

容量型波高計について

稲田 亘・渡部 勲

国立防災科学技術センター平塚支所

Capacitance-Type Ocean Wave Meter

By

W. Inada and I. Watabe

Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention

Abstract

Description is made on a mechanism, operation and response characteristics of an ocean wave meter of variable capacitance type. A sensor of the meter is an iron pipe coated with epoxy resin and forms a coaxial condenser in cooperation with sea water surrounding the pipe. The meter gives an instantaneous wave height. Through tests, the meter is proved to be of a good linearity for variations in wave height, a high stability in operation, a quick response to rapid variations in wave height and an enough accuracy.

まえがき

容量型波高計は、広範囲の周期の波浪を観測する目的で製作された測器である。この波高計の特長は出力が測定波高値に比例した電圧であること、広範囲の周期の波に対してよい応答を示すこと、およびトランジスタを使用したプリント回路の採用で動作が安定していることなどである。

1. 受感部構造

受感部は図1に示すように、海面の昇降に比例して電気容量が変化する、同軸型コンデンサである。すなわちこのコンデンサでは海水が外側電極を形成しており、その静電容量 C は、 $C=2\pi\epsilon h/\log(b/a)=[\epsilon_s h/\log(b/a)]\times 24.1\times 10^{-12}[\text{F/m}]$ で与えられる。この式で ϵ は絶縁体の誘電率、 ϵ_s は絶縁体の比誘電率、 a は内側電極の外径、 b は外側電極の内径、 h は波高(円筒の長さ)である。上式で ϵ, a, b は定数であるから、 $2\pi\epsilon/\log(b/a)$ を K とおくと、上式

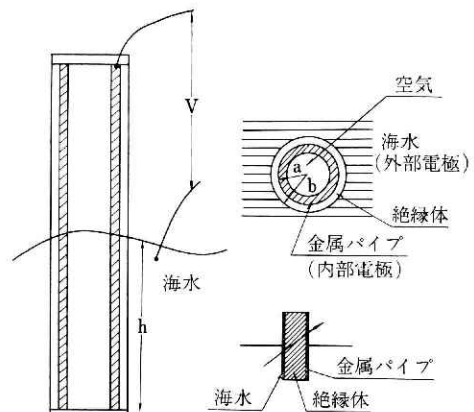


図1 受感部構造

は $C=Kh$ で表わされる。すなわち静電容量 C は、円筒の長さつまり波高 h に比例する。

2. 測定原理

図2に示す回路において、受感部を形成する可変容量 C の両端に、一定周波数 ω の交流電圧を加え、その実効値を常に一定に保つようにする。出力インピーダンス R の両端の電圧 V_o は、 $V_o = I_a R = V_c \omega C R = V_c \omega R K h$ で表わされる。この式で $V_c \omega R K$ は一定であるから、これを P と置くと、 $V_o = P h$ と書ける。すなわち出力電圧 V_o は波浪により振幅変調を受け、その実効値は波高 h に比例する。 V_o を一定に保つためには V_c を制御電圧としてフィードバックし、それにより較正電流 I_a を $V_c = I_a / (\omega C)$ の右辺が一定になるよう制御している。

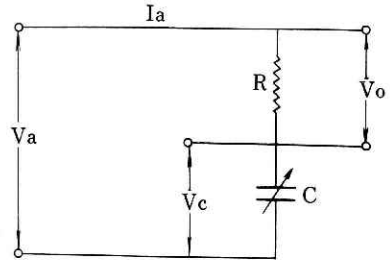


図2 測定原理

3. 回路構成

回路は大きくわけて発振回路、制御回路、受感部、出力回路からできている。(図3) 発振回路では、測定用電源電圧 V_a として用いられる周波数 75kc の正弦波を発振しており、制御回路では、受感部の電圧 V_o が一定になるよう正弦波電圧 V_a を制御している。受感部回路では、出力 $V_o = P h$ を取り出すと同時に V_o を検出して制御回路へフィードバックしている。出力回路は、低出力インピーダンスを持ち、一般の記録計と A-D 変換器に同時に接続できる。出力電圧の大きさは、測定可能な最大波高に対してアナログ記録用には $\pm 1V$ 、デジタル記録用には $\pm 10V$ となっている。この波高計では受感部に与えられる電圧 V_c が一定である必要があるので、各回路が外部からノイズを受けないよう設計上特別な考慮が払われている。(図4) 回路が波による h の速い変化に対して充分よい応答を持つためには、波高 h の変化に伴う V_c の変化を較正する制御回路の時間遅れが充分短くなければならない。この回路の時定数は 5×10^{-3} になっており、この値は波の周期に対して無視できると考えられる。

