

船載式出会波浪計の性能について (第2報)

—空中超音波式と Tucker 式の比較—

高石 敬史* ・ 原口 富博**

猿田 俊彦** ・ 大松 重雄**

Experiments on the Ship-Borne Wave Recorder (2nd Report)

By

Yoshifumi TAKAISHI, Tomihiro HARAGUCHI,
Toshihiko SARUTA and Shigeo OHMATSU

Abstract

In the previous report, two of the present authors et al. showed the full-scale ship measurements of waves by using two kinds of ship-borne wave recorder, i.e. the one consists of a radar distance meter and an accelerometer and the other used the ultrasonic distance meter. The results were compared with the wave buoy measurements and with some results obtained by the model ship.

This second report describes recent development of a new ultra-sonic wave height meter and the results of full-scale measurements on the ocean weather ship, this time in comparison with the conventional Tucker wave recorder as well as buoy wave meters.

The influence of radiation and diffraction waves on the measured wave heights due to presence of ship body and its motions has been clarified theoretically.

1. 緒 言

船舶の設計や安全運航にとって海洋の波浪に関する情報は不可欠のものであり、今日では目視観測、波浪計測、波浪予報など様々な手段により集められた波のデータが用いられている。なかでも波浪計によって計測された波のデータ、即ちエネルギースペクトルの形状や波高や周期の統計的諸量は多くの情報を含んでいるので、利用価値が高い。

波浪計測に常用されている測器としては、係留されたブイによるもの、海底に設置した固定のセンサーによるもの、そして船舶に装備されたもの等がある。これらのうち、係留されたブイは深海での海況観測に、海底設置型は沿岸域の比較的浅海での観測に使用され

る場合が多い。これらに対して、船舶による波浪観測は、海洋気象観測船によって他の海洋気象要素の観測と同時に実施されるが、前2者に比べて一定の場所に長時間留ることがないので長期にわたる波浪データの取得には向いてない反面、自由に移動可能であるので、若し多数の船舶に装着されれば、近海から外洋に至る広範囲の波浪情報収集に役立つ。特に現在の外洋波浪データ収集は、一般船舶の目視観測に依存しているので、これが計器による観測で広くチェックできれば、波浪データの精度や信頼性が飛躍的に向上することが期待できる。

また船舶の耐航性能向上、即ち、波浪中性能の優れた船型の開発や波浪中運航の最適化などを行うには波浪中の船の応答を波浪と関連させて明かにすることが重要な課題である。このためには理論的研究、模型実験等のほかに、実船による実海域での波浪及び船体応答の把握が必要であり、実船に装備可能な波浪計の開

* 海洋開発工学部

** 運動性能部

原稿受付：昭和58年5月7日

発が望まれている。

船舶技術研究所では、船体と波面との相対運動を計測して船が出会う波浪を求める、いわゆる出会波浪計の開発をいくつか試みてきた。その1つは山内ら¹⁾によるマイクロ波（レーダー）を利用した船首出会波浪計であり、もう1つは空中の超音波信号を利用した船側の出会波浪計である²⁾。これらの波浪計の性能やその実用性は、模型実験、実船での計測及びブイ式波浪計との比較などを通じて確認された。

著者らは、前報²⁾においてこれらの実用化実験を報告したが、その時に残された課題として、

- 著者らが実用化試験をした超音波式の船側波浪計と、海洋気象観測船等で常用されている Tucker 式波浪計との比較。
- 船上における波浪データのオンライン解析の実行。
- さらに性能の優れた安価な船載波浪計の開発と多数船舶への装備による波浪データの広範な取得。

等の項目を挙げた。

その後このような目論に沿って新方式の超音波式波浪計を開発し、海洋気象観測船による Tucker 式波浪計並びにブイ式波浪計との比較実験、船上における波浪データのオンライン解析等を順次実施した。

その結果、新方式の超音波式波浪計の実用性が確かめられたほか、Tucker などとの比較において船載式波浪計に対する船体影響も明らかとなり、船載式波浪

計の利用に対する指針を示すことができた。

2. 波浪計の実船テスト

2.1 超音波式波浪計の改良

今回新しく開発した波浪計は、従来の超音波式の相対水位計³⁾と異なり^{注1)}、送波器を出た超音波信号が水面から反射されて受波器に帰って来るまでの時間差の検出方法として入出力信号の相関を計算する方法を用いたものである。

既ち、一般外界には存在しないような人為的に作られた、一定のくりかえしを持つ不規則的時系列信号（M系列信号と呼ばれている）によって変調された超音波信号を水面に投射すると、相対水位に比例した時間経過後にそれと同じ時系列の反射信号が受波される。そこで、復調再生した受波系列信号と、送波時刻より遅延された送波系列信号との相互相関を求め、相関が最大となる遅延時間量を探し、これから相対水位を求める方式である。

その原理のブロック図を Fig. 1 に示す。

この方式では一般自然界に存在しないような時系列信号を用いるため雑音分離性に優れている。また従来の方式で使用した矩形状パルス信号では、受波され、電気信号に変換される時の信号の立ち上がりが鈍化するため、入出力波の時間差の検出の誤差となるが、今回の方式ではこの測定誤差をなくすることが原理的に可能である。この波浪計の諸元は Table 1 に示すとおりである。また機器を実船に取付けた状態の写真を

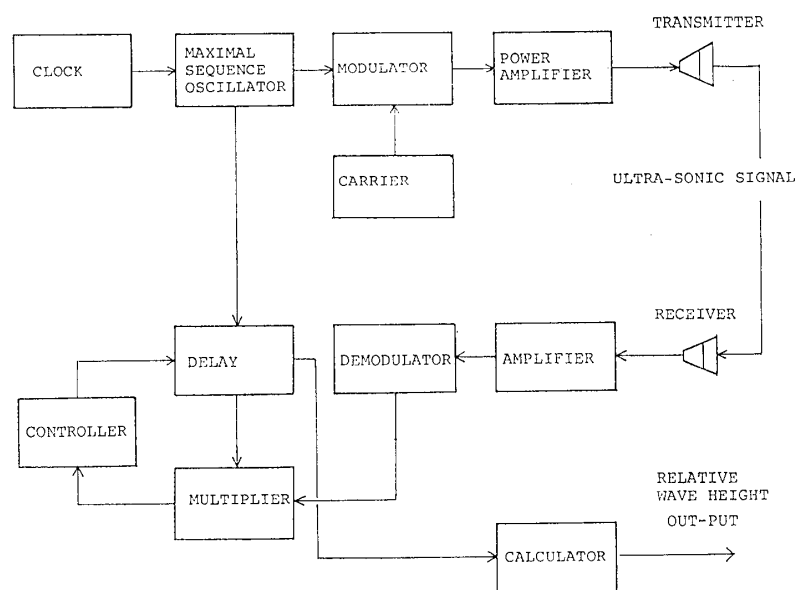


Fig. 1 Block Diagram of Ultra-Sonic Wave Meter

Table 1 Nominal Performance of Ultra-Sonic Wave Meter

Measurable Wave Height	0~10 m (± 5 m)
Measurable Distance	2~12 m
Accuracy	$\pm 1\%$ (of full scale)
Nyquist Frequency	1Hz (-3 dB)
Frequency of Ultra-sonic	28.5kHz
Beam Angle of Ultra-sonic	about 5 degrees
Measurable Wave Slope	within 15 degrees
Environmental Condition	Temperature $-5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ Humidity within 95%

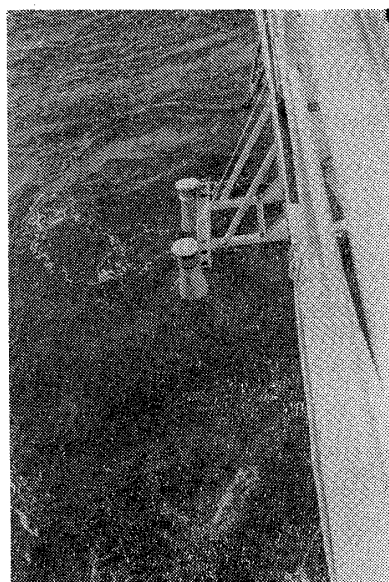
**Fig. 2** Photograph of the Ultra-Sonic Wave Meter

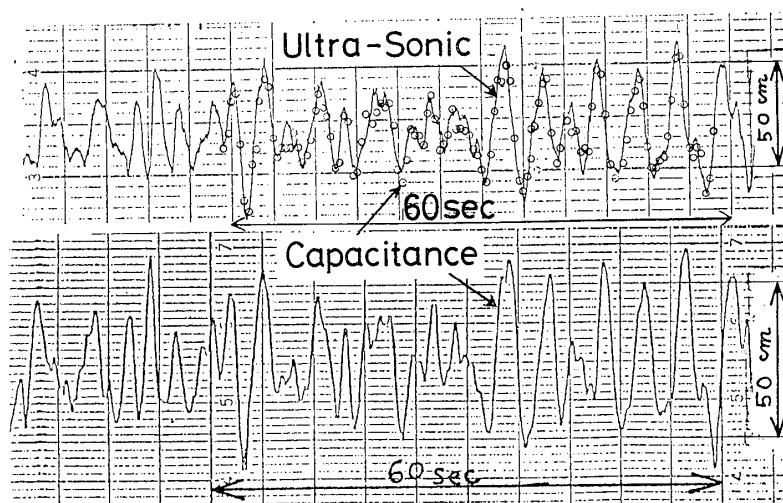
Fig. 2 に示す。

この波浪計の実用性を確認するため、東京商船大学の練習船「汐路丸」(331GT)に本装置を取付け、同船の電気容量式 (Capacitance Type) のワイヤーによる船首相対水位変動の記録と比較した。この予備的実験は昭和52年11月24~25日、館山沖の海域で行われたが、その時得られた記録を **Fig. 3** に示す。図中、比較のため、超音波式 (Ultra-Sonic Type) の記録上に、Capacitance Type の記録から読みとった値を○印で示してある。これにより、両者の相対水位記録はよく一致していることが確認されたので、本方式を波浪計に採用することとした^{注2)}。

2.2 実船における波浪計測実験のシステム

波浪計測実験は、主として気象庁所属の海洋気象観測船「啓風丸」(1,800GT)の波浪観測航海に乗船して行った。啓風丸の主要目を **Table 2** に、全景写真を **Fig. 4** にそれぞれ示す。

使用した波浪計は、前節で述べた新形式の超音波式波浪計のほか、啓風丸装備の Tucker 式波浪計及び東京大学生産技術研究所高橋幸伯教授の開発になる加速度ブイ式波浪計⁵⁾の3種類が主なものであるが、これらのほか、気象庁が外洋に面した沿岸の波浪観測のために設置している海底定置式波浪計の同時観測も行われた。また啓風丸に搭載されている PMS と呼ばれる水圧ブイ式波浪計も、一部の実験では用いた。

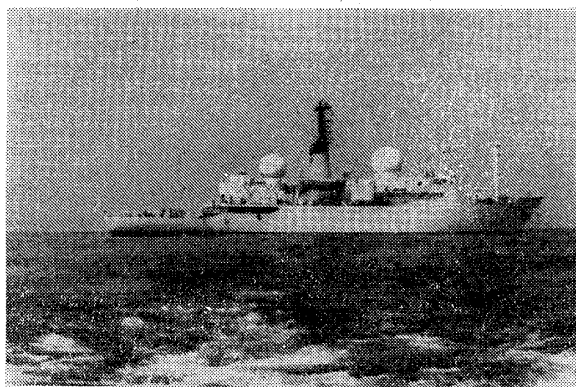
**Fig. 3** Comparison of Relative Wave Records Measured by the Ultra-Sonic Wave Meter and the Electric Capacitance Wire Wave Meter

