

船載式出会波浪計の性能について

— 実船及び模型船による試験結果 —

高石敬史*・松元尚義*・吉野泰平*・猿田俊彦*

Experiments on the Ship-Borne Wave Recorders

By

Yoshifumi TAKAISHI, Naoyoshi MATSUMOTO,
Taihei YOSHINO and Toshihiko SARUTA

Abstract

Two kinds of the ship-borne wave recorder for the actual ships were tested. Both recorders consist of the relative wave height meter and the vertical accelerometer. The relative wave height is measured by the different manner for each other, the one is radar and the other supersonic distance meter.

The wave spectra measured by these encounter wave recorders were compared with those measured by the buoy wave recorders of various types as well as by the wave measuring tower and good agreement has been obtained provided the moderate wave height and the low forward speed of the ship which was the case of the comparative experiments.

Model experiments on the encounter wave recorder at the bow of ship was also carried out and it has been shown that the encounter wave recorder at the bow is reliable to measure the waves with sufficient accuracy if the ship sails in beam seas.

It is recommended that the encounter wave recorder at the bow is to be used in low and moderate beam seas while the wave recorder at the ship side is useful in the severe head seas.

1. 緒 論

最近、波浪中の船の各種応答を計測し実船の耐航性能を定量的に調べるための実船試験が行われることが多い。その場合、船体に加わる外力としての波浪を測定することが望まれるが、未だ決定的な方法は得られておらず、種々の試みがなされている段階である。

波浪計にはブイ式波浪計のように船体から離れた海面に浮び或る一点の波面の上昇や傾斜を測定するものと、船体に固定されて船が刻々に出会う波浪を測定するものがあるが、本論文では後者の、いわゆる船載式波浪計(Ship borne wave recorder)を取扱う。

航行中の船舶が出会う波浪をその船自身で測定する船載式波浪計にはいくつかの形式がある。その原理はいずれも、船側の一点とその場所の波面との垂直相対変位から、その点の上下加速度の二重積分で得られる上下変位を差し引いて、波面の絶対変位を求めるものである。それぞれの形式の船載式波浪計の相違点は、船体と波面との相対変位の測定方法及びその測定場所に在るようである。即ち、相対変位の測定方法には、船側の水面上の一点から水面までの垂直距離を測定する方法と、船側の水面下の一点の水圧からその場所の相対波面高さを求める方法とがある。前者の方法にも、相対変位を船首で測定する方法と船側で測定する方法とがある。これらの方にはそれぞれ得失があるが、その議論は後に譲るとして、船載式波浪計の持つ本質的な欠点に言及しておく必要がある。

*運動性能部

原稿受付：昭和51年2月27日

それは測定しようとする波の波長と同じオーダーの長さの船の動揺を含む量から波浪を求めることに基づいている。波の長さのオーダーから極端に外れた大きさの物体による波の測定はより簡単である。例えば投込式のブイ波浪計は波の大きさに対してブイの大きさが極端に小さくブイの動揺が波面の変動と等しいとすることができる。海底に定置された波浪計では、波の大きさに対して極端に大きい大地が基準であるから波浪計は波によって動揺せず波面の変動がそのまま波高となる。これに対し船載式波浪計では次のような難点が生じる。

- (a) 船体の動揺が激しく波浪計自体の運動が大である。
- (b) 船体と波との流体力学的相互干渉により測るべき船体近傍の波が、船体のない場合と異なる。
- (c) 航行中に波浪を測定することになるが、船速が大きくなる程、動揺も大となり一般に流体に対する攪乱が大となるので波と船体との相互干渉も大となるほか、波に対する船のコースも自由に変えることが制限される場合が多く、後述するような波浪の測定に比較的都合のよい出会角を取れない。

これらの難点があるため未だ決定的な船載式波浪計の出現を見るに到らない。しかしながら、波浪中における船体動揺、相対水位変動、水圧変動などの特性の推定法がかなり進歩した現在では、船載式波浪計で測定した波浪から、船体で乱されない波浪を推定することも可能であるし、また船体の攪乱のなるべく小さい測定場所や測定方法を選ぶこともできると考えられる。

そこで本論文では船首及び船側に設ける出会波浪計を対象にして、実船での使用実績、他の形式の波浪計との性能比較、出会波浪計の模型実験結果を考察し、船載式波浪計の実用性について検討を加えた。その結果、船載式波浪計とブイ式波浪計の測定結果はかなり良い一致を示すことがわかったほか、船首出会波浪計は横波の中で、船側出会波浪計は縦波中で比較的良好な結果を得ることがわかった。また斜め追波及び追波中では船載式出会波浪計で得られた波浪のスペクトラムから固定点における波浪のスペクトラムを推定することには問題があることも示した。

2. 出会波浪計の原理

Fig.1に示すように船側の相対水位変動量を $hr(t)$,

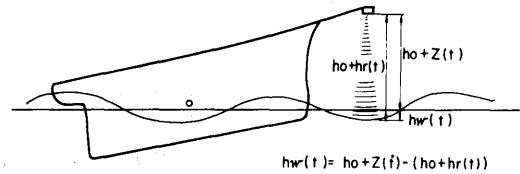


Fig.1 Relation between relative motion of ship and wave elevation

その点の上下変位を $z(t)$ とすると、波面の絶対変位 $hw(t)$ は、両者の差で表される。即ち

$$hw(t) = z(t) - hr(t) \quad (1)$$

しかし船体上では $z(t)$ を測定することは非常に困難であるから $\dot{z}(t)$ の代わりに上下加速度 $\ddot{z}(t)$ を測定し、それを時間に対して二重積分して $z(t)$ を求めることになる。そうすると(1)式は次式のように書かれる。

$$hw(t) = \iint \ddot{z}(t) dt dt - hr(t) \quad (2)$$

従って $\ddot{z}(t)$ 及び $hr(t)$ を測定し、(2)式の演算を行えば $hw(t)$ が得られる。 $hw(t)$ は時間 t に対する変動量であり、この時系列の統計的解析により出会波浪の統計的性質が得られる。しかしながら(2)式の第一項にある $\ddot{z}(t)$ の二重積分は電子回路による演算をオンラインで行う場合、ドリフトが生じ易く長時間の測定では誤差が混入するおそれがある。多くの場合、波の性質はエネルギースペクトルの形で記述されれば良いのであるから、その場合には、 $hr(t)$ 、 $\ddot{z}(t)$ のauto-及びcross spectrumを用いて出会波浪のスペクトラムを求めればよい。その方法は以下に述べるとおりである。即ち、 $hr(t)$ 、 $z(t)$ 、 $\dot{z}(t)$ 、 $hw(t)$ のauto spectrumをそれぞれ $S_{rr}(\omega)$ 、 $S_{zz}(\omega)$ 、 $S_{\dot{z}\dot{z}}(\omega)$ 、 $S_{ww}(\omega)$ とし、 $hr(t)$ と $z(t)$ 、 $hr(t)$ と $\dot{z}(t)$ のそれぞれのcross spectrumを $S_{rz}(\omega)$ 、 $S_{r\dot{z}}(\omega)$ とすると、次式のような関係がある。^{註)}

$$S_{ww}(\omega) = S_{rr}(\omega) + S_{zz}(\omega) - 2RS_{rz}(\omega) \quad (3)$$

$$S_{zz}(\omega) = S_{\dot{z}\dot{z}}(\omega)/\omega^4 \quad (4)$$

$$S_{rz}(\omega) = -S_{r\dot{z}}(\omega)/\omega^2 \quad (5)$$

故に次式によって出会波浪のスペクトラムが求まる。

$$S_{ww}(\omega) = S_{rr}(\omega) + S_{\dot{z}\dot{z}}(\omega)/\omega^4 + 2RS_{r\dot{z}}(\omega)/\omega^2, \quad (6)$$

