

タッカー式舶用波浪計に関する研究

II. 目視及びブイ式波浪計との比較観測

道田 豊*

海上保安庁水路部

徳田正幸**

国立防災科学技術センター平塚支所

上野義三*・石井春雄*

海上保安庁水路部

A Tucker Type Ship-borne Wave Recoder II. Comparative Experiment with the Visual Observation and a Buoy Wave Meter

By

Yutaka Michida¹⁾, Masayuki Tokuda²⁾, Yoshizo Ueno¹⁾ and Haruo Ishii¹⁾

1) *Hydrographic Department, Maritime Safety Agency
of Japan, Chuo-ku, Tokyo, 104*

2) *Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention,
9-2, Nijigahama, Hiratsuka, Kanagawa-Ken, 254*

Abstract

Because of its unstable accuracy, the Tucker type ship-borne wave recorder has not been used as a practical ocean wave measuring instrument. Tokuda and Michida (1986) developed a new measuring system which uses digital data processing. The total accuracy of this system was estimated by the following two comparative experiments.

- (1) A comparison based on visual observations.
- (2) A comparison with a pressure type wave meter suspended under a drifting buoy which was already calibrated.

As a result of these investigations, it was ascertained that the Tucker type ship-borne wave recorder can maintain a stable accuracy when the new measuring system is utilized.

1. はじめに

異常波浪による海難事故の未然防止を行うために、波浪予報に対する外洋波浪の実状及び

**沿岸防災第1研究室

強流域で発生する複雑な波浪の特性を明らかにする必要がある。このために、外洋波浪の観測データの蓄積が最も重要な課題のひとつである。しかし外洋域において、荒天時でも観測可能な高精度の測器による観測データの蓄積が進んでおらず、現在なお、外洋波浪に関する情報は大部分を目視観測に依存している。外洋波浪の計器観測はブイ式波浪計、船用波浪計等によって行われて来たが、最近では人工衛星や航空機によるリモートセンシングの研究も盛んになっている。

これらの観測法の中で、タッカー式船用波浪計(以下T式波浪計と呼ぶ)は、1952年イギリスのタッカー(M. J. Tucker)により考案されたもので、開発の歴史は古い。この測定原理は徳田・道田(1986)で詳しく説明されている。この論文をPart Iと呼ぶ。すなわち、船体の上下運動を加速度の出力を2回積分することによって検出し、船体と海面の相対運動を圧力センサーによって測定して、両者の合成によって海面の運動——波浪の波高変動を計測するものである。この波浪計は精度面での信頼性に欠けるために、今まであまり普及していない。ECOR日本委員会の報告書は次のことを指摘した。「タッカー式波浪計は圧力計により検出される波による水圧変動が、船体の存在によりあるいは船体の運動により乱されていること、短周期の波に対しては水位変動と圧力変動との関係が簡単でないこと、など精密な波浪情報を得るためには問題点を含んでいるが、波浪計を取り付けた船の出動が可能な限り、いかなる荒天時でも波浪の観測が可能であるという利点がある」。Part Iにおいて、この波浪計のデジタル処理システムが開発された。これによって、上記の問題点は分析され、センサー、波浪及び船の応答性の特性の情報から、センサーの出力に対する補正係数を合理的に決定することによって解決された。また目視観測と同様に波浪場をうねり成分と風浪成分に分離し、それぞれについて特性を求めることができた。Part Iで残された課題は高精度の波浪計による観測そして目視観測との比較観測を行い、新しいシステムによるT式波浪計の総合的な精度を調べることであった。本論文(Part II)でこれを行う。

水路部は昭和40年代から測量船「昭洋」、巡視船「いず」「みうら」にT式波浪計を搭載し、貴重な外洋波浪データを取得して来た。「いず」に関して、倉品・友定(1968)の概略的な報告がある。昭和58年から、これらの波浪計をより高性能なセンサーを有する新型のものに更新しており、現在「拓洋」「昭洋」「みうら」に搭載されている。本論文で議論する比較観測は、昭和60年2月「昭洋」によるWESTPAC航海時のものと、昭和60年12月「昭洋」による駿河湾でのものである。前者は目視観測と、後者は吊り下げ圧力式波浪計(以下ブイ式波浪計と呼ぶ)との比較観測である。これらの比較観測において、T式波浪計のデータはすべて風上舷のものを採用した。