注1) 従来の超音波式相対水位計では、1発の矩形パルス信号を超音波として投射し、それが水面から反射されて受信器に受波されるまでの時間を計測する方式であった。パルスの発射回数は、この時間をパルス間隔内で十分確保する必要があるので、測定距離に応じて決められる。文献3)のものは18Hzである。

注2) 本新方式と同原理の超音波式波浪計が現在「汐路丸」の船首に常備されている⁴⁾。

Table 2 Principal Dimensions of Keif-Maru

Length (o.a.)	81.70(m)
Length (p.p.)	72.00(m)
Breadth (mld.)	12.60(m)
Depth (mld.)	6.50(m)
Draught	4.61(m)
Gross Tonnage	1795.76(ton)
Speed	14(kt)

**Fig. 4** Photograph of the Ocean Weather Ship "Keifu-Maru"

実験時の計測システムを Fig. 5 に示す。

計測システムの構成機器のうち、スペクトルアナライザーは、第4回の実船計測においてのみ使用した。

2.3 実験航海の概要

啓風丸による波浪計比較観測実験の航海は Table 3 に示すように前後4回にわたって行われた。それぞれの実験航海の海域及び航路図を Fig. 6(a)~(d) に示

Table 3 Schedule of Wave Measurement Navigation of Keifu-Maru

	Experiment Area	Period
1st	Off Sendai	April 12~17, 1979
2nd	Around Izu	Nov. 21~30, 1979
3rd	do.	April 21~28, 1980
4th	Around Izu and Enshu-Nada	Nov. 11~18, 1980

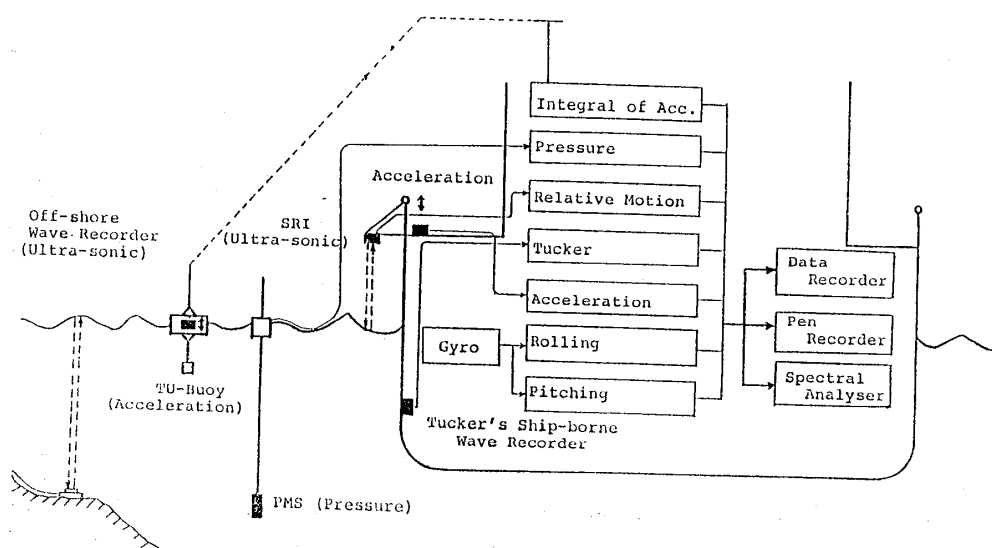
す。

(1) 第1回実験

この実験は新形式の波浪計の予備実験として行われた。それまでに数度の汐路丸等による実船テストを繰り返してほぼ実用のめどがついていたのでこれを啓風丸に取付けた。この航海は穏やかな海象に終始し風浪はほとんどなく、うねりが僅かに認められ程度であった。波浪計の比較実験は計3回行われた。この実験で新しい超音波式波浪計は一応、他の波浪計と比べて妥当な計測結果を与えたが、航走中の計測の大部分、停船中の計測の一部において、超音波の反射信号の受信に欠測を生じることが多く、その場合、欠測による出力信号の乱調を防ぐために設けられた信号のホールド回路の時定数が不適切なため、計測波形が実際の波浪と著しく異なった形となった。

そこで実験後に、欠測を少なくするため超音波信号の出力を増大させるとともに、受信信号の処理回路の時定数を調整し直した。

(2) 第2回実験

**Fig. 5** Arrangement of Experiment on Board

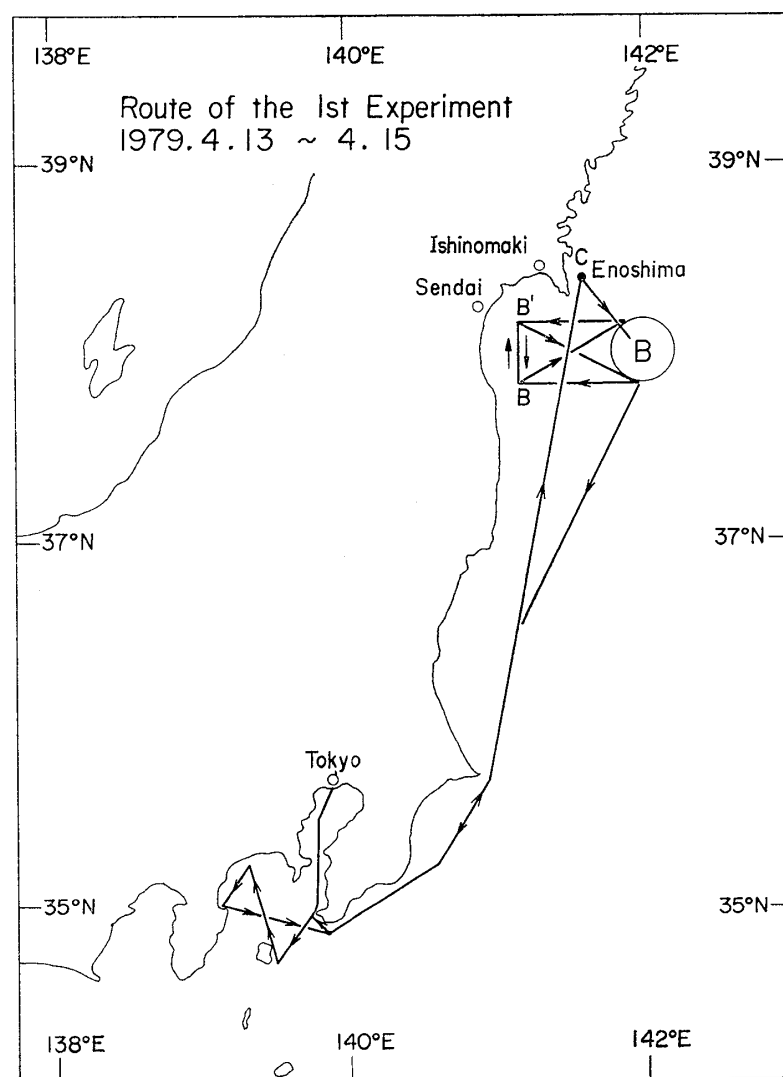


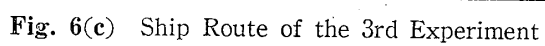
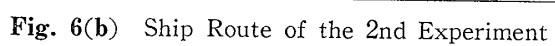
Fig. 6(a) Ship Route of the 1st Experiment

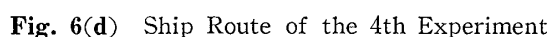
第2回目の実験は伊豆半島周辺海域で行われた。この実験の期間に、日本近海は気圧の谷が周期的に通過し（23日、26日、29日）、この時は南西～西寄りの風が約20～30ktであった。低気圧通過後は一時的に冬型の気圧配置になったが、全般的には北高型で本州南岸沖には前線が発生し易く、関東南岸は北東の風が卓越し30～50ktの風速に遭遇した。このため、風浪、うねり共に目視波高で2～2.5mをしばしば観測している。この航海では計35回の波浪計測を実施したが、そのうち9回は波浪計の比較実験である。この実験を通じて超音波式波浪計の作動も順調で、良好な波浪記録を多数得ることができた。しかし波高が3mを越えるような場合には超音波の反射信号を受信できない頻度が増加し、欠測時のホールド時間も依然として改良されない等の欠点が再び露呈された。そこで実験後、a)受信

部のゲインを10倍に上げて受信感度を高める、b)受信部のヘッドアンプ回路に使用したIC部品をS/N比の良いものに交換する、c)ホールド回路の時定数をさらに1/2にする、d)超音波の送信用振動子を新替する、等の改善を行った。さらに、受信感度を高めるために送受波器の水面上の取付高さを従来の5.5mから、4.5mに下げるよう船体取付治具を改造した。

(3) 第3回実験

この実験も伊豆半島周辺で行われた。4月22日～23日は相模湾内での計測で、北東の風があったが海面は穏やかで波高は約1mであった。23日の午後に石廊崎沖に移動したが、その夜半から24日未明にかけて前線の通過があり北西の風が30ktをこえ、風浪が1時的に高くなり2.5mに達した。24日はその余波のうねりが続いた。25日は駿河湾より伊豆大島へ向い、26日はそ





る波浪も欠測なく測定でき、前回までの欠点が改善されたことが示された。Fig. 7(a), (b) に、この実験で

Figure 1 displays wave spectra (USW) for various test numbers, plotted against wave period T (sec) and wave frequency ω (rad/s). The spectra show the relationship between wave height $S_w(\omega)$ and wave period T , with a peak around 7-8 seconds. The spectra are arranged in a grid with time (15:30, 12:55, 09:45, 21:00, 15:20, 12:56, 09:54) and location (off Oshima, off Irozaki) indicated.

The Y-axis represents wave height $S_w(\omega)$ in $m^2 \cdot sec$, ranging from 0 to 2.0. The X-axis represents wave period T in seconds, ranging from 0 to 2.0, and wave frequency ω in rad/s , ranging from 0 to 2.0.