ここに、 R はクロススペクトラムのreal partをと

註) これらの式の誘導は東京商船大学大津皓平助教によるものである。

ることを示す。

次に船が出会う波浪のスペクトラムと、それを海面の一点に固定した場所で測定した波浪のスペクトラムの関係について述べる。

一般に波長 λ の規則波中で出会角 α のコース上を、速度 v で進む船の波との出会いの円周波数 ω_e は、次式で表される。ここに $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega_0^2}{g}$ である。

$$\begin{aligned}\omega_e &= \omega_0 - kv \cos \alpha \\ &= \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} v \cos \alpha\end{aligned}\quad (7)$$

固定点における波スペクトラム $S_{sw}(\omega_0)$ と、出会う波浪のスペクトラム $S_{sw}(\omega_e)$ とは、対応する ω_0 と ω_e についてはそのエネルギーは等しいから、

$$S_{sw}(\omega_0)d\omega_0 = S_{sw}(\omega_e)d\omega_e\quad (8)$$

である。即ち

$$S_{sw}(\omega_e) = S_{sw}(\omega_0) \frac{d\omega_0}{d\omega_e}\quad (9)$$

となり、(7)式から

$$\frac{d\omega_0}{d\omega_e} = \frac{1}{\left| 1 - 2 \frac{\omega_0}{g} v \cos \alpha \right|}\quad (10)$$

が得られるから

$$S_{sw}(\omega_e) = \frac{S_{sw}(\omega_0)}{\left| 1 - 2 \frac{\omega_0}{g} v \cos \alpha \right|}\quad (11)$$

によって $S_{sw}(\omega_e)$ は $S_{sw}(\omega_0)$ より求められる。し

即ち向波、斜め向波中では $S_{sw}(\omega_e)$ は $S_{sw}(\omega_0)$ に比べて周波数の高い領域に移り、スペクトラムの縦軸の値が低くなると共に周波数に対する拡がりが大となる。横波中では両者は等しい。追波、斜め追波中では、(11)式の分母を0とする ω_0 があり、この ω_0 を ω_c とすると、 ω_c の波と船との出会い周波数は $\omega_e = \omega_c/2$ であり、ここで $S_{sw}(\omega_e)$ が無限大となるような特異な状況が起こる。そしてFig.2の(c)に示すように、 $S_{sw}(\omega_0)$ は、(I) $0 \leq \omega_0 < \omega_c$ 、(II) $\omega_c < \omega_0 < 2\omega_c$ 、(III) $2\omega_c < \omega_0$ の領域毎に、それぞれ実線、鎖線、点線で示すように $S_{sw}(\omega_e)$ の(I') $0 < \omega_e < \omega_c/2$ 、(II') $\omega_c/2 < \omega_e > 0$ 、(III') $\omega_e < 0$ 又は(III'') $0 < \omega_e < \omega_c/2$ の部分には3つのエネルギースペクトルが重畳しており、この場合 $S_{sw}(\omega_e)$ を測定して、 $S_{sw}(\omega_0)$ を逆算して求めることは原理的に不可能である。

3. 船首出会波浪計

航海訓練所練習船青雲丸には船首出会波浪計が設けられた^{1),2)}。この波浪計の構造、性能に関しては既にこれらの文献で述べられているが本報告ではその概略を説明する。

船首出会波浪計の構造はFig.3に示すようなものでFig.4の写真のように青雲丸の船首に取付けられた。F.P.から8.3 m前方の腕の先端に出会波浪計を格納したドームが下向きに固定されている。ドームの内部には船体の動揺を打消して常に出会波浪計を鉛直下方に向けておくための人工水平面設定装置がある。相対水位 $hr(t)$ はレーダ反射式距離計測装置で測定され、またこの点の上下変位は別の人工水平台

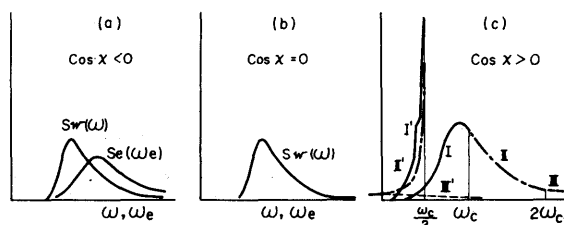


Fig.2 Wave spectrum transformed to the encounter frequency of the ship to waves

かし $S_{sw}(\omega_e)$ と $S_{sw}(\omega_0)$ の関係は船と波との出会角 α の値或は $\cos \alpha \geq 0$ に応じて稍か異なった形状を呈する。

それを図示するとFig.2のようになる。

上に置かれた磁わい式加速度計の出力信号の二重積分によって測定され、両者の差を電気回路で演算して波高を記録するようになっている。ドームのLWL上の高さは10.65 mが基準となっている。

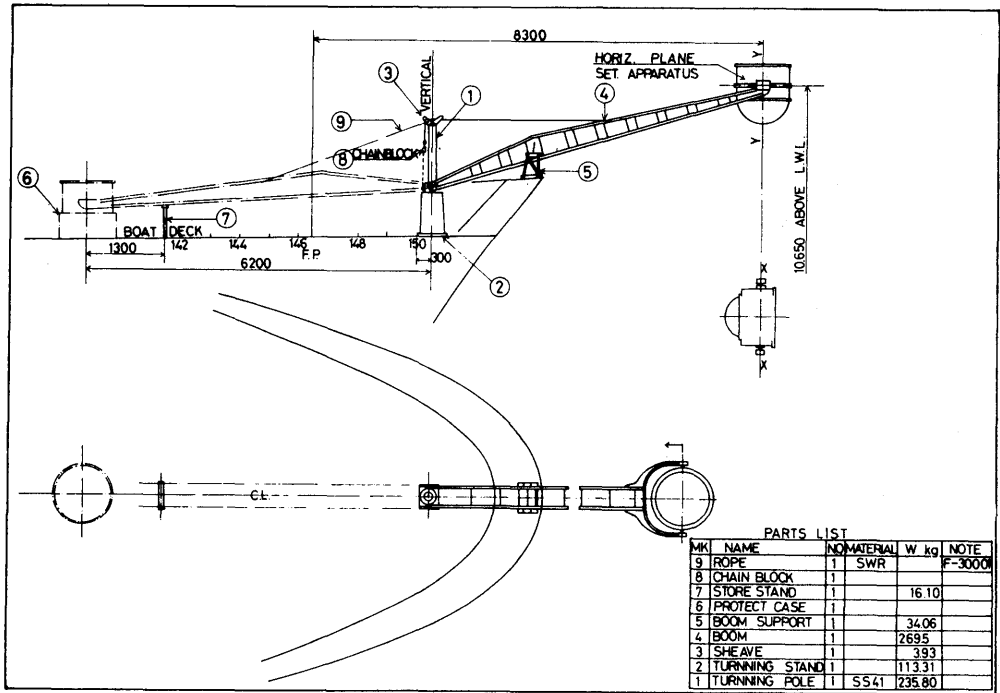


Fig.3 General arrangement of the encounter wave recorder for the ship

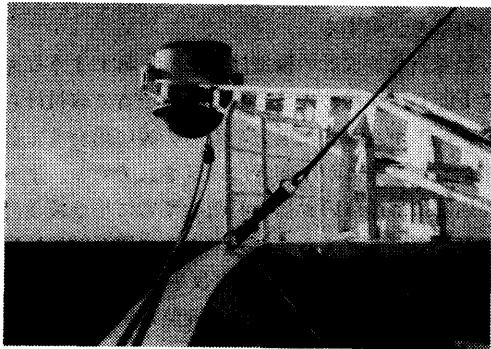


Fig.4 Encounter wave recorder on the Seiu-Maru

この波浪計の設計性能は Table 1 に示すようなものである。また出会波浪計システムのブロック図を Fig.5 に示す。

レーダ反射式距離計の特徴は、超音波反射式と比べて、測定距離が大きい、船速や風の影響がない、気温や湿度、気圧の影響を受けない、応答周波数が高い等の利点を有する。レーダ波の搬送周波数は9.65 GHz、変調周波数は7.6875 MHzである。加速度計出力の2重積分に際してドリフトが生じるのを防止するため、直流成分或いは低周波成分の積分のカットオフを行うような feed back 回路が用いられているが、このために生じる位相差を補償するため相対

Table 1 Design particulars of the encounter wave recorder installed on the Seiu-Maru