2. 目視との比較観測

T式波浪計と目視観測の比較を行う。目視観測は気象庁風浪階級表(表1)及びうねり階級(表2)に基づいて、現場の波浪特性を目測するものである。もっとも大きな特徴は波浪場をうねり成分と風浪成分に分離し、それぞれについて波浪特性を求めることである。波向に関

| 階級 | 風浪階級の説明 | 波の高さ(単位:m) |
|----|---------------|--------------------------------------|
| 0 | 鏡のようになめらかである。 | 0 |
| 1 | さざ波がある。 | 0をこえ $\frac{1}{10}$ まで |
| 2 | なめらか、小波がある。 | $\frac{1}{10}$ をこえ $\frac{1}{2}$ まで |
| 3 | やや波がある。 | $\frac{1}{2}$ をこえ $1\frac{1}{4}$ まで |
| 4 | かなり波がある。 | $1\frac{1}{4}$ をこえ $2\frac{1}{2}$ まで |
| 5 | 波がやや高い。 | $2\frac{1}{2}$ をこえ 4まで |
| 6 | 波がかなり高い。 | 4をこえ 6まで |
| 7 | 相当荒れている。 | 6をこえ 9まで |
| 8 | 非常に荒れている。 | 9をこえ 14 |
| 9 | 異常な状態。 | 14をこえる |

表1 気象庁風浪階級表
(昭和37年9月27日制定
昭和38年1月1日より施行)

Table 1 Scale of sea

| 階級 | うねりの階級の説明 |
|----|--------------------------|
| 0 | うねりがない。 |
| 1 | 短くまたは中位の |
| 2 | 長く |
| 3 | 短く |
| 4 | 中位の |
| 5 | 長く |
| 6 | 短く |
| 7 | 中位の |
| 8 | 長く |
| 9 | 2方向以上からうねりがきて海上が混乱している場合 |

表2 気象庁うねり階級表
(昭和37年9月27日制定
昭和38年1月1日より施行)

- (注) 1. 「短く」とは、波長100m未満(周期8.0秒以下の程度をいう)。
2. 「中位の」とは、波長100m以上200m未満(周期8.1秒から11.3秒まで)の程度をいう。
3. 「長く」とは、波長200m以上(周期11.4秒以上)の程度をいう。

Table 2 Scale of swell

して、コンパス等を用いて目視しやすいため比較的高い精度(16方位程度)をもつ。波高については船の舷側の高さ等を基準にして決めるが、階級表に示される程度の精度しかない。これはある程度の経験を必要とする。目視であるため昼間に比べて夜間はさらに精度が落ちる。波長(または周期)に関しては波高に比べて重要視されず、うねりに関してのみ100m単位で目測されている。T式波浪計は第1章で述べたように目視観測で得られた、波向以外の情報と同じものを出力できる。以上のことにより、目視観測によってT式波浪計の精度を調べることもよりむしろ、目視観測の特性を明らかにすることになる。

比較観測はWESTPAC航海(1985年)で行われた。観測期間は2月8日から3月19日で、海域は本州南方、南東方から赤道域、東シナ海に及ぶものであった。観測回数は92回であった。この期間の海象及び波浪の解析結果は水路部観測報告(1986)に詳しく示したので、ここでは省略する。使用した船は「拓洋」で、これの基本的特性はPart Iの表1にある。上記の92回

のデータから、T式波浪計と目視観測の比較を行う。これを行う前に、T式波浪計で得られた外洋波浪の特性を概略的に示す。

図1はうねりと風波を分離しない場合の有義波の波高と周期の分布である。これから分るように、データは非常にバラついている。図2は両者を分離し得られたものである。この図より、とくに風浪に組織的な分布が見られる。Toba(1978)によれば、風浪の波高(H)と周期

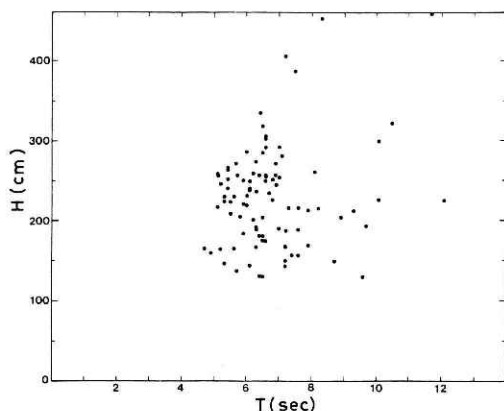


図1 WESTPAC航海(1985)で観測された有義波の波高(H)と周期(T)の分布

Fig. 1 Significant wave heights (H) and periods (T) measured by the Tucker type ship-borne wave recorder (the T-wave recorder) during the WESTPAC Cruise (1985).

