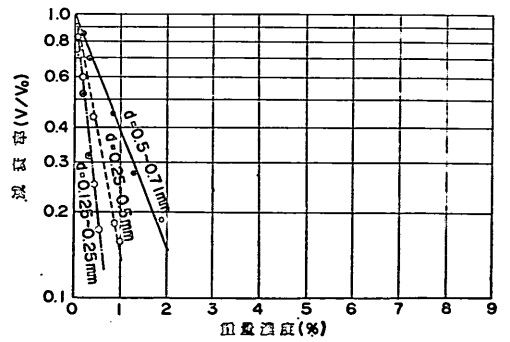
図A-9-(2) 超音波減衰曲線  $l=9\text{cm}$ ,  $f=1\text{MHz}$



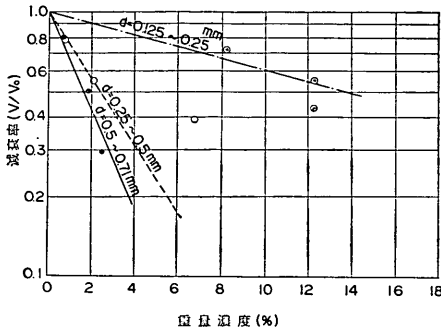
図A-9-(4) 超音波減衰曲線  $l=9\text{cm}$ ,  $f=4\text{MHz}$



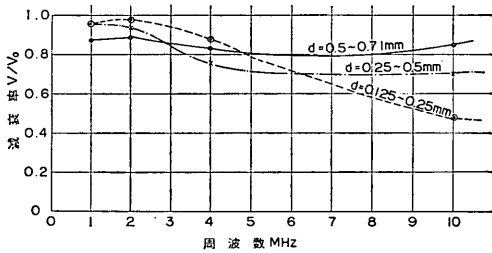
図A-9-(3) 超音波減衰曲線  $l=9\text{cm}$ ,  $f=2\text{MHz}$



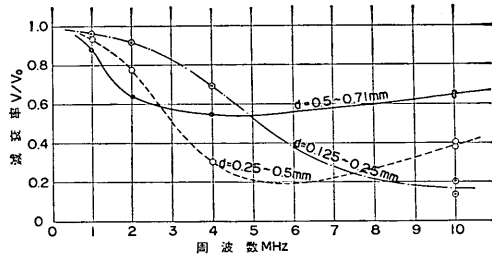
図A-9-(5) 超音波減衰曲線  $l=9\text{cm}$ ,  $f=10\text{MHz}$



図A-10 超音波減衰曲線  $l=18\text{cm}$ ,  $f=1\text{MHz}$



図A-11-(1) 超音波パルスの減衰率と周波数との関係  $l=4.5\text{cm}$  の場合



図A-11-(2) 超音波パルスの減衰率と周波数との関係  $l=9.0\text{cm}$  の場合

のようにして、超音波パルスの減衰量と、そのときの浮遊砂濃度との関係を求めた。実験に用いた砂の粒径は、 $d=0.125\sim 0.25\text{mm}$ ,  $d=0.25\sim 0.5\text{mm}$ ,  $d=0.5\sim 0.71\text{mm}$  の3種で、超音波の使用周波数は、

$$f=500\text{kHz}, 1\text{MHz}, 2\text{MHz}, 4\text{MHz}, 10\text{MHz}$$

であった。

### 2-2 実験結果

超音波の周波数  $f(\text{Hz})$ , その減衰距離  $l(\text{cm})$ , 浮遊砂粒子の直径  $d(\text{mm})$  をいろいろ変化させたときの超音波パルスの減衰曲線の実験結果を、図A-7～図A-9に示す。図で、浮遊砂濃度は、重量百分率で示してある。図

A-7は、減衰距離  $l=2\text{cm}$ , 周波数  $f=10\text{MHz}$  の場合を示し、図A-8は、減衰距離  $l=4.5\text{cm}$  で各周波数に対する場合、図A-9は、減衰距離  $l=9\text{cm}$  で各周波数に対する場合、図A-10は、減衰距離  $l=18\text{cm}$ , 周波数  $f=1\text{MHz}$  の場合をそれぞれ示したものである。これらの図から、超音波パルス振幅の減衰曲線は、片対数方眼紙上でほぼ直線となることがわかる。また、これらの図をよく見ると、つぎのような興味ある事実がわかる。すなわち、超音波の周波数が  $1\text{MHz}$  のときは、同じ浮遊濃度に対するパルス振幅減衰率  $(1-P/P_0)$  は、砂粒子の粒径が小さくなるほど少なくなるが、周波数が増大するにつれてこの関係が反転し、周波数が  $10\text{MHz}$  になると、 $1\text{MHz}$  の場合とは完全に逆に、砂粒子の粒径が小さくなるほどパルス振幅減衰率が大きくなっている。また、以上の事実は、超音波減衰距離が変化しても同じであるようである。これをさらに明確にするため、超音波パルス振幅  $P/P_0$  と、周波数  $f$  との関係を、浮遊砂濃度  $0.5\%$  の場合に対し、砂粒子の粒径をパラメータにして示したのが図A-11である。図中(1)は、減衰距離  $l=4.5\text{cm}$ , (2)は、減衰距離  $l=9\text{cm}$  場合である。図から、明らかに、超音波パルス振幅減衰率の砂粒子粒径による影響(以下、粒径効果とよぶ)は、周波数  $f$  が増大するにつれて完全に反転していることがわかる。また、この現象は、図A-11-(1), (2)で全く同様に見られ、超音波減衰距離に関係なく、粒径効果の反転が存在することがわかる。この粒径効果の超音波周波数による反転は、とりもなおさず、超音波の浮遊砂粒子による減衰定数が超音波の周波数変化により反転していることを意味するものである。そこで、以上の実験結果から、超音波減衰定数を求め、その特性を理論値と比較してみることとする。