The spectra are labeled with Test No. and location:

- 42608 (off Oshima)
- 42605 (off Oshima)
- 42602 (off Oshima)
- 42601 (off Oshima)
- 42418 (off Irozaki)
- 42417 (off Irozaki)
- 42416 (off Irozaki)
- 42415 (off Irozaki)
- 42414 (off Irozaki)
- 42413 (off Irozaki)
- 42412 (off Irozaki)
- 42410 (off Irozaki)
- 42409 (off Irozaki)
- 42408 (off Irozaki)

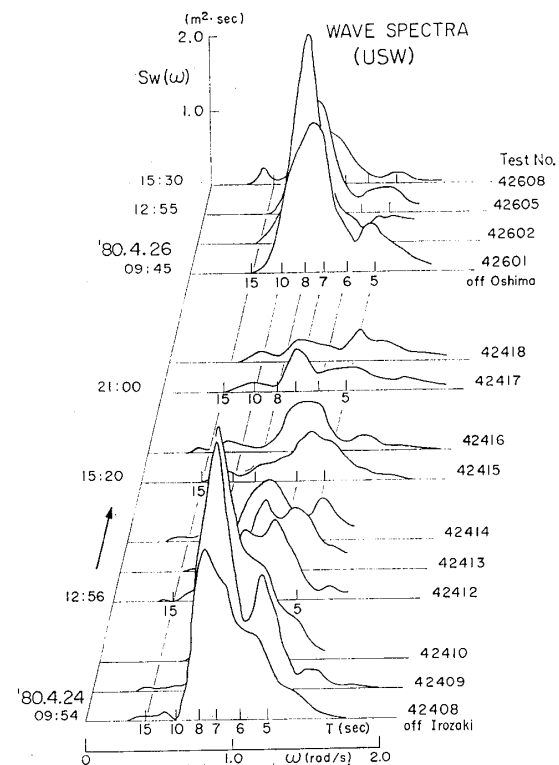


Fig. 7(b) Wave Spectra Measured During the 3rd Experiment

測定した波スペクトルの時間的変化を示す。

(4) 第4回実験

この実験も伊豆半島周辺及び遠州灘において実施された。11月12日は、伊豆大島沖では南々西からのうねりが残っている程度であったが、その夜半から13日早朝にかけて通過した前線のため13日は大時化となり、南西からの35ktの風と5mの波を受け、船の動揺は激しく、横揺れ角は両振幅で30°に達するほどであった。13日の昼過ぎには大島沖を離れ相模湾へ向った。11月16日にはやや強い風と適当な波と好天に恵まれ、石廊崎沖で波浪計測を行った。第4回実験では合計14回の計測を行ったが、波浪計の比較実験は8回で、良好な記録を得た。

3. 実験結果

3.1 波浪観測値の比較

前章で述べた4回の実験航海で得た波浪の観測値を、目視及び波浪計によるものを併せて Table 4 (a) ~ (d) に表示した。表の左半分には啓風丸乗組の気象観測員による波浪の目視観測値を示し、右半分には超音波式 (USW)、加速度ブイ式 (BUOY) 及び Tucker 式 (TUCKER) の各波浪計でそれぞれ計測された波の有義波高 $H_{1/3}$ (m) 及び平均波周期 (ゼロアップクロス) T_0 (sec) を示す。また目視波高 H_V (m) として、

風浪の目視波高 H_V (sea) と、うねりの目視波高 H_V (swell) を用いて

$$H_V = \sqrt{H_V^2(\text{sea}) + H_V^2(\text{swell})} \quad (1)$$

により求めた波高も記入した。 $H_{1/3}$ 及び T_0 は、波記録を解析して得られた波のエネルギー Spektrum から算出した値である。

表の右端の欄には、各種波浪計の比較実験を行ったケースを、①~⑭まで通し番号を付して示した。

これら27回の比較実験のうち、代表的と思われる16ケースについて波浪スペクトラムを比較したのが、Fig. 8~23である。

このうち、比較的多数のデータが得られた第3回と第4回の実験結果を見ると、第3回実験では超音波式波浪計で得た波スペクトルが Tucker 式のそれより全般に高目の値を示しているが、第4回実験では両者のスペクトルはお互によく一致していることがわかる。

スペクトルより求めた有義波高の値を比較してみると、Fig. 24のようになる。第3回実験では、USW の値が TUCKER より約30%高目に出ている。

第4回実験では超音波式がやや高目ではあるが、Tucker 式と大差ない値となっている。第3回実験で両方式の計測値にかなりの差があることの理由は明らかではない。ただし、計測に当り用いられた各種の量

Table 4(a) Observed and Measured Waves of the 1st Experiment

Test No.	Month / Day / Time	Wind		Visual Observation							Course - Speed deg kt	SRI		TU		JMA		Number of Comparative Rep & Comments	
				Sea			Swell					USW		BOUY		TUCKER			
		Direction	Speed	Direction	Period	Height	Direction	Period	Height	H _{1/3}		T	H _{1/3}	T	H _{1/3}	T	H _{1/3}		T
		deg	m/s	deg	sec	m	deg	sec	m	→ ~		m	sec	m	sec	m	sec		m
11	4/13 10:40~10:55	60	2.3	60	2	0.5	16	7	0.5									0.7	
12	11:40~11:55	60	2.3	60	2	0.5	16	7	0.5									0.7	
13	13:12~13:37	90	3.9	90	2	0.5	120/80	7/6	0.8/0.5	㊟	195-STOP			1.3	5.4	1.3 [*] 1.7	4.0 [*] 7.0	1.1	① * PMS
14	15:37~	110	5.0	110	2	0.5	90	7	1.5		62-150							1.6	
21	4/14 8:30~ 8:44	340	2.6	340	1	0	40/190	9/6	1.5/1.0							2.5	9.5	1.8	
22	9:04~ 9:16	30	2.5	340	1	0.2	40/190	9/6	1.5/1.0	㊟	290-STOP					2.3	9.4	1.8	
23	9:55~10:15	340	2.2	340	1	0.2	40/190	9/6	1.5/1.0	㊟	75-STOP	1.7		2.0	6.4	1.8	8.5	1.8	②
24	11:00~11:14	350	2.1	340	1	0.2	40/140	9/6	1.0/1.0	㊟	90-STOP					1.6	8.4	1.4	
25	11:36~11:47	320	2.6	320	1	0.1	40/140	9/5	1.0/1.0	㊟	210-STOP					1.2	9.5	1.4	
26	13:47~	360	8.2	360	2	0.5	150/90	6/9	1.0/0.5		180-150							1.2	
27	14:00~	360	8.2	360	2	0.5	150/90	6/9	1.0/0.5		180-150							1.2	
28	14:11~14:23	360	8.2	360	2	0.5	150/90	6/9	1.0/0.5		180-150							1.2	
31	4/15 8:10~	360	4.0	360	1	0.2	60/360	9/1	1.5/1.0	㊟	120-STOP	2.8		2.3	5.8	2.0 [*] 2.5	6.4 [*] 7.6	1.8	③ * PMS

Remarks; SRI : Ship Research Institute

USW : Ultra-Sonic Wave Height Meter

TU : Institute of Industrial Science,
University of Tokyo

BUOY : Acceleration Wave Meter

JMA : Japan Meteorological Agency

TUCKER : Tucker Wave Meter

Table 4(b) Observed and Measured Waves of the 2nd Experiment

Test No.	Month / Day Time	Wind		Visual Observation							Course — Speed deg kt	SRI		TU		JMA		Number of Comparative Exp & Comments	
				Sea			Swell					Sea Swell	USW		BUOY		TUCKER		
		Direction	Speed	Direction	Period	Height	Direction	Period	Height	H _{1/3}			T	H _{1/3}	T	H _{1/3}	T		Hv
		deg	m/s	deg	sec	m	deg	sec	m	m			sec	m	sec	m	sec		m
1	11/22 9:10~9:25	20	13.7	20	4	1.5	295	9	1.0		205-15						1.8		
2	11:00~11:15	30	15.7	30	5	2.5	110	8	2.0	☞	295-STOP					2.6	6.7	3.2	
3	14:00~	40	6.0	49	3	1.0	100	8	2.5	☞	310-STOP					3.3	7.9	2.7	
4	17:00~	160	5.0	160	3	1.0	100/40	8/5	20/1.0	☞	40-STOP					3.3	8.0	2.4	
5	11/23 8:00~	220	11.2	220	3	1.3	100/40	8/5	20/1.0	☞	90-STOP					2.4	8.4	2.6	
6	10:38~11:10	220	6.4	220	2	0.7	100/160	8/6	20/1.5	☞	70-STOP					3.3	8.0	2.6	
7	11:10~	220	4.1	220	2	0.5	100/160	8/6	20/1.5	☞	65-STOP					3.2*	6.1*	2.5 (4)	
8	13:30~	250	11.1	250	3	1.2	100/150	8/6	20/1.5	☞	145-STOP					1.7	7.7	2.8	
9	14:00~	240	10.0	240	3	1.0	100/150	8/8	20/1.5	☞	135-STOP					2.5*	5.2*	2.7 (5)	
10	15:15~	240	10.0	250	3	1.0	100	8	2.0		300-15							2.2	
11	11/24 7:40~	20	9.0	20	3	1.5	90	8	2.0	☞	285-STOP					3.5	9.2	2.5	
12	8:10~	20	9.0	20	3	1.5	90	8	2.0	☞	280-STOP					1.8*	10.8*	2.5 (6)	
13	10:10~10:55	201	10.5	20	3	1.5	70	8	2.0	☞	310-STOP					3.2	8.7	2.5	
14	11:10~11:25	20	12.0	20	4	2.0	70	8	2.0	☞	285-STOP					3.0*	5.8*	2.8 (7)	
15	13:33~	30	12.5	30	5	2.0	70	9	2.5	☞	305-STOP					3.6	8.4	3.2	
16	14:00~																		
17	11/25 5:30~5:50	10	16.0	10	5	2.0	70	9	2.5	☞	270-STOP					2.9	7.8	3.2 (8)	
18	6:43~6:53	(325)	(18.5)	40	4	1.5	45	7	2.5	☞	38-15								
19	7:07~7:23	10	15.0	10	5	2.5	80	9	2.0	☞	265-STOP					3.0	7.0	2.9	
20	10:07~	5	11.9	10	3	0.7	—	—	—	☞	270-STOP							0.7	
21	11/25 11:40~11:55	5	11.2	10	4	1.5	—	—	—	☞	285-STOP					1.6	6.5	1.5	
22	11/27 7:47~7:56	10	5.0	360	2	0.3	180	6	0.5	☞	270-STOP					0.3	8.1	0.6	
23	9:50~10:05	10	6.0	10	10	0.5	170	7	0.5	☞	250-STOP					0.7	8.5	0.7	
24	12:47~13:07	70	6.5	70	2	0.5	120	9	1.0	☞	325-STOP					2.0	7.8	1.1	
25	13:35~13:50	50	1.2	0	4	1.5	100	9	1.5	☞	70-14							2.1	
26	17:45~18:00	35	11.3	340	4	1.5	90	8	2.0	☞	300-STOP					2.2	8.3	2.5	
27	11/28 7:30~7:45	30	1.3	30	4	2.0	80	8	2.0	☞						2.3	7.6	2.8	
28	8:30~	15	15.2	20	4	2.0	80	8	2.0	☞	280-STOP					3.2*	5.6*	2.8 (9) * PMS	
29	10:33~10:50	20	11.4	20	4	2.0	170/80	10/8	15/2.0	☞	275-STOP					2.3	7.9	3.2	
30	11:10~11:17																	(10)	
31	13:32~14:05	20	12.5	20	4	2.0	170/80	10/7	20/1.5	☞	280-STOP					2.4	7.7	3.2	
32	11/29 7:30~	250	9.6	250	5	2.0	160/70	10/8	15/1.5	☞	120-STOP					2.8	8.7	2.9	
33	8:18~8:27	220	9.6	220	4	1.5	160/70	10/8	15/1.5	☞	120-STOP					3.0*	5.9*	2.6 (11) * PMS	
34	10:30~	230	13.1	230	5	2.0	80/160	9/8	20/1.5	☞	130-STOP					2.5	8.8	3.2	
35	10:57~11:13	240	13.0	240	5	2.0	80/160	9/8	20/1.5	☞	140-STOP					2.9	2.6	3.2 (12)	

(上下加速度, 相対水位, 計器のゲイン調整)の較正值のいずれかに誤差が混入した可能性も否定できない。波浪計の比較に当って, 同一の波浪について実量の較正が困難である点が, このような比較実験の問題点であろう。

ブイ式波浪計による有義波高値を Tucker 式のそれと比べると, 点の散らばりは若干大きく目であるが, 大略はお互に同じオーダーの値を示している。

啓風丸の気象観測員による目視波高 H_v と, Tucker 式波浪計で測定した有義波高の関係を示したのが Fig. 25 である。また, 風速と有義波高の関係を Fig. 26 に示す。同図中に, 北太平洋の風と波の統計解析による⁶⁾風速と波高の平均値との関係を実線で示した。こ