Item	Measurable	Accuracy
relative wave height	3~20m	0.5%
absolute(encounter)wave height	0~±7m	2%
range of elementary wave	1~30sec	
acceleration	1~±1.5g	±0.01g
artificial horizontal plane setting apparatus A	0~±40°	±1.0°
(for wave sensor) { roll	0~±10°	±1.0°
ditto B { pitch	0~±40°	±0.5°
(for accelerometer) { roll	0~±10°	±0.5°
atmospheric temperature	-10°C~+45°C	
humidity	0~90%	
electric source	AC100V±10V(50~60c/s)	

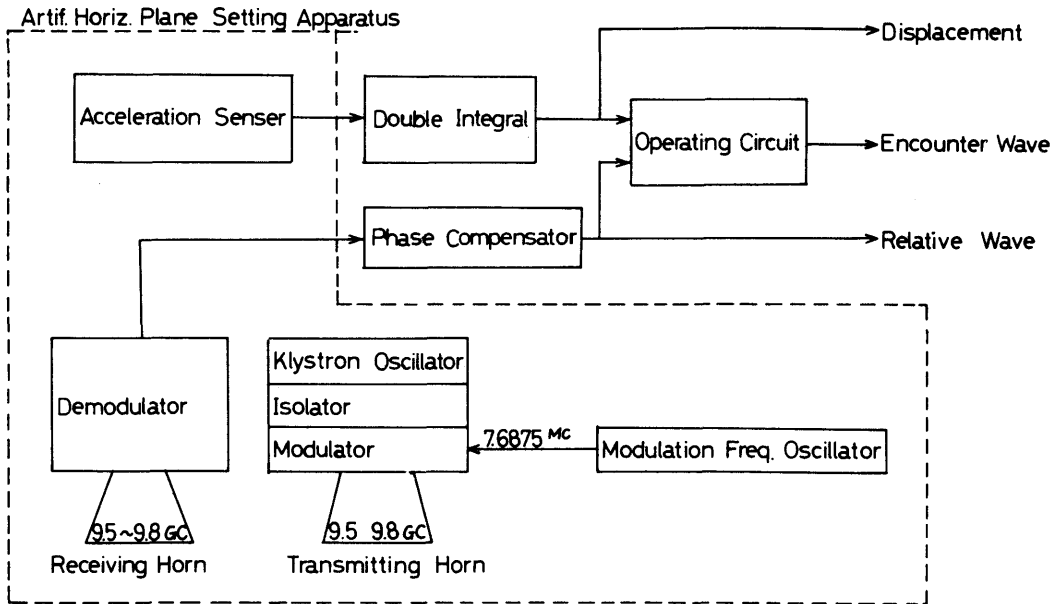


Fig.5 Block diagram of the encounter wave recorder

水位にも位相おくれの回路を挿入してある。

相対水位，上下変位，出会波高の信号は，青雲丸の船橋の後方に在る実験室に送られ，多ペン記録器及びデータレコーダに，船体動揺，プロペラ負荷及び回転数等と同時に記録される。記録の例をFig. 6

に示す。

この出会波浪計をブイ式波浪計と比較した結果を述べる。実験は東京大学生産技術研究所と共同で，昭和46年10月21日，三陸沖にて行われた。

比較に用いたブイ式波浪計は東京大学生産技術研

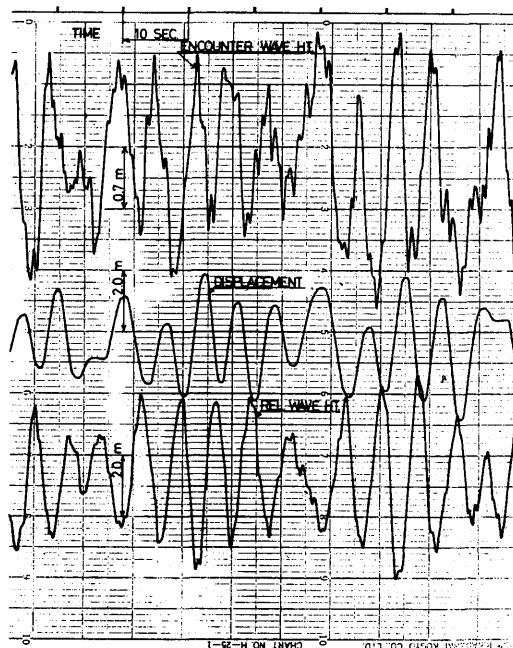
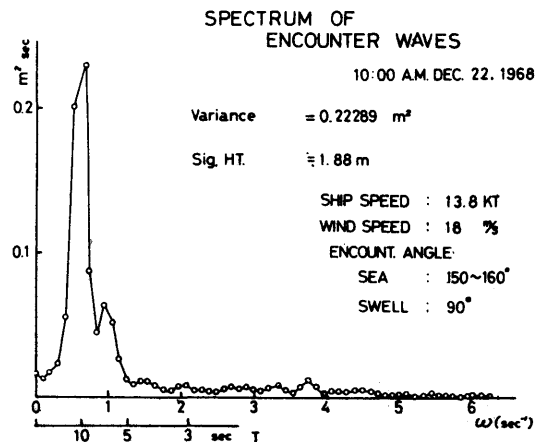


Fig.6 Example of records obtained by the encounter wave recorder



究所の前田久明助教授の考案したもので³⁾水面に浮かぶブイとブイから水面下約50mにワイヤーで吊された水圧計とから成り、ブイの波による上下動が水圧計の静水圧変動に変換されて波高を測定するようになっている。水圧の信号はブイに付けられたアンテナで発信されテレメータにより母船上で受信されて記録される。実験はFig. 7に示すようにブイ式波浪計を風上側に投入したのち、(a) 横波中停船時、(b) 追波中7ktで航走中、(c) 横波中7ktで航走中、(d) 向波中7ktで航走中の4回行われたが、そのうち(a), (b)及び(c)の3回のデータが得られた。記録の1例をFig. 8に示すが、ブイ式波浪計では水面の波長の短い波に追従せず一種のフィルター効果を得ている。このときの海面の状態は、目視によるうねり波高2 m、風浪波高1 m、平均波周期は5.5~6

secであった。波高データを解析して得た波のエネルギー Spektrumを比較したのが Fig. 9である^{註)}。追波中試験の(b)ではブイ式波浪計で求めた固定点の波 Spektrumを船の会波の Spektrumに、

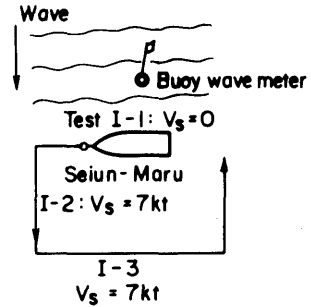


Fig. 7 Ship's course during the comparative experiment of the encounter wave recorder with a buoy wave meter