まず、図A-12のように、球形の砂粒子が浮遊している中を超音波が伝播して受波板に達する場合を考える。受波板の断面積を  $B \times C$ , 減衰距離を  $l$  とする。そこでもし、

$$\text{入射超音波の強度} \quad I_0 [W/cm^2]$$

$$\text{砂粒子による反射パワーの総量}$$

$$W_r [W]$$

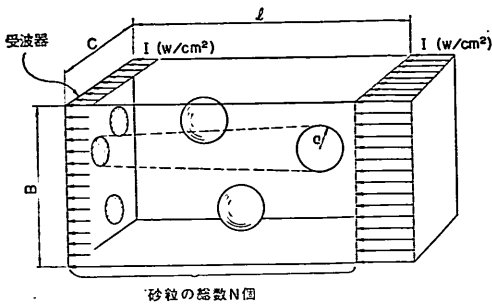
$$\text{受波板表面における平均の超音波パワー}$$

$$I [W/cm^2]$$

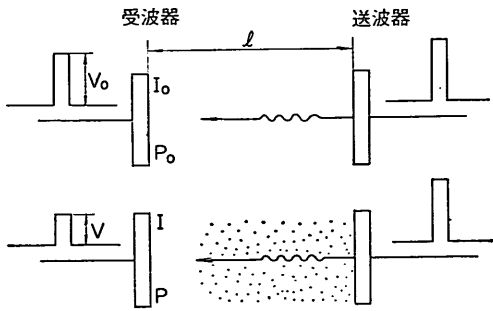
とすれば、

$$I \cdot B \cdot C = I_0 \cdot B \cdot C - W_r$$

すなわち



図A-12 浮遊砂による超音波の散乱



図A-13 超音波強度の減衰

$$\frac{I}{I_0} = 1 - \frac{W_r}{B \cdot C \cdot I_0} \quad \dots\dots(20)$$

となるが、ここで

$$\frac{W_r}{I_0} = \text{全粒子の散乱断面積} = N C_{sca}$$

$C_{sca}$  : 粒子1個あたりの散乱断面積

$N$  : 容積  $B \cdot C \cdot l$  中の砂粒子の数

砂粒子と水との比重を  $\gamma_s, \gamma_w$  とすれば

$$\text{砂粒子の総重量} = N \cdot \gamma_s \cdot \frac{3}{4} \pi a^3$$

$$\text{水の総重量} = \alpha_w \cdot B \cdot C \cdot l$$

であるから、浮遊砂の重量濃度  $C$  は、

$$c = \frac{4 \gamma_s N \pi a^3}{3 \gamma_w B \cdot C \cdot l} \quad \dots\dots(21)$$

である。

また、砂の体積率を  $\phi$  とすれば、

$$c = \gamma_s \phi \quad \dots\dots(22)$$

実験において測定した超音波パルス振幅  $P$  は、超音波送受波器の発振板に作用する電圧  $V$  に比例する。また、超音波のパワー  $I$  [ $W/cm^2$ ] は、電圧の二乗に比例する。そこで、超音波発射時におけるパワーを  $I_0$  [ $W/cm^2$ ]、電圧を  $V_0$  [ $V$ ]、受波時のそれを  $I$  [ $W/cm^2$ ]、 $V$  [ $V$ ]

であるから、

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad \dots\dots(23)$$

(20)~(23) を用い、さらに  $\gamma_w=1, \gamma_s=2.65$  を用いれば、

$$C_{sca} = 11.1(a^3/C \cdot l) \{1 - (V/V_0)^2\} \quad \dots\dots(24)$$

式(11)より、超音波の減衰定数  $\alpha$  [ $db/cm$ ] は

$$\alpha = \frac{C_{sca}}{\pi a^2} \times 3.26 \times \frac{\phi}{a} \quad \dots\dots(25)$$

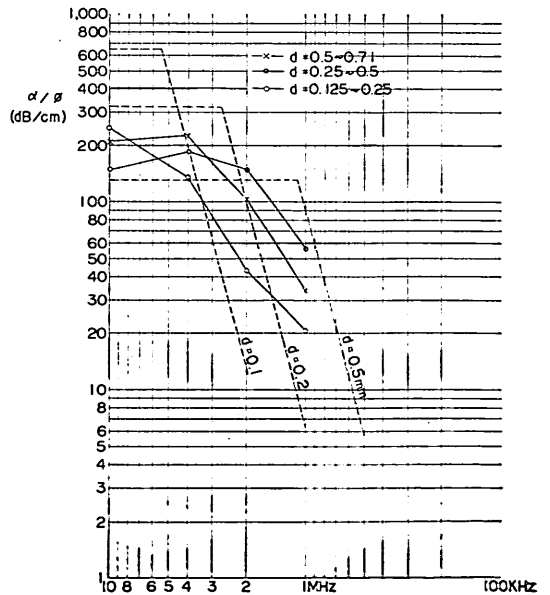
したがって

$$\begin{aligned} \alpha/\phi &= 3.26 C_{sca}/\pi a^3 \\ &= (3.26/\pi a^3) \times 11.1(a^3/c \cdot l) \{1 - (V/V_0)^2\} \\ &= (11.4/c \cdot l) \cdot \{1 - (V/V_0)^2\} \quad \dots\dots(26) \end{aligned}$$

ここで、浮遊砂の重量濃度を 0.5% ( $c=0.005$ )、減衰距離  $l=9cm$  とすれば

$$\alpha/\phi = 252 \{1 - (V/V_0)^2\} \quad \dots\dots(27)$$

となる。そこで、図A-11-(2)に示す実験結果を、(27)式に代入して減衰定数  $\alpha/\phi$  の実験値を求め、理論値と共に示したのが図A-14である。これより、減衰定数に対する粒径効果の特性は、理論と実験の間で極めてよく一致していることがわかる。このことは、超音波の浮遊砂による、減衰を理論値によって論議しても十分信頼性があることを示すものである。

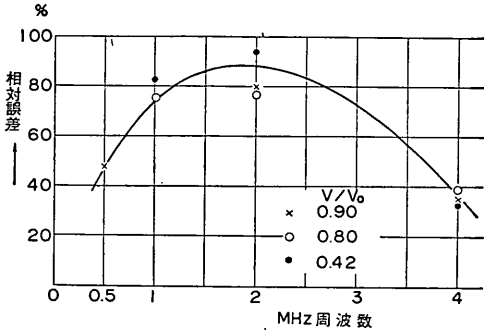


図A-14 減衰定数  $\alpha/\phi$  の理論値と実験値の比較

### 3. 粒径効果とその基礎実験

#### 3-1 粒径効果について

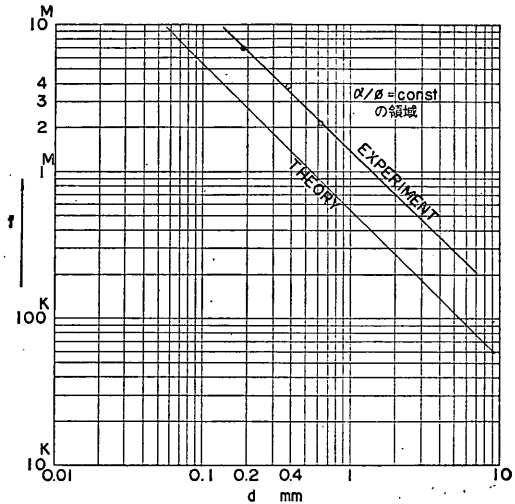
超音波の浮遊砂による減衰は、砂粒子の大きさに微妙に影響されることがわかったが、超音波の減衰を利用して浮遊砂量を測定しようとする場合、このことは非常に困った問題となる。何故なら、現地で波により浮遊された砂の直径が、ある範囲内で変化することは十分考えられ、これが直接浮遊砂量測定の上での誤差となってあらわれるからである。たとえば、図A-15は、底質粒径が、



