

相模湾の波浪特性 II*

徳田正幸**・渡部 勲**・江口純弘***

国立防災科学技術センター平塚支所

Characteristic of Ocean Waves in Sagami Bay II

By

M. Tokuda, I. Watabe

*Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention
No. 9-2, Nijigahama, Hiratsuka, Kanagawa-ken 254*

and

S. Eguchi

*Institute of Industrial Science, University of Tokyo
Roppongi 7-22-1, Minato-ku, Tokyo 106*

Abstract

Buoy techniques of a pressure type wave meter are discussed and a new spar buoy is proposed for obtaining directional wave spectra.

Next comes an investigation of the characteristics of ocean wave elevations observed in the center of Sagami Bay by means of the same wave meter as used in Part I. Spectral analysis of the elevations was made in a manner similar to that described in Part I. The results of the analysis are compared with those of the observations at the marine tower off the coast of Hiratsuka using a capacitance type wave gauge. The following facts are indicated.

The evolution of ocean wave field under the coexistence of swell and sea waves was observed in the center of Sagami Bay. It was realized from the behavior of spectral peak waves that the swell wave component did not develop substantially and the sea wave component grew independently till its spectral peak frequency became lower than half that of swell wave component. This phenomenon corresponds to Stage 1 indicated by Hatori *et al.* (1981).

* この研究は、海洋開発調査研究促進費による「海洋遠隔探査技術の開発—波浪・長期周期波等に関する研究」の一環として行われたものである。

** 国立防災科学技術センター平塚支所 *** 東京大学生産技術研究所

1. はじめに

本研究は、徳田ら(1981)の「圧力式波浪計による相模湾での波浪観測 I」の研究を發展させたものである。この研究は波浪計ブイの観測から相模湾の波浪の空間的特性を明らかにするとともに、実体に即した波浪予報モデルを確立することにある。よって、今後この研究の題名を「相模湾の波浪特性」に改めることにする。上記の論文を Part I として、本論文は Part II とする。

本論文において、はじめにこの研究で用いられる波浪計について従来の研究を検討し、波向をも測定できる波浪計について議論する。次に、今回行った波浪観測について議論を行う。この観測は沖合での波浪の時間的発達特性を明らかにすることにある。すなわち、相模湾中央海域に小型船(11.2トン)を漂流させ、Part Iと同様な波浪計ブイによる波浪観測を行った。同時に平塚沖の観測塔において容量型波高計による波浪観測を行った。これらの観測結果を比較することにより、次のことを明らかにする。第一に、うねりと風浪は沖合(相模湾中央)と沿岸(平塚沖の観測塔)で時間的な発達に関してどのように異なるか。第二に、うねりと風浪が混在する波浪の場において、風浪の発達はうねりからどのような影響を受けるかを明らかにする。

2. 波浪計

吊り下げ圧力式の波浪計に関して、今までの研究について検討する前に、この波浪計の測定原理について少し議論する。この原理は、Part Iで示したように、波浪の波面によく追従するブイに圧力計のセンサーを吊り下げて、その圧力計がブイと同じ上下運動をすることによって圧力変化を測定し、水面変位を求めるものである。しかしながら、この原理を次のように解釈すると、水面変位は測定できないことになる。すなわち、ブイとセンサー間が常に一定の長さのケーブルで結びつけられているため、たとえブイが波面の上下運動によって上下しても、ブイ(水面)とセンサー間にある水の量(水の重さ)は常に一定であることになる。よってセンサーには圧力変化が起らず、水面変位は相対的にゼロになってしまうと言う解釈ができる。しかしながら、この解釈が成立するためには、水粒子の運動の流線(等圧面)の振幅が深さに対して減衰せず一定であることが必要である。この条件は物理的にありえないことである。すなわち、波の運動によって誘引された水粒子の運動の鉛直成分は、十分に深いところでは小さくなるわけである。このことから、理論的に流線の振幅は深さに対して指数関数的に減衰することになり、一定でなくなるからである。このような流れの場であれば、圧力計のセンサーはブイの上下運動によって必ず等圧面を横切ることになり、よって水面変位に対応する圧力変動が生ずることになる。

上記の波浪計について今までの研究を調べる。はじめにこの波浪計に付けられた名前を上げると、吊り下げ型波高計（谷口, 1958）、吊り下げ式自己波高計（田口・外山, 1966）、吊り下げ式波浪計（川鍋, 1967；川鍋・田口, 1968）、圧力式波浪計（細田ら, 1977；徳田ら, 1981）、水圧型波浪計（光易ら, 1973）そして圧力式ジンバル波浪計（徳田・江口, 1982）がある。最後のものは波向をも測定できるものである。波向の測定については後で議論する。本論文ではこの波浪計の名称として「吊り下げ圧力式波浪計」と呼ぶことにする。この波浪計に関する研究について年代順に議論することにする。

谷口（1958）は吊り下げ圧力式波浪計をもっとも早く開発した。彼はブイの運動方程式からブイの動きと圧力計センサーの変位を計算し、圧力補正係数を求めた。またこの測定原理が成立する条件として、ブイに対する圧力計センサーの張力が常に正とする条件を考えた。この条件は主として圧力計のセンサーの比重と波浪の波形勾配に依存するものとなった。彼が用いたセンサーの比重は 3.59 であった。これによると、許容される最大の波形勾配は 0.214 となった。普通海洋波の波形勾配は 0.12 を越すことがないので、上記の比重で十分であると結論された。圧力計のセンサーの深さ D を 24.14m に設定、瀬戸内海の豊後水道で観測を行い、データ解析は主として有義波の波高と周期を求めるもので、得られた結果は従来の経験式と比較された。

田口・外山（1966）そして川鍋（1967）はそれぞれ類似の波浪計を製作した。観測について、前者はセンサーの深さ $D = 20.5\text{m}$ で播磨灘において、後者は $D = 14.5\text{m}$ で紀伊水道で行った。両者ともデータ解析として有義波の特性とスペクトル分布の解析を行い、従来の経験式と比較を行った。川鍋の観測において、目視観測では 8 秒の周期のうねりと 5 秒の周期の風浪が確認された。しかし波浪計から得られたスペクトル分布では周期 5 秒から 10 秒の間にエネルギーが集中しているが、その間にとくに卓越する周期の波は存在しなかったことが示された。

川鍋・田口（1968）は、同一の波浪計ブイに 3 つの圧力計センサーを取り付け、ブイ運動の深さによるセンサーの応答性を調べた。これらのセンサーの深さは 10m、20m そして 50m であった。観測は高知沖で、非常に穏やかな波の日に行われた。3 つのセンサーの出力はスペクトル解析され比較された。これらのスペクトル分布は、高周波領域ではほぼ同一の分布となったが、ピーク周波数を含む、低周波領域ではあまりよく一致しなかった。彼らは、これについてセンサーの感度に問題があるとした。またセンサーの適切な深さとして、注目するもっとも周期が長い波の波長の $1/10$ の深さでよいと結論した。

本論文の研究によれば、このセンサーの深さの結論は適切でないと言える。その理由は次のことになる。圧力補正は周波数の低い領域ほど大きくなるので、そこでの誤差はたとえ小さくても圧力補正によって非常に大きくなる可能性がある。よって低周波領域ではできるだけ圧力補正を行わないようにすること、すなわちセンサーの深さをできるだけ深くすること

が望ましいと言える。

今まで述べた波浪計は静的な特性について十分に調べられ問題はないが、動的な特性を含む総合的な特性に関して十分に調べられていない。これは、比較すべき他の種類の精度の高い測器との比較観測を行っていなかったことによる。このために、波の上下運動に対する圧力計センサーのレスポンスが十分に研究されていなかったように推測される。

細田ら(1977)は十分にレスポンスが速い圧力計センサーを作ることによって、軽量で丈夫で精度の高い実船搭載用投棄式波浪計を開発した。この波浪計を、西部及び北部の太平洋航路の貨物船に搭載して観測を行った。センサーの深さは50mであった。その結果、精度の高いデータが得られ、有義波の特性及びスペクトル分布が求められ、従来の経験式と比較された。スペクトル分布は Pierson-Moskowitz 型に近い分布であることが示された。これらにより、吊り下げ圧力式波浪計による波浪観測は、外洋上で比較的容易な方法で精度の高い波浪計測を可能にすることが証明された。

