

砕波帯の波の研究(1)

—観測法および例—

井島 武士*・松尾 隆彦**

1. はしがき

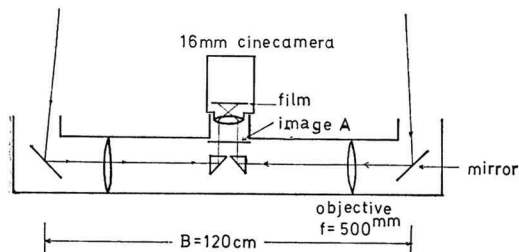
砕波帯内の波あるいは構造物近傍の波を実際に観測することは、波高計の設置あるいは維持の困難のため、多くの場合すこぶる困難で、したがって、実測資料は少ない。ここでは種々の条件と場所における実測資料を容易に得ることができるように、取扱いが簡単で、また目的海面に計器を設置する必要のない方法として、実体視による波浪の測定装置を考案し、それによって観測を行なう場合の方法と測定精度および実測例を紹介するもので、今後この方法で得られた資料の集積により、浅海の波の性質の解明に資したいと考えている。

2. 測定原理および装置

著者はかつて実体写真機を用いて、広い海面の波形分布の測定を行なったが、それは一般の写真による地形測量法を海面波に適用するもので、写真機自身の精度はかなり高度でなければならず、現場における設置および撮影に面倒な準備を要するうえに、写真の図化作業にはコンパレータあるいはプラングラフなどの高級な装置を必要とし、図化作業には多くの時間と労力を必要とするものである。そして測定される範囲は数波長以上を含むことは困難であるため、海面波に関する信頼度の高い統計量を得るには不十分である。

そこで、これに代る方法として、測定範囲を狭くする一方、測定時間を長くとることにすれば、測定装置全体を簡便なものとし、測定に要する時間を短縮し、信頼度の高い統計量を得ることができるのであって、著者はこれをステレオ波高計と名付けている。

図-1



測定原理は実体写真法と全く同じである。図-1に示すように、基線長 $B=120$ cm の間隔をもつ一対の対物反射鏡により、目標海面の像を焦点距離 $f=500$ mm のレンズと直角プリズムを通して、面Aに結ばせる。この結像面Aにはあらかじめ一対のV型マークが刻まれており、このVマークと海面像とを同時に実体視することによって、目標海面上に固定した標識を設けたのと全く同じ効果を得ることができる。そこで結像面Aの海面像とVマークを16ミリカメラによって連続接写し、そのフ

写真-1

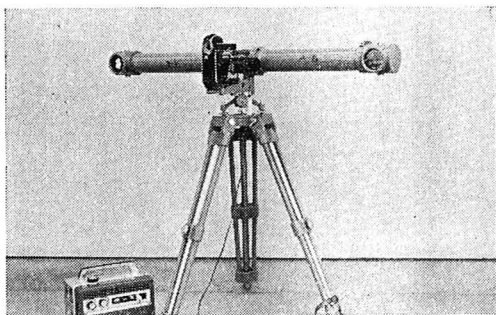
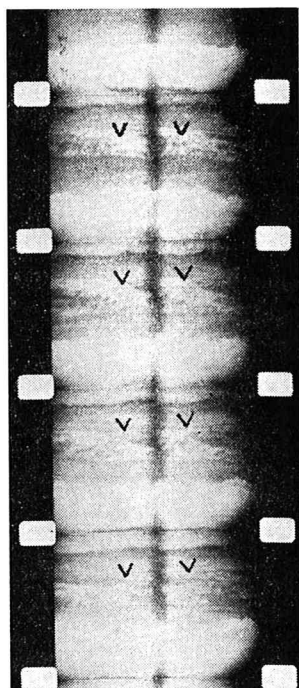