れによると計測値の平均的傾向は統計による値に近いといえる。

3.2 考 察

前後 4 回にわたる実船試験により, 船載式 (Ship-borne) 波浪計として超音波式及び Tucker 式, 投入式波浪計として加速度ブイ式及び 1 部水圧ブイ式 (PMS) の, 各種波浪計の比較実験を行った。その結果, 前節で述べたように, 波高が 5 m 程度の波に遭遇し, このような波も十分に測定できる新しい形式の超音波式波浪計がほぼ実用可能である段階に到達した。この波浪計で計測した波スペクトルの形状を従来より観測船に常用されている Tucker 式と比較すると, ほぼ同じ形状, エネルギーの波スペクトルを与える。但

10

Table 4(c) Observed and Measured Waves of the 3rd Experiment

Test No.	Month / Day / Time	Wind		Visual Observation							Course - Speed deg kt	SRI		TU		JMA		Number of Comparative Exp & Comments		
				Sea			Swell			Sea Swell → ~ ~		USW		BUOY		TUCKER			ALSCA	
		Direction deg	Speed m/s	Direction deg	Period sec	Height m	Direction deg	Period sec	Height m			H _{1/3} m	T sec	H _{1/3} m	T sec	H _{1/3} m	T sec			
42201	4/22 08:25~08:34	50	40	40	2	0.5	140	7	1.0		305-STOP	1.0	7.3			0.7	9.3	1.1	TUCKER: Sbd (★)	
42202	08:47~08:56	50	60	40	2	0.5	140	7	1.0		165-STOP 150	1.5	8.7			1.1	8.6	1.1	TUCKER: Port (★)	
42203	09:36~09:45	50	2.3	50	1	0.5	140	7	1.0			1.1	9.0	1.0	5.1	1.0	8.3	1.1	43	
42301	4/23 13:02~13:12	250		250	3	0.8	90/160	7/7	10/1.0		340-STOP	1.5	7.7	1.4	5.1	1.1	7.1	1.6	44	
42302	13:12~13:21											1.5	5.1							
42304	15:45~15:55	230		230	3	0.8	90/160	8/7	10/1.0		335-STOP	1.3	4.4	1.6	5.4	1.0	7.0	1.6	45	
42305	15:55~16:04											1.8	5.6							
42306	16:04~16:13											1.8	7.9							
42307	16:14~16:23											1.3	7.6							
42401	4/24 00:52~01:01	310	16.4	310	5	2.5	---	---	1.5		200-STOP	2.4	7.0			2.0	7.0	2.9	TUCKER: Sbd (★)	
42402	01:01~01:10											2.5	6.9							
42403	01:10~01:19											2.3	6.7							
42404	01:19~01:28											2.2	6.5							
42405	01:28~01:37											2.4	6.3							
42407	09:45~09:54			260	2	0.5	290	8	2.5		20-STOP	3.9	6.3						TUCKER: Port (★)	
42408	09:54~10:03											4.0	6.1							
42409	10:03~10:12											4.2	6.2	2.7	5.6	2.9	6.4	2.5		46
42410	10:12~10:21											4.2	6.3							
42412	12:56~13:05	270	3.5	270	2	0.5	280	8	2.5		20-STOP	2.9	5.7							
42413	13:05~13:14											2.9	5.4	1.8	5.0	1.9	6.0	2.5	47	
42414	13:14~13:23											2.7	5.4							
42415	15:20~15:29	280	3.8	280	2	0.5	280	6	2.0		5-STOP	2.4	5.2	1.7	5.0	1.5	5.8	2.1	48	
42416	15:29~15:37											2.3	5.4							
42417	21:00~21:09	290	10.4	290	4	1.5	---	---	2.0		-STOP	2.3	5.1					2.5		
42418	21:09~21:18											2.1	4.8							
42419	21:18~21:27											2.1	4.8							
42420	21:27~21:38											2.2	4.9							
42421	21:38~21:43											2.1	4.7							
42601	4/26 09:45~09:54	50	9.6	50	5	2.0	73	7	2.5		155-STOP	3.9	6.4							
42602	09:54~10:03											3.9	6.8							
42603	10:03~10:12											4.3	6.4	2.8	5.4	3.1	7.0	3.2	49	
42604	10:12~10:21											3.9	6.4							
42605	12:55~13:04	50	6.2	45	3	1.0	70	8	2.5		165-STOP	3.1	6.4							
42606	13:04~13:13											3.3	6.8	2.1	5.2	2.5	7.5	2.7	50	
42607	13:13~13:22											3.1	6.2							
42608	15:30~15:39	80	2.6	80	2	0.5	80	8	2.0		180-STOP	2.7	6.9	1.5	5.7	2.4	7.9	2.1	51	
42609	15:39~15:45											3.1	7.3							

Table 4(d) Observed and Measured Waves of the 4th Experiment

Test No.	Month / Day / Time	Wind		Visual Observation							Course - Speed deg kt	SRI		TU		JMA			Number of Comparative Exp & Comments
				Sea			Swell			Sea Swell		USW		BUOY		TUCKER			
		Direction	Speed		Direction	Period	Height	Direction	Period			Height	H _{1/3}	T	H _{1/3}	T	H _{1/3}	T	
		deg	m/s		deg	sec	m	deg	sec	m		m	sec	m	sec	m	sec	m	
1	11/12 10:10~10:25	0	4.5	5	2	---	180	5	---		185-15	0.8	4.3						
2	12:05~12:20	25	2.8	30	2	0.3	190 90	6 6	1.0 0.7		307-STOP	1.0	4.7	1.2	4.7	0.8 0.23	6.5 4.1	1.3	
3	15:00~15:15	190	8.2	190	3	0.8	190 90	8 6	1.2 1.0		90-STOP	1.2	4.7	1.3	4.4	0.8 0.7	6.0 4.1	1.8	
4	11/13 09:00~09:20	230	17.0	230	6	2.5	190	8	3.0		126-STOP	3.8	7.2			3.7 2.24	7.3 3.2	3.9	52
5	11:50~12:10	250	16.1	250	6	2.0	190	8	3.0		140-STOP	4.4	7.6			4.0 2.6	7.7 5.5	3.6	53
6	12:36~12:52	245	22.0	250	4	1.0	200	8	5.0		324-140	3.4	10.2					5.1	USW: Sbd. (Ice)
7	15:30~15:50	250	15.0	250	5	2.0	200	7	2.0		145-STOP	2.2	5.7	2.4	6.0	1.7 2.2	6.0 5.2	2.8	54
8	11/14 08:45~09:00	10	7.8	10	3	1.0	190 220	8 7	1.5 1.0		163-150	1.1	5.8					2.1	
9	09:40~09:55	---	---	---	---	---	---	---	---		---								N.G.
10	10:53~11:10	15	5.0	15	4	0.5	110	8	1.0		0-145	1.0	6.8					1.1	
11	11/16 12:00~12:30	40	10.3	40	6	2.0	60	7	1.5		297-STOP	2.1	5.2	2.1	4.8	1.9	5.8	2.5	55
12	12:40~13:00	40	9.0	40	6	2.0	60	7	1.5		300-STOP	2.1	5.5	2.3	5.0	1.9	5.7	2.5	56
13	15:00~15:30	40	7.5	40	5	1.5	60	7	1.5		300-STOP	2.0	4.8	1.9	3.5	1.9	5.6	2.1	57
14	11/17 09:00~09:20	100	3.0	100	2	0.5	150	5	1.0		90-140	0.6	4.0					1.1	

(270)