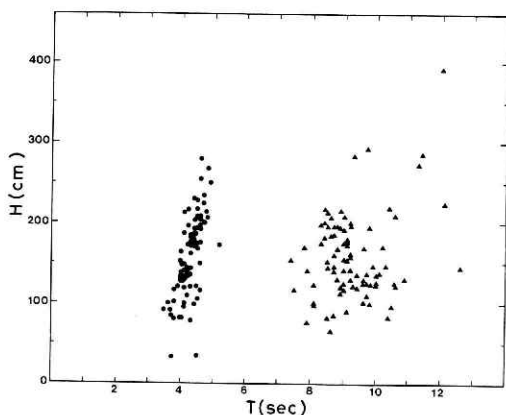


図2 風浪とうねりの波高(H)と周期(T)の分布

これは図1の有義波をカット周期で風浪(●)とうねり(▲)に分離して得られたもの。

Fig. 2 Distribution of wave heights (H) and periods (T) of sea and swells.

Symbols (●) and (▲) indicate the component wave of sea and swells, respectively. These component waves were obtained by the resolution of the significant waves indicated in Fig. 1.

(T)の間に次のような3/2乗法則が成立する。ここでUは代表風速である。

$$(H/U^2) \propto (T/U)^{3/2} \quad (1)$$

図3は図2に上式に示す規格化を行い、その結果を図示したものである。これにより、外洋の風浪においても3/2乗法則が成立することが分る。よってPart Iで導入されたうねりと風浪の分離法は合理的な結果を与えるものと言える。

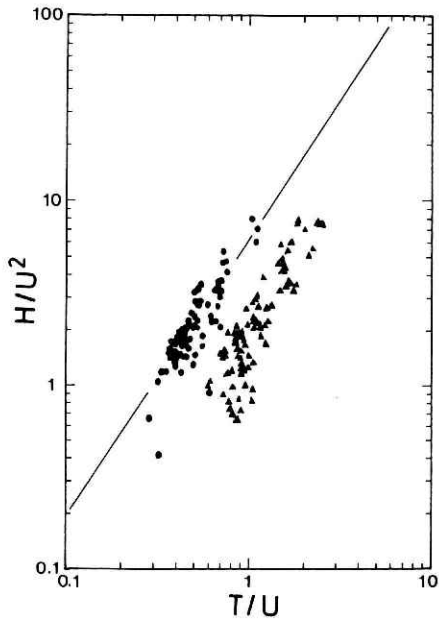


図3 風速で規格化された風浪とうねりの特性
風速 U は船の風向風速計(設置高度24m)の値を用いた。風浪は●で、うねりは▲で示した。実線は $3/2$ 乗法則を表す。

Fig. 3 Characteristic of sea and swells normalized by wind speeds.
Symbols (●) and (▲) are the same as that of Fig. 2.

次に目視観測との比較を行う。風浪の波高(H_w)に関して図4に示した。この図において、目視の値は H_{w0} としてたて軸の値に、T式波浪計の値は H_{wT} としてよこ軸の値とした。この図から、目視観測は2m前後の波高についてはほぼ正確に判断するが、それより大きくなるとより大きく、それより小さくなるとより小さく判断してしまう傾向がある。このような傾向は

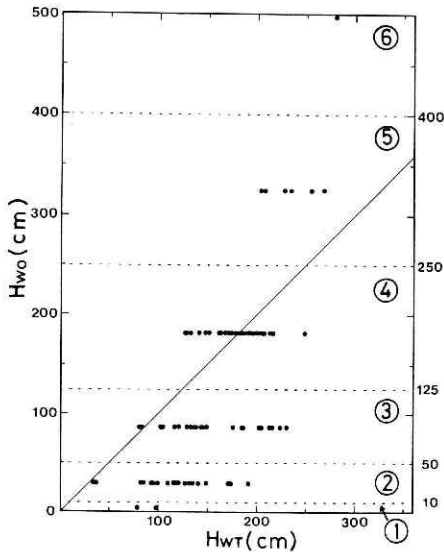


図4 T式波浪計(H_{wT})と目視観測(H_{w0})による風浪の波高比較
図中の数字は気象庁風浪階級を示す。目視観測の波高値は便宜的に階級の波高範囲の中央値とした。

Fig. 4 Comparison of wave heights of sea measured by the T-wave recorder (H_{wT}) and by visual observation (H_{w0}). The circle numbers indicate the scale of sea in Table 1.