図A-15 浮遊砂の粒径が変化したことによる濃度測定値の相対誤差  
(0.125 mm~0.25 mm→0.25 mm~0.5 mm)

$d=0.125\sim0.25\text{ mm}$  から、 $d=0.25\sim0.5\text{ mm}$  に変化したとき、超音波パルスピーク振幅  $P/P_0=0.9$  の場合の検出浮遊砂濃度の相対誤差と周波数との関係の実験値を示したものである。このように、 $f=2\text{ MC}$  付近では、9割ほども誤差があり、とても浮遊砂濃度測定器として使えそうもない。この粒径効果の消去には二つの方法が考えられる。その一つは、砂粒子の直径がある値を中心にある程度変化しても、減衰定数があまり変化しないよう、超音波の周波数を選択することである。いま一つは、同じ粒径に対しても、超音波の周波数が異ると、減衰定数が異なることを利用して、二種類の周波数の超音波を用い、逆に粒径を判別することである。もし、現地における浮遊砂の粒径が大きく変化しないのであれば、前者の方が原理的にも簡単なので、有利であろう。そこでまず前者の粒径効果を少なくする超音波周波数の選択について考えてみる。図A-1の減衰定数  $\alpha/\phi$  曲線において、一定の粒径に対しては、周波数がある値より大きいと、減衰定数は一定であるが、周波数がその値より小さくなると、減衰定数は急速に減少する。そこで、粒径の変化により減衰定数が変化することを小さくするに

は、減衰定数が一定となる領域の超音波周波数を用いればよいことになる。たとえば、図A-1において、砂粒径が0.1mmから0.2mmへと変化した場合の減衰定数  $\alpha/\phi$  の変化を調べてみると、両粒径域に対して減衰定数が一定となる周波数、たとえば、 $f=6\text{ MHz}$  を用いれば、減衰定数  $\alpha/\phi$  は、650[dB/cm] から、330[dB/cm] と、約半分に変化するが、もし、減衰定数が一定とされない領域の周波数たとえば、 $f=2\text{ MHz}$  を用いれば、減衰定数  $\alpha/\phi$  は、93[dB/cm] から13[dB/cm] へと、約1/7まで変化する。このように、対象粒径に対して周波数を適当に選定することにより、粒径効果による濃度測定誤差を減ずることができる。この減衰定数が周波数に対して一定になる限界を与える粒径と周波数との関係を、理論計算、および図A-14に示す実験値を用いてプロットしたのが図-16である。図で、曲線より上の領域

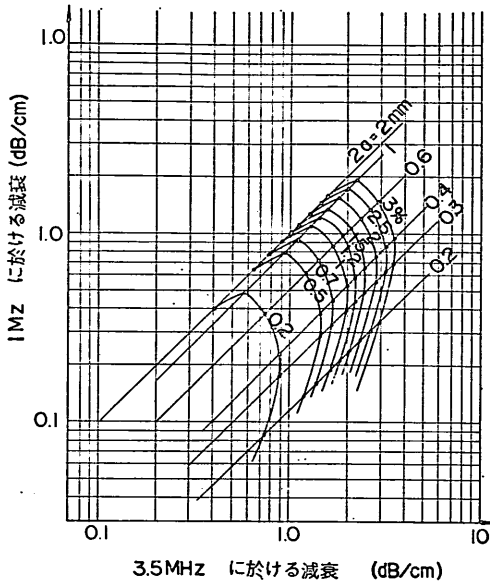


図A-16 減衰定数  $\alpha/\phi$  が周波数  $f$  に対し一定となる限界

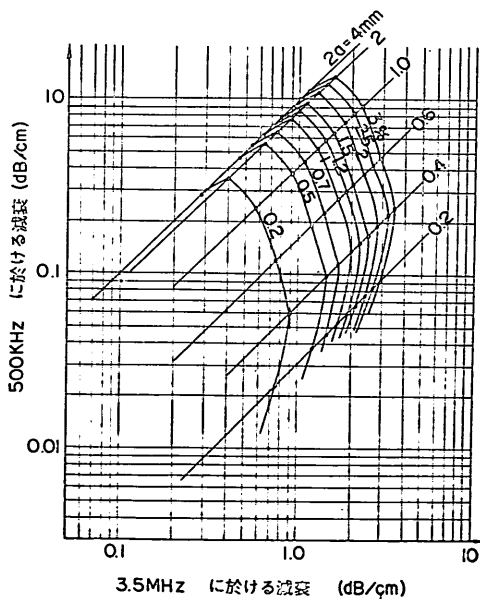
が、一定の減衰定数を与える。理論曲線と実験曲線とは、その勾配はきわめてよく一致しているが、両者互いにシフトしており、実験の方が、同じ粒径に対しては、より高周波を必要とする結果となっている。以上のように減衰定数一定となる周波数を用いた場合でも、減衰定数は、粒径の変化率にほぼ比例した量だけ変化する。したがって、周波数選択による粒径効果減少法は、対象浮遊砂の粒径があまり変化しない場合にのみ用いることができる。

図A-1で明らかなように、減衰定数に対する粒径効果の特性は、超音波の周波数によって異なる。そこで、超音

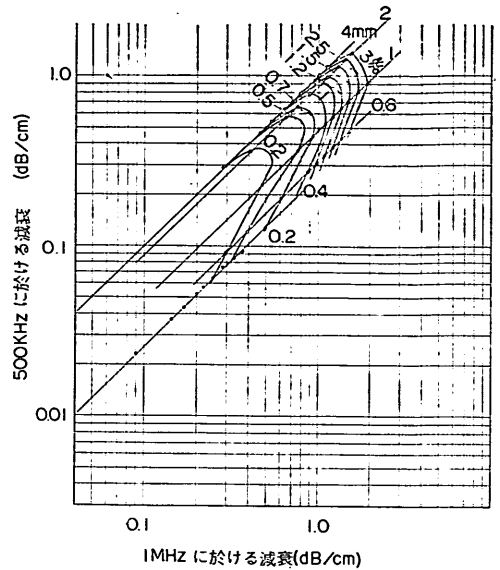
の周波数を2種類用いて、その各々の周波数に対する超音波減衰率を求め、浮遊砂粒子の粒径を判別する方法について考えてみる。もし、このようにして砂粒径が判別