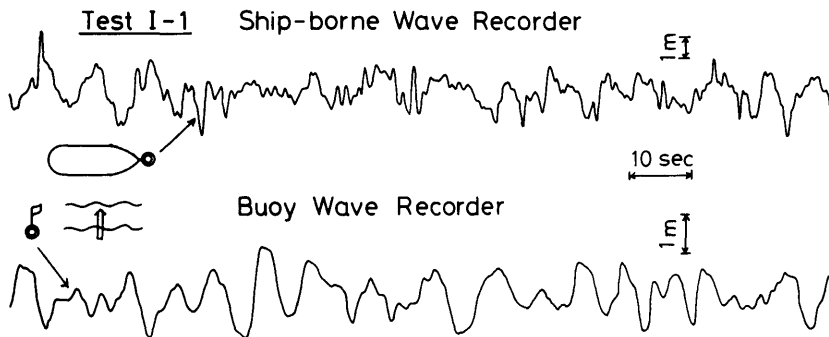


Fig. 8 Wave records obtained by the two kinds of wave recorder

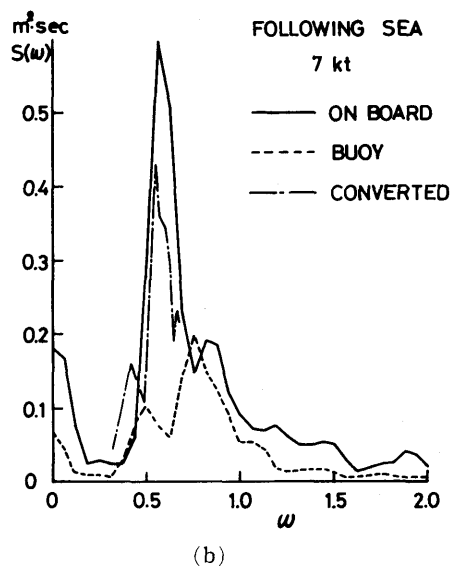
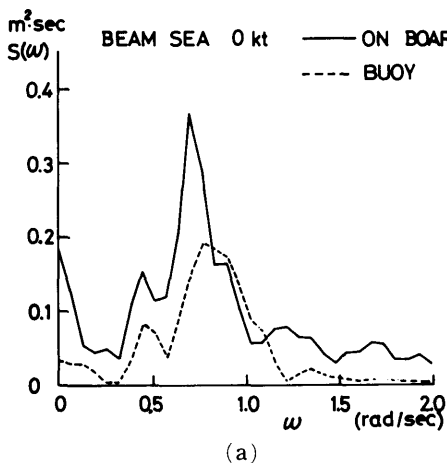


Fig. 9 Comparison of the wave spectra measured by the ship-borne wave recorder and the buoy wave meter

註) これらの波形の解析は東京大学生産技術研究所が行った。

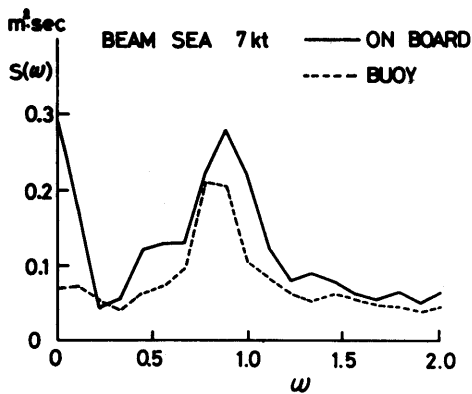


Fig.9(c) Comparison of the wave spectra measured by the ship-borne wave recorder and the buoy wave meter

(11)式を用いて換算する必要があり、そのスペクトラムも図中に鎖線で示される。

この結果によると横波中では両波浪計のスペクトラムの一致は良いこと、追波中에서도固定点の波浪を出会波に換算したスペクトラムと、測定した出会波のスペクトラムのピークは良く一致することなどがわかる。

青雲丸では上記の実験のほか、船体運動と併せた総合的な耐航性試験や、訓練航海中随時行った波浪測定の実験がある。これらに関しては別に述べる機会があると思うが、本論文では取扱わない。

青雲丸の出会波浪計は、昭和47年1月北太平洋において航海中の波浪観測中に、15mをこえる大波浪を計測した直後に、船首に当たった打込み海水により破壊損失してしまった。

青雲丸式の出会波浪計の第2号機は(社)日本造船

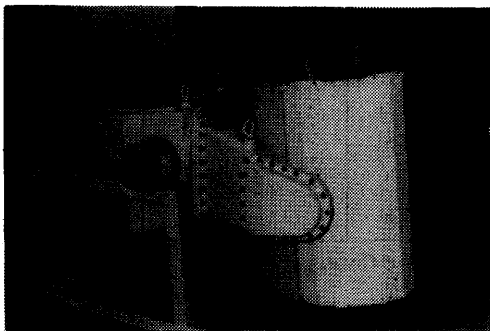


Fig.10 No.2 encounter wave recorder developed at the Ship Research Institute

研究協会 SR 132 部会と船舶技術研究所の共同研究により製作された³⁾。第2号機の写真をFig.10に示す。そこでは第1号機の使用経験を取入れ加速度計などに若干の改良を施した。第2号機は完成したが実船には未装着のままであり、今後適当な船舶を選んで波浪観測に活用されることを期待するが、船首出会波浪計の問題点を挙げれば以下のものである。

(a) レーダ反射式水位計の発射波と入射波の干渉が短距離の測定の場合に現れ、測定値に誤指示を生じる³⁾。

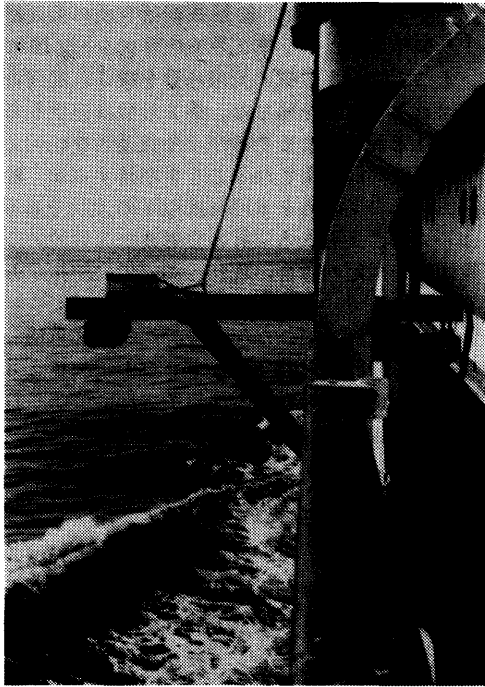
(b) 第1号機で現れた加速度計出力の2重積分に現れる、船の旋回運動に伴うドリフトは、第2号機で容量式平衡型加速度計の採用で大幅に改善された。

(c) 人工水平面設定の機構がやや複雑である。また人工水平面設定のためバーチカルジャイロが必要である。これらは共に保守に手数と費用がかかり過ぎるきらいがある。出会波浪計で測定する精度の程度から見れば、船体動揺によって相対水位或は上下加速度に誤差が入るがそれも許容できると考えられるので、場合によっては人工水平面としなくてもよい。

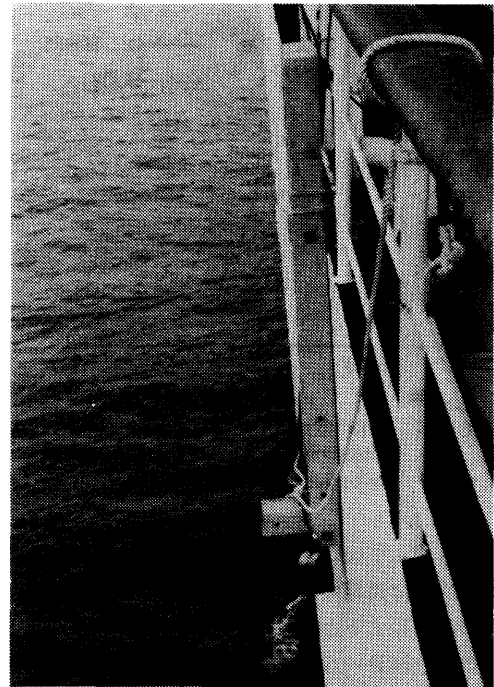
(d) 船首に装着した場合、装置が波をかぶり易く、青雲丸の場合のように損壊の危険度が高い。これを避けるため、高い場所に置くことが考えられるが、そのための腕の張り出しが大きくなり、腕の出納の操作が困難となる。(社)日本造船研究協会SR132部会では大型専用船の船首出会波浪計の腕を設計したが³⁾、いずれにしても人力に頼らず動力で、かつ遠隔操作で行うようにすることが必須の条件であろう。

4. 船側出会波浪計

練習船進徳丸(GT3000トン)の船体中央部左舷船側に、超音波反射式出会波浪計を取付けて波浪の測定実験を行った。本実験は(社)日本造船研究協会SR132部会がブイ式波浪計の比較試験を行った際に当研究所も共同研究に参加して行なわれたものである³⁾。この船側出会波浪計は、北太平洋における高速貨物船の実船試験に用いられ^{4), 5)}、主に船側の水位変動と船体に働く横荷重との相関を解析するのに利用された。今回の実験もこれらの実船試験とほぼ同様に船側に沿って超音波反射式相対水位計を水線以上4mのところを下向きに取付けた。本装置の測距可能距離は当初4mであったがその後14mに改造した。しかし今回の実験に際し地上テストを行ったところ9mであったのでFig.11(a)の写真に示すように水