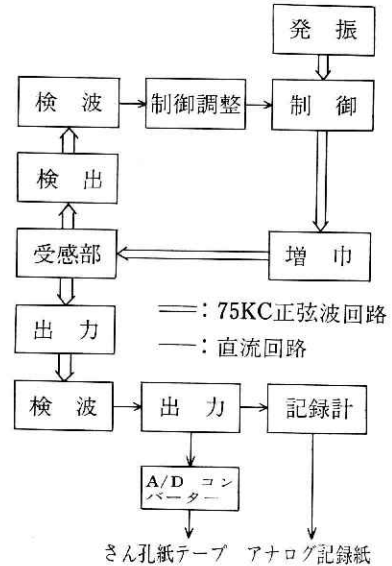


図3 回路構成

電気容量 C は $4 \times 10^3 \text{pF/m}$ であり、受感部は観測塔の南面波高計用支柱に取付けられている、(図7)

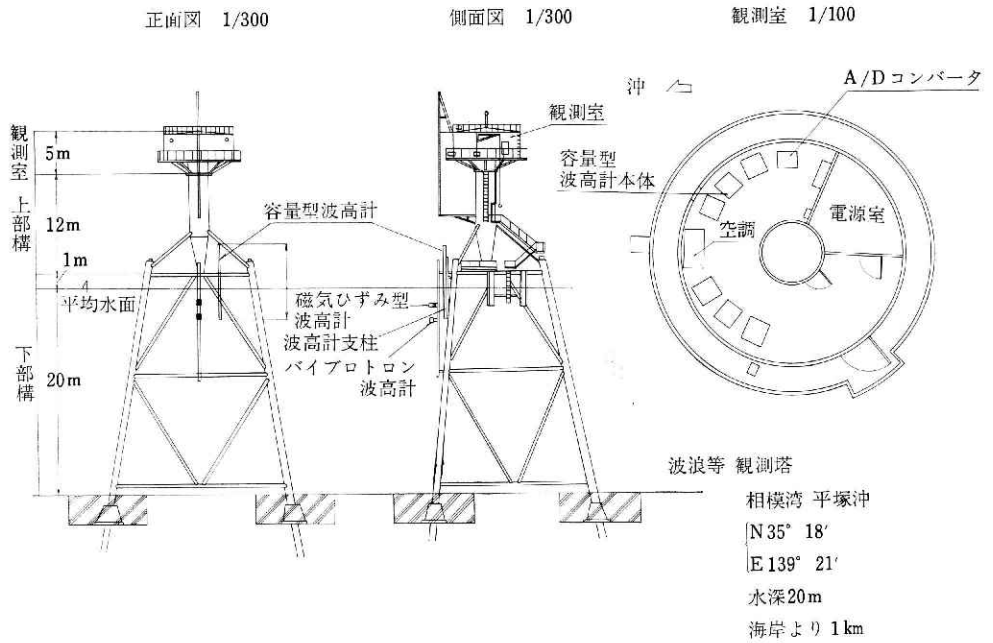


図7 波高計設置位置

5. 波高計の特性試験

受感部をダミーとして用いたマイカコンデンサでおきかえ、その容量の変化と出力電流との関係(図8)を求めて電気回路の直線性をしらべた。次に実際の受感部をセットしてそれを静かな海面状況下で20cmずつ鉛直に上昇または下降させて行き、そのダミー波高と出力電流(図9)との関係を求めた。両図からわかるように、回路および受感部の水位変動に対する直