図A-17-(1) 理論値による粒度判別グラフ  
1 MHz, 3.5 MHz



図A-17-(2) 理論値による粒度判別グラフ  
500 KHz, 3.5 MHz



図A-17-(3) 理論値による度判別グラフ  
500 KHz, 1 MHz

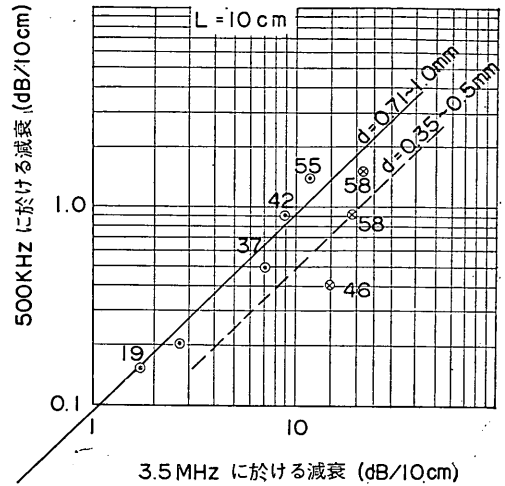
できれば、浮遊砂濃度測定の精度を非常に高くすることができる。減衰定数  $\alpha/\phi$  の理論曲線を示す図A-1において、まず、砂粒径を与え、浮遊砂の体積濃度  $\phi$  を変化させたときの、二種類の超音波周波数に対する減衰定数  $\alpha$  [dB/cm] を求め、これらを縦軸、横軸にとってプロットする。これを、種々の粒径について行なうといわゆる粒度判別グラフをつくることができる。図A-17-(1), (2), (3)は、このようにして作った理論値による粒度判別グラフで、(1)は、1MHz, 3.5MHz, (2)は、500 kHz, 3.5MHz, (3)は、500 kHz, 1MHzをそれぞれ用いた場合のものである。これらの図でわかるように、一定の砂粒径に対しては、周波数の異なる二つの超音波の減衰定数は、両対数紙上で互いに直線関係にある。これに対し、浮遊砂濃度はを一定にする曲線は、カーブをなし、これらの直線と交叉している。これらの図を用いれば、浮遊砂の中を、周波数を異にする二つの超音波の減衰量を測定することにより、浮遊砂の粒径、粒径に影響されない浮遊砂濃度を求めることが、原理的には、できるはずである。

### 3-2 粒度判別に関する基礎実験

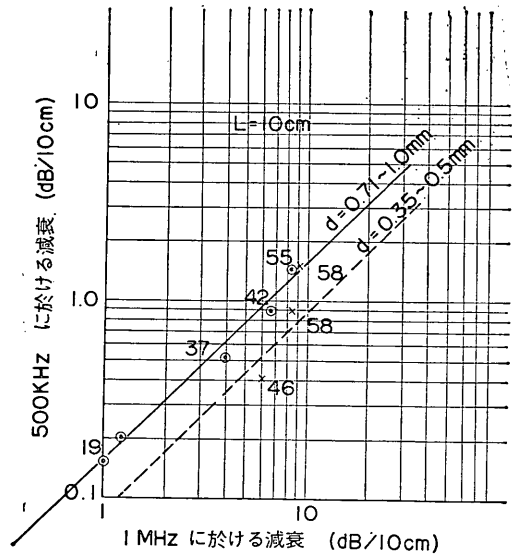
図A-17に示すように粒度判別グラフが実際に得られれば、超音波減衰利用による浮遊砂量測定精度が非常に高められるはずである。そこで、これを実験的に調べてみた。

実験は、超音波減衰に関する実験と同じ方法をとった。図A-6に示す濁度発生装置を用い、まずプロペラの回転速度を一定に保ち、約0.2%ずつ濃度が変化するように砂を定量ずつ水中に入れ、超音波減衰量測定と同時に水槽の中央から約1 lの水を採取し、含有砂量を定量した。超音波減衰量の測定は、超音波送波器から発射された超音波が、反射板からはね返って来るのを受波し、増幅してオシロスコープでレベルを読み取った。このようにして、砂粒径  $d=0.125\sim 0.25\text{ mm}$ ,  $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ ,  $0.5\sim 0.71\text{ mm}$  と三種類に変化させ、超音波の伝播距離  $l=10, 20, 30\text{ cm}$  ととり、超音波の周波数  $f=500\text{ KHz}$ ,  $1\text{ MHz}$ ,  $3.5\text{ MHz}$  に対して実験を行なった。

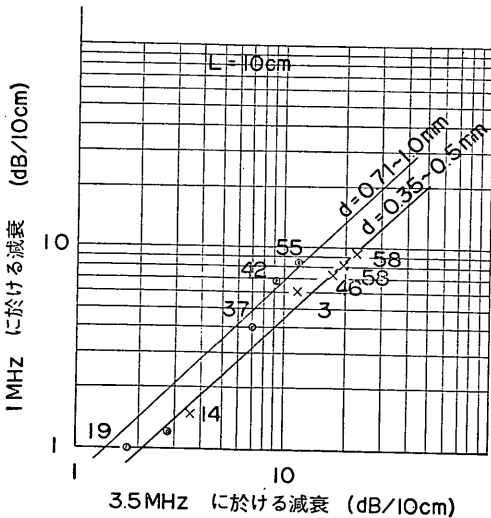
実験結果から、各周波数組合せに対する粒度判別、および濃度検定に関するグラフをつくると、図A-18-(1), (2), (3)のようになる。図で、各粒径域は、プロットした点の形で区別してあり、等粒径を示す直線は、これら実験値をほぼ平均するように引いたものである。また、図中各プロット点に記してある数字は、測定時の浮遊砂濃度を容積率( $\times 10^{-2}\%$ )で示したものである。これらの実験結果によれば、同一の砂粒径に対してデータは、ほぼ直線状にならんでおり、図A-17に示した理論による粒度判別グラフと、傾向がよく一致している。ただし、実験ケースによっては、データのばらつきが著しいが、これは超音波減衰量測定を、二つの周波数に対して同時に行わず、一つの周波数に対して測定を終えた後、もう一方の周波数について測定を行うという方法を