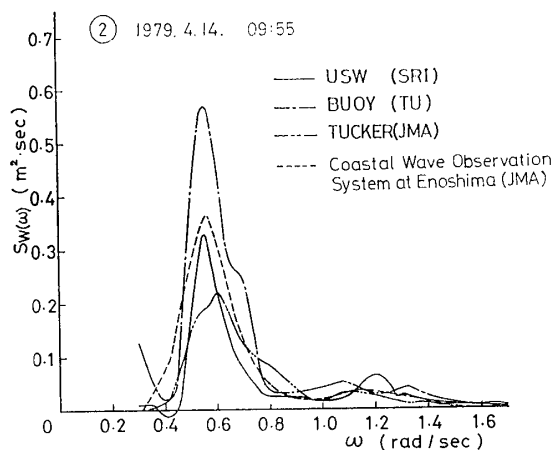


Fig. 8 Comparison of Measured Wave Spectra

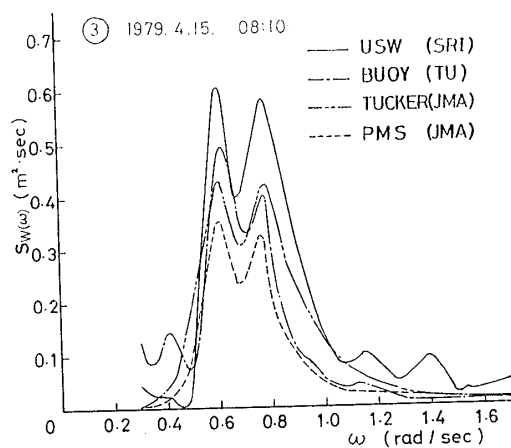


Fig. 9 Comparison of Measured Wave Spectra

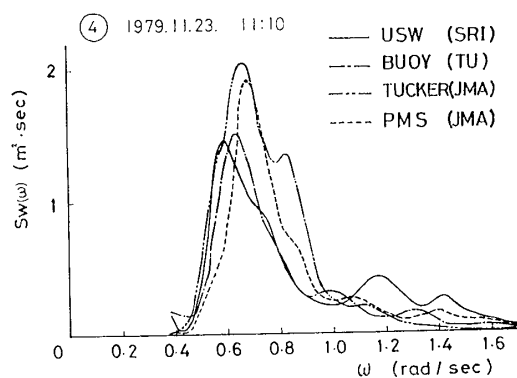


Fig. 10 Comparison of Measured Wave Spectra

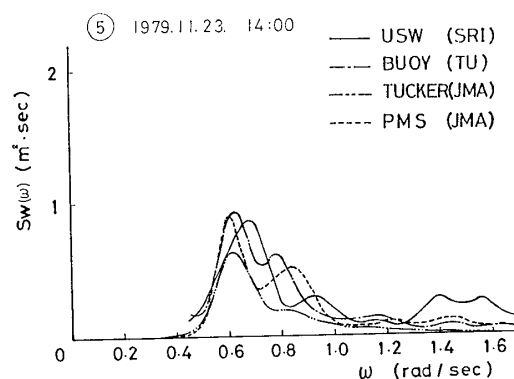


Fig. 11 Comparison of Measured Wave Spectra

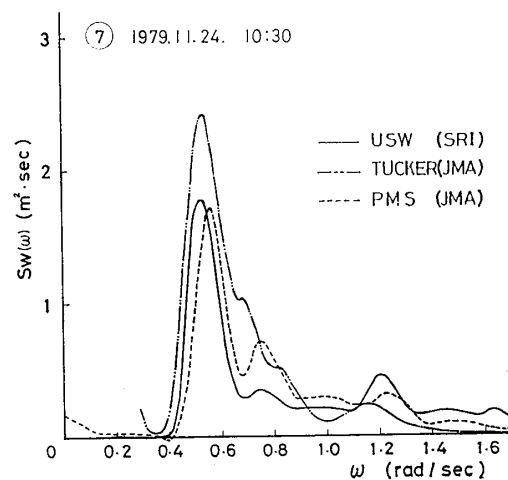


Fig. 12 Comparison of Measured Wave Spectra

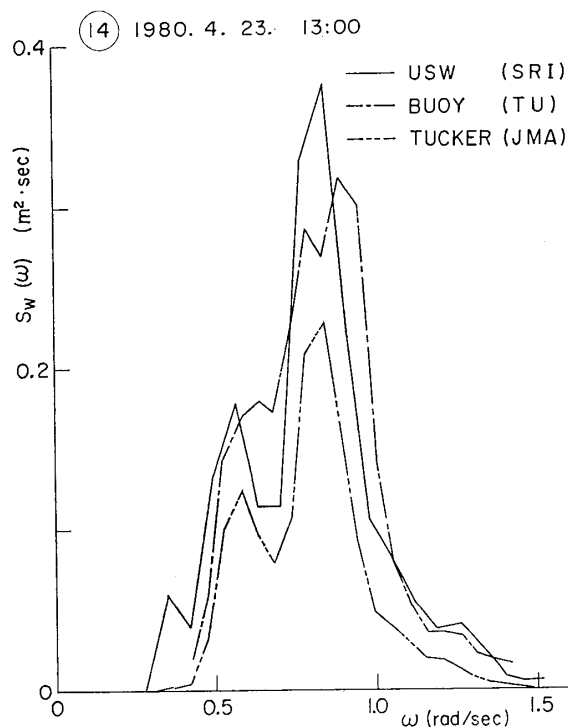


Fig. 13 Comparison of Measured Wave Spectra

12

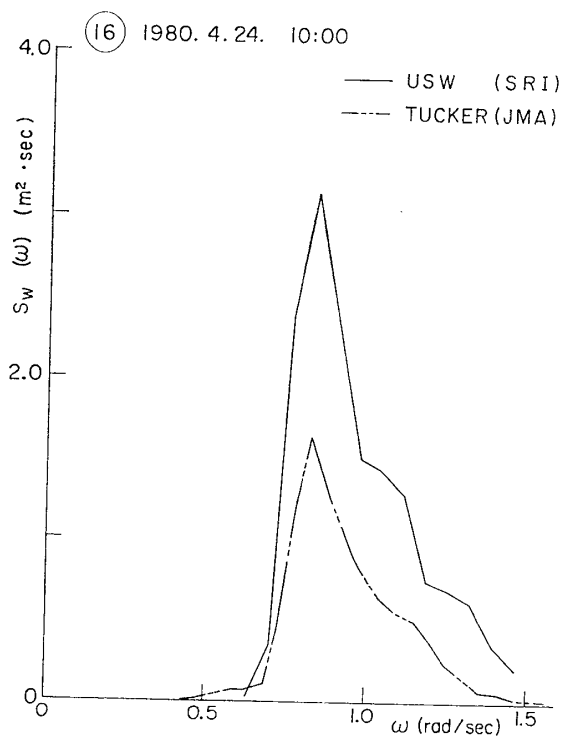


Fig. 14 Comparison of Measured Wave Spectra

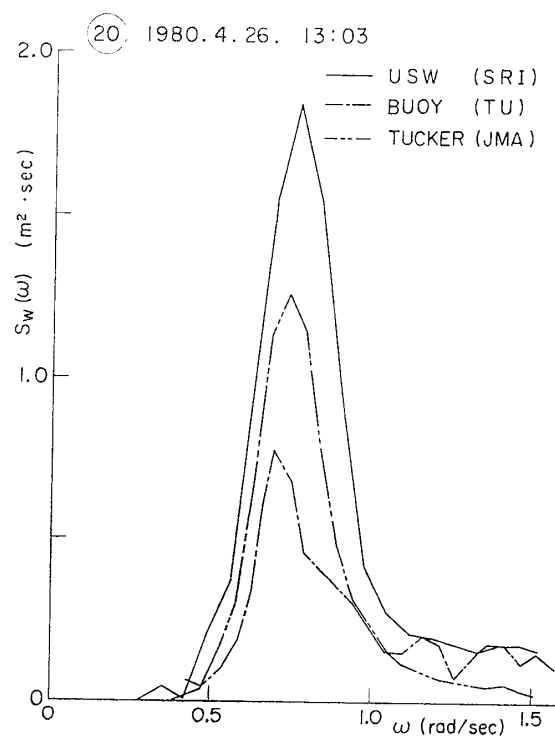


Fig. 16 Comparison of Measured Wave Spectra

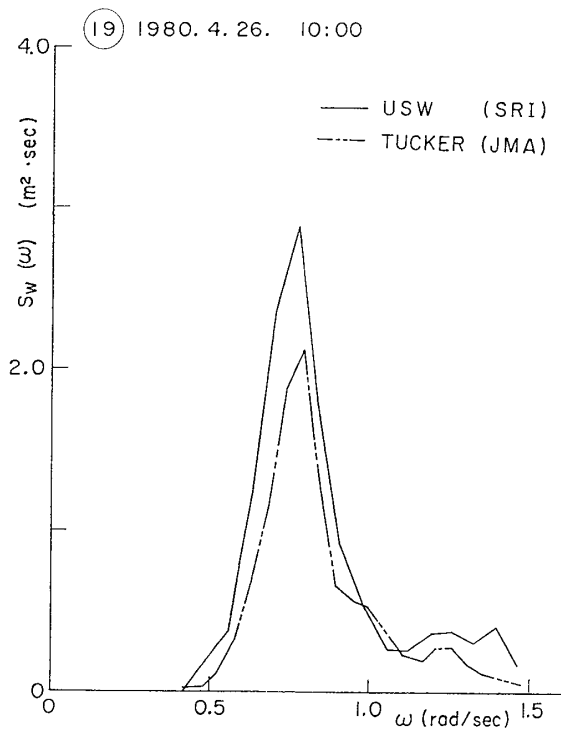


Fig. 15 Comparison of Measured Wave Spectra

(272)