光易ら(1973)は波浪の方向スペクトルを加速度計方式で計測するクローバーリーフ型ブイの開発において、波高の測定の検定用として吊り下げ圧力式波浪計を用いた。

徳田ら(1981)は平塚沖の観測塔で、塔から吊り下げ圧力式波浪計を係留し、塔に常設してある容量型波高計と同時観測を行い、得られたスペクトル分布の比較から波浪計の総合的な特性を調べた。センサーの深さは水深20mに対して17mとした。その結果、波浪計の波高観測はセンサーの水深による圧力補正を行えば、周波数 0.06Hz～1.0Hzの範囲で十分な精度で行うことができることを示した。さらに彼らは小型船で平塚・大島間を往復して、7つの観測点で観測を行い、相模湾における周期10秒のうねりの空間的特性を明らかにした。この場合センサーの深さは21mとした。

以上述べた研究により、吊り下げ圧力式波浪計による波高観測法は確立されたものと言える。

徳田・江口(1982)はこのような状況から、吊り下げ圧力式波浪計の特徴を活用した波向をも計測できる圧力式ジンバル波浪計を開発した。この波向の測定法は、クローバーリーフ型ブイと同様に波面の傾斜から求めるものである。このような波面の傾斜の計測法は今までにないもので、圧力計のセンサーケーブルの安定した鉛直性を利用する新しい方式である。すなわち、圧力計を吊り下げたケーブルの他端に2軸ジンバルを介して、ブイに取り付ける方法である。この波浪計の特性は圧力計センサーの深さ $D = 2.4$ mとして、実験室で詳しく調べられた。波高計測に関して十分に精度があることが再確認されたが、波向に関して実用化への問題点が明らかにされた。それは安定した波向計測がむずかしいことにある。すなわち、用いられた2軸ジンバルでは波面に追従するブイの傾斜を安定して計測することが容易でないことである。よって安定した性能のよい2軸ジンバル機構を開発する必要がある。

以上が今までの吊り下げ圧力式波浪計に関する研究である。これらの研究から、外洋の波

浪の波高観測において圧力計のセンサーの深さを50mに設置すれば、荒天時であっても信頼のある計測が可能であると結論される。この波浪計の最大の特徴はクローバーレーフ型ブイ等の加速度方式と異って、計測法が簡単であるために軽量化ができ、かつ安価となる。今後衛星による海洋上のデータ収集が容易になるために、波浪計測用の漂流ブイとして、この波浪計が活躍する日が必ず来ると思われる。その場合安定した波向の計測法が実用化されていなければならない。これについての突破口は前述したように、徳田・江口(1982)の研究によってなされ、その見通しは明るいと思われる。

最後に私たちは上記の研究をもとに波向の計測法として、次のような方法を提案したい。この方法は徳田・江口の研究と Brainard (1978)の研究を組み合わせたものである。この方法による波浪計は図1に示す丸太型吊り下げ圧力式波浪計となる。徳田・江口の方法(ジンバル方式)では安定した2軸ジンバル機構の開発の必要性があること述べた。Brainardの方法(丸太方式)は漂流した丸太が波浪の場で波の進行方向に対して直角に向く性質を使って、丸太の方向より波向を求めた。しかしこの方法だけでは波が進行波か後退波かの区別はできない。よってジンバル方式に丸太方式を付加することから、複雑な2軸ジンバル機構の代わりに単純な1軸のジンバル機構だけでよいことになる。すなわち、丸太型のブイは波の進行方向に直角になるので、その方向における波面の傾斜(最大の傾斜)をセンサーケーブルの鉛直性を利用して計測するものである。このような計測法はきわめて単純な原理に基づくために波向に関してもより安定した測定が可能となる。よってこの方法を用いれば、うねりと風浪が相異なる方向から伝播してくる波浪の方向特性に対しても、解析方法を工夫すれば、波高観測と同様に、それぞれの波の成分の進行方向を計測することができると思われる。

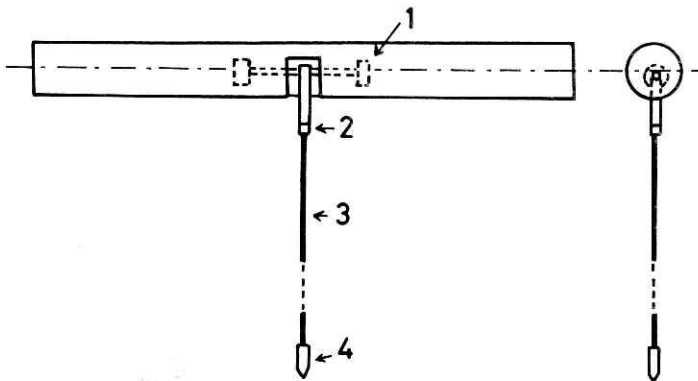


図1 丸太型吊り下げ圧力式波浪計の構造

1. ポテンション・メータ 2. よりもどし 3. 圧力計のケーブル 4. 圧力計のセンサー

Fig. 1 A spar buoy for obtaining directional wave spectra

3. 観測法

観測法には次の4つの点をのぞき、写真1に示すようにPart Iと同じ方法である。第一は、相模湾中央海域での波浪の時間的発達過程を明らかにするために、観測点は検定観測点としてのSt. A 以外は St. B (N 35°02'00", E 139°22'30") だけとした。これらの観測点は図2に示した。St. Bは平塚と大島を結ぶ線と、真鶴と船形を結ぶ線の交点とした。第二は、圧力計センサーの深さD=50mとしたことである。これはセンサーの深さによる圧力補正の周波数領域を狭くするためである。しかしこのようにセンサーの深さを深くすると、Part Iのような観測塔(深さ20m)での波浪計の検定観測はできない。このために検定観測点として、観測塔から1km沖のSt. A(深さ約130m)を選んだ。第三は、波浪計ブイは、Part Iでは船から係留したのに対して、今回は写真2で見られるように船から切り離して完全に漂流させたことである。またPart Iでは、風速は風速計で、風向は目視で観測した。これらは今回風向風速計で同時測定した。

波浪観測は1981年11月19日10時40分から15時20分(Ob.1)と、同月20日8時25分から15時9分(Ob.2)の2日間にわたって行った。手順として、はじめに平塚港からSt. A に行き、検定観測を行った後にSt. B で本観測をした。帰りは再びSt. A に戻り検定観測を行い、平塚港に戻った。



写真1 吊り下げ圧力式波浪計
Photo 1 Pressure type wave meter.

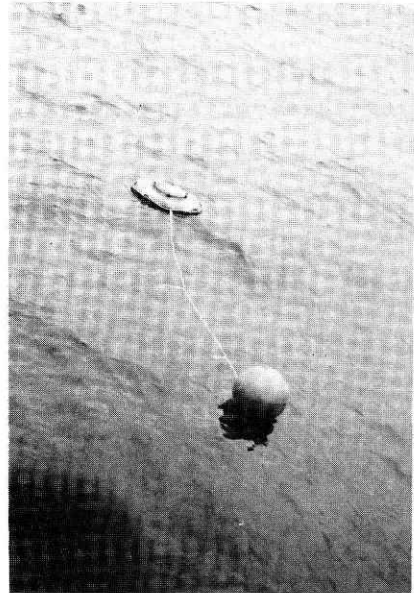


写真2 観測中の波浪計
Photo 2 Buoy of wave meter among ocean waves.