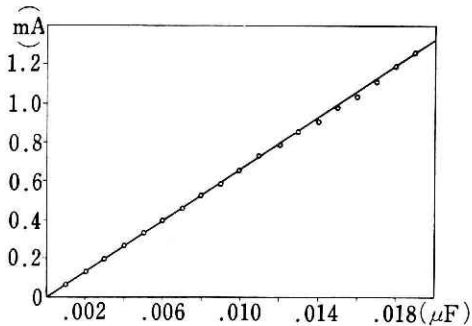


図8 受感部容量変化に対する出力電流値

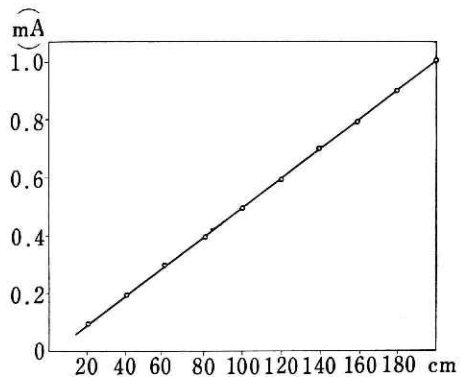


図9 波高に対する出力電流値

線性は非常に良く、総合的な精度は 1 cm とみてよい。観測塔では現在波高に対する出力の較正值を 53cm/V で使用している。

6. 観測結果

昭和40年2月4日より1週間、気象研究所の伊東海洋気象観測塔に、移動用容量型波高計を設置して波浪の観測を行なった。記録計にはフォートコーダを使用した。図10の破線は、2月

8日14時より2分間にとられた観測データを時間間隔 0.08 秒、実際には紙送り速度 25mm/sec の記録紙上で 2mm 間隔で読取った総数 1,500 個のデータについてのオートコロログラムである。観測時の海面は穏やかで風速 3 m/sec 以下、風向は西であり、波浪の状態は波がしらが砕けていない小波であった。図11の破線は、同データのパワースペクトルである。これ

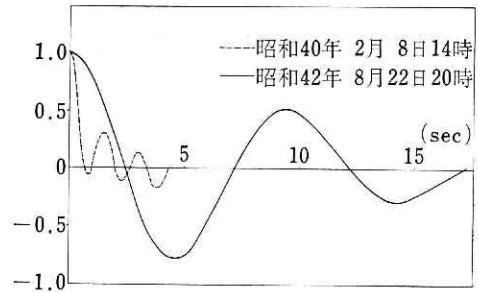


図 10 オートコロログラム

を見るに、0.6c/sec の波が卓越

しており、波の周波数の -5 乗で変化している。平塚沖の波浪等観測塔における測定では、容量型波高計の本体を観測室内に納め、受感部まで 20m の同軸ケーブル (3c 2V) を使用して較正電流 I_a を搬送している。観測データは測器出力電圧 V_0 を 1.3km の複合海底ケーブルの通信線 ($\phi=0.9$ mm 単線) に結合、アナログ伝送して陸上施設内に置いてある自動平衡型記録計で記録するとともに、塔内で出力電圧をデジタルに変換して、パルス信号 (または一符号とデータ 10bit の構成) をもって、サンプリング速度 0.1 秒で陸上に伝送し電子計算機 SDS-92 の実時間制御を通じてデータを採集しており、その結果は、せん

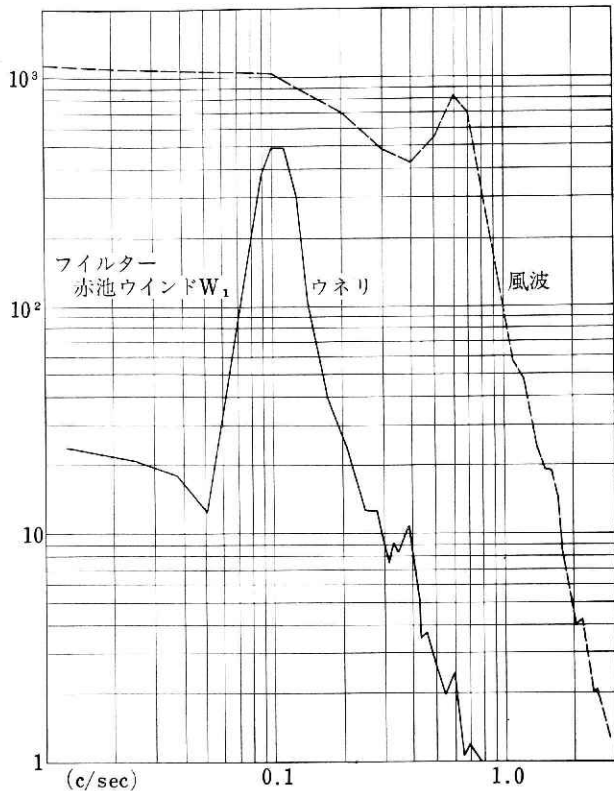


図 11 波浪パワースペクトル

孔紙テープ上および印字ペーパー上に出される。図10の実線は0.4秒のサンプリング間隔で採集された2,000個のデータのオートコログラムであり、図11の実線はそのパワスペクトルである。波の状態は台風18号の接近に伴う、うねりが卓越しており波の表面はしぶきが飛んでいた。(表1)