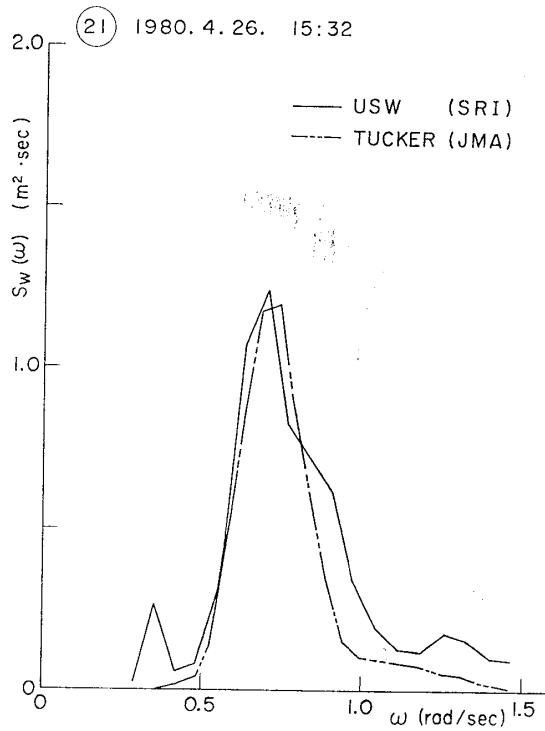


Fig. 17 Comparison of Measured Wave Spectra

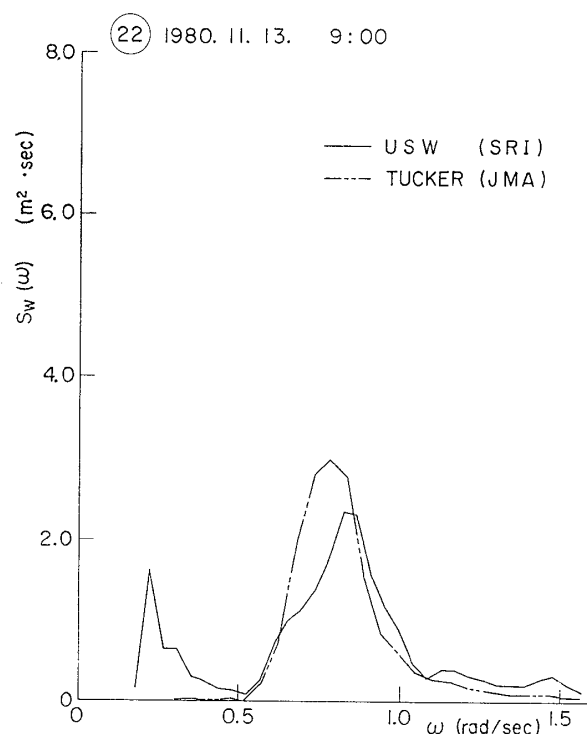


Fig. 18 Comparison of Measured Wave Spectra

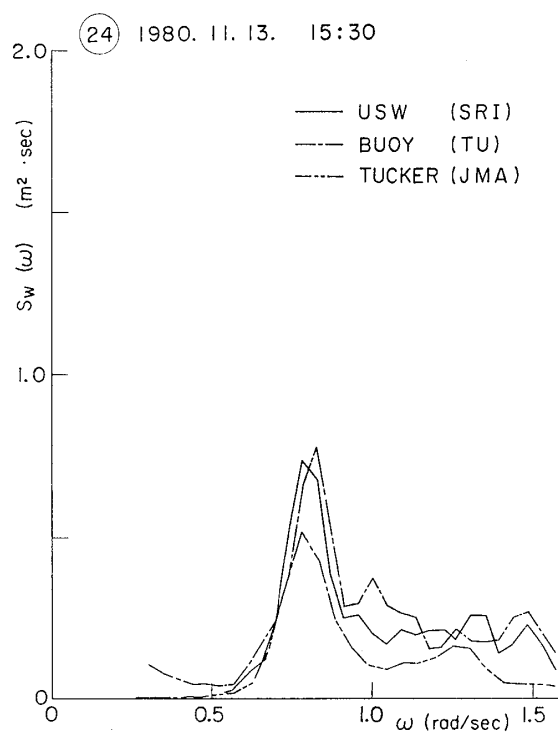


Fig. 20 Comparison of Measured Wave Spectra

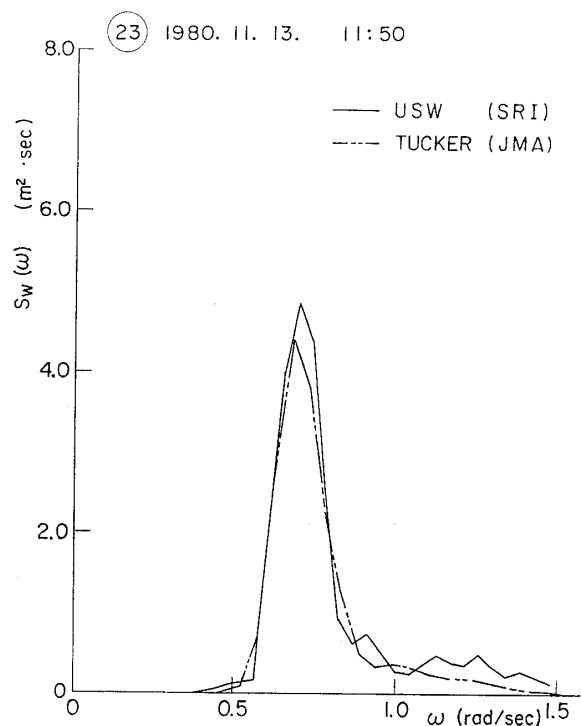


Fig. 19 Comparison of Measured Wave Spectra

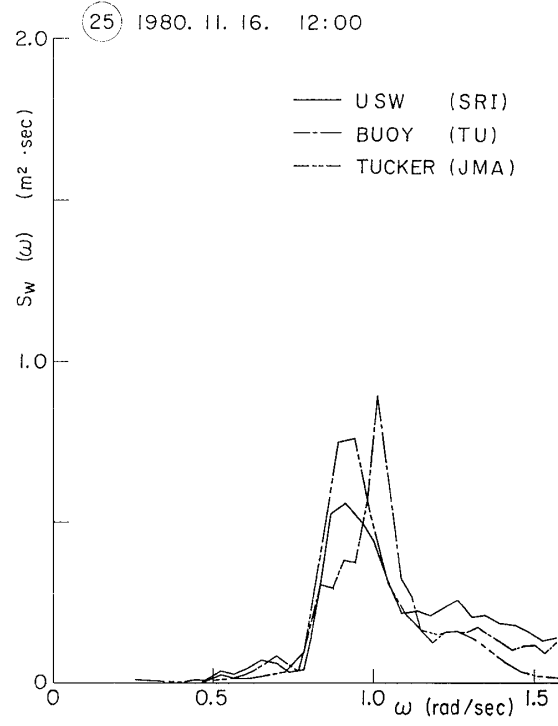


Fig. 21 Comparison of Measured Wave Spectra

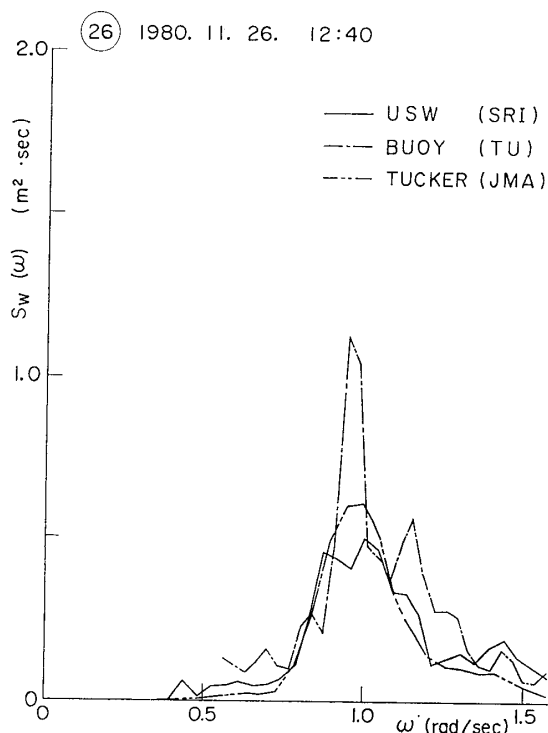


Fig. 22 Comparison of Measured Wave Spectra

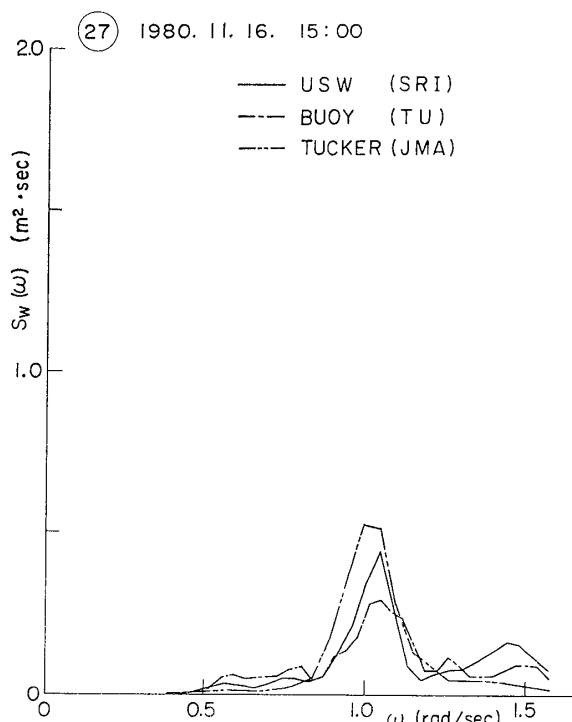


Fig. 23 Comparison of Measured Wave Spectra

(274)

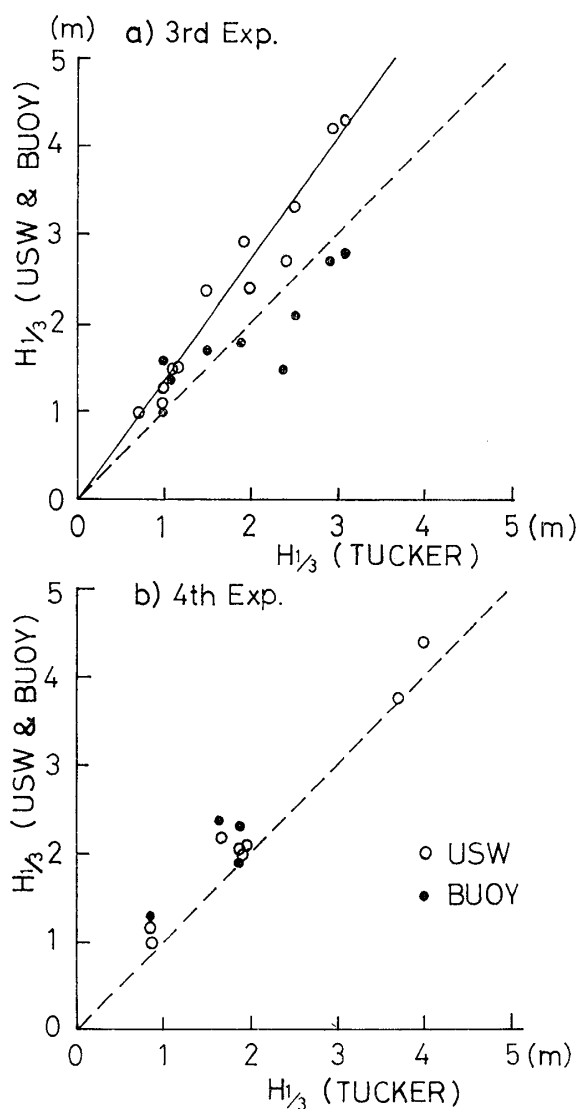


Fig. 24 Comparison of Wave Heights Measured by Various Wave Meters

し、超音波式の方が高い波周波数で一般に高目の値となる。また、スペクトルの囲む面積から算出した有義波高の値も超音波式の方が高くなっている。これらの理由については次章において検討を加える。

4. 波浪計測に関連する事項の検討

4.1 波浪計測における船体影響

船側に取付けられた船載式波浪計で測定した波には、入射波のほかに、船体からの反射波 (diffraction wave) と船体動揺による発散波 (radiation wave) が混入している。船載式波浪計により計測される波の信頼性を明らかにするため、これら船体の影響を調らべる必要がある。そこで、ストリップ法により、波浪中

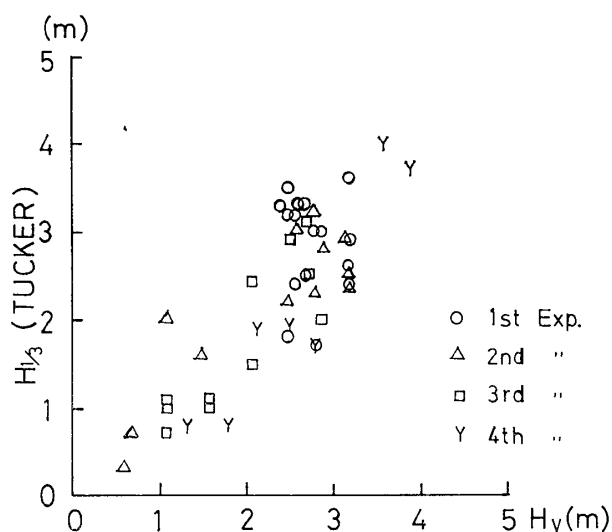


Fig. 25 Relation between Observed and Measured Wave Heights

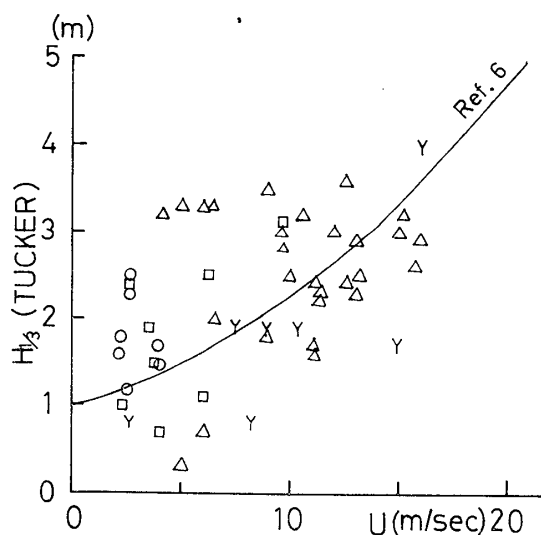


Fig. 26 Relation between Wind Speed and Wave Height

の船体運動及び船体表面の変動圧力を計算し、入射波に対する船体の影響を調べた。対象とした船は啓風丸のほかに、小型の海洋気象観測船高風丸を加えた2隻で、船の大きさの影響も調らべることにした。

船側相対水位計を用いた波浪計測における船体影響については、大型専用船を対象に雁野⁷⁾が理論的考察を行っているが、本論文でもこれと同様の方法を用いた。

(1) 超音波式波浪計の場合

この場合は Fig. 27 に示すように、船側の相対水位変動に対する船体影響を調べればよい。

船体に対して入射波 h が当たり、相対水位計によ

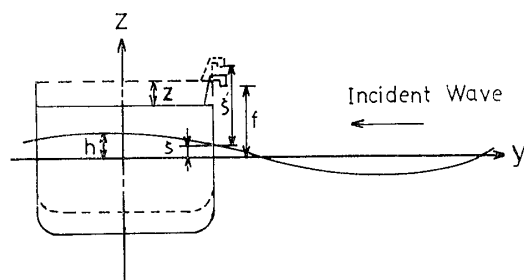


Fig. 27 Measurement of Relative Wave Height by USW

て ζ' が測定されたとする。その時の船体動揺による船側の上下変位を z とすると、船側における絶対水位変動量 ζ は次式で表される。

$$\zeta = f + z - \zeta' \quad (2)$$

船体で乱されない入射波 h に対する船体影響を ζ_d 、相対水位の変動量を ξ とおくと、 $\zeta = h + \zeta_d$, $\xi = f - \zeta'$ であるから、入射波 h は

$$h = \xi + z - \zeta_d \quad (3)$$

である。一方、船側相対水位計で測定した波高 h^* は次式で求められる。

$$h^* = \xi + z \quad (4)$$

即ち、測定波は、真の入射波と次の関係にある。

$$h^* = h + \zeta_d \quad (5)$$

h^* , h 及び ζ_d を入射波の周波数 ω で規則的に変動する量としてそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} h^* &= h_0^* \cos(\omega t + \varepsilon) \\ h &= h_0 \cos(\omega t + ky) \\ \zeta_d &= \zeta_{d0} \cos(\omega t + \varepsilon_d) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

とおくと、測定波高 h_0^* は次式となる。

$$h_0^* = \frac{\sqrt{(\cos ky + \zeta_{d0} \cos \varepsilon_d)^2 + (\sin ky + \zeta_{d0} \sin \varepsilon_d)^2}}{\quad} \quad (7)$$