波高が高い領域において、木村(1975)が指摘したこと、すなわちT式波浪計は目視波高に比べて6~7割となることと矛盾しないことである。階級5に入った風浪を調べて見ると、T式波浪計で2m付近の波高のものがある。これはうねり成分の大きい場合と対応した。このことはうねりの存在によって実際より高く目測したことになる。うねりに関して図5に示した。うねりの階級(表2)は風浪と異なり、波高(H_s)と周期(T_s)の両方について区分されている。この図から、目視はほとんどの場合階級1にもかかわらず、階級3~4に判断したことである。このことはうねりと風浪の分離が不十分なために、風浪の存在によってうねりの波高をより高く、うねりの周期をより短く目測したことにある。

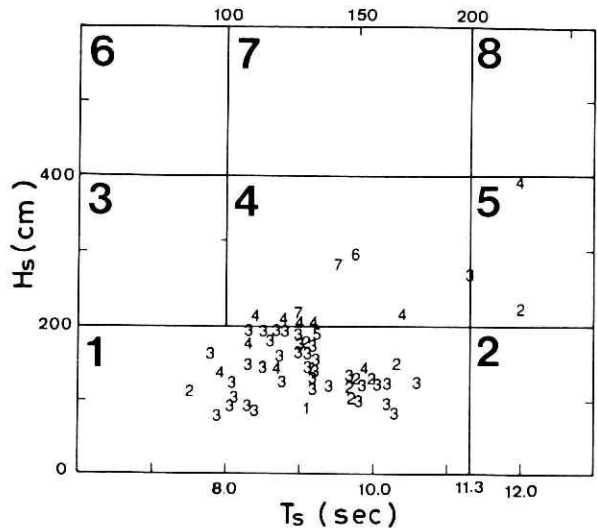


図5 T式波浪計と目視観測によるうねりの特性比較
大文字の数字は表2のうねり階級を、小文字の数字は目視観測で得た階級で、その位置の値(H_s , T_s)はT式波浪計から得た値である。

Fig. 5 Comparison of wave heights (H_s) and periods (T_s) of swells measured by the T-wave recorder (capital letters) and by visual observation (small letters). Each number indicates the scale of swell.

3. ブイ式波浪計との比較観測

T式波浪計とブイ式波浪計の観測の比較を行う。ブイ式波浪計は吊り下げ圧力式のもので、ブイから圧力センサーを50mの深さに吊り下げて水面変位を計測するものである。この波浪計の特性は徳田ら(1981, 1983)で明らかにされた。T式波浪計とブイ式波浪計において、ともに圧力センサーを使用している。しかしこのセンサーの、周波数に対する深さの補正が全く反対であることに注意を要する。すなわち、前者は高周波になればなるほど、後者は低周波になればなるほど、補正値が大きくなることである。これは水面変位の計測方法の違いによるものである。

比較観測は昭和60年12月18日駿河湾(図6)において実施した。使用した船は「昭洋」(表3)である。観測は波浪計ブイを漂流させ、船で監視しながら行った。T式波浪計による観測を30分間を1RUNとして8RUN行い、同時にブイ式波浪計による約4時間の連続観測を行った。観測時の海象は表4にあるように、東北東から北北西の風2~5m/sで、風浪階級は1~3(0~

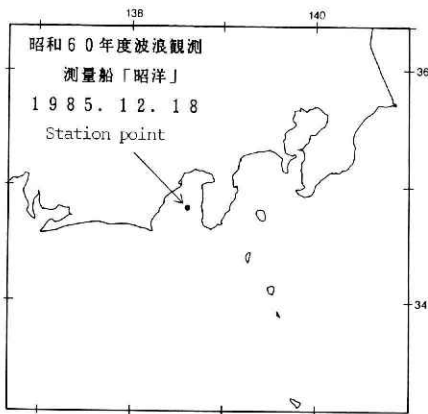


図6 T式波浪計とブイ式波浪計の比較観測の観測点
観測点は(34°50'N, 138°35'E)であった。

Fig. 6 Station point of the comparative experiment of the T-wave recorder with the buoy wave meter.

| | | |
|-----------------|-------|------|
| Length | (m) | 80.0 |
| Breadth | (m) | 12.3 |
| Draft | (m) | 4.3 |
| Displt. | (ton) | 2148 |
| \overline{KG} | (m) | 4.72 |
| \overline{GM} | (m) | 1.34 |

表3 昭洋の大きさ

Table 3 Principal dimensions of the Shoyo

図7 比較観測中の船首方向と波向の関係
記号↗はうねりの波向で、↑は風浪の波向を示す。

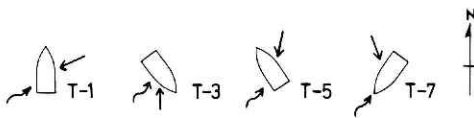


Fig. 7 Relation between the motions of ship and weaves during the comparative experiment. Symbols (↗) and (↑) indicate the direction of sea and swells, respectively.