表 1 波 浪 観 測 値

観測年月日 昭和42年8月22日 20時より 風向 南南西 風速 6m/sec
 観測時間 13分20秒 データ数 2,000 個 気温 23.7°C 水温 24.0°C
 天 候 くもり 波の状態 うねり

	波 高		峰 の 周 期		*平均水面を横切る周期	
	容量型波高計	パイプロトン波高計	容量型波高計	パイプロトン波高計	容量型波高計	パイプロトン波高計
平均	29.8cm	28.8cm	2.6sec	3.8sec	6.6sec	8.8sec
** 1/3	67.6	74.5	4.2	7.6	10.3	12.0
*** 1/10	111.9	111.1	5.9	10.0	12.2	14.2
最大	178.0	155.2	9.6	13.6	15.2	15.2

* 下から上へ横切る周期 ** 大きい順に並べた全観測値の大きい方から1/3個の平均値
 *** 同 1/10 個の平均値

7. 容量型波高計による測定と水位標観測との比較

容量型波高計が忠実に波浪を測定しているかどうかを知るために、受感部の隣に水位標を立て、8ミリカメラを使用して、0.2秒間隔で波による水位の変化を撮影すると同時に、波高計の出力を同間隔でデータ採集する観測を実施した。

(写真1) その結果、水位標観測による波形と容量型波高計出力波形とはよく合っていることがわかった。(図12) 表2は観測波高値であり、図13はそのパワスペクトルおよび水位標による観測値と容量型波高計による観測値の差のパワスペクトルである。なお同時に容量型波高計により約1m離れた水深3.5mの所に設置されたパイプロトン波高計および同

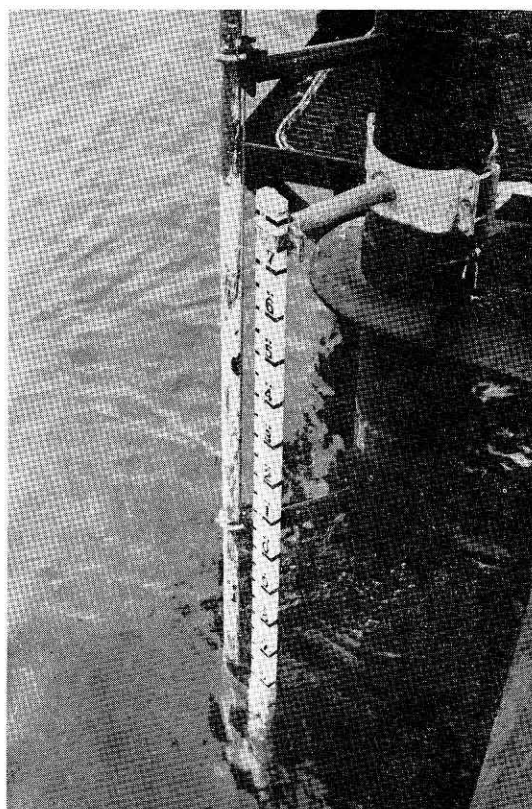


写真 1 容量型波高計と水位標

容量型波高計について—稲田・波部

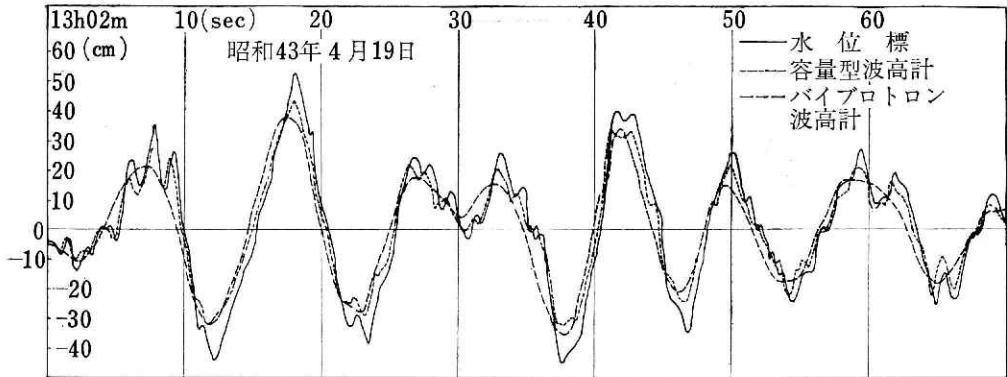


図 12 波浪同時観測記録

表 2 波浪観測値

観測年月日	昭和43年 4月19日 13時より		
観測時間	6分16秒	データ数	1,880 個
天 候	くもり	波の状態	風 波
風 向	北 東	風 速	2 m/sec
気 温	13.0°C	水 温	24.0°C