図A-18-(2) 実験による粒度判別グラフ  
500 KHz, 3.5 MHz  $l=10\text{ cm}$



図A-18-(3) 実験による粒度判別グラフ  
500 KHz, 1 MHz  $l=10\text{ cm}$



図A-18-(1) 実験による粒度判別グラフ  
1 MHz, 3.5 MHz  $l=10\text{ cm}$

とったことにも原因があるものと思われる。また図A-18において、浮遊砂濃度をみると、右上方が濃度が高く、左下方が濃度が小さいという傾向があるが、これも、図A-17の理論曲線とよく一致しているところである。

以上のように、二つの超音波周波数を用いた粒度判別法、および濃度検定法は、実験的にもその可能性を十分見込むことができるようである。ただし、図A-17の理



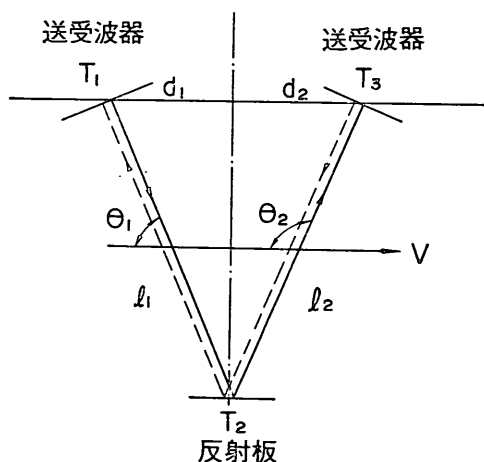
論判別グラフからもわかるように、粒度、あるいは濃度判別の精度を高めるためには、対象となる砂の粒径に対し、超音波の周波数を適切に選定する必要がある。

#### 4. 超音波式小型漂砂量計の試作

海底の砂は、波や流れの作用により浮乱浮遊し、流れに乗ってその方向に運ばれる。このようにして移動する砂の量を漂砂量とよんでいる。漂砂量を測定するには、測定器の検知部等が、流れや砂の浮遊現象を乱すことなく、浮遊砂量と流速を同時に測定する機能を有するものでなければならない。ここでは、これらの二つの機能を有する小型漂砂量計を試作した結果について述べる。

##### 4-1 流速測定

水中を超音波が伝播するとき、もし水が流れていればその流速に比例した量だけ、2地点の間の超音波伝播時間にずれが生じる。したがって、この時間差を知ることにより、流速が測定できる。まず、図A-19のように、



図A-19 流速測定の原理

流速Vで流れる水中に二つの送受波器  $T_1$ ,  $T_3$  があり、 $T_1$  から放射された超音波が発射板  $T_2$  により反射されて  $T_3$  に達し、また  $T_3$  から放射された超音波が  $T_2$  により反射されて  $T_1$  に達する場合を考える。 $T_1$  から  $T_2$  を経て  $T_3$  に達し、電氣的に検知されるまでの時間を  $T_1$ ,  $T_3$  から  $T_2$  を経て  $T_1$  に達する場合を  $T_2$  とする。超音波の水中伝播速度を  $C$ 、超音波伝播経路と水の流向とのなす角を、図のように  $\theta_1, \theta_2$ 、 $T_1 T_2$  および  $T_3 T_2$  の距離をそれぞれ  $l_1, l_2$  とすれば

$$t_1 = \frac{l_1}{C+V \cos \theta_1} + \frac{l_2}{C+V \cos \theta_2} + \Delta t \quad \dots\dots(28)$$

$$t_2 = \frac{l_1}{C-V \cos \theta_1} + \frac{l_2}{C-V \cos \theta_2} + \Delta t \quad \dots\dots(29)$$

ただし、 $\Delta t$  は、計測器の電氣的遅延時間である。したがって、二つの伝播経路における時間差は、

$$\begin{aligned} t_2 - t_1 &= \left\{ \frac{l_1}{C-V \cos \theta_1} - \frac{l_1}{C+V \cos \theta_1} \right\} \\ &+ \left\{ \frac{l_2}{C-V \cos \theta_2} - \frac{l_2}{C+V \cos \theta_2} \right\} \\ &= \frac{2Vd_1}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta_1} + \frac{2Vd_2}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta_2} \quad \dots\dots(30) \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned} d_1 &= l_1 \cos \theta_1 \\ d_2 &= l_2 \cos \theta_2 \end{aligned}$$

ここで、 $C \gg V$  であるから

$$t_2 - t_1 = \frac{2Vd}{C^2}$$

したがって

$$V = \frac{t_2 - t_1}{2d} \cdot C^2 \quad \dots\dots(31)$$

ここで

$$d = d_1 + d_2$$

である。

また

$$\begin{aligned} t_1 + t_2 &= \left\{ \frac{l_1}{C-V \cos \theta_1} + \frac{l_1}{C+V \cos \theta_1} \right\} \\ &+ \left\{ \frac{l_2}{C-V \cos \theta_2} + \frac{l_2}{C+V \cos \theta_2} \right\} + 2\Delta t \\ &= \frac{2l_1 C}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta_1} + \frac{2l_2 C}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta_2} + 2\Delta t \\ &= \frac{2}{C} (l_1 + l_2) + 2\Delta t \quad \dots\dots(32) \end{aligned}$$