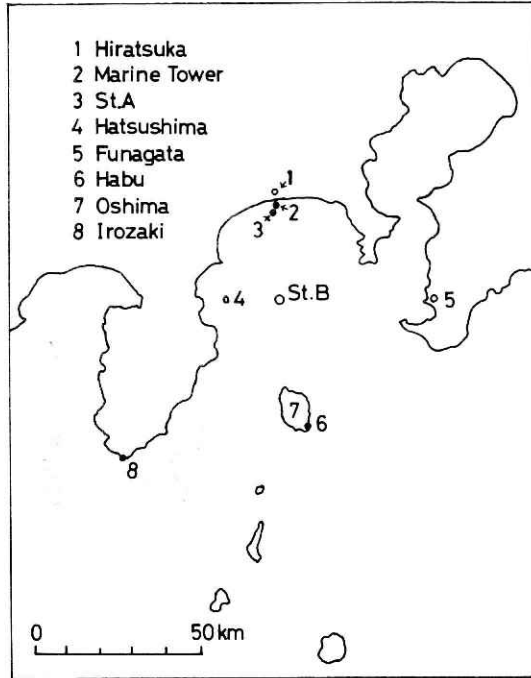


図2 相模湾の観測点の位置
 Fig. 2 Locations of the observation stations

4. 天候と風速分布

観測時の天気図は図3に示した。11月16日から発達した低気圧が前線を伴って、カラフトからカムチャッカ半島へと移動した。この低気圧は18日の天気図(図3(a))の右上にある。この低気圧の風により太平洋上で波浪が発達し、18日から19日にかけて相模湾にうねりが伝播した。20日の天気図(図3(c))によれば、別の低気圧がカラフト付近で急に発達した。このために強い南風が吹くことが予想された。その後この低気圧はあまり発達しなかったのて、強い南風も長く吹くことはないと思われる。

図4は平塚支所、相模湾中央点(船上)そして大島測候所で観測された風向風速の記録である。この図より、平塚では20日の11時までには弱い北風であったが、11時から急に強い南東の風となった。これに対して大島では平塚より早く19日の12時頃から強い南西の風が吹き始め、20日の11時にはさらに強い南西の風となった。また相模湾中央海域では20日の11時に突然強い真南の風となった。

以上のことから、20日の11時以降は相模湾全体にわたって強い南系の風となることが分る。これは天気図のところで予想したように、カラフト付近で急に発達した低気圧によるものと

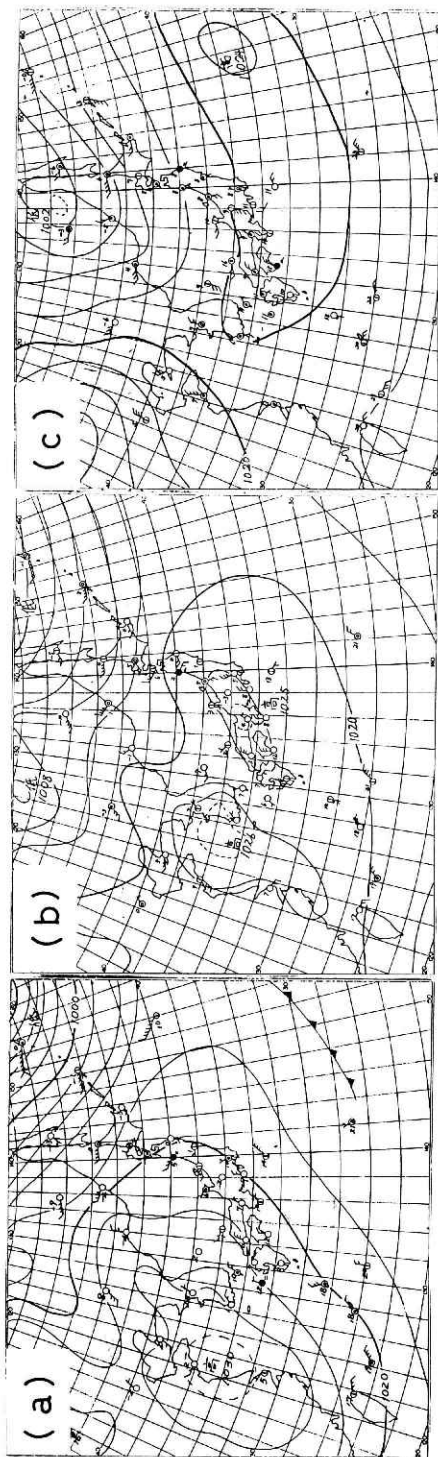


図3 観測期間中の天気図 (a)1981年11月18日 (b)同年11月19日 (c)同年11月20日
いずれも午前3時の天気図を示す。

Fig. 3 Weather maps during the observation at 3 a.m. on (a) Nov. 18th (b) Nov. 19th and (c) Nov. 20th

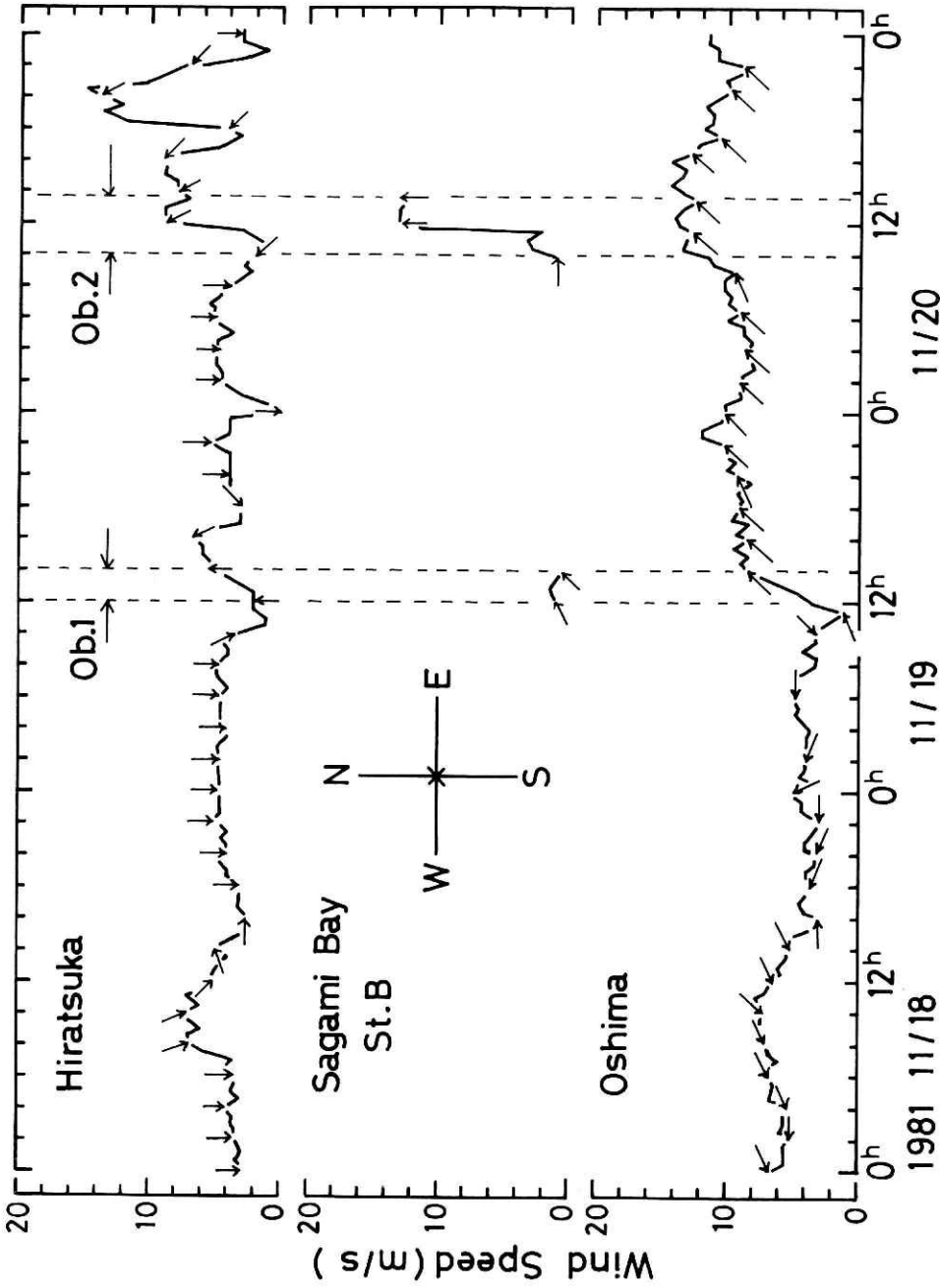


図4 平塚沖, 船上および大島測候所での風向風速の記録

Fig. 4 Records of wind direction and speed at Hiratsuka, in Sagami Bay and at Oshima. Data of Sagami Bay were obtained on the ship.