波 高

	水 位 標	容量型波高計	パイプロトン波高計	磁気ひずみ波高計
平 均	10.8cm	8.9cm	12.8cm	16.9cm
1/3	23.5	20.8	31.4	38.0
1/10	40.9	37.8	51.3	56.0
最 大	97.0	94.3	73.0	79.0

峰 の 周 期

	水 位 標	容量型波高計	パイプロトン波高計	磁気ひずみ波高計
平 均	1.6sec	1.5sec	3.7sec	5.3sec
1/3	2.7	2.5	7.1	8.9
1/10	4.0	3.6	9.8	10.6
最 大	7.4	9.0	11.0	12.6

平均水面を横切る周期

	水 位 標	容量型波高計	パイプロトン波高計	磁気ひずみ波高計
平 均	4.6sec	5.0sec	8.0sec	7.9sec
1/3	8.1	8.6	12.0	11.9
1/10	10.0	10.7	15.1	15.2
最 大	12.0	12.0	17.4	17.2

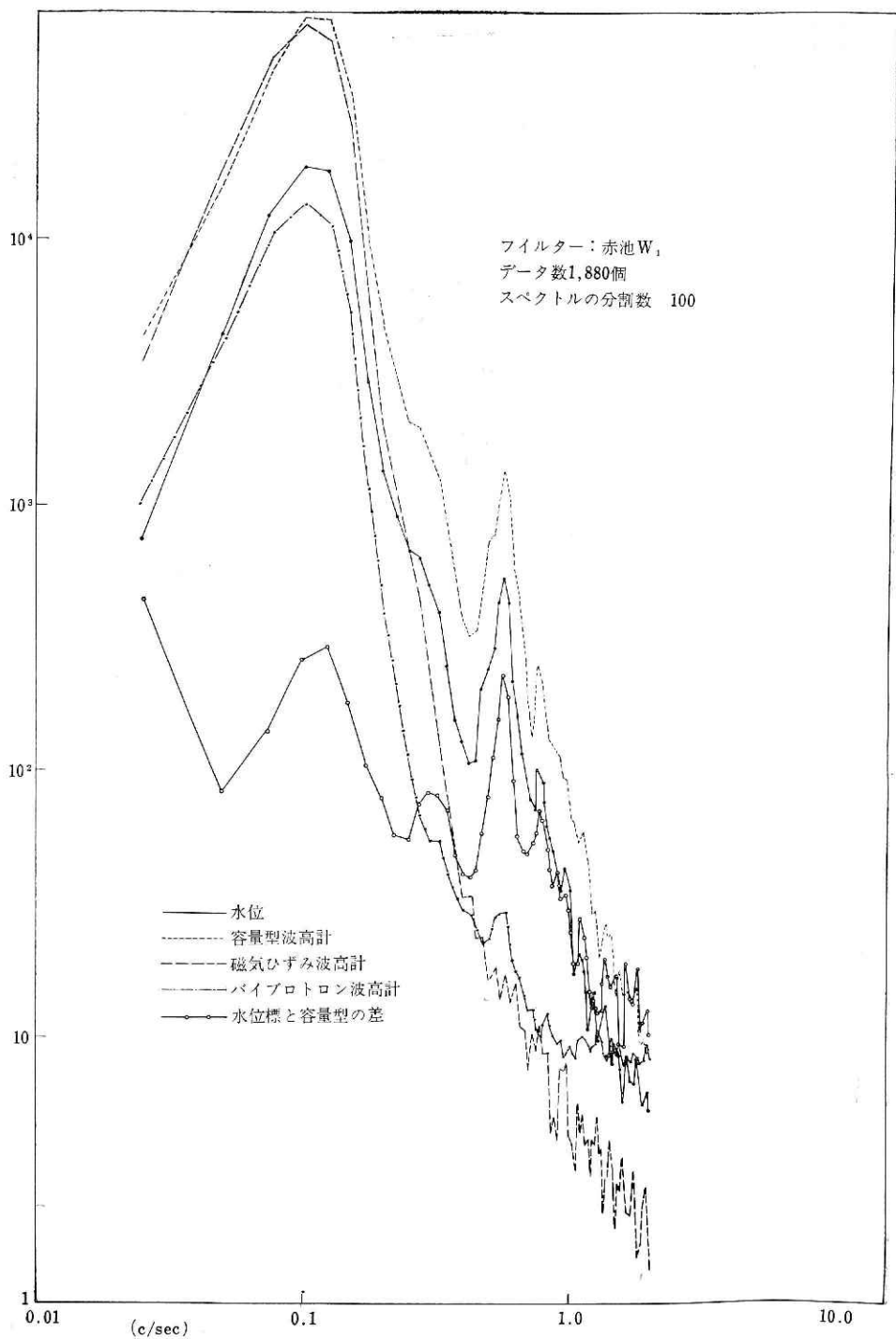


図 13 波浪パワースペクトル

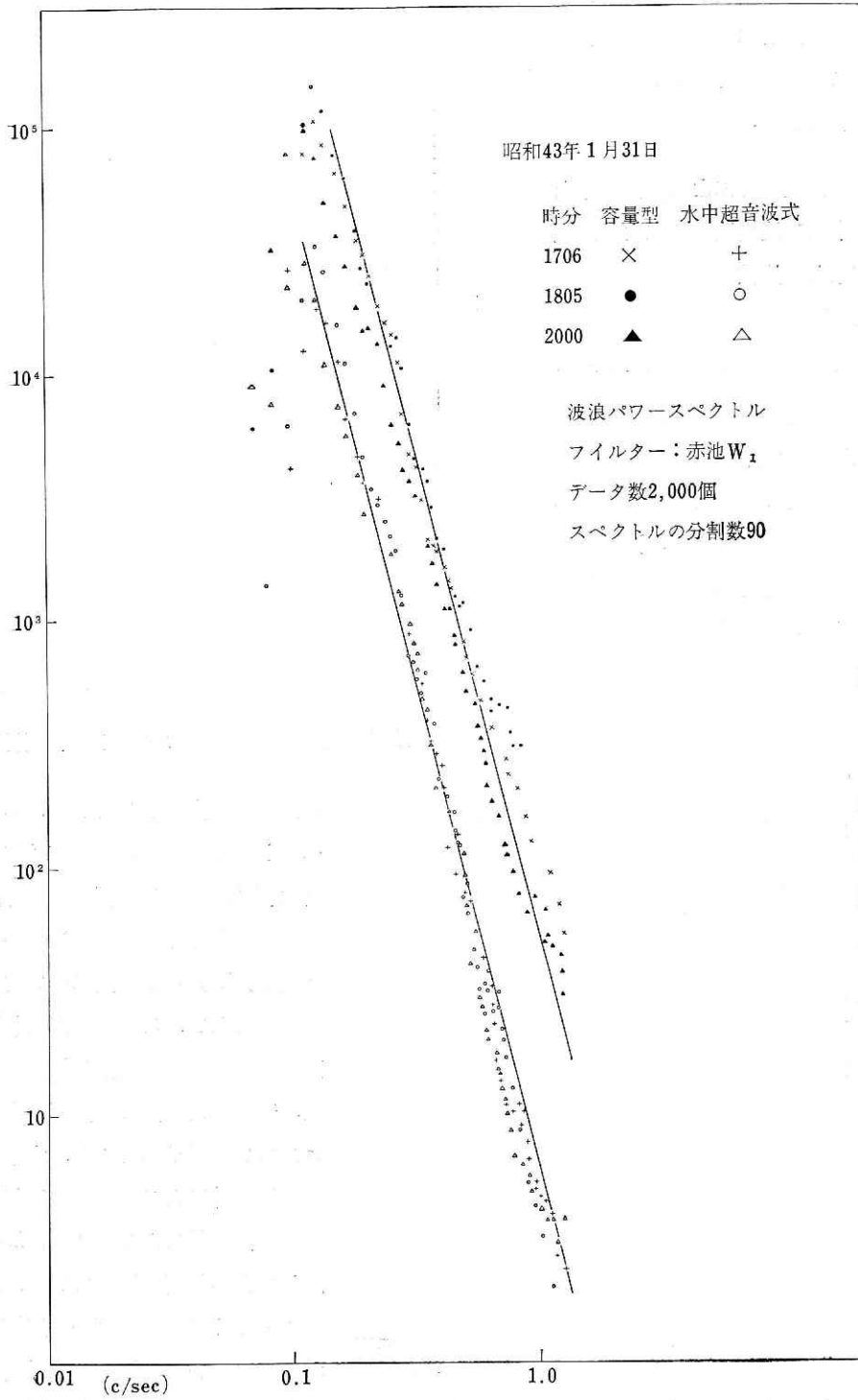


図 14 波浪パワースペクトル

地点水深 4.8m の所に設置された磁気ひずみ波高計による測定をも行った。この測定のおもしろい解析結果は後で報告する。

8. 容量型波高計による測定結果と水中超音波式波高計による測定結果との比較

波高を直接観測できる水中超音波式波高計（港湾技術研究所所有）と容量型波高計による同時観測の結果を比較した。水中超音波式波高計は容量型波高計の位置より南に約10m 沖の海底に設置してある。両波高計の観測データ解析結果は図14に示されている。これによると周波数特性