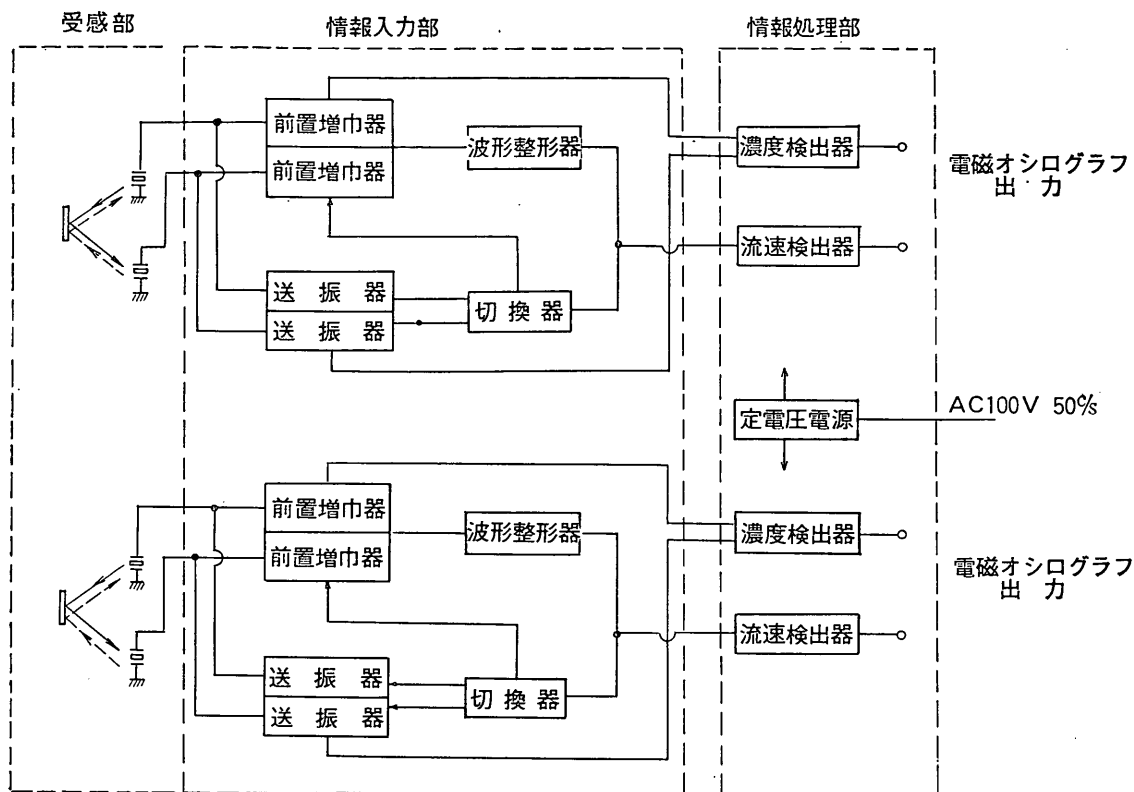
これより

$$C = \frac{2(l_1 + l_2)}{(t_2 + t_1) - 2\Delta t}$$

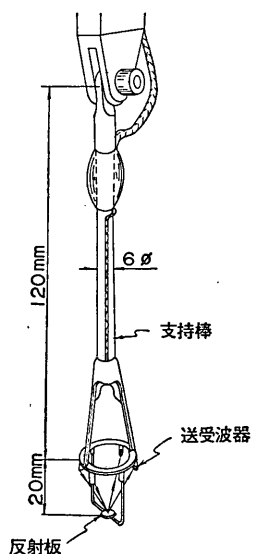
これと(31)より、

$$V = \frac{2(l_1 + l_2)^2}{d} \cdot \frac{(t_2 + t_1 - 2\Delta t)^2}{t_2 - t_1} \quad \dots\dots(33)$$

となり、流速測定値が、超音波の伝播速度によらなくなる。すなわち、図A-19のように検構により流速を測定すれば、超音波の伝播速度が水温により変化することの影響をなくすることができる。



図A-20 小型漂砂量計のブロックダイアグラム



図A-21 小型漂砂量計検知部の外観

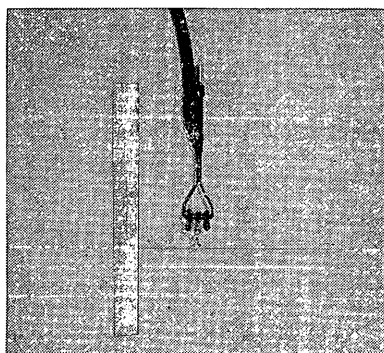


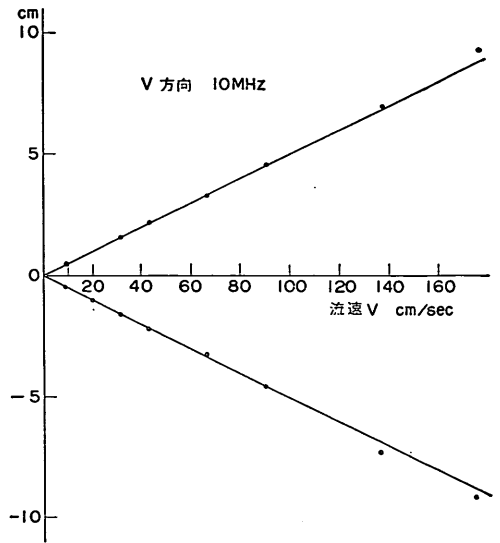
写真-2

#### 4-2 小型漂砂量計

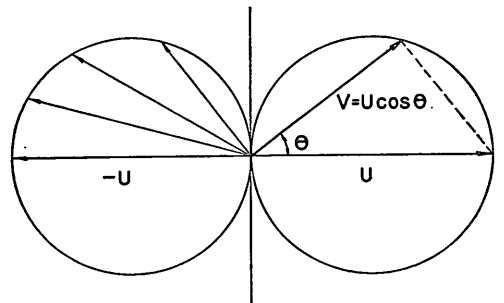
流速、濃度を同時に検知する装置として、まず、室内用の小型漂砂量計を試作したが、その電気回路に関するブロックダイヤを図A-20に示す。本装置は、図のように受感部、情報入力部、情報処理部より成り、この出力が電磁オシログラフへ送られる。また、二方向成分の流速

漂砂の連続的な現地観測について

Vを測定するため、同じ回路が並列に二含まれている。また、超音波の伝播方向を正、逆と切り換えるため、送信位置、前置増器が対になっている。その動作の概要を述べると、送振器から10V(P-P)の変調パルス電圧を送信器に加え、この電気信号を音エネルギーに変換、超音波パルスとして送波器から放射する。超音波パルスは、途中の浮遊砂により減衰をうけ、さらに水の流れに従って伝播速度の影響をうけながら、反射板で一たん反射されて受波器へ帰って再び電気信号に変換される。この受波パルスは、増幅され、波形整形回路で矩形パルスにされた後、流速検出用の情報処理部へ送られる一方、自走回路を同期させ、切換器を作動させて前にパルスを送った送信器ではない方の送信器から電圧パルスを送らせる。このように、切換器で超音波の伝播方向を正逆と交互に切換えている。こうして交互に切換えることにより得られたパルスをLow Pass Filterに通してアナログ変換して、流速の情報を得る。浮遊砂濃度の検出は、送信器から発せられるパルス電圧と、受波器から前置増幅器を通ったパルス電圧との差の電圧を取り出すことにより行うものである。以上のような機能を果たす回路が、U、V方向として二系統独立してあるわけであるから、使用周波数を互いに異なったものとすれば、先に述べた粒度判別ができることになる。本回試作した小型漂砂計においては、第1回試作において、2MHzおよび10MHzを用い、第2回試作において、1MHz、3.5MHzを用いた。実際の検知部の外観は、図A-21に示す通りで、送