写真-2

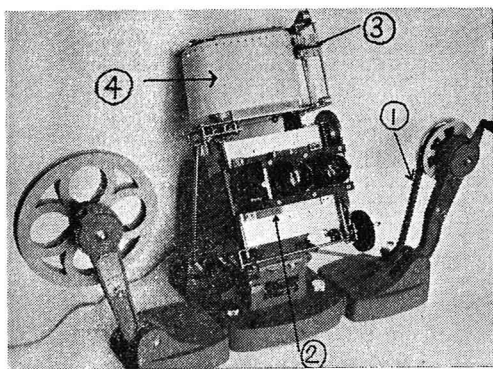
ィルムを室内で拡大実体視すれば、海面とVマークの実体像が再現されるから、このVマークから海面までの垂直距離を測定すれば海面上の一定点における波形記録を得ることができる。

写真-1はこのステレオ波高計の外観で、写真-2は砕波帯の波を撮影したフィルムの一例である。フィルムの1コマの中に一対の海面像とVマークが写されている。外海に面する海岸の波では毎秒4コマ、港内風波では毎秒8コマで撮影すれば十分であり、市販の



* 正会員 工博 九州大学教授 工学部
** 正会員 九州大学助手 工学部

写真-3



100 ft フィルムにより、前者では 17 分間、後者では 8.5 分間の連続撮影ができる。

このフィルムを読取り装置によって実体視測定を行なうわけであるが、これは写真-3 に示すもので、フィルム編集器を改造したもので、フィルム①の像をスクリーン②上に拡大投影する。このスクリーンに重ねた透明なカーソル板上に V マークと対応した標識●をつけておき、測定時にはこの●印を海面像と同時に実体視し、移動させて海面実体像に接触する位置を求める。V マークはフィルムに写しこまれているが、読取器に対しては固定した位置をとることができるから、一度 V マークと●印を合わせておけば、あとは●印を海面像に追尾させ、その移動をペン③に伝え、記録紙④に描かせることができる。フィルム送りと記録紙送りは機械的に同期してあるから、連続した（正確には階段型の）波形記録が得られる。こうして 17 分間のフィルム像約 4000 コマを約 3.5 時間で波形記録に直すことができる。周期 3～4 秒以上の波については 0.5 秒ごとの読みで十分であるから、その場合は約 1.5 時で作業が終る。写真-4 は読み取った波形記録の例で、精度の検討を行なうために同じフィルムを 2～3 回測定した例である。

3. 観測法

現地において観測を行なう場合には、あらかじめ目標点とカメラ設置位置間の距離を想定して、陸上にその距離に相当する地点にポール（または代る標識）を立て、

写真-4

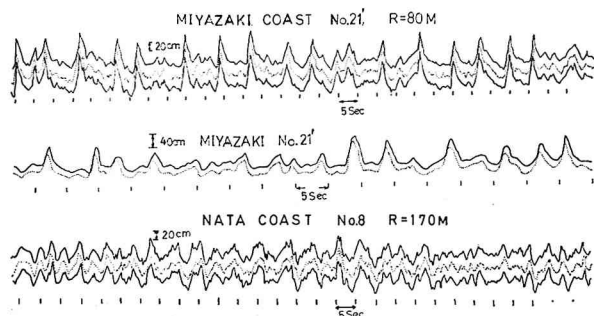
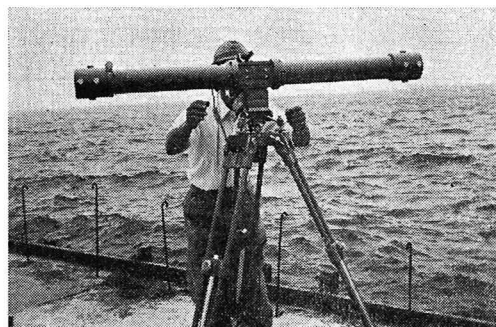


写真-5



これに波高計の V マークを合わせて撮影しておき、その位置で波高計を回転して、目標海面と視野内に納め撮影を行なえばよい。写真-5 は現地観測の状況を示すものである。この方法の利点は、このような簡単な操作で標定作業を終ることであり、いま一つの利点は同一視野内の多数点観測を行ないたい場合には、それと同じ相対位置で陸上に目標を設置し、フィルムに写しこんでおけば、これを読取り器の●印に合わせることににより、1 回の撮影フィルムから多数点の同時波形が得られることで、これによって他の方法ではきわめて困難な 2 次元スペクトルの測定算出もできるということである。