125cm), うねり階級は1 (波高2m以下, 周期8秒以下)であった。これらの波浪の波向に対して船首の関係は図7に示した。データ解析は有義波の特性とスペクトルについて行った。スペクトル解析において、T式波浪計のデータは読み取りかんかく、 $\Delta t=0.5$ 秒、データ個数 $N=2,048$ 個、ラグ数 $M=128$ 個で、一方ブイ式波浪計のデータは $\Delta t=0.2539$ 秒、 $N=4,096$ 個、 $M=128$ 個で処理した。

有義波の特性について比較を行う。表4に示したように、比較する例は8例である。初めに有義波の周期について議論する。波浪場は後述するスペクトル分布から分るように、うねりと風浪が混在するものであった。図8aから次のことが言える。うねりの周期は7, 8秒で短かく十分に遠方から伝播して来たものでない。よって周期は安定していない。一方風浪についても、風速が小さく風向が大きく変動しているために、安定せず値も小さいことである。両波浪計の直接的な比較は図8bに示した。風浪については非常に良い一致が見られたにもかかわらず、うねりについては1秒ぐらいのずれがある。このずれはカット周期(表4)の違いによるもので、波浪計の特性の相違によるものでない。すなわち、ブイの方のカット周期は

表4 T式波浪計とブイ式波浪計の比較観測

T式波浪計の観測値はT-1, ..., T-8で、ブイ式波浪計のものはB-1, ..., B-8で示した。海象と目視観測は毎正時に行った。

Table 4 Characteristic of observed and measured waves

Run number T-1 to T-8 : by the Tucker type ship-borne wave recorder Run number B-1 to B-8 : by the buoy wave meter

| RUN 番号 | 波浪計観測時刻 | 海象観測 | | | 目視波浪観測 | | タッカー式波浪計とブイ式波浪計の観測 | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------|----------|----------|-------------|------------|-----------------------|--------------------|-----------|----------|------|-----------|----------|-------|-----------|----------|------------------|--|
| | | 気温 °C | 気圧 mb | 風 m/s | 風浪成分 | うねり成分 sec-cm | 有義波(全体) | 周期 sec | 波高 cm | 風浪成分 | 周期 sec | 波高 cm | うねり成分 | 周期 sec | 波高 cm | カット 周期 sec | |
| | 1985年12月18日 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T-1 | 07:55-08:20 | 4.7 | 1018.2 | ENE 4m/s | ENE | SW | 4.3 | 161 | 4.1 | 156 | 10.0 | 57 | 6.70 | | | | |
| B-1 | 08:10-08:27 | | | | 階級2 | 階級1 | 5.5 | 104 | 4.1 | 78 | 7.3 | 72 | 5.42 | | | | |
| T-2 | 08:25-08:50 | | | | (波高10~50) | (周期<11.3) (波高<200) | 4.7 | 108 | 4.0 | 95 | 7.9 | 58 | 6.00 | | | | |
| B-2 | 08:30-08:47 | | | | | | 5.1 | 99 | 4.1 | 84 | 7.9 | 61 | 5.91 | | | | |
| T-3 | 08:56-09:21 | 5.8 | 1019.2 | S 2m/s | S | SW | 4.2 | 168 | 3.8 | 161 | 8.7 | 57 | 5.70 | | | | |
| B-3 | 09:01-09:18 | | | | 階級1 | 階級1 | 5.0 | 106 | 4.3 | 91 | 8.2 | 64 | 5.91 | | | | |
| T-4 | 09:26-09:51 | | | | (波高0~10) | (同上) | 4.2 | 114 | 3.6 | 107 | 8.4 | 53 | 5.70 | | | | |
| B-4 | 09:31-09:48 | | | | | | 4.9 | 94 | 3.8 | 74 | 7.8 | 65 | 5.42 | | | | |
| T-5 | 09:56-10:21 | 5.5 | 1019.2 | NNE 5m/s | NNE | SW | 4.3 | 87 | 3.4 | 78 | 9.0 | 46 | 6.60 | | | | |
| B-5 | 10:01-10:18 | | | | 階級3 | 階級1 | 4.9 | 96 | 3.7 | 76 | 7.7 | 61 | 5.42 | | | | |
| T-6 | 10:26-10:51 | | | | (波高50~125) | (同上) | 4.7 | 106 | 3.6 | 93 | 8.4 | 53 | 6.30 | | | | |
| B-6 | 10:31-10:48 | | | | | | 5.2 | 94 | 3.6 | 67 | 7.3 | 72 | 5.00 | | | | |
| T-7 | 10:51-11:21 | 5.8 | 1019.0 | NNW 3m/s | NNW | SW | 5.1 | 87 | 3.7 | 71 | 8.3 | 54 | 6.30 | | | | |
| B-7 | 11:01-11:19 | | | | 階級2 | 階級1 | 5.0 | 81 | 3.5 | 60 | 7.3 | 62 | 5.00 | | | | |
| T-8 | 11:26-11:51 | | | | (波高10~50) | (同上) | 5.3 | 77 | 3.8 | 62 | 8.2 | 50 | 6.30 | | | | |
| B-8 | 11:31-11:49 | | | | | | 5.1 | 78 | 3.4 | 57 | 7.2 | 58 | 5.00 | | | | |