図A-22(2) 流速検定曲線 V方向



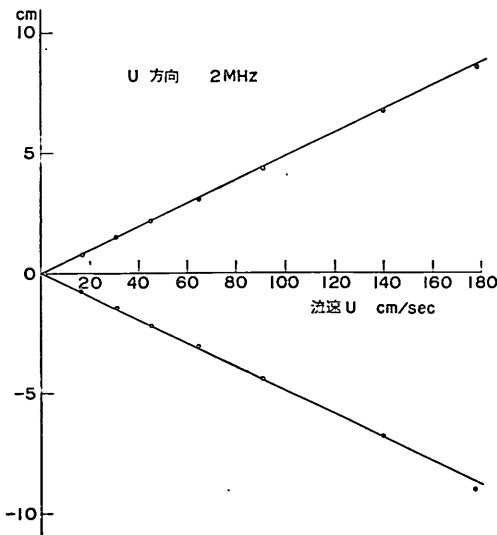
図A-23 方向特性

受波器から場出た超音波は、下の円板状反射板で反射されて、反対側の送受波器へ到達する。流れを乱さないように、検知部の部品はすべて細くなっている。

4-3 流速、濃度の検定

周波数  $f=2\text{MHz}$ 、 $10\text{MHz}$  の場合

流速測定における直線性、方向特性について検定した結果について述べる。流速検定には、検知部を取りつけた台車を等速度で走らせ、これが1mの区間を通過するに要する時間をカウンターにより計った。図A-22-(1)、(2)は、U方向(2MHz)、V方向(10MHz)に対する流速検定曲線である。両者とも、直線性が非常に優れていることがわかる。つぎに、検知部は、U、V方向、すなわち、互いに直角方向の流速成分のみを測定できるわけであるが、流向がこれらに対し斜めるとき、正しく



図A-22-(1) 流速検定曲線 U方向

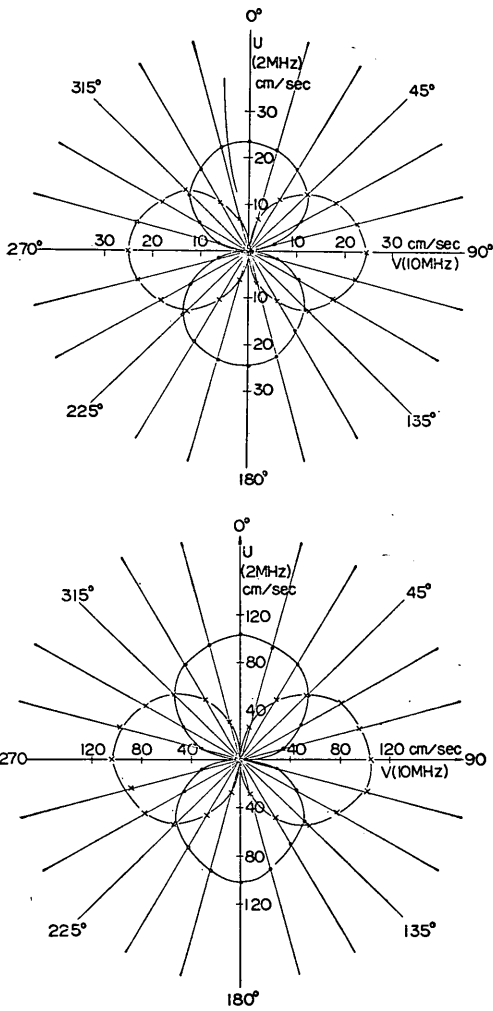
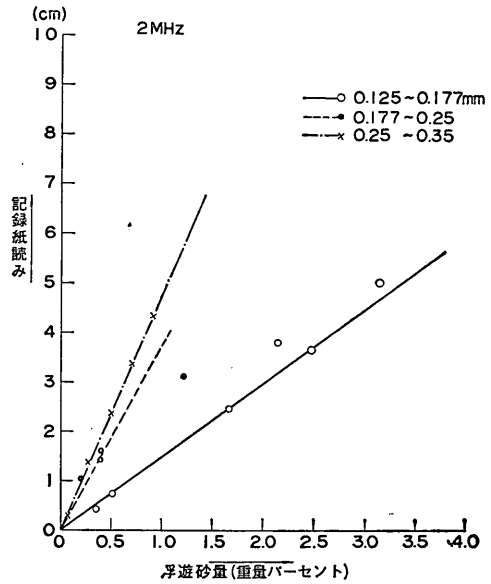


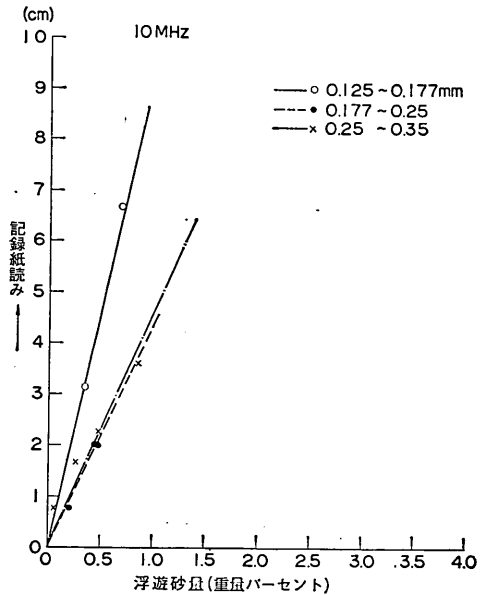
図 A-24

流速成分を測定しているかどうか、すなわち、方向特性について調べてみた。たとえば、 $U$ 方向の場合を考えてみると、図A-23のように、 $U$ 方向へ流速 $v$ の流れがあるときは、 $v$ の値そのものが流速として測得されるが、 $U$ 方向に対し $\theta$ の角度をなした流れがあるときは、 $U$ 方向で測得される流速は、 $v \cos \theta$ でなければならない。このことは、すべての流向に対して測得される速度ベクトルの先端が、図A-23のように同一円周上になければならないことを意味する。逆の流向に対しては、この反対側にもう1つ円が出来るので、通常このような特性を8の字特性といっている。そこで、本装置について、検出部を $15^\circ$ ずつ回転させて検定した結果を、図A-24に示す。図中上は、流速50 cm/sec、下は、流速1 m/

sec に対応するものである。これらの図では、 $U$ 方向、 $V$ 方向同時に示してある。いずれの場合も、ほぼ完全な円形を示しており、本装置の流速測定に関する方向特性が極めて優れていることがわかる。