4. 観測精度

この装置では基線上 1.20 m レンズの $f=50$ cm で、読取り装置を含めて、光学的倍率は約 15 倍となっており、 $f=20$ cm のカメラで基線長 5 m として実体写真撮影を行なう場合とほぼ同じ条件である（この方法では実視界 1° 約であるから測定範囲は横方向には狭いが、光軸方向はきわめて広い）。観測における誤差は、まず撮影された海面像の鮮明さに左右されることが大きく、つぎに実体視測定における測距誤差と測定装置（主として読取り器）の機械誤差である。これらを別々に論ずることは不可能なので、実際例により検討するために、波高計設置からの距離 $D=80$ m, 150 m, および 170 m における同一地点の波形写真を 2～3 回測定して比較して見ることにした。

天候はほぼ晴天で、映像はかなり鮮明な場合である。

こうして測った 3 分間の記録から最大波、有義波を求めたのが表-1 である。個々の波の波高値の分散は最大 10～150 cm である。このような測定値の分散の中にはもちろん正しい意味の誤差が含まれるが、そのほかに海面に存在する微小な短周期攪乱波ノイズに類する）があることと、砕波を生ずる場合の白い沫を波として見るかどうかの判定のむらによるものかなり含まれる。すなわち見方によれば、海面波自体が誤差をもっていることになる。したがって、読取り値に適当な操作を加えて打ち消すべき

表-1

	R (m)	H_{max} (m)	T_{max} (sec)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)
MIYAZAKI No. 21'	80 (3 min)	1.12	10.2	1.10	9.0
		1.17	10.0	1.11	8.9
		1.29	10.2	1.18	9.2
MIYAZAKI No. 21'	80 (17 min)	0.95	7.8	0.71	7.7
		0.96	6.2	0.70	7.2
MIYAZAKI No. 22'	150 (3 min)	1.55	6.9	1.23	8.1
		1.43	7.3	1.17	8.3
		1.39	7.4	1.19	8.3
NATA No. 8	170 (3 min)	0.68	7.0	0.53	5.1
		0.72	5.7	0.53	5.0
		0.71	5.4	0.54	5.0

図-2

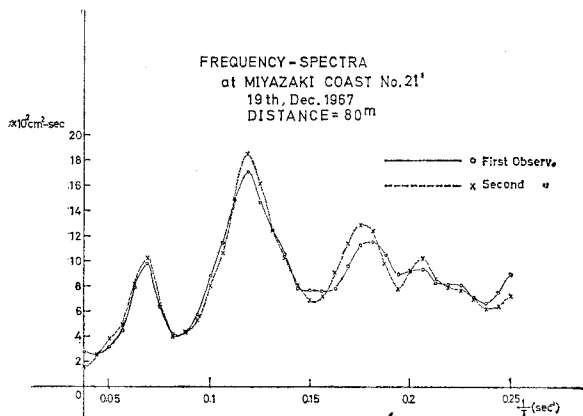
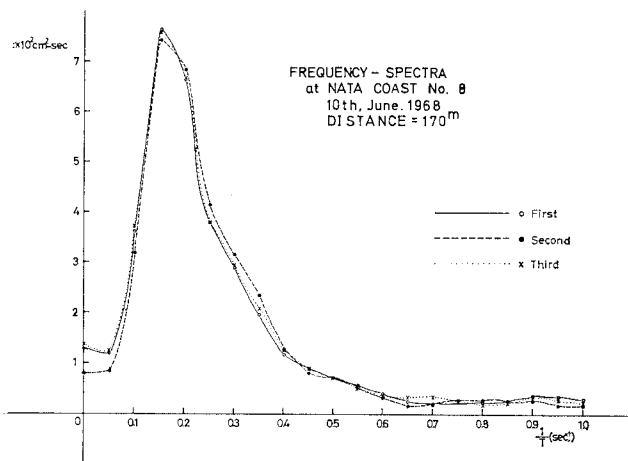