思われる。波浪観測期間中の風の特徴をまとめると次のようになる。Ob.1(19日)において、大島付近では強い南西の風が吹いていたが、相模湾内では卓越した風が吹かなかった。他方 Ob.2(20日)では、観測の始めの時期は相模湾内ではほとんど風がなかったが、11時から突然に風が吹き始め、ほとんど瞬間に13m/sの南風となった。このような風の場合から、Ob.1ではうねりが、Ob.2ではうねりと風浪が卓越する波浪の場となることが期待される。

5. 観測結果

使用したデータの解析法はPart Iと同じ方法である。ただし、今回の波浪計のデータの読み取り間隔はPart Iと少し異なる値——0.2539秒とした。また解析する波浪の場はPart Iと異なって、主としてうねりと風浪による2つのスペクトルピークをもつものであった。このようなことから、波浪の場のパラメータとして有義波の特性を使わず、スペクトル分布の2つのピーク波の特性を使うことにした。ピーク波の特性はピーク周波数とピーク波の平均的エネルギー密度とした。前者は離散化されたパワー・スペクトル分布において2次曲線近似でその分布のピーク値となる周波数で表した。後者はスペクトルピーク値($\phi_p = \phi(f_p)$)とその前後の値($\phi_1(f_p - \Delta f)$, $\phi_2(f_p + \Delta f)$)から得られる平均値($\phi = (\phi_1 + 2\phi_p + \phi_2)/4$)で計算された。波浪計のパワー・スペクトル分布は、データ個数2000個でラグ数 $M=100$ 個として計算された後、圧力計センサーの深さ $D=50\text{m}$ による補正係数($1/T_r^2$)をかけて求められた。一方観測塔の容量型波高計のデータの読み取り間隔はPart Iと同様に0.3秒とした。

5.1 検定観測

第3章で説明したように、波浪計の特性はSt.Aの波浪計による観測と観測塔の容量型波高計による観測の比較から調べられた。これらの結果はスペクトル分布で表され、図5に示された。この図からPart Iで指摘したことの外に、次のことが指摘される。

(1) 圧力計センサーの深さ D はPart Iで $D=17\text{m}$ に対して、ここでは 50m と深くした。その結果より低周波の波が正確に測定できるようになった。波浪計ブイの観測点が観測塔より1km沖にあることを考慮すれば、波浪計によって得られるパワー・スペクトル分布は、周波数 $0.05 < f \leq 1.0$ の領域において十分に精度のあるものといえる。

(2) 代表的な風浪のスペクトル分布は、風速8 m/sの時の分布、すなわち図5のOb.2のCAL2の分布である。この分布を細く見ると、風浪の高周波領域すなわち平衡領域において、容量型波高計のスペクトル分布(CT)は f^{-4} に比例するのに対して、波浪計の分布は f^{-5} に比例する。このような傾向はPart Iの観測結果(Part Iの図10)や第5.3節で示す図9にも見られる。この分布の相違は現在のところ観測点の海域と測器の特性の違いによると考えられる。これらの点を明らかにするためには、風がある程度強く吹く天候の時(高周波領域で十分に広い平衡領域が成立する時)に、Part Iと同様にセンサーの深さ $D=17\text{m}$ とする検定観測が

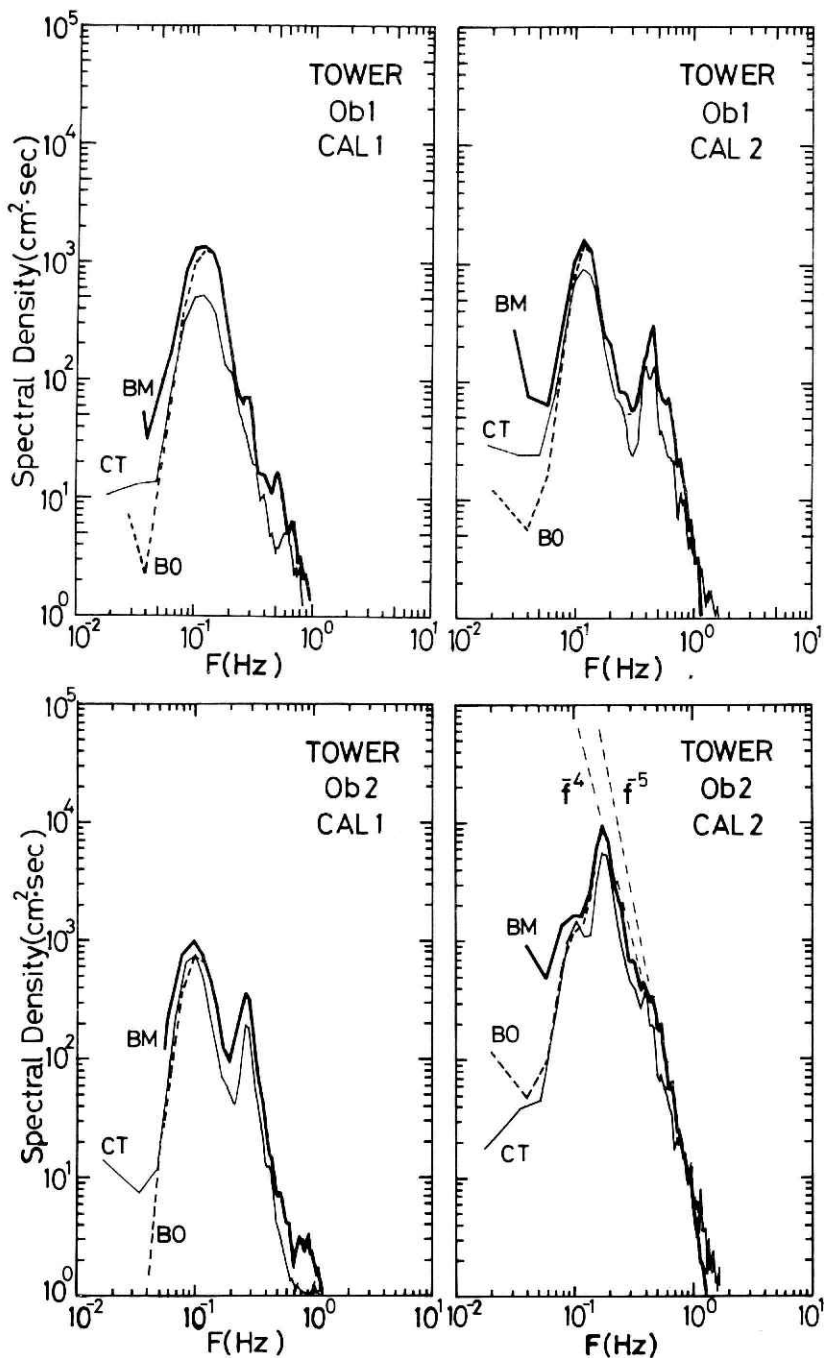


図5 スペクトル分布に関して波浪計(B0, BM)と容量型波高計(CT)の検定観測. BMはB0に圧力補正したもの.

Fig. 5 Comparison between the energy spectra observed by the wave meter (BO, BM) and by the capacitance type wave gauge (CT). BM refers to corrected data (the sensor being 50 meter deep).

必要である。

5.2 平塚沖観測塔、波浮そして石廊崎のスペクトルピーク波の特性

相模湾の波浪の特性は、石廊崎方面と波浮方面からの外洋波と湾内の local 的な風に引き起された風浪から決まる。外洋波は、相模湾を含む広い海域が大規模な強い風域におおわれている場合風浪となり、それ以外はほとんどうねりとなる。このようなことから、相模湾中央海域での波浪の発達過程を明らかにするためには、そこでの観測ばかりでなく、湾口に当る石廊崎と波浮、そして湾奥の平塚沖の観測塔での観測をも必要となる。今回も Part I と同様に、外洋波として主にうねりに注目した。

図6は平塚（平塚沖の観測塔）、波浮および石廊崎におけるスペクトルピーク波の周期の時間的変化を示したものである。この図から次のことが注目される。第一に、うねりの周期が19日18時まで8秒あったものが、約10秒にジャンプしたことである。この周期のジャンプは場所によって時間的に少し異なるが、ほぼ19日の18時から23時にわたって起っている。その後のうねりの周期は約10秒に保たれている。このようなことから、この周期のジャンプは外洋で、周期8秒のうねりが19日の正午頃から吹き始めた強い南西風によって発達し周期10秒の風浪となり、その波がうねりとなって新たに相模湾に入射して来たと考えられる。第二に、風浪の周期は強い南系の風によって徐々に増加したことである。この周期の増加率は、平塚がもっとも高い。これは波浮沖と異なって、相模湾内ではほとんど風がないところに、20日