(a)



(b)

Fig.11 Photograph of the encounter wave recorder at the ship side

Table 2 Time table of the comparative experiments of various wave recorders by the Shintoku Maru

Test No.	Date '73	Time	Test Area	Wave Dir.	Ship Speed	Compared Wave Recorders §	Remarks
11	2.15	10:00 - 10:20	Sagami Bay	0	0kt	A C D E	Octagonal run
12		10:20 - 10:40		0	0	A C D E	
20		12:52 - 13:35		135s	0	B C D	
30	2.16	14:45 - 15:05	Off Shiono Misaki	90s	10.5	C D	
41		16:05 - 16:17		45s	13.2	E	
42		16:19 - 16:29		0	13.2		
43		16:31 - 16:41		45p	13.2		
44		16:42 - 16:52		90p	12.8		
45		16:55 - 17:05		135p	12.3		
46		17:07 - 17:17		180	12.5		
47		17:21 - 17:31		135s	13.6		
48	17:35 - 17:45	90s	13.5				
50	2.18	11:20 - 11:35	Genkai Nada	45s	0	C D	
71		13:20 - 13:35		60p	0	B D E	
62	2.19	13:35 - 13:48		60p	0		
70		09:30 - 09:45		120s	11.5		
80		10:37 - 10:52		90s	0	C D E	
90		11:21 - 11:36		75p	0	B D	
100		12:55 - 13:14		90p	11.5		
§ Type of the wave recorders : A Wave observing tower B Clover leaf buoy C Pressure buoy D Pressure buoy E Acceleration buoy F Super sonic wave height meter on board							

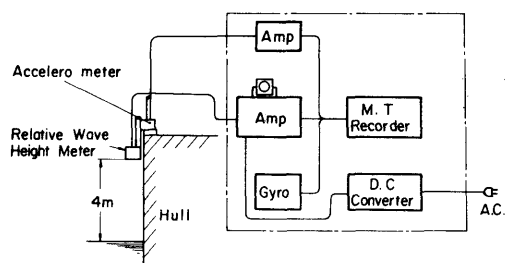


Fig.12 Block diagram of the encounter wave recorder at the ship side

線上6mの高さに取付けたのであるが、実際海面では7mしか測定できなかったので、Fig.11(b)のようにそれを4mにまで下げて取付け直して実験を行った。

相対水位計の位置の上下加速度を測定するために抵抗線歪計式の加速度計を用いた。そのほか船体動揺も記録したが、計測装置のシステムをFig.12に示す。

実験は進徳丸の訓練航海に便乗して行われた。期間は昭和48年2月15日より2月19日まで、航路は千

葉港一博多湾（豊後水道、関門海峡経由）で実験海面は平塚沖、紀伊水道及び博多沖の3ヶ所であった。実験ケースはTable2に示す10ケースである。実験中の海面状況はだいたい平穏であったが2月19日はやや波浪が高かった。実験はほとんど停船中に行われた。

出会波浪の解析は相対水位と上下加速度の記録から(6)式を用いて行い出会波浪のスペクトラムを求めた。本装置により測定した船体運動のスペクトラムをFig13に、これらの解析で求めた出会波浪のスペクトラムをFig.14に示す。Fig.15(a),(b) Fig.16には同時に測定されたパイ式波浪計による波スペクトラムとの比較を示す。Table3には波スペクトラムから求めた有義波高、平均波周期等を目視観測(著者)、波形の統計解析と比較した結果も示す。比較試験を行った波浪計は、当研究所の船側波浪計、平塚海岸の国立防災科学センターの定置式波浪計、加速度式パイ波浪計(東大生研)、水圧式パイ波浪計(東大生研方式及び大阪府立大方式)、クローバ型パイ波浪計(九大応力研)である。

Table 3 Wave data obtained by the spectrum analysis of the records by the encounter wave recorder and the visual observations

Test No.	By Visual observation		F		A	B	C	D	E
	$\lambda(m)$	$H_v(m)$	$T_p(sec)$	$H_{1/3}(m)$					
11	50	0.45	4.4	0.50	0.43		0.44		
12	50	0.45	4.8	0.46				0.93	0.62
20				0.75		0.75		1.16	
30	20	1.0	3.5	0.51			1.35		
41	15	0.8	8.7	0.87					1.20
50	5	0.4	3.4	0.57			0.79		0.92
61	15	1.0	4.5	1.09	0.84	1.05		1.06	
62	15	1.0	3.9	0.78	0.88			1.23	1.10
70	40	2.0	6.3	1.35				2.78	
80	40	2.0	8.3	1.97	2.47	2.89		2.36	2.54
90	40	2.5	5.2	2.34	2.55				
100	50	2.5	5.4	1.63					