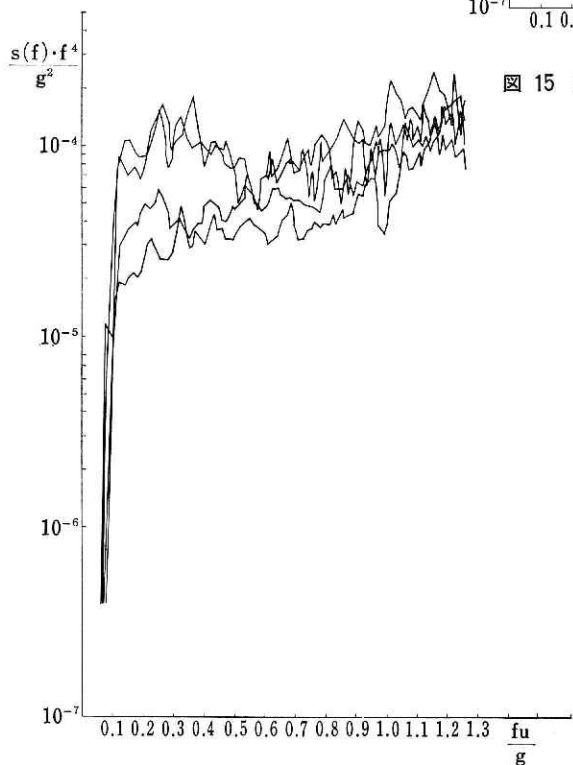


図 16 周波数による波浪パワースペクトル f^4 特性

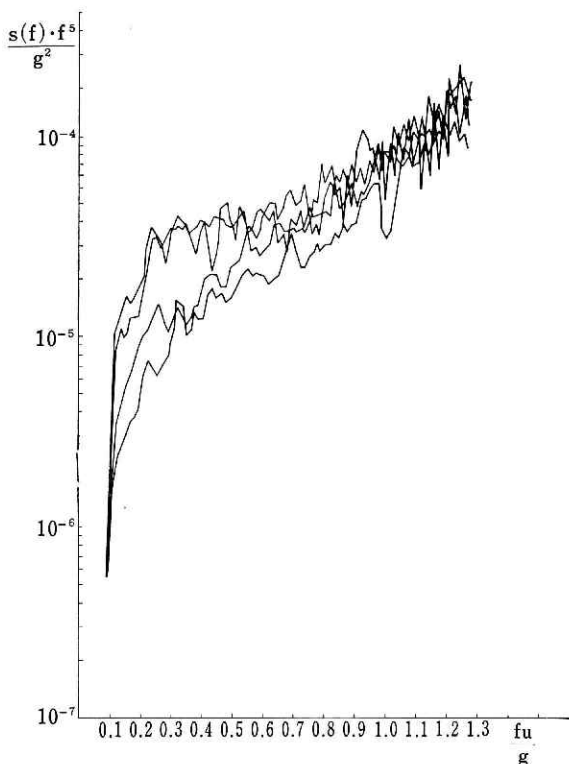


図 15 周波数による波浪パワースペクトル f^5 特性

は同様な傾向を示している。パワースペクトルの周波数に対する減衰傾斜は f^{-5} よりむしろ f^{-4} に近く、一般の場合とやや趣を異にしている。

(図15, 16) この原因についてはあきらかでない。この時の気象状況は南の風が強く海面は荒れ模様であった。表3および図17は同データのクロスコロログラムであり、水中超音波式波高計による測定結果に対して容量型波高計によるそれが、1.4 秒遅れでよい相関を持っている。最大のスペクトル密度をもつ周期 3.6 秒の波について、深海波を仮定して求めた波長 20m および波速 5.6

表3 波浪観測値

観測年月日	昭和43年1月13日 18時5分より		
観測時間	13分20秒	データ数	2,000個
天候	雨	波の状態	うねりおよび風波
風向	S	風速	10m/sec
気温	16.0°C	水温	16.5°C