ここで入射波の振幅 h_0 は1としている。波浪計の y 座標の値は波と船の出会角 χ に対して次式で求められる。

$$y = x_0 \cos \chi + y_0 \sin \chi \quad (8)$$

(2) Tucker 式波浪計の場合

Fig. 28 に示すように、深さ z_0 の船側に取付けた水压計で測定した変動水圧 p_z と、船体の上下変位 z とを用いて演算した測定波高 h^{**} は

$$h^{**} = \frac{p_z}{\rho g} + z \quad (9)$$

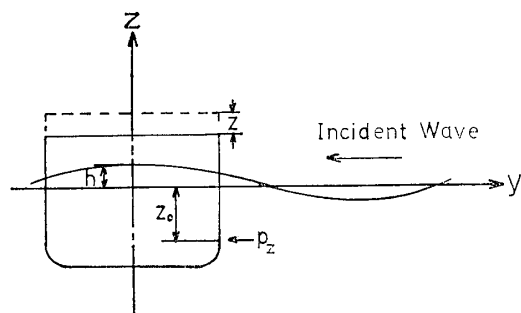


Fig. 28 Measurement of Relative Wave Height by TUCKER

である。真の入射波は(3)式で与えられるから、これと(9)式から z を消去すると、 h^{**} と h の関係は次式のようなになる。

$$h^{**} = h + \zeta_d - \xi + \frac{p_z}{\rho g} \quad (10)$$

ここに、船側の水線における相対水位変動 ξ は、 $z_0=0$ における船側の変動水圧 p_0 と、 $\xi = p_0 / \rho g$ の関係にあるから、(10)式は次のようになる。

$$h^{**} = h + \zeta_d - \frac{1}{\rho g} (p_0 - p_z) \quad (11)$$

変動水圧を入射波及び船体変位による変動水圧 p_s と、船体の攪乱による変動水圧 p_d との和であると考えたと次式のように表すことができる。

$$p = (p_{sR} + p_{dR}) \cos \omega t - (p_{sI} + p_{dI}) \sin \omega t \quad (12)$$

ここに、suffix R, I はそれぞれ real part 及び imaginary part を表す。

また p_0, p_z に対応してこれらを p_{sR}^0, p_{sR}^z のように表すことにする。

$$h^{**} = h_0^{**} \cos(\omega t + \varepsilon^{**}) \quad (13)$$

と表すと、水圧計で測定した波振幅 h_0^{**} は変動水圧の値を用いて次式により求められる。

$$h_0^{**} = \sqrt{\left\{ \cos ky - \frac{1}{\rho g} (p_{sR}^0 - p_{sR}^z - p_{dR}^z) \right\}^2 + \left\{ \sin ky - \frac{1}{\rho g} (p_{sI}^0 - p_{sI}^z - p_{dI}^z) \right\}^2} \quad (14)$$

ここで、 $\zeta_d \cos \varepsilon_d = p_{dR}^0 / \rho g$, $\zeta_d \sin \varepsilon_d = p_{dI}^0 / \rho g$ である。

(3) 計算結果及び考察

気象庁の海洋気象観測船啓風丸及び高風丸について Tucker 式波浪計及び超音波式波浪計 (USW) によって測定した波に対する船体影響を(7)式、(14)式により計

(276)

算した。ストリップ法による船体運動と変動水圧の計算は、船研の渡辺らによるプログラムを使用した。

両船の主要寸法を Table 5 に示す。計算は、船速

Table 5 Principal Dimensions of Ocean Weather Ships

Items	Keifu-Mar	Kofu-Mar
Length (L_{pp}) (m)	72.00	42.50
Breadth (B_0) (m)	12.60	7.70
Draft (d) (m)	4.30	2.85
Displt. (Δ) (ton)	2200	532
C_B	0.550	0.556
$\overline{KG}$ (m)	4.43	2.56
$\overline{GM}$ (m)	1.24	1.11
T_R (sec)	9.27	5.86

T_R : Rolling Period

がゼロの停船状態で、波の出会い角を 180° (向波) から 0° まで 30° おきについて行ったが、波浪観測に最もよく用いられる出会い角として、横波と向波の2つのケースについての結果を示すことにする。

啓風丸に対する結果を Fig. 29 に、高風丸に対するものを Fig. 30 にそれぞれ示す。これらの図の横軸は

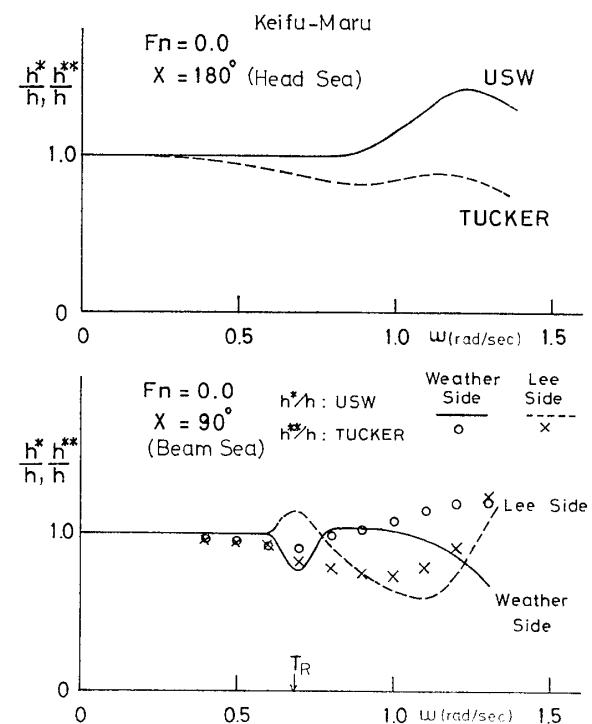


Fig. 29 Wave Amplitude Ratio on Ship Side of Keifu-Mar

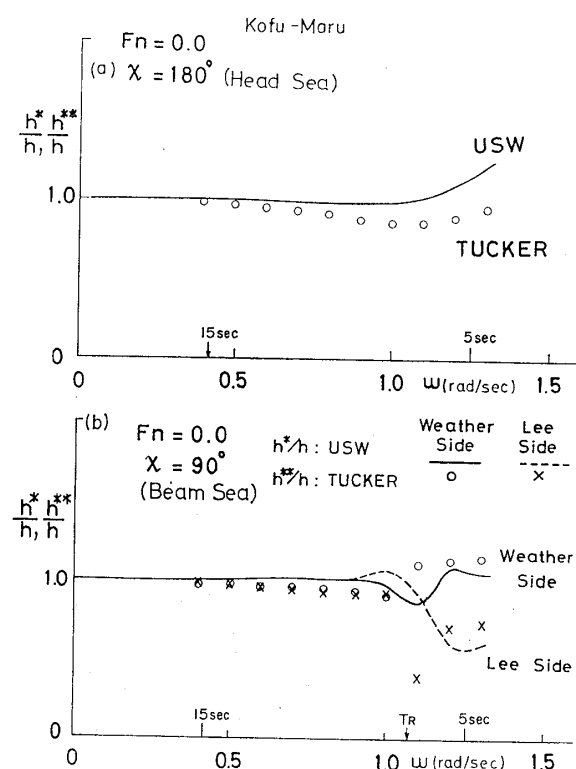


Fig. 30 Wave Amplitude Ratio on Ship Side of Kofu-Marui

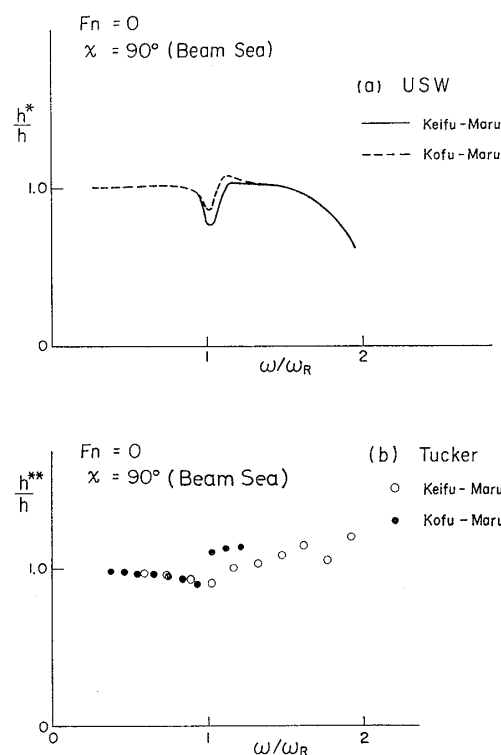


Fig. 32 Wave Amplitude Ratio on Ship Side

波の周波数であるが、両船の大きさ及び横揺れ固有周期の違いによる差を除いて考察するため、横軸をそれぞれ $\sqrt{L/\lambda}$ 及び ω/ω_R に無次元化して書き直したのが Fig. 31 及び Fig. 32 である。

これらの結果をまとめて考察すると次のような結論を得る。

- 向波中では $\lambda/L > 1$ の長い波については、USW が Tucker より真の波高に近い値を測定する。 $\lambda/L < 1$ の短波長範囲では USW は大き過ぎる波高を測定するが、Tucker はやや低目 (10~15%) の波高を測定する。
- 横波中では全般的に weather side の波高計が lee side のものより良好な測定値を与える。以下、weather side について述べると USW は横揺れ固有周期 $T_R (= 2\pi/\omega_R)$ 付近で測定波高が少しく低くなるほかは、 $\omega/\omega_R < 1.5$ の範囲で真の波高に近い値を出す。USW と Tucker は $\lambda/L > 1$ までの範囲ではそう大きい差はない。これより短波長域では Tucker が高目、USW が低目の波を測定する。

4.2 船載型スペクトルアナライザー

波浪観測実験において船上で直に波記録が解析され、船が遭遇している波のエネルギースペクトル、波高分布、周期等の統計的性質が示されることは、波浪

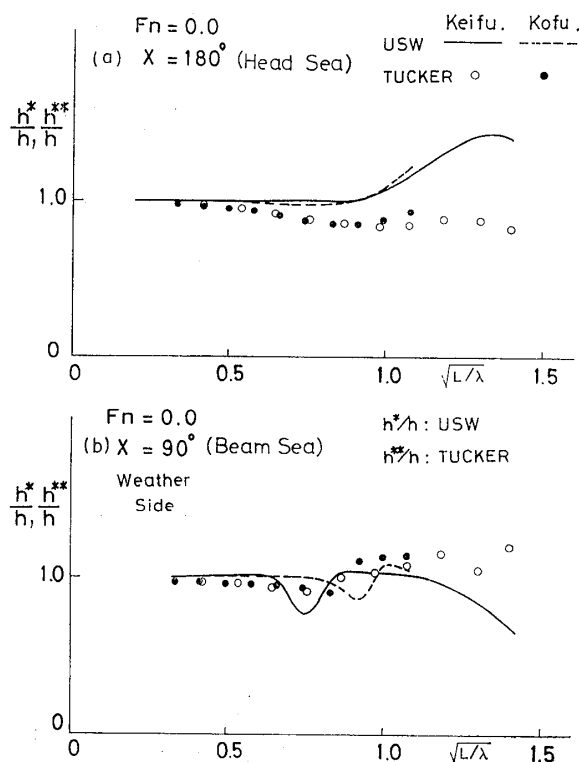


Fig. 31 Wave Amplitude Ratio on Ship Side

観測データのオンライン利用（例えば波浪予報、船の最適航路指定）に対する価値を高めることになる、そこで船載式波浪計の解析用としてスペクトルアナライザーを導入し、第4回の実験で用いたものでその概要を報告する。