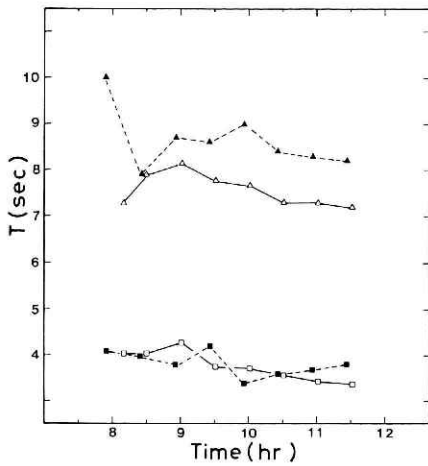


図 8 (a) T式波浪計とブイ式波浪計による周期の比較

Fig. 8a Comparison of the wave periods measured by the T-wave recorder (\blacktriangle : swell, \blacksquare : sea) and by the buoy wave meter (\triangle : swell, \square : sea) with respect to time.

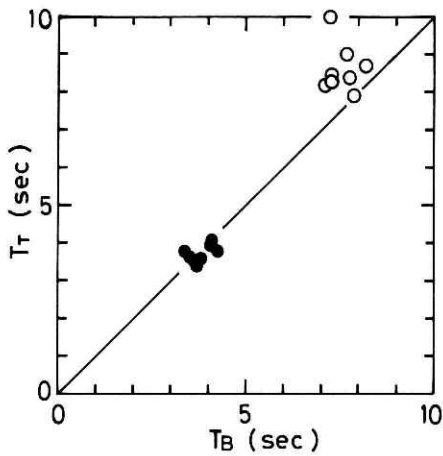


図 8 (b) T式波浪計とブイ式波浪計による周期の比較

T式波浪計は T_T で、ブイ式波浪計は T_B で示した。うねりは \circ で、風浪は \bullet で表す。

Fig. 8b Comparison of the wave periods measured by the T-wave recorder (as ordinate) and by the buoy wave meter (as abscissa). Symbols (\circ) and (\bullet) indicate swells and sea, respectively.

T式に比べて小さいために、それに比例して周期も小さくなったわけである。カット周期は Part I で示したように、2つのスペクトルピーク間のもっとも低い値——谷のところの周期とした。よって谷付近の分布の少しの相違によってカット周期が大きく変わることがある。上記のうねりの周期の不一致はこのためである。これはスペクトル分布の平滑化によって解決される。

有義波の波高の比較は図9a, bに示した。図9aから、観測中のうねりと風浪の波高はほぼ同程度であったことが分る。T式波浪計において、風浪の波高がRUN 1と3において非常に大きくなった。この原因はたぶん次のことによると推定される。表4から分るように、これらの観測時に風向が非常に変化したために、船体がそれに伴い回転し、それによって水面が乱されたためであること。このことは図7の船体の姿勢の変化から裏付けされる。両波浪計の直接的な比較は図9bに示した。RUN 1と3(点線で囲んだデータ)を除けば、両者はよく一致していると言える。