図-3



である。

なお、このような誤差の Power Spectrum に対する影響を見るために、宮崎海岸における $D=80$ m における 17 分間の記録について、2 回の読みによる結果を比較したものが図-2 であり、奈多海岸の $D=170$ m の 3 分間の読みについて比較したものが図-3 である。大体満足すべき精度であることがわかる。

5. 観測例

昭和 42 年 10 月、12 月の 2 回宮崎県大淀川河口北岸約 2 km の海岸において、また昭和 43 年 6 月、7 月の 2 回玄海灘海岸（奈多海岸）において観測を行なった例を示す。図-4 は宮崎におけるもので、海岸線に直角な測線上での測点の位置を横軸に波高計からの距離 R (m) をとり、縦軸に測定時刻をとって示したものである。同時に有義波高と周期および水深（等深線）を示している。図-5 は奈多海岸の平面図に波高計位置 O, A, B と測定点の位置を示したもので、この場合は 2 次元スペクトルを求めるために、同一フィルムから $D=170$ m, 175 m, 190 m, 200 m の 4 点の波形を測定したのでその位置を●で示している。この場合の海岸汀線からの距離はおおのこのデータに R で記入している。

(1) 海面変動 η の確率分布

水深の変化による波の非線型性によって、静水面からの水面変動量 η は正規分布からしだいにはずれてくることになる。横軸に $\eta/\sqrt{\eta^2}$ をとり、縦軸に確率密度をとって示したものが、図-6（宮崎）および図-7（奈多）である。波が浅海に進行するにつれて、正規分布

$$p\left(\frac{\eta}{\sqrt{\eta^2}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta}{\sqrt{\eta^2}}\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

の対称形から、負の側にピークをもった非対称形に変わることがわかる。これは波の山が steep に、谷が flat に変形して行くことに対応する。

(2) 波高と周期の確率分布

波高 $H/\bar{H}$ と周期の平方値 $T^2/\bar{T}^2$ について示すと図-8~11 のようである。微小振幅の波では $H/\bar{H}$ は Rayleigh 分布

$$p\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{\bar{H}} \cdot e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

にしたがうとされるが、観測結果では $H/\bar{H}=1.0$ の周囲にかなり対称形に近く分布することが見られる。一方 $T^2/\bar{T}^2$ の分布は Bretschneider によると Rayleigh 分布に近いとされるが、この結果ではそれよりも非対称性が大きい。

(3) Power spectrum の変化

波の進行にともなう Power spectrum の変化を例示すると、図-12, 13 のようである。図-

12（宮崎）では、 $R=150\sim 200$ m の間ではほとんど変化がないが、砕波が完全に起こっている $R=80$ m においてはエネルギーはかなり広い周波数に分散しているのが見られ、図-13（奈多）では 3 つのピークをもつスペクトルの変形が見られる。

(4) 2 次元スペクトル

奈多海岸における観測では、波の進行方向にほとんど

図-4 (a)

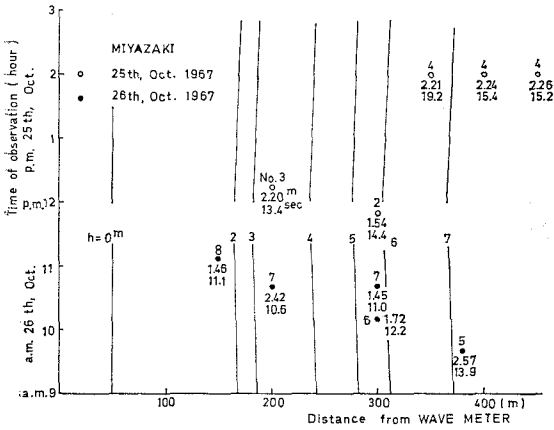


図-4 (b)