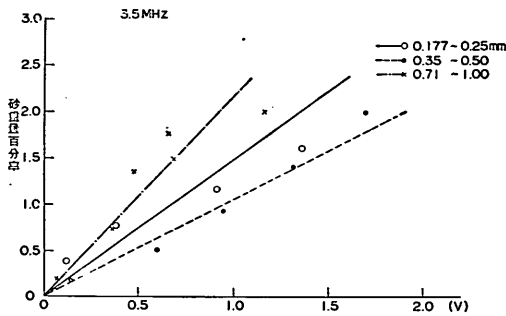


図A 25-(1) 小型漂砂量計による濃度検定曲線 2 MHz

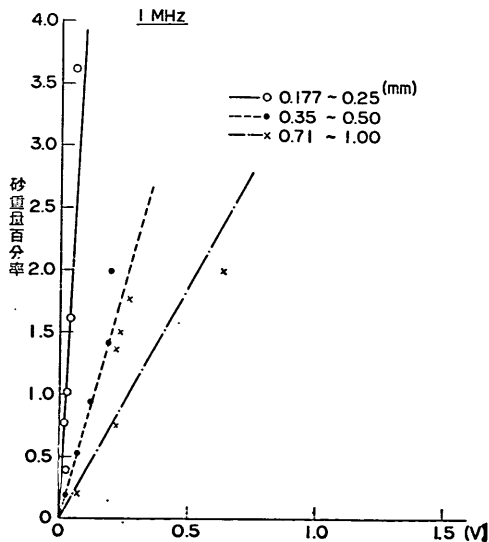


図A 25-(2) 小型漂砂量計による濃度検定曲線

漂砂量を測るためには、流速と同時に浮遊砂量を測定する必要があるわけであるが、本装置についての濃度検定を、図A-6の濁度発生装置を用いて調べた。その結果を図A-25-(1)、(2)に示す。図A-25-(1)は、2MHz(U方向)図A-25-(2)は、10MHz(V方向)に対するものである。図から、データに少しばらつきがあるが、本実験の濃度範囲では、検定曲線はほぼ直線となるようである。また、粒径効果は、10MHzの方向が、2MHzに比べてずっと少ないこともわかる。ただし、10MHzでは、超音波の減衰率が非常に大きいので、測定濃度に大きな制約があり、濃度0.5%以下であってもV方向の流速出力が得られなくなる場合があった。一方2MHzの場合は、浮遊砂濃度が1%を越えても、流速出力には支



図A-26-(1) 小型漂砂量計による濃度検定曲線  
1 MHz

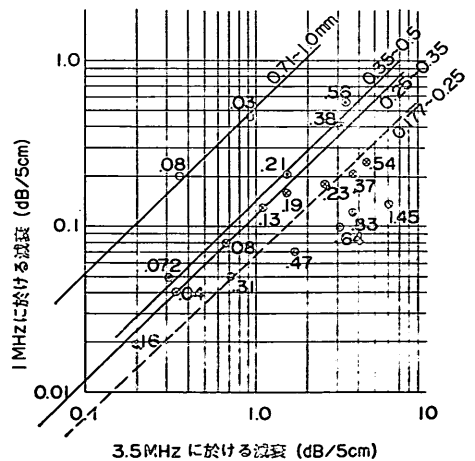


図A-26-(2) 小型漂砂量計による濃度検定曲線

障がなかった。そこで、V方向に対してもこのような浮遊砂濃度に対する制約をなくすには、周波数をもっと小さくする必要がある。周波数が小さくなると、粒径効果も大きくなるので、この場合は、粒度判別を行う必要がある。

周波数  $f=1\text{MHz}$ ,  $3.5\text{MHz}$  の場合

浮遊砂による減衰のため、流速測定が影響を受けない様に、前回より低い周波数領域、すなわち、1 MHz と 3.5 MHz を用いて、とくに粒度判別特性について調べた。まず前ケースと同じ方法で、濃度減衰曲線を探ると、図A-26-(1)、(2)のようになる。図A-26-(1)は、 $f=1\text{MHz}$  に対するもので、図A-26-(2)は、 $f=3.5\text{MHz}$  に対するものである。1 MHz では、3.5 MHz の場合と比較して、粒径効果が大きく出ており、粒径が小さいほど減衰率が少ないという結果が出ている。これに比べて 3.5 MHz の場合は、粒径効果は小さく出ているが、粒径  $d=0.177\sim 0.25\text{mm}$  の検定曲線が、それより大きな粒径に対する検定曲線の間へ来ている。これは、図A-1で、 $f=3.5\sim 4\text{MHz}$  の減衰曲線を見れば、当然あり得ることがわかる。図で、 $d=0.1\text{mm}$  に対する減衰曲線は、 $d=0.2\text{mm}$  および  $d=0.5\text{mm}$  の粒径の間に来ており、 $d=0.5\text{mm}$  の場合の方が、減衰定数が小さくなっているが、これは、図A-26-(2)と、傾向が完全に一致するものである。 $f=1\text{MHz}$ ,  $3.5\text{MHz}$  なる二つの周波数を用い、種々の砂粒径、浮遊砂濃度に対する減衰率を調べ、粒度、濃度判別グラフをつくと図A-27のようになる。これに対する理論曲線は、図A-17-(1)であ



図A-27 小型漂砂量計による粒度判別グラフ  
(各点の添付数字は、重量パーセント濃度)

るが、粒度判別曲線が両対数紙上で直線となる傾向は、高濃度の場合を除けば、ほぼ一致している。高濃度の場合、理論計算で仮定された、すべての粒子の投影面を考えるということが適用できなくなるためではないかと思われる。また、図において濃度の判別が、かなり明瞭にできるようである。すなわち、図 A-27 のように粒度濃度判別グラフを、十分な検定のもとに用意すれば、砂粒径に影響されずに浮遊砂濃度を知ることが可能のようである。

以上、小型漂砂量計を試作し、その流速、濃度検定を行なった結果、かなり良好な結果が得られたが、テスト

の実施を通じて、いくつかの改良すべき点も明らかとなった。1つは、測定濃度をできるだけ大きくするため、超音波周波数を低くする必要があったわけであるが、こうした場合、送波器から出る超音波の指向角が鈍くなり、反射板で反射されずに直進し、実験水路側壁や水路床で反射されて帰って来る割合が多くなることである。これが、とくに流速検出に支障をきたしがちである。これを解決するには、1つは反射板を大きくすること、いま1つは、送波器の発振板の形状を工夫して、超音波の指向性を鋭くすることである。また、流速と浮遊砂濃度を同時に測定したときの両者の相互干渉については、テスト方法が困難でもあり、検討するに至らなかった。