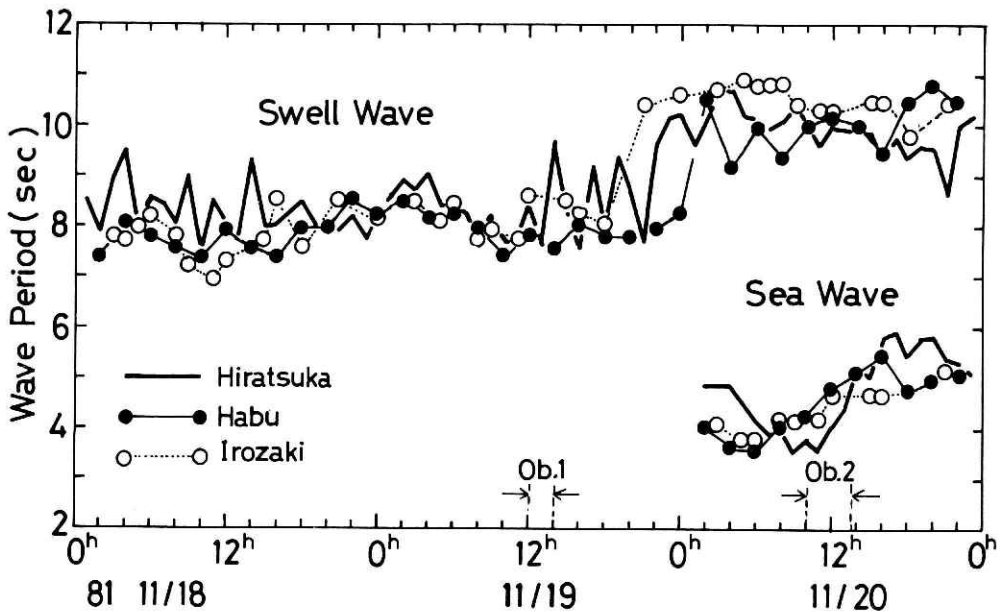


図6 平塚沖(観測塔)、波浮港沖および石廊崎におけるうねりと風浪の周期の時間的変化
 Fig. 6 Variations of the wave periods of swell wave and sea wave off Hiratsuka (the marine tower), at Habu and Irozaki.

の11時から突然強い南風になったためである。第三に、うねりと風浪の周期に関して、平塚、石廊崎、波浮の三者は相互に全体としてほぼ類似した分布をもつことである。

図7はうねりと風浪のスペクトルピークのエネルギー密度の時間的変化を示したものである。この図から明らかなように、図6の周期変化と対応してスペクトル密度は変化しており、次のようなことが注目される。第一に、うねりに関してPart Iで指摘したように、湾内で系統的な減衰が認められる。それは、上記の3つの観測点のエネルギー密度の変化が相互に類似した形となっているためである。18日の0時から19日の18時まで、周期約8秒のうねりの平均ピークエネルギー密度を求めると、平塚は $0.412 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ 、波浮は $21.31 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ 、そして石廊崎は $5.54 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ となり、それらの間の比は波浮を1とすると、0.02:

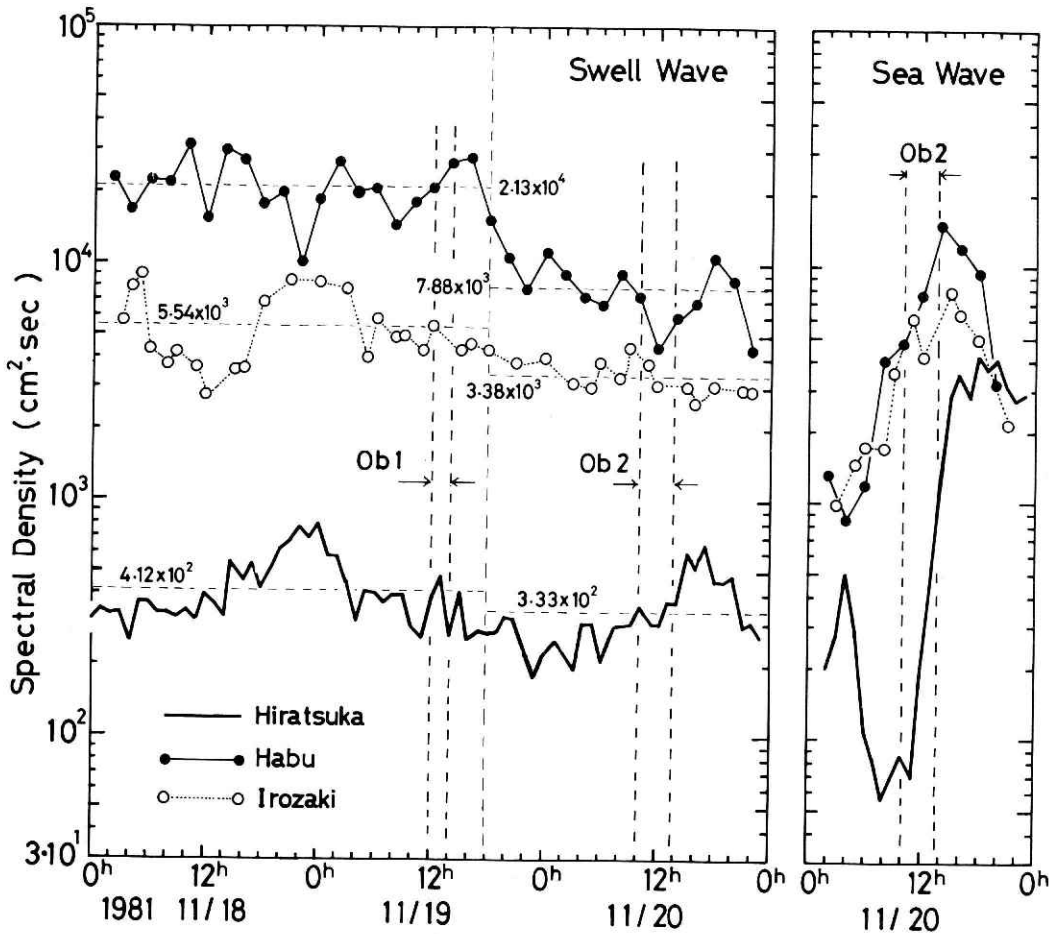


図7 平塚沖、波浮港沖および石廊崎におけるうねりと風浪のスペクトル密度の時間的変化
 Fig. 7 Variations of the spectral density of swell wave and sea wave off Hiratsuka (the marine tower), at Habu and Irozaki.

1 : 0.26となった。一方19日の19時から20日の23時までの周期10秒のうねりについて同様に求めると、平塚で $0.333 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$, 波浮で $7.88 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$, そして石廊崎で $3.38 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ となり、それらの間の比は 0.04 : 1 : 0.43 となった。これらのことから、うねりは周期によって湾内で異なった減衰をすることが分かる。

第二は、風浪のエネルギー変化に関して、平塚の分布はうねりの場合と異なって波浮と石廊崎の分布と非常に異なっていることである。これは、相模湾を含む広い海域が大規模な強い風域でなく local 性の強い風域におおわれたためである。風浪はこのような local 的な風の特性に強く依存する。この節で使用したピーク波の特性はすべて表 1 に示した。

表 1 平塚沖(観測塔)、波浮および石廊崎における波浪の特性

Table 1 Characteristics of ocean wave off Hiratsuka (the marine tower), at Habu and Irozaki

(a) うねりの特性 (11月18日)

1981年 11月20日 時刻	平 塚		波 浮		石 廊 崎		1981年 11月20日 時刻	平 塚		波 浮		石 廊 崎	
	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$		周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$
0	8.36	0.301	—	—	6.59	10.3	12	8.00	0.396	7.88	15.3	7.32	2.76
1	8.54	0.343	—	—	—	—	13	7.80	0.360	—	—	—	—
2	7.85	0.326	7.39	22.7	—	—	14	9.28	0.316	7.55	30.2	—	—
3	8.88	0.336	—	—	7.76	5.65	15	7.95	0.552	—	—	7.68	3.48
4	9.50	0.248	8.08	16.7	7.69	7.88	16	7.97	0.457	7.40	27.5	8.48	3.59
5	7.88	0.370	—	—	8.01	8.87	17	8.26	0.533	—	—	—	—
6	8.58	0.371	7.80	22.4	8.23	4.30	18	8.49	0.424	7.98	17.7	7.54	6.86
7	8.45	0.330	—	—	—	—	19	8.01	0.510	—	—	—	—
8	8.00	0.331	7.55	21.9	7.81	3.65	20	7.84	0.622	8.03	20.0	—	—
9	9.01	0.315	—	—	7.20	4.15	21	7.89	0.669	—	—	8.47	8.52
10	7.45	0.238	7.36	31.0	—	—	22	8.18	0.757	8.54	9.97	—	—
11	8.49	0.311	—	—	6.94	3.60	23	7.75	0.685	—	—	—	—