この解析装置は、CPUにi8085Aを使用した8ビット計算機で、メモリ容量が64Kバイトあり、Basicでプログラミングができる。この構成をFig. 33に、

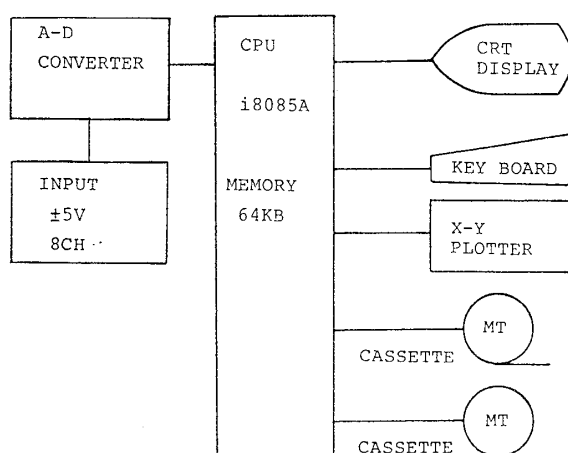


Fig. 33 System of Spectral Analyser

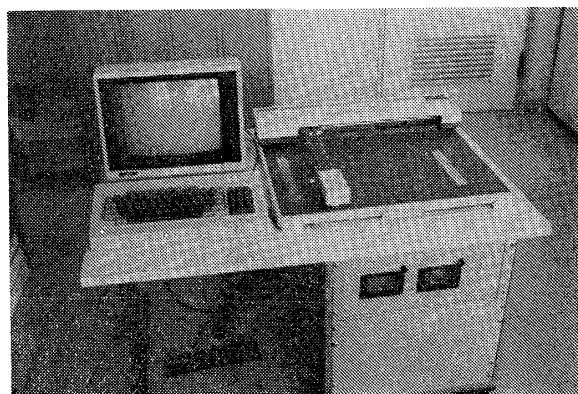


Fig. 34 Photograph of Spectral Analyser

全体の写真をFig. 34に示す。データ解析の方法は、SR125で使用したものと同じで、1024個のデータを、FFTを用いて256個づつ解析する重ねずらし平均法によってパワースペクトラムを求めるものである。ウィンドウにはQウィンドウを使用している。

出会の相対水位変動と上下加速度の記録から絶対波高を求める手法は、前報²⁾で述べた通りスペクトラムの場に変換を行う方法を用いた。

本装置による解析例をFig. 35に示す。図の左から、上下加速度、相対水位並びにこれらから計算され

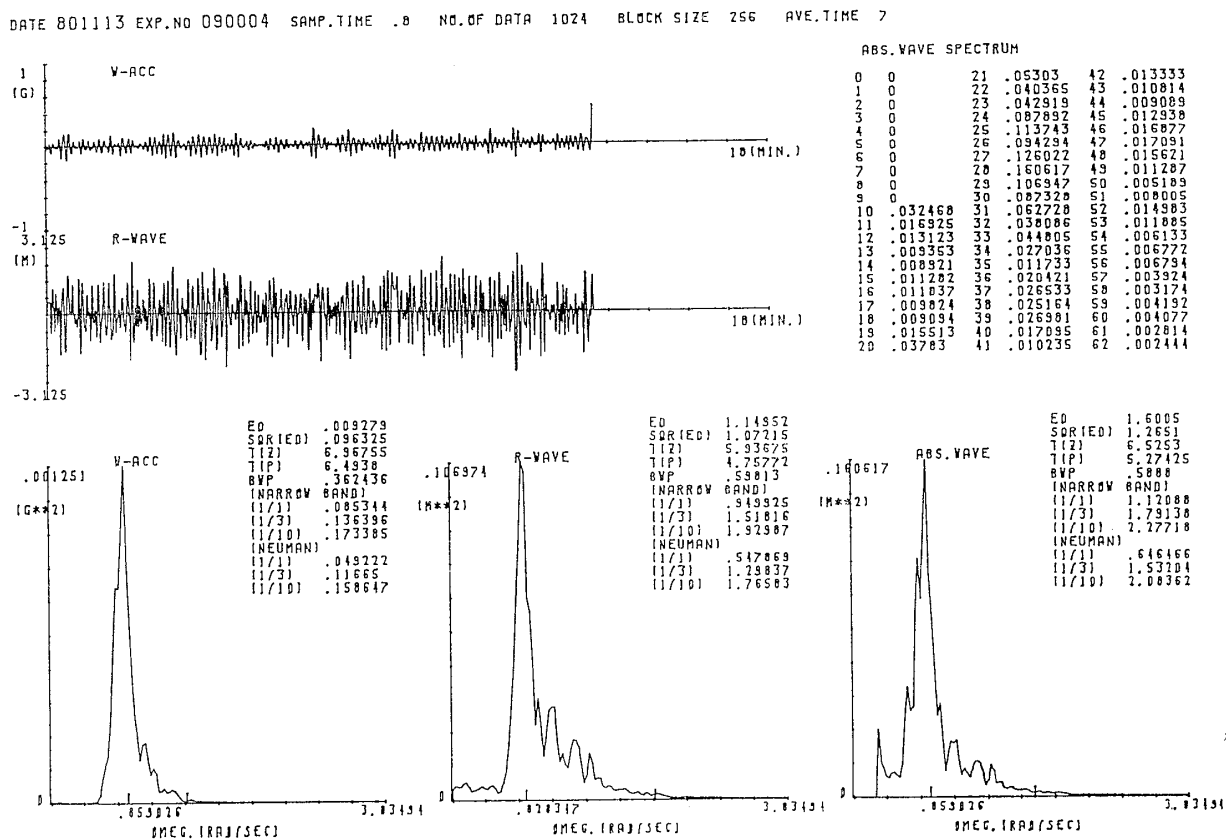


Fig. 35 An Example of Output on Spectral Analyser

た絶対波高のスペクトラムである。

解析時間は1チャンネル当り25分程度かかり、さらに超音波式相対水位計の出力と加速度計の出力から出会波のスペクトルを求める際は約55分程かかる。この処理時間の短縮にはプログラムをアセンブラーで組む方法が考えられる。

5. 結 言

前後4回にわたる実船実験により超音波式波浪計とTucker式波浪計（以上船載式）及びブイ式波浪計との比較実験を行った。

その結果、超音波式波浪計が実験を重ねるごとに改良され、後半の実験ではTucker式波浪計とよく似た波スペクトルを与えるようになった。両者がほとんど一致する場合も多く見られた。ブイ式波浪計も大略Tucker式や、超音波式の船載波浪計と類似の波スペクトル形状をとらえていると言える。

スペクトラムの面積を用いて求めた有義波高の値は、実験時の計測条件によって、それぞれの波浪計の値の間に異なる傾向が見られる場合がある。これは、船と波との出会角と波浪計の取付け場所との関係や、各波浪計の計測時の較正值に入る可能性のある誤差等に原因があると推定される。今後の計測に当たって正確な較正值を得ることに特に留意する必要がある。

理論計算により、Tucker式と超音波式に対する船体影響を調べたが、その結果、波浪測定は停船中weather sideの波浪計によるのが適当であるという、従来から実行されている方法を裏付けることができた。その場合でも啓風丸、高風丸とも波周期6秒以下の短波長域では誤差が大きくなることも判明した。(Fig. 29, Fig. 30)

以上の実験結果の検討を経て、船載式の超音波式波浪計の新形式のものが実用に役立つようになった。船載のオンライン解析装置も一応完成された。

今後に残された問題点としては次のような諸点がある。

- (1) 空中の超音波信号の減衰が大きく、相対水位の測定距離が当初計画していた $7\text{ m} \pm 5\text{ m}$ の範囲をカバーできず、結局現状では $5\text{ m} \pm 3\text{ m}$ 程度が確実に測定できる範囲と思われる。測定距離を伸ばして乾舷の大きい大型船の船側にも取付け可能とするには、相対水位測定に超音波と別の信号（例えば前報のレーダー式など）を用いる必要があろう。しかしながら超音波式波浪計は価格も比較的安価であるから、

小型の観測船には適当な波浪計となり得るであろう。

- (2) 計測された波浪の船上でのオンライン解析が今後は取得データの有効な利用のため必須の条件となる。さらに性能の良いコンパクトな解析装置の導入は現在のマイコンの利用により十分可能である。

謝 辞

啓風丸における波浪計の性能比較実船実験は、日本造船研究協会第163研究部会（部会長高橋幸伯東京大学教授）と船舶技術研究所との共同研究として行われた⁸⁾。船舶技術研究所は超音波式波浪計を、東京大学生産技術研究所は加速度ブイ式波浪計をそれぞれ担当した。両機関から啓風丸の実験に乗船した人の氏名は下記の通りである。

- 第1回 能勢義昭（東大生研）、不破 健（船研）、二村 正（船研）
- 第2回 能勢義昭（東大生研）、原口富博（船研）、山川賢次（船研）
- 第3回 高橋幸伯（東大生研）、猿田俊彦（船研）、田中義久（船研）
- 第4回 小畑和彦（東大生研）、原口富博（船研）、高井隆三（船研）

実船実験の便宜を与えていただくとともに、啓風丸備付のTucker式波浪計や海底定置式波浪計のデータを提供していただいた気象庁海洋気象部の御好意を多とすると共に、松野正治船長はじめ啓風丸乗組の方がたの御協力に心から感謝する次第である。本報告に記載したTucker式波浪計やブイ式波浪計の解析結果はそれぞれ気象庁及び東京大学生産技術研究所で解析したものをそのまま使用させていただいたことを記してそれぞれの担当の方がたに著者らの謝意を表したい。

また、新型式の超音波式波浪計の開発に際して実船による予備実験を汐路丸で実施することを許可された東京商船大学の関係者各位、汐路丸の船長として実験中の便宜を計っていただいた同大学の天津 皓平助教授、今津隼馬助教授はじめ同船の乗組の方がた、超音波式と比較できる容量式波浪計の記録を提供していただいた桑島進助教授に深く感謝する次第である。

船舶技術研究所では、運動性能部渡辺 巖氏、不破健氏、二村正氏、海洋開発工学部山川賢次氏、高井隆三氏、田中義久氏、矢後清和氏の諸氏に実船計測の協力をしていただいた。謝意を表す次第である。

なお新型式の超音波式波浪計は電子工業㈱の考案製

作になるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Y. Yamanonchi 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)
- 2) 高石敬史, 松元尚義, 吉野泰平, 猿田俊彦; 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—, 船舶技術研究所報告, 第13巻, 第4号, (1965)
- 3) 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)
- 4) 桑島 進; 船用超音波式波高計による航走出会い波浪の観測, 日本航海学会論文集, 第64号, (1981), pp. 87.
- 5) S R 132 研究部会; 実船塔載用波浪計に関する研究, 報告書, 4. 加速度式波浪計, 日本造船研究協会, 研究資料, No. 177, (1973), pp. 26—32.
- 6) Y. Takaishi, T. Matsutsumoto, and S. Ohmatsu; Winds and Waves of the North Pacific Ocean, Papers of Ship Research Institute, Supplement No. 3, (1980)
- 7) SR132 研究部会; 実船塔載用波浪計に関する研究報告書, 7.3.1. 船側水位と波高の関連, 日本造船研究協会, 研究資料, No. 177, (1973), pp. 68—76.
- 8) SR163 研究部会; 気象海象および船舶の波浪中応答に関する統計解析ならびに実船計測, 日本造船研究協会, 研究報告, 第97号, (1981), 同研究資料, No. 312, (1979), No. 325, (1980).