T. No. 4500-90 DN= 960 LN=90 DT=0.500 SEC

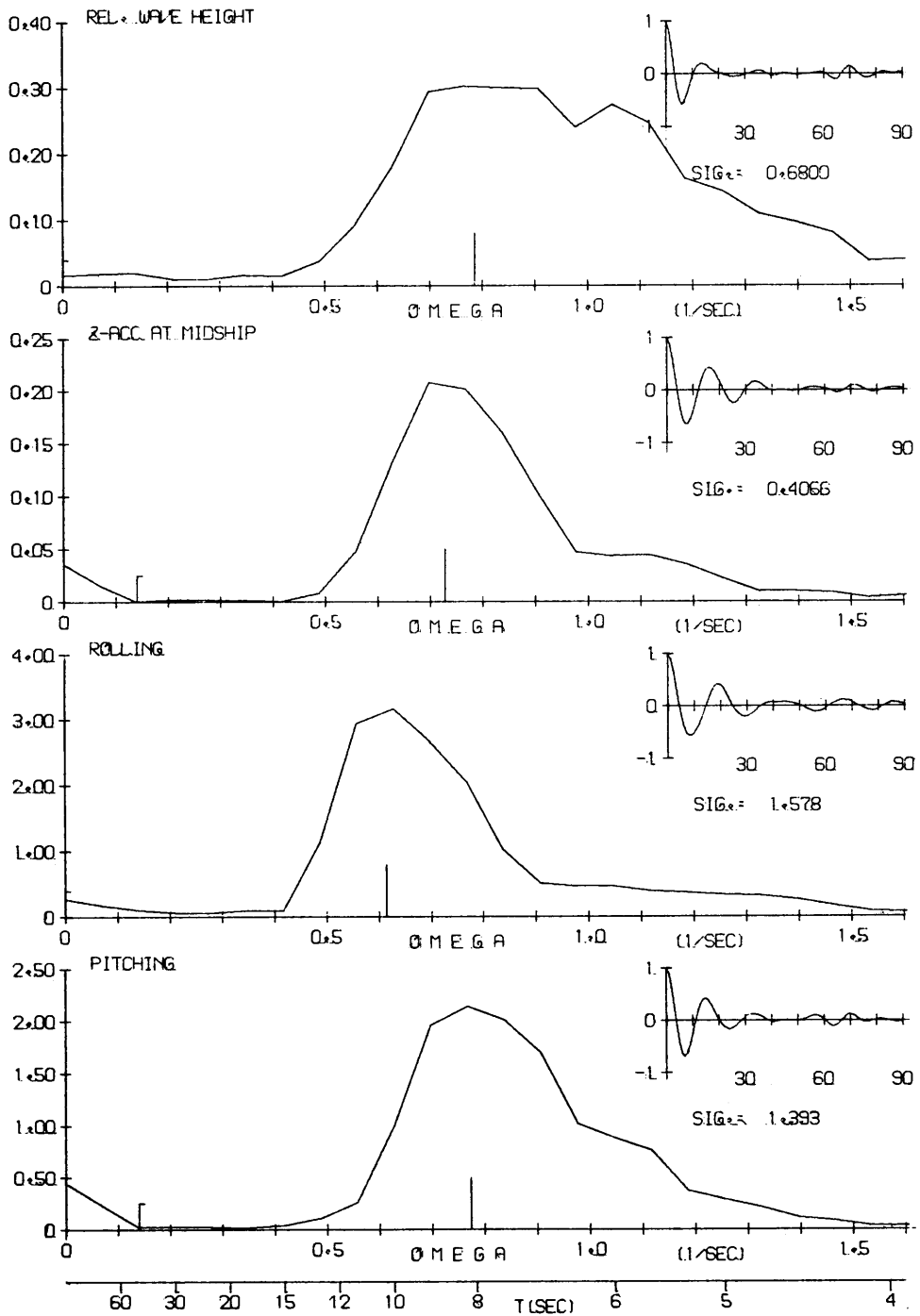


Fig.13 Spectrum of ship motions

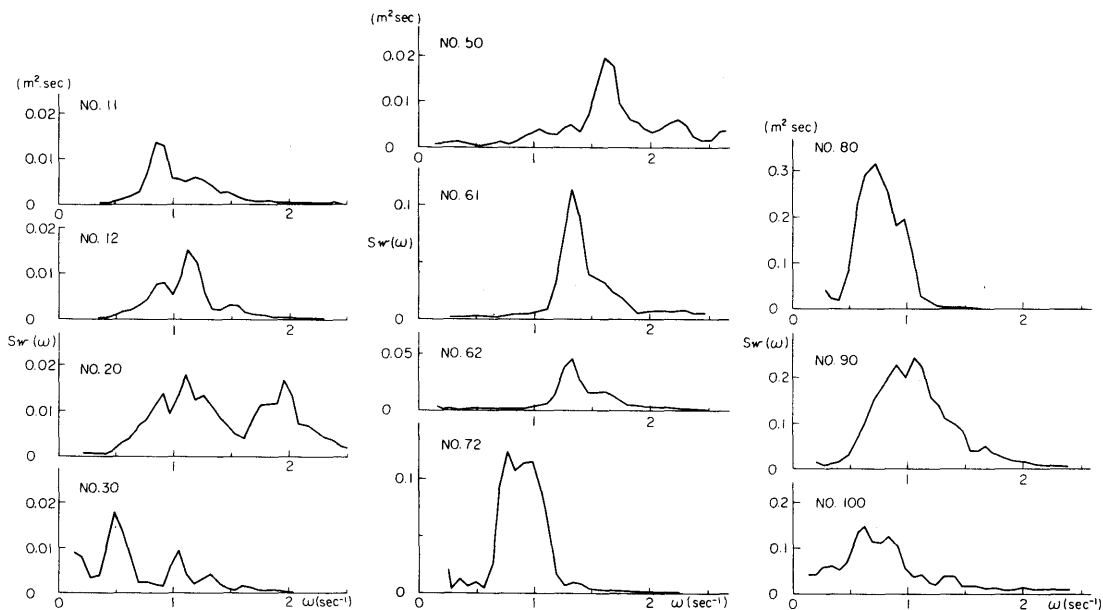


Fig.14 Wave spectrum obtained by the encounter wave recorder at the ship side

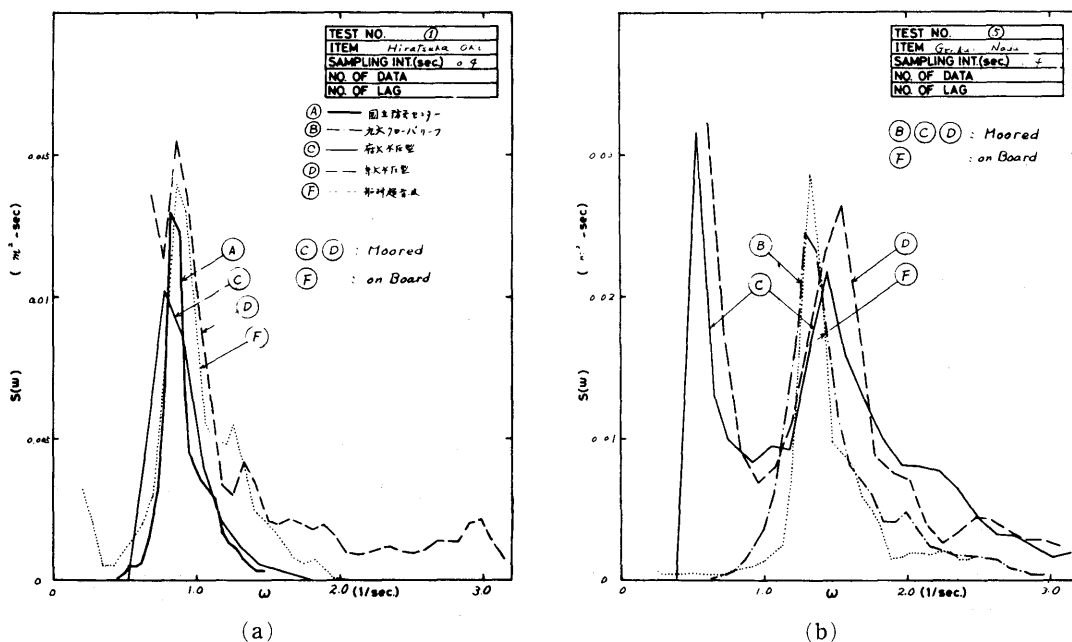


Fig.15 Comparison of the wave spectra measured by the encounter wave recorder and the buoy wave meter as well as wave measuring tower³⁾

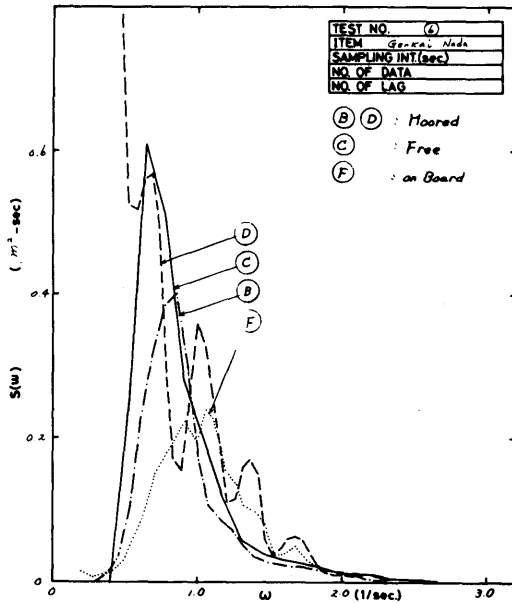


Fig.16 Comparison of the wave spectra measured by the encounter wave recorder and the buoy wave meter as well as wave measuring tower³⁾

比較実験は停船中に限定されたが、本実験により船側の出会波浪計の実用性に関して次のような結論を得た。

(a) 船側出会波浪計はこの比較実験で波浪計の原器と考えられた定置式波浪計及びクローバー型ブイ波浪計と比較的よく一致するスペクトラム形状を与えているので、波浪計として実用になる。

(b) 船側出会波浪計は船体への取付けが船首に比べて容易であるほか、操作し易かつ安全度が高いので有用である。

(c) 従って実船に出会波浪計を装備する場合、船首に限定せず、船側中央部にも設けることも考慮に入れてよい。出来れば船首、両舷船側の3ヶ所に、それぞれ適当なタイプの出会波浪計を設けることを推奨する。これは後述する模型試験結果によれば、船首出会波浪計は波高の比較的大きくない横波に近い場合に好都合であり、船側出会波浪計は波高の比較的大きい縦波に近い状況で用いるのに適していることから、両者の併用が望ましいと考える。