(b) うねりの特性 (11月19日)

1981年 11月20日 時刻	平 塚		波 浮		石 廊 崎		1981年 11月20日 時刻	平 塚		波 浮		石 廊 崎	
	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$		周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$	周 期 秒	エ ネ ル ギ ー 密 度 $\times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$
0	8.21	0.778	8.25	18.8	8.12	8.27	12	8.40	0.386	7.81	21.1	8.58	5.41
1	8.59	0.592	—	—	—	—	13	7.59	0.480	—	—	—	—
2	8.91	0.582	8.50	27.0	—	—	14	9.71	0.266	7.54	27.1	—	—
3	8.70	0.456	—	—	8.50	7.85	15	8.24	0.412	—	—	8.48	4.28
4	9.04	0.305	8.23	20.2	—	—	16	7.56	0.256	8.05	28.6	8.24	4.62
5	8.38	0.412	—	—	8.11	3.98	17	9.23	0.278	—	—	—	—
6	8.44	0.406	8.25	20.8	8.45	5.92	18	7.85	0.272	7.77	15.5	8.07	4.37
7	8.24	0.367	—	—	—	—	19	9.43	0.281	—	—	—	—
8	7.84	0.398	8.00	14.4	7.73	4.93	20	8.68	0.323	7.83	10.7	—	—
9	8.22	0.396	—	—	7.89	4.97	21	7.67	0.300	—	—	10.39	3.76
10	7.67	0.288	7.43	18.6	—	—	22	9.58	0.231	7.95	7.90	—	—
11	7.70	0.265	—	—	7.76	4.76	23	10.08	0.181	—	—	—	—

相模湾の波浪特性Ⅱ- 徳田・渡部・江口

(c) うねりの特性 (11月20日)

1981年 11月20日 時刻	平塚		波浮		石廊崎		1981年 11月20日 時刻	平塚		波浮		石廊崎	
	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$		周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$
0	10.19	0.225	8.27	11.3	10.57	3.97	12	9.98	0.300	10.17	4.44	10.22	3.13
1	9.62	0.254	—	—	—	—	13	9.93	0.382	—	—	—	—
2	10.16	0.225	10.54	9.10	—	—	14	9.90	0.366	9.99	5.92	—	—
3	10.70	0.192	—	—	10.67	3.13	15	9.84	0.611	—	—	10.45	3.06
4	10.70	0.304	9.14	7.40	—	—	16	9.44	0.522	9.47	6.89	10.46	2.62
5	10.23	0.298	—	—	10.88	3.03	17	9.76	0.643	—	—	—	—
6	10.08	0.209	9.96	6.80	10.80	3.91	18	9.36	0.479	10.46	10.7	9.82	3.12
7	9.93	0.286	—	—	—	—	19	9.57	0.447	—	—	—	—
8	10.07	0.295	9.35	9.15	10.83	3.27	20	9.54	0.480	10.78	8.46	—	—
9	10.46	0.294	—	—	10.42	4.52	21	8.57	0.293	—	—	10.40	3.00
10	9.98	0.357	9.98	7.29	—	—	22	10.00	0.300	10.48	4.33	10.42	2.95
11	9.62	0.312	—	—	10.29	3.91	23	10.16	0.270	—	—	—	—

(d) 風浪の特性 (11月20日)

1981年 11月20日 時刻	平塚		波浮		石廊崎		1981年 11月20日 時刻	平塚		波浮		石廊崎	
	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$		周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	周期 秒	エネルギー 密度 $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$
0	—	—	—	—	—	—	12	4.05	0.189	4.75	7.55	4.68	4.11
1	—	—	—	—	—	—	13	4.40	0.484	—	—	—	—
2	4.86	0.201	4.03	1.28	—	—	14	5.21	1.29	5.07	14.8	—	—
3	4.86	0.271	—	—	4.12	0.990	15	5.01	2.84	—	—	4.64	7.67
4	4.79	0.498	3.66	0.865	—	—	16	5.77	3.49	5.45	12.1	4.62	6.25
5	4.53	0.286	—	—	3.83	1.45	17	5.89	2.76	—	—	—	—
6	4.16	0.109	3.56	1.19	3.81	1.74	18	5.44	4.16	4.76	9.34	4.81	4.92
7	3.93	0.0866	—	—	—	—	19	5.82	3.71	—	—	—	—
8	4.03	0.0563	4.07	4.02	4.20	1.71	20	5.85	3.98	4.94	3.21	—	—
9	3.55	0.0702	—	—	4.15	3.52	21	5.41	3.09	—	—	5.15	2.17
10	3.75	0.0857	4.24	4.82	—	—	22	5.31	2.69	5.06	3.05	—	—
11	3.57	0.0690	—	—	4.16	6.00	23	5.07	2.84	—	—	—	—

5.3 相模湾中央点の波浪計による観測

前節において相模湾の入口と湾奥での波浪の特性が明らかにされた。とくに20日 (Ob.2) に観測された波浪の場はうねりと風浪が混在する場で、突風による風浪の発達予想される場であるといえる。よってこの節では Ob.2 に注目して風浪の発達におけるうねりの影響を明らかにしたい。

相模湾の中央点と観測塔で得られたスペクトル分布の比較を行う前に、これらの観測点での水位変動の時系列について調べる。波浪計の時系列は Part I で説明した理由により圧力補正なしのものである。図8は20日 (Ob.2) での記録の一部である。両者の時間のスケールが若干異なるのは、読み取り間隔の相違によるものである。この図から、11頃から吹き始めた南風の影響は両者とも12時から明白に現れていることが分る。図9は相模湾中央点と観測塔ではほぼ同時刻に測定されたデータから求めたスペクトル分布を示している。この図からスペクトル分布の形に関して次のことが言える。

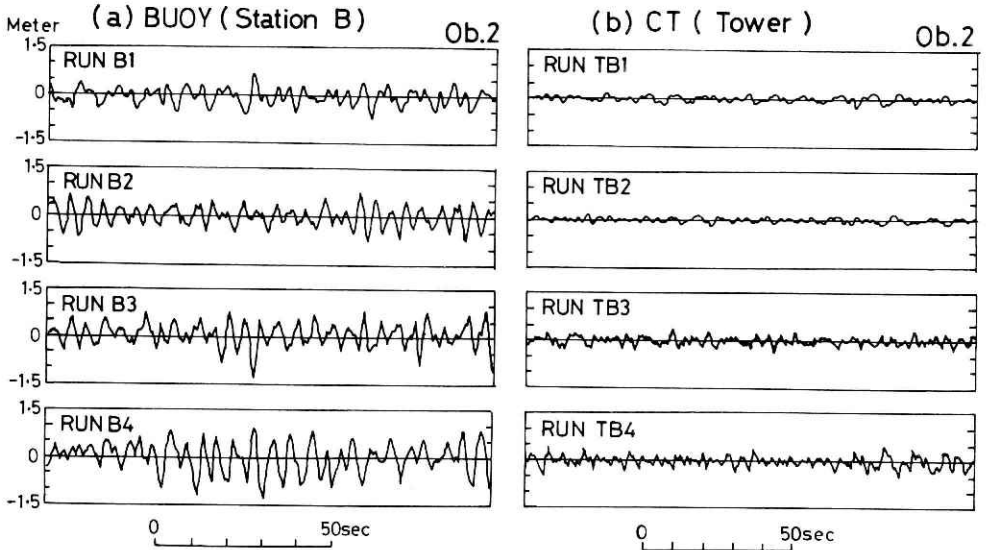


図8 波浪計と観測塔の容量型波高計で得られた波高記録
 Fig. 8 Examples of wave records obtained at St. B and the marine tower.