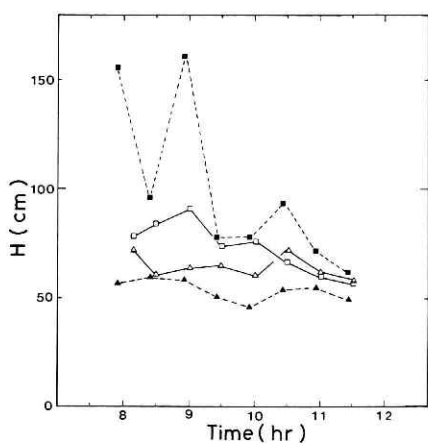


図9 (a) T式波浪計とブイ式波浪計による波高の比較記号の説明は図8 (a)と同じ。

Fig. 9a Comparison of the wave heights measured by the T-wave recorder and by the wave meter with respect to time. Symbols are the same as that of Fig. 8a.

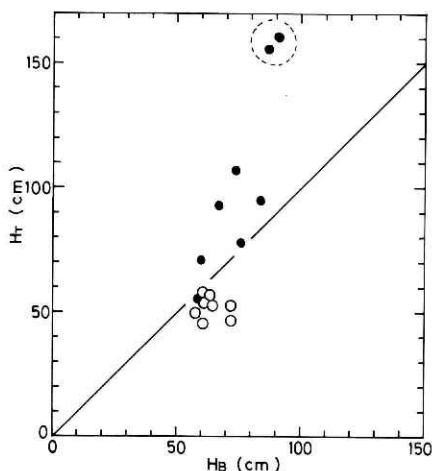


図9 (b) T式波浪計とブイ式波浪計による波高の比較
T式波浪計は H_T で、ブイ式波浪計は H_B で示した。うねりと風浪は図8 (b)と同じ記号で表す。

Fig. 9a Comparison of the wave heights measured by the T-wave recorder (as ordinate) and by the buoy wave meter (as abscissa). Symbols are the same as that of Fig. 8a.

スペクトル分布の比較は図10に示した。両者の分布が一致すれば、有義波の特性も当然一致することになる。よってスペクトル分布の比較は非常に重要となる。図10より、両者の分布はRUN 1と3を除けば非常によく一致したことである。RUN 1と3での相違は、T式波浪計の風浪成分のスペクトルピークが非常に高い値であることによる。そしてこれらのことによって、上述した有義波の風浪の波高が非常に大きくなったわけである。この原因はすでに述べたこと、すなわち風向変化による船体の回転による水面の乱れによるものと推定できる。

4. ま と め

Part Iで、T式波浪計の合理的なデジタル処理システムが開発された。本論文で新しいシステムによるT式波浪計の総合的な精度を調べるために、目視観測及びブイ波浪計との比較