	波高		峰の周期		平均水面を横切る周期	
	容量型波高計	水中超音波式波高計	容量型波高計	水中超音波式波高計	容量型波高計	水中超音波式波高計
平均	78.6cm	110.1cm	3.2cm	4.2cm	5.8cm	6.0cm
1/3	162.7	215.3	5.1	6.6	8.2	8.1
1/10	226.2	275.0	6.5	7.9	9.4	9.0
最大	375.6	387.0	9.2	9.2	13.2	10.4

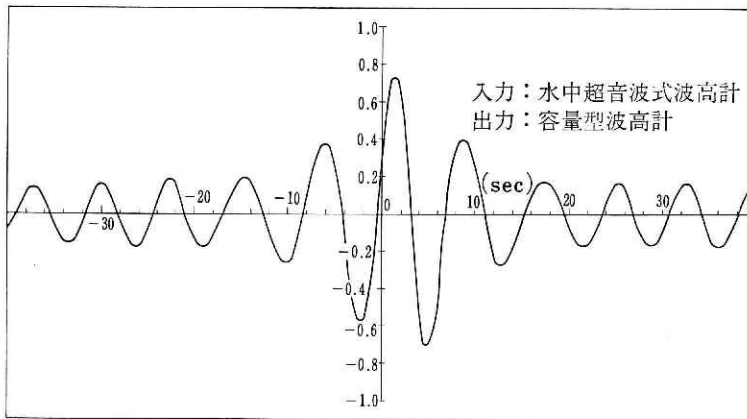


図17 クロスコレログラム

m/sec を用い、この波が水中超音波式波高計の上を通過後、その波高計より水平方向に 8m 隔たった所にある容量型波高計に到達する時間を求めると、ちょうど 1.4 秒になる。したがって上述の時間遅れは波高計の位置によって生じたものと考えられる。

9. むすび

容量型波高計についての問題点および今後の課題について述べる。受感部については強度の向上と付着物による障害発生の防止が問題である。長いパイプを海中に立てるのであるから、どうしても途中数か所を固定しなければ強度が保てない。塔では 90cm の間隔で U ボルトを使用して固定している。(図6) 固定箇所をふやすと、受感部固定箇所付近を水面が上下する時受感部の電気容量 C の変化が不連続になり、記録が階段状になる。対策としては製作費の安い受感部を使用して固定箇所を少なくし損害をうけても直ちに取り替えられるようにするか、

接着剤で裏側だけを固定する方法が考えられる。絶縁物の強度については塩化ビニール樹脂は表面が傷つきピンホールができて絶縁不良になりやすい。一方エポキシ樹脂は非常にかたく少々物がぶつかってもこわれませんが、曲げに弱く塔の受感部は台風の時、波により曲げられて、きれつが生じたことがあった。付着物については、絶縁体の表面に防虫塗料（商品名ビニリアAF）を塗布して、カラス貝、フジツボ、藻類の付着を完全に防いでいる。この塗料はエポキシ樹脂には付着しにくいから樹脂の表面を紙やすりで一度こすってから塗る。なお、この塗料により受感部の特性が変化することはない。変換器本体については問題はほとんどない。V₀の電圧を精度よく一定に保つこと、発振周波数を安定にすることに注意を払う必要があるだけである。われわれの場合、観測室内は18°C~24°Cに保たれており温度変化による変動はない。観測にあたり、受感部と本体を遠くに離して置く場合には中継ケーブルの線間容量が受感部容量と並列に入り、波高対出力の直線性が悪くなる。観測塔では、20mの同軸ケーブル（3c2V）を使用しているがこの長さが限界である。以上のべたように容量型波高計は海面に受感部を設置しなければならない欠点はあるが、波高に対して出力電圧の直線性が良く、しかも応答が速いから、表面波高を観測するのにたいへん有力な測器であると思われる。なお、上述の波浪解析は、国立防災科学技術センター第3研究部の標準プログラムによった。容量型波高計の製作は東京都三鷹市の電子工業株式会社である。実験に際してご指導いただきました、気象研究所海洋研究部菱田部長、港湾技術研究所観測調査課高橋課長、東京大学海洋研究所竹田講師、解析についてご指導いただきました、国立防災科学技術センター第3研究部菅原部長、同センター平塚支所沿岸防災第1研究室岩田室長、原稿に目を通していただきました、海洋研究所寺本助教に感謝いたします。

（1968年9月30日原稿受理）