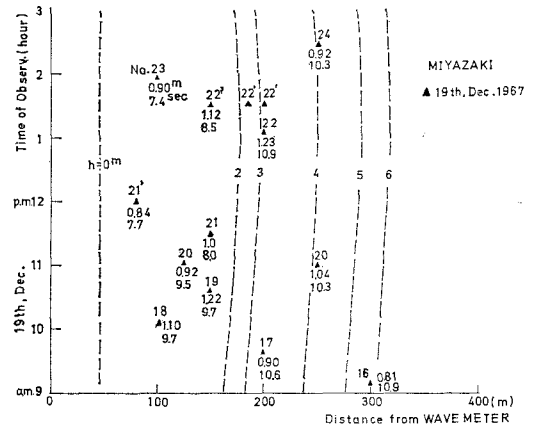


図-5

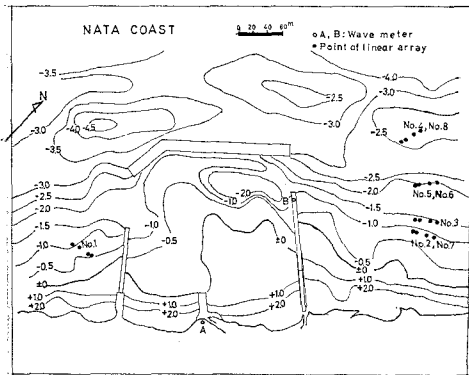


図-7 Distribution of Surface Displacement

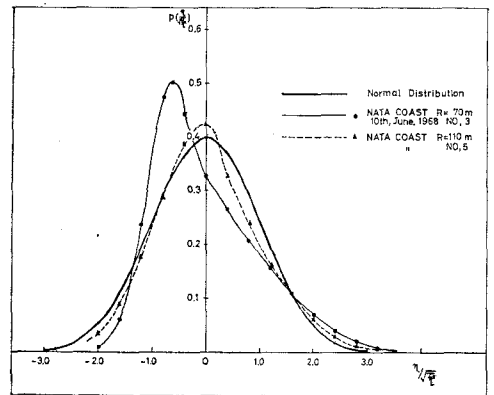


図-8 Distribution of Wave Height

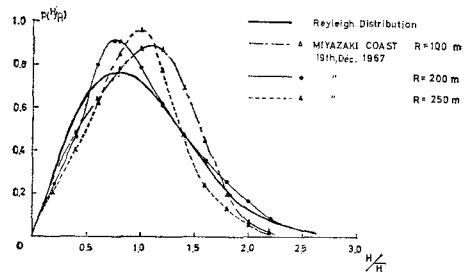


図-6 Distribution of Surface Displacement

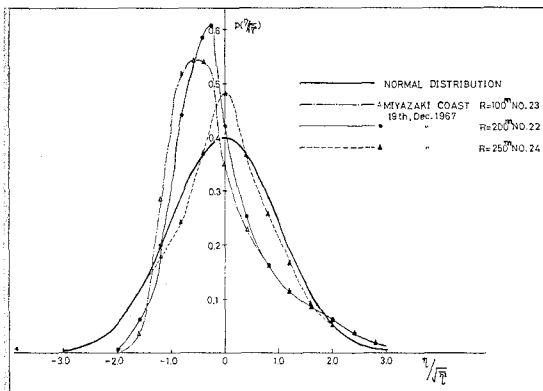


図-9 Distribution of Wave Height

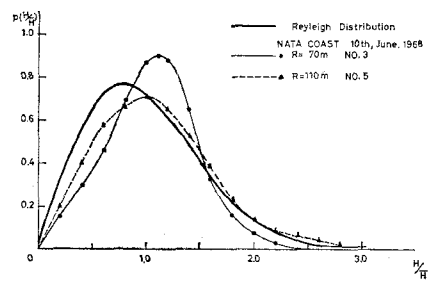


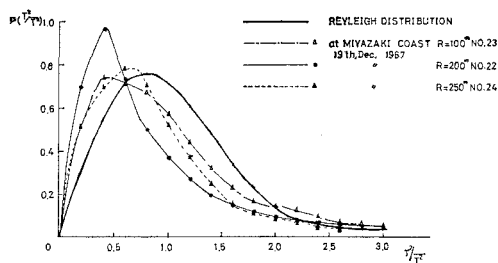
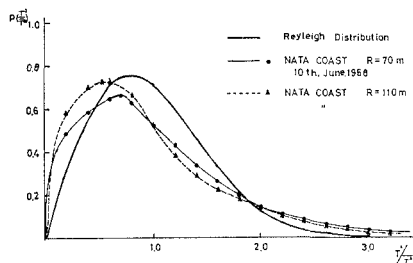
図-10 Distribution of $T^2/\overline{T^2}$ 図-11 Distribution of $T^2/\overline{T^2}$ 