5. 模型試験

角水槽で耐航性能に関する模型試験を行う場合、船体の応答と共に水槽の波浪を測定するが、とりわ

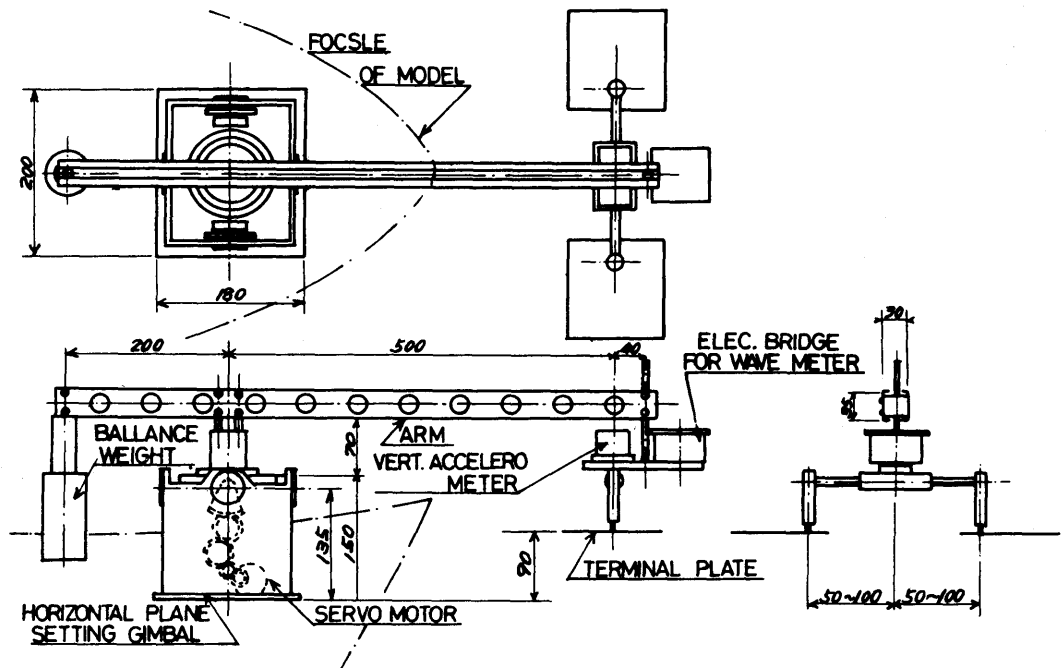


Fig.17 General arrangement of the encounter wave recorder for the model ship

け船が会おう波浪を測定し、船体応答と波浪との相関を位相も含めて明らかにすることが望ましい。しかしながら、当研究所の角水槽では自由航走模型船を用いて波浪中の試験を行うことを基本としており、いわゆる曳航或は追跡台車を持たないから、出会波浪は模型船に出会波浪計を取付けて測定せざるを得ない。模型船用の出会波浪計の原理は実船用のものと同様であるが、相対水位の測定には全く別個の、独特の方法を開発して用いた。模型船用出会波浪計の構造はFig.17に示すとおりである。本装置の詳細は既に著者の1人ほかによって発表されているので^{2), 6)}、本論文では装置の概要及び本装置による出会波浪のスペクトラムについて、一部再録しながら紹介することにする。

相対水位計は1辺約10cmの正方形の薄いアルミ板2枚を約20cm離して水面に平行な同一水平面内に横に並べて絶縁体を介してアームに取付けられたものである。この2枚のアルミ板を1対の電極と考えると、この電極間の静電容量は水面と電極の距離によって変化する。静電容量はFig.18に示すように水面からの距離に対して対数的に反比例するので対数増幅器を用いて直線化すれば、相対水位を線形化した電気信号で取出すことができる。

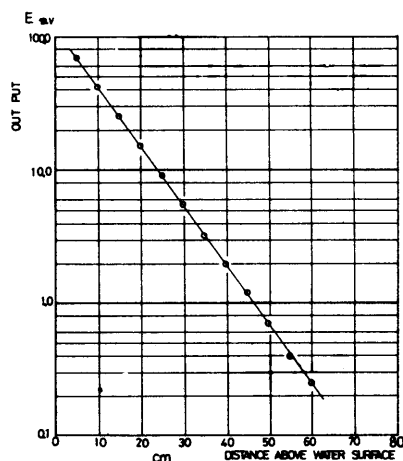


Fig. 18 Calibration curve for non-contact capacity probe for measuring the relative wave elevation

相対水位計の位置の上下変位は、青雲丸の実船用出会波浪計と同じく、磁気歪計式の加速度計で測った加速度の二重積分で求めた。

相対水位計と加速度計の検出部は共にアームの先

端に取付けられているが、これらの検出部を船体動揺にかかわらず常に鉛直下方に向けておくため、アーム自体は模型船内にある人工水平台上に固定されている。人工水平台は一種のジンバルであり、船の動揺を測定するパーチカルジャイロの出力信号で制御されるサーボモーターにより水平面を実現している。

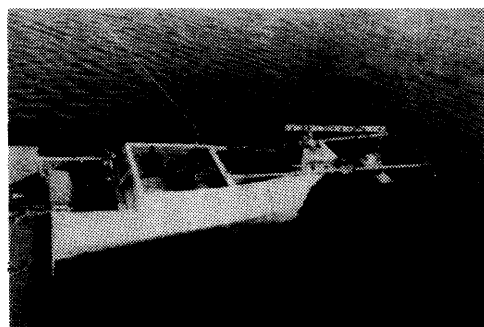


Fig.19 Photograph of the encounter wave recorder on the model ship

本装置を青雲丸の模型船に取付けた写真をFig.19に示す。この模型船により主として不規則波中の実験が行われた。水槽に発生した波は水槽壁の中央部で定置式の波高計によっても測定されている。

模型試験の結果から得られた固定点と模型船の出会いの波スペクトラムの代表例をFig.20~27に示す。出会波のスペクトラム（太実線）は、固定点での波スペクトラム（細実線）を(11)式によって変換したスペクトラム（太破線）と比較される。この結果から模型船出会波浪計に関して次のような点がわかった。

- (a) 横波中では両者の一致は良好で、出会波浪計が所期の性能を発揮していると言える。
- (b) 横波に近い斜め向波中及び斜め追波中でも両者の一致は比較的良好である。
- (c) 向波、追波及びこれに近い斜め向い波や斜め追波中では両者の一致はややわるくなる傾向が見られる。これは、船の会った波と固定点で測った波とが厳密に対応していない実験手法上の制約にも原因があると考えられる。

6. 結 言

本論文では船載式波浪計の開発に関して船舶技術研究所が行った実船試験及び模型試験の結果を述べた。ブイ式波浪計との比較試験や模型試験に

より、青雲丸に装備されたレーダー反射式船首出会波浪計、進徳丸に仮設された超音波反射式船側出会波浪計とも、幾つかの制限付きであるが波浪

の測定に有用であることが示された。今後、海洋観測或は実船試験で波浪計を使用する必要性が益々増してくるものと思われるが、船からいかなる条件下

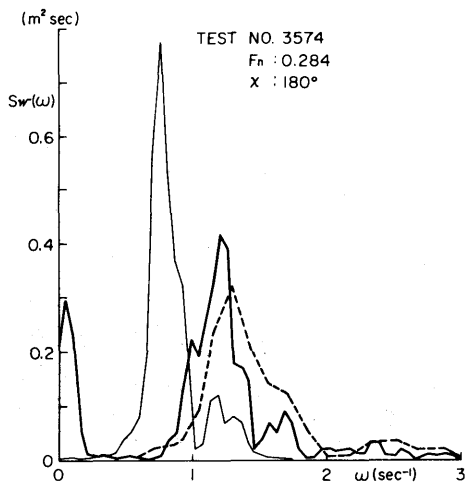


Fig.20

Wave spectra by:
 —○— Fixed wave probe
 - - - Conversion from —
 — Encounter wave recorder