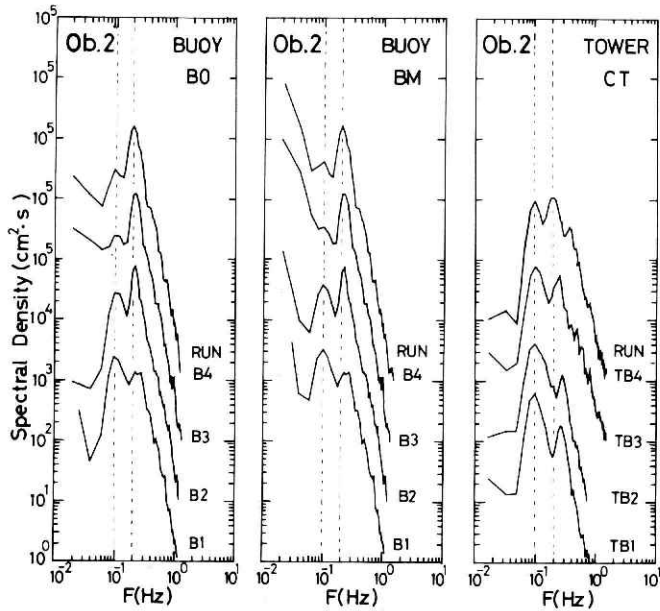


図9 相模湾のSt. Bと平塚沖でのパワー・スペクトル分布. St. Bの分布は波浪計で得られたもので、B0、BMは図5と同じ意味をもつ。
 Fig. 9 Comparison between the energy spectra observed by the wave meter (B0, BM), at St. B and by the capacitance type wave gauge (CT) at the marine tower. B0 and BM are the same symbols as used in Fig. 5.

(1) 両者のスペクトル分布 (BMとCT)は予想したよううねりと風浪の2つのピークをもつ分布となった。波浪計で測定された風浪の高周波領域の分布はPart Iの分布(図10)と非常に類似しており、周波数 f のマイナス5乗となった。

(2) うねりの分布は両者とも観測期間中ほとんど一定の分布であった。このことから、風浪の発達とうねりと独立に発達し、そのピーク周波数はうねりの周波数の2倍の値まで小さくなった。

(3) 波浪計のスペクトル分布B0(圧力補正なし)とBM(圧力補正あり)の比較から、周波数 $0.05 < f \leq 1.0$ の範囲で信頼のあるスペクトル分布が得られていることが分る。このことは第5.1節で述べたことと一致している。

図10は上記の(2)のことをさらに詳しく調べるために、図9のスペクトル分布をスペクトルピーク波の特性(ピーク周波数とその平均エネルギー密度)でパラメータ化したものである。この図は図9の1時間おきの結果のほかに、その間の10分間おきの結果をも含んでいる。これらの結果の数値は表2に示した。図10より上記の(2)のことがより明白に示された。すなわち、相模湾中央海域と観測塔付近では風浪の発達率は異なるが、次の点はともに成立する。風浪はその周波数がうねりの周波数の2倍値に減少するまで発達したが、うねりはその間は

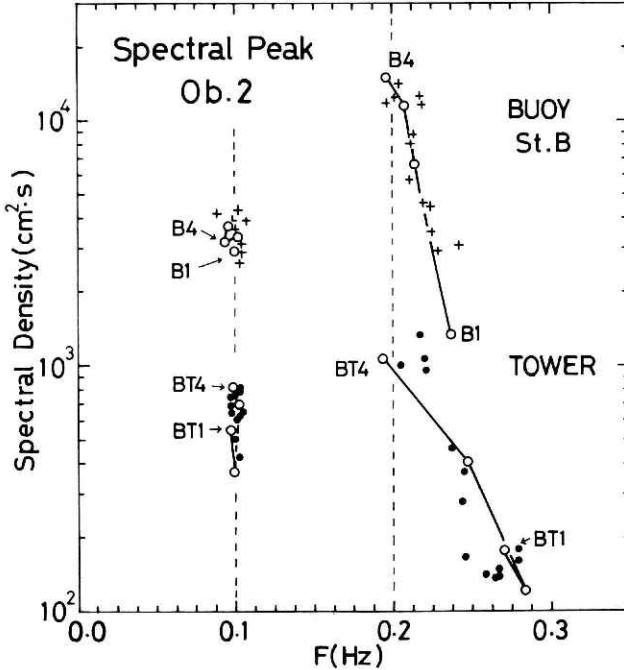


図10 相模湾のSt. Bと平塚沖でのスペクトルピーク波の特性
 Fig. 10 Behavior of characteristics of spectral peak waves off Hiratsuka (the marine tower) and at St. B in the center of Sagami bay.

とんど発達も減衰もしなかったことである。この節の最初で述べたこと——風浪の発達におけるうねりの影響を明らかにすることは、今回の観測では不十分であると言える。なぜなら観測された風浪はうねりと一体化するまで発達しなかったからである。これについては次の章で議論する。

図10でもう一つ注目したいことは、うねりの湾中央点と平塚間の減衰率である。この図から、平塚沖での周期10秒のうねりは相模湾中央点に比べて20%に減少していることが分る。

図11はPart I の図15の下図に対応するもので、Part I のデータを観測塔からの距離に対して再プロットしたものである。今回の減衰率はこの図の結果とよく一致している。

Ob.1 (19日) では周期8秒のうねりが観測された。この周期のうねりについても上述した減衰率を求めた。それによると平均35%となった。このことから、うねりの減衰率はその周期によって異なることが明らかにされた。このことはうねりの分散効果や角伝搬効果よりもむしろ平塚沖付近の海底の摩擦の影響によるものと推測される。

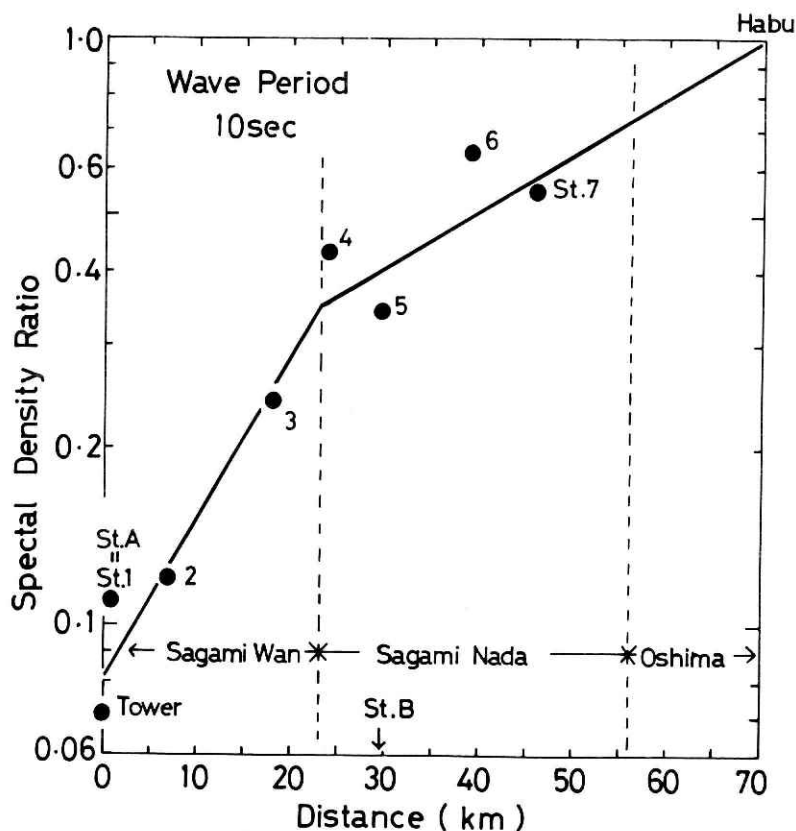


図11 Part I で観測された周期10秒のうねりのスペクトル密度の減衰率
Fig. 11 Attenuation rate of energy density of swell observed in Part I.