図-12 Power Spectra of Surf Waves

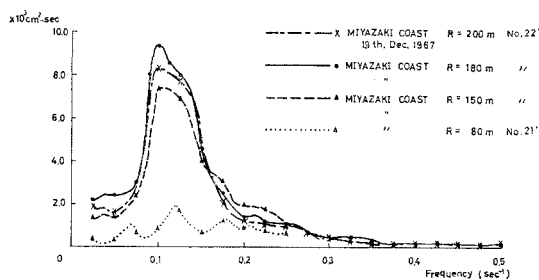


図-13 Power Spectra of Surf Waves

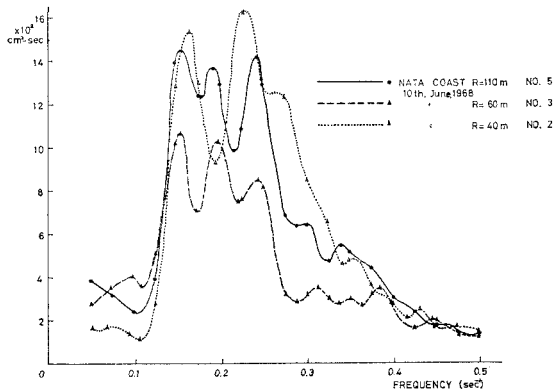


図-15 Directional Spectrum

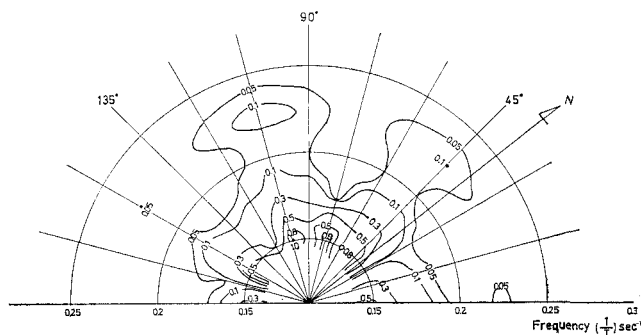
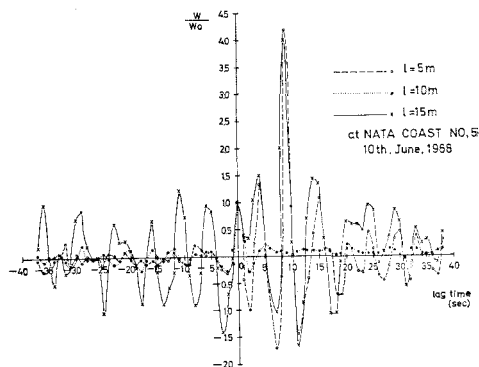


図-14 Cross Correlation



直角に測線を設け、図-3に示したように4点の波形を同時に測定できるので、これから測点間隔5, 10, 15, 20, 25, 30 mの間での cross correlation を求め、二次元スペクトルを算出することができる。この一例が、図-14に示した $l=5\sim 15$ m に対する cross correlation ($l=20\sim 30$ m は示していない) である。これから図-15に示すような二次元スペクトル分布が得られる。図では energy density の最大値を1として、それに対する比を示している。これから波の入射は主として測線に対して 105° を中心としており、その他に 50° および 120° 方向からの波が存在することが見られる。

6. 結 び

以上述べたようにステレオ波高計は、一般に波の変形の著しい場所での実測方法として有効なものと考えられる。とくに砕波帯の波の観測には便利である。今後実測値の集積によって波の性質を明らかにする予定である。

この装置の開発と宮崎海岸における実測にあたっては、運輸省第四港湾建設局および同博多港工事事務所から多大の援助を受けた。また、観測および資料の解析には、本学大学院学生石川敏雄、大石敏文両君の協力を得た。ここに厚くお礼申し上げる次第である。