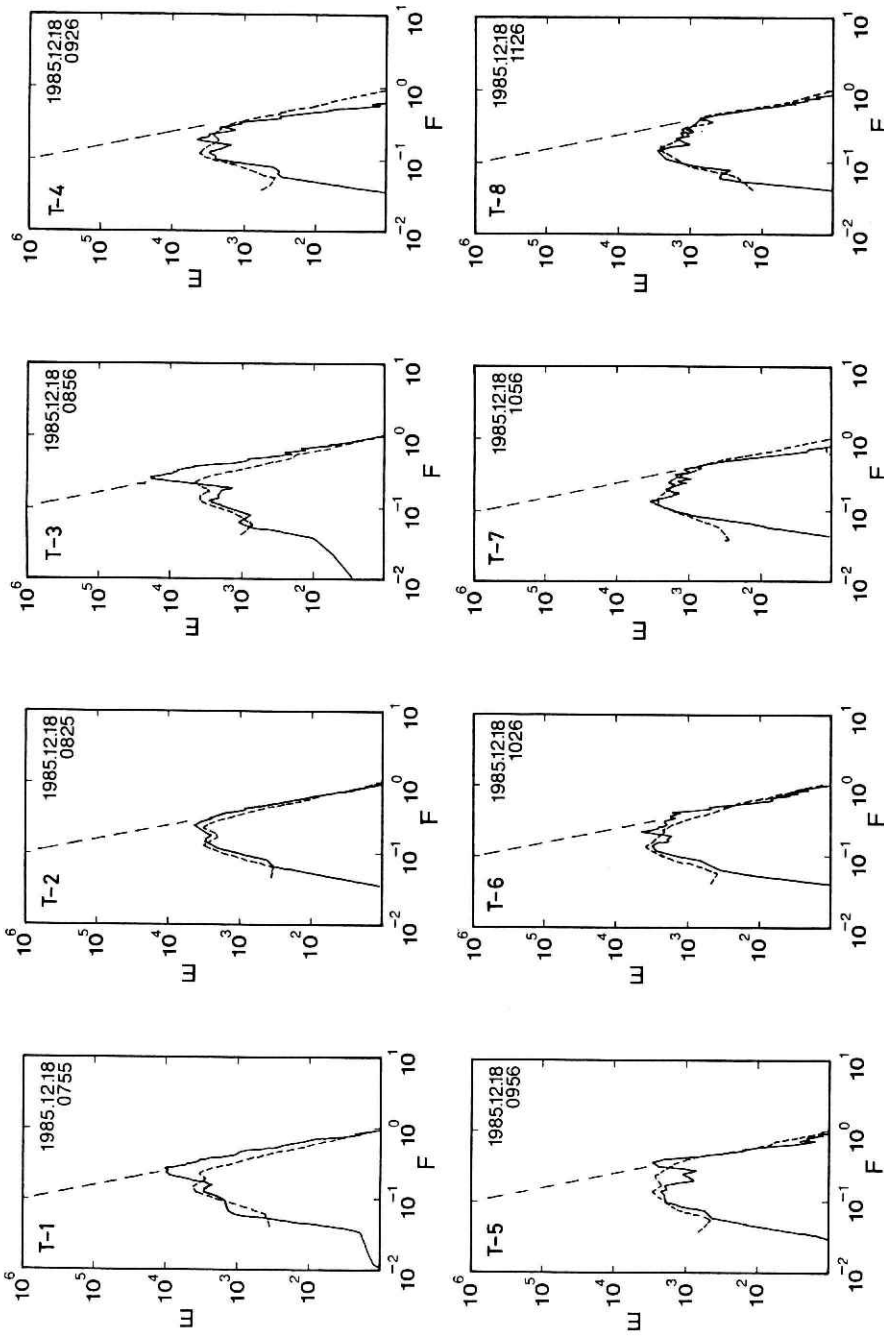


図10 T式波浪計とブイ式波浪計によるパワースペクトルの比較
各図中の上方の線分(点線)はマイナス5乗のラインを示す。

Fig. 10 Comparison of the power spectra measured by the T-wave recorder (heavy lines) and by the buoy wave meter (dotted lines).

観測を行った。とくに後者の比較観測において、両者のスペクトル分布が非常によく一致した。このようなことから、次のことが結論された。

開発された処理システムをもつT式波浪計は、風向が安定している波浪場において、うねりと風浪の波浪特性を実用上十分な精度で計測できることが明らかにされたことである。

また目視観測は次のような特徴をもつことが示された。風浪の波高に関して、人間の身長と同程度のものに対してはほぼ正確に判断するが、それより大きくなると過大評価し、それより小さくなると過小評価することである。うねりに関しては風浪と完全に分離して評価ができず、卓越した風浪が存在する場合、実際に比べてより高い波高、より短かい周期(または波長)の波と評価することである。

謝 辞

目視及びブイ式波浪計との比較観測に従事された「拓洋」と「昭洋」の乗組員諸氏と、協和商工株式会社の伊藤二夫氏に御協力をいただきました。ここにあわせて深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) ECOR日本委員会(1975): 海洋波浪の調査研究に関する現況報告書, 380pp.
- 2) 木村隆昭(1975): 啓風丸による波浪観測報告(2). 測候時報, **42**, 203-210.
- 3) 倉品昭二・友定彰(1968): 船用波浪計による沖合の波の観測. 水路要報, **85**, 23-24.
- 4) 気象庁(1969): 船舶気象観測指針, 119pp.
- 5) 水路部(1986): 水路部観測報告, 波浪編85pp.
- 6) Toba. Y (1978): Stochastic form of the growth of wind wave in a singer-parameter representation with physical implications. J. Physical Oceanography, Vol. 8, No. 3, 494-507.
- 7) 徳田正幸・内藤玄一・都司嘉宣・渡部勲(1982): 圧力式波浪計による相模湾での波浪観測 I. 国立防災科学技術センター研究報告, 第**26**号, 247-278.
- 8) 徳田正幸・渡部勲・江口純弘(1983): 相模湾の波浪特性II. 国立防災科学技術センター研究報告, 第**31**号, 219-239.
- 9) 徳田正幸・道田豊(1986): タッカー式船用波浪計に関する研究 I. 計測処理システムについて. 国立防災科学技術センター研究速報, 第**72**号, 32pp.

(1986年11月27日 原稿受理)