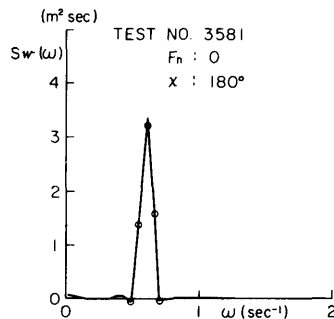


Fig.21

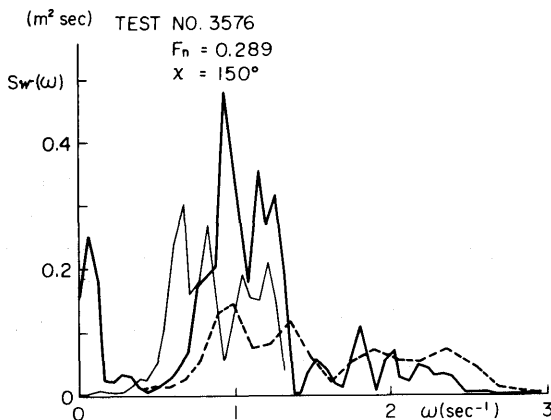


Fig.22

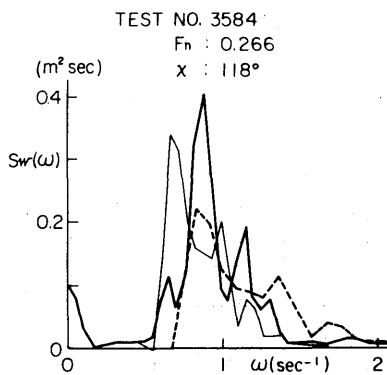


Fig.23

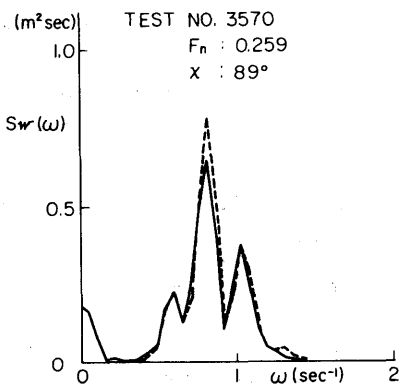


Fig.24

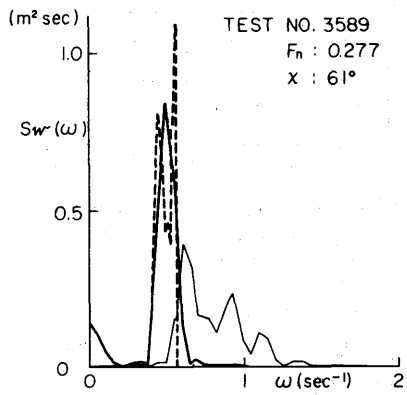


Fig.25

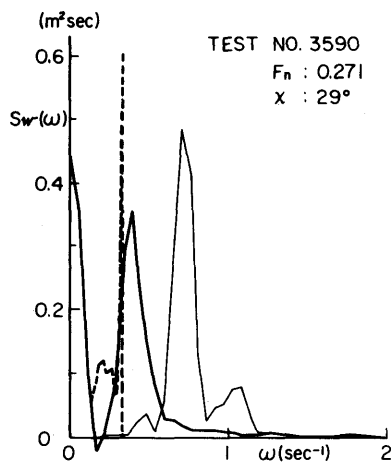


Fig.26

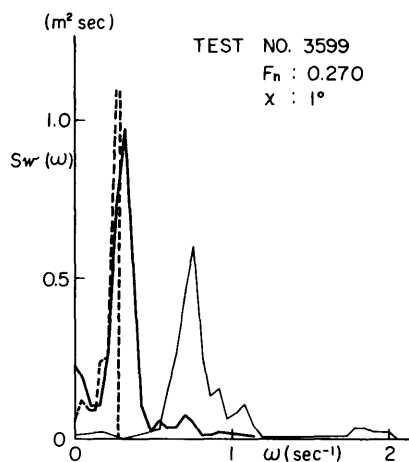


Fig.27

Fig.20~Fig.27 Wave spectra measured by the encounter wave recorder on the model ship in the experimental tank

でも波浪を完璧に測定できる唯一の決定的な方法がない現在、なるだけ多様な方法を並用して波浪を測定することが望ましい。例えば波浪観測船などでは船首と船側の両方に本論文のような出会波浪計を設けるほか、ブイ式波浪計も随時使用できるとよい。

装置の設計上注意すべき点を挙げると次のようになる。即ち波浪計は荒天時に使用しなければならないので、波浪による損傷を受けないようなものにしておく必要がある。また、荒天中の必要な時に随時張り出し格納が安全に、遠隔から動力で行うようにすべきである。相対水位の測定には比較的小形の船で乾舷が小さい場合には装置の簡便さや価格の点で超音波式が優れているが、乾舷の大きい大型船にはレーダ式がよい。レーザー式は現在研究中のものであり実用までにはなお時間がかかるものと思われる。測定の結果はアナログ量としてデータレコーダに記録されるのが普通であるが、さらに船載のデータ解析装置を備え、観測と同時に波浪の統計的性質、エネルギー Spektrum が得られるようにすることが、波浪データの収集にとって最も重要な点であろう。

船舶の新しい設計法や運航法の開発、海洋開発等に役立てるためにも日本近海や北太平洋の波浪観測を精力的に行うことの必要性が言われて久しいが、得られたデータはまだ充分ではない。国が保有する船舶のできるだけ多数の船に船載式波浪計を備え、気温、風向、風速等の気象データと同じ程度に容易

に日常的に波浪を観測し、得られたデータを集中して整理し、広く役立てるシステムの確立、整備が望まれるが、本論文で述べたような船載式波浪計の使用実績はそのような場合の有用な資料となるであろう。

なお船載式出会波浪計として実用されているものに Tucker 式があり、これと本論文で述べた出会波浪計との比較検討も重要な課題である。今後そのような比較実験も実施したいと考えている。

謝 辞

本論文は船舶技術研究所が実施している船載式出会波浪計の開発研究の成果をとりまとめたものである。波浪中の船体運動研究における出会波浪計の重要性を主張され本研究の端緒を開き、本論文で述べた青雲丸の船首出会波浪計及び模型船用出会波浪計の実現に努力された元船舶技術研究所長山内保文博士に本論文を捧げ、著者らの敬意を表したい。

また青雲丸の船首出会波浪計の実現に尽力され、実船での波浪データの観測に力を注がれた元青雲丸船長荒稻蔵氏はじめ航海訓練所の関係者の方々に敬意を表します。さらに、著者らの実船試験に際しては、荒船長はじめ、青雲丸の池田勲船長(当時)、進徳丸の桜木幹雄船長(当時)及び両船の乗組員の方々の御協力をいただいた。深く感謝いたします。

またブイ式波浪計との比較のため共同研究を実施していただいた、東京大学生産技術研究所前田久明助教授はじめ同研究室の方々、(社)日本造船研究協

会SR132 部会「船載波浪計の開発研究」の部長田宮真東大教授はじめ委員の方々に深く感謝する次第である。

本論文における波スペクトラムの解析は、船研共用電子計算機 FACOM 270-20 によったが、相対水位と加速度の記録から出会波のスペクトラムを計算するプログラムは、東京商船大学大津皓平助教授の開発したものを使用させていただいたことを付記し、青雲丸の実船試験に同氏の御協力を得たことと併せて感謝の意を表したい。

進徳丸の実船試験には当研究所の運動性能部野中晃二技官の協力を得たことを感謝する。

参 考 文 献

- 1) 航海訓練所編；練習船青雲丸，日本鋼管(株)発行，成山堂書店，(昭和44年2月)
- 2) Yamanouchi, Y. and N. Matsumoto; On the Encounter Wave Recorder for Free Running Model and for Actual Ship, Proceedings of the 12th International Towing Tank Conference, Rome. (1969)
- 3) 日本造船研究協会SR132研究部会編；実船搭載用波浪計に関する研究，日本造船研究協会，研究資料，No.164(1972), No.177(1973), No.193(1974) 及びNo.214(1975)
- 4) 高石敬史，安藤定雄，門井弘行；ニューヨーク定期貨物船山隆丸による北太平洋航海性能実船試験について，船舶技術研究所報告，第2巻，第2号，(1965)
- 5) 日本造船研究協会SR63研究部会編；船舶の耐航性に関する実船試験，日本造船研究協会報告，第65号(1968)
- 6) 山内保文，松元尚義，森正彦；自由航走模型船用の出会波浪計について，船舶技術研究所研究発表会（第12回），講演概要（1968）