相模湾の波浪特性Ⅱ—徳田・渡部・江口

表2 相模湾のSt.Bと平塚沖(観測塔)での波浪の特性

Table 2 Characteristics of ocean waves off Hiratsuka (the marine tower) and at St. B in Sagami Bay

(a) 1981年11月19日の観測結果

No.	波 浪 計				容量型波高計 (観測塔)				うねりのエネルギーの比 $\bar{\phi}_{TS}/\bar{\phi}_{BS}$
	1981年11月19日		うねりの特性		1981年11月19日		うねりの特性		
	観測時刻	RUN番号	ピーク周波数 Hz	$\bar{\phi}_{BS}$ $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	観測時刻	RUN番号	ピーク周波数 Hz	$\bar{\phi}_{TS}$ $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	
1	10:40		0.125	1.42	10:43		0.127	0.583	0.411
2	10:50	CAL 1	0.117	1.33	10:53	CAL 1	0.113	0.515	0.387
3	11:00		0.128	1.43	11:03		0.105	0.587	0.410
4	12:20		0.122	2.43	12:23		0.132	0.719	0.296
5	12:30		0.129	1.72	12:33		0.127	0.993	0.577
6	12:40		0.119	3.14	12:43		0.131	0.920	0.293
7	12:50		0.121	2.57	12:53		0.128	0.742	0.287
8	13:00		0.122	2.10	13:03		0.130	1.281	0.610
9	13:10		0.120	3.33	13:13		0.134	0.773	0.232
10	13:20		0.122	2.31	13:23		0.125	0.973	0.421
11	13:30		0.107	2.40	13:33		0.145	0.650	0.271
12	13:40		0.120	3.66	13:43		0.119	0.552	0.151
13	15:10		0.119	1.77	15:10		0.125	0.686	0.388
14	15:20	CAL 2	0.121	1.40	15:20	CAL 2	0.119	0.838	0.599

(b) 1981年11月20日の観測結果

No.	波 浪 計						容量型波高計 (観測塔)				うねりのエネルギーの比 $\bar{\phi}_{TS}/\bar{\phi}_{BS}$		
	1981年11月20日		うねりの特性		風浪の特性		1981年11月20日		うねりの特性				
	観測時刻	RUN番号	ピーク周波数 Hz	$\bar{\phi}_{BS}$ $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	ピーク周波数 Hz	$\bar{\phi}_{BW}$ $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	観測時刻	RUN番号	ピーク周波数 Hz	$\bar{\phi}_{TS}$ $\times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{s}$			
1	8:29		0.096	1.27	0.261	0.305	8:33		0.101	0.465	0.257	0.146	0.366
2	8:39	CAL 1	0.098	0.90	0.278	0.332	8:43	CAL 1	0.096	0.661	0.272	0.174	0.734
3	8:49		0.093	1.21	0.274	0.200	8:53		0.094	0.567	0.268	0.127	0.469
4	10:07	B 1	0.099	2.91	0.236	1.33	10:03	BT1	0.098	0.540	0.270	0.176	0.186
5	10:17		0.104	3.14	0.243	3.11	10:13		0.100	0.776	0.247	0.166	0.247
6	10:27		0.102	3.01	0.229	2.95	10:23		0.098	0.744	0.268	0.178	0.247
7	10:37		0.102	2.60	0.225	3.52	10:33		0.105	0.686	0.265	0.135	0.264
8	10:47		0.102	2.61	0.224	4.49	10:43		0.105	0.651	0.279	0.158	0.249
9	10:57		0.104	2.92	0.220	4.57	10:53		0.102	0.619	0.267	0.138	0.212
10	11:07	B 2	0.101	3.37	0.214	6.63	11:03	BT2	0.099	0.367	0.284	0.119	0.109
11	11:17		0.103	4.33	0.211	5.65	11:13		0.098	0.681	0.267	0.148	0.157
12	11:27		0.101	3.15	0.212	8.79	11:23		0.101	0.502	0.259	0.142	0.159
13	11:37		0.100	3.58	0.219	11.53	11:33		0.098	0.642	0.279	0.180	0.179
14	11:47		0.102	4.31	0.211	8.03	11:43		0.105	0.418	0.244	0.278	0.097
15	11:57		0.101	3.19	0.217	12.64	11:53		0.096	0.630	0.245	0.366	0.197
16	12:07	B 3	0.093	3.23	0.208	11.60	12:03	BT3	0.102	0.703	0.248	0.505	0.218
17	12:17		0.098	3.86	0.204	13.90	12:13		0.102	0.595	0.233	0.464	0.154
18	12:27		0.108	3.91	0.198	14.06	12:23		0.100	0.758	0.221	0.958	0.194
19	12:37		0.102	3.22	0.202	12.56	12:33		0.105	0.698	0.220	1.070	0.217
20	12:47		0.089	4.15	0.196	15.64	12:43		0.103	0.821	0.217	1.327	0.198
21	12:57		0.102	3.35	0.197	11.70	12:53		0.098	0.749	0.205	0.994	0.224
22	13:07	B 4	0.095	3.70	0.197	14.70	13:03	BT4	0.099	0.814	0.194	1.039	0.220
23	13:17		0.102	3.31	0.190	19.29	13:13		0.096	0.659	0.202	1.417	0.199
24	13:27		0.102	3.58	0.194	17.07	13:23		0.103	0.537	0.191	1.211	0.150
25	14:59		0.099	2.19	0.172	5.70	14:03		0.101	0.813	0.192	2.947	0.371
26	15:09	CAL 2	0.105	1.57	0.178	8.26	14:13	CAL 2	0.099	0.495	0.183	3.535	0.315

6. まとめ

本論文で、はじめに波浪の波高と波向を比較的簡単な方法で精度よく測定できる波浪計について議論した。今まで開発された吊り下げ圧力式波浪計について検討した結果、丸太型の吊り下げ圧力式波浪計を提案した。

次に吊り下げ圧力式波浪計による相模湾での波浪観測について議論した。今回の観測は、相模湾中央海域での波浪の時間的発達の特徴を明らかにすることにあつた。うねりと風浪が混在する波浪の場で、突風による風浪の発達が観測された。風浪はその周波数がうねりの周波数の2倍の値に減少するまで発達したが、その間うねりはほとんど発達も減衰もしなかったことであつた。

このような現象は、Hatori, Tokuda and Toba (1981)の実験結果と類似している。この実験はあらかじめ造波機で規則波を作っておき、その上に風を吹かせて風波と規則波の発達関係を明らかにしたものである。彼らはこの発達関係を4つの段階にわけて議論した。第一段階は、風からのエネルギーが主に風波だけに入るために、風波の成分だけが発達し、うねりの成分はほとんど発達しない段階である。第二段階は、このように発達した風波の周波数が規則波の周波数の2倍まで小さくなると、規則波が発達し始める段階である。この段階で風波成分のエネルギーが規則波へ伝達される。第三段階は、風からのエネルギーはほとんど規則波に入り、規則波の波高はさらに大きくなる段階である。第三段階まで規則波の周波数は変化しない。第四段階は、発達した規則波が風波の成長曲線を越えてさらに発達すると、ついにはくずれて周波数は低周波に移行する段階である。この段階になると、規則波はその性質を失い、完全な風波となる。すなわち2つのスペクトルピークをもった場は一つのスペクトルピークを有する純粋な風波の場となる。以上が実験室の規則波のある時の風波の発達過程である。規則波をうねりと見なすと、今回の相模湾中央海域及び観測塔で得られた波浪の発達状況は実験室の第1段階に対応していると言える。

最後に、今後の課題として次のことが上げられる。

(1) 観測の回数を増加して、うねりがある時の風浪の発達状況をさらに明らかにし、実験室の場合と比較すること。

(2) 相模湾へ入射する外洋の波浪として、石廊崎方面からのものと波浮方面からのものが考えられる。このために大島・平塚間ばかりでなく、それと直角方向——例えば三浦三崎・真鶴間をも観測する必要がある。

7. 謝 辞

波浪スペクトル分布の資料の提供に関して、波浮港沖については港湾技術研究所水工部海象観測研究室の広瀬宗一主任研究官に、右廊崎については静岡地方気象台の新津美晴氏にお世話を頂きました。大島の風の資料については大島測候所鈴木茂男所長にお世話を頂きました。また小型船による観測作業に関して、船宿の庄治郎丸にご協力頂きました。ここに合せて感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Hatori, M., M. Tokuda and Y. Toba (1981): Experimental study on strong interaction between regular waves and wind waves—I. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **37**, 111—119.
- 2) 細田龍介・前田久明・外山嵩・田口賢士(1977): 船舶設計における波浪資料の利用に関する検討. 関西造船協会誌, 第163号, 7—16.
- 3) 川鍋安次(1967): 吊り下げ式波浪計について. *海の気象* **12**, 6, 8—12.
- 4) 川鍋安次・田口賢士(1968): 吊り下げ式波浪計で観測した3層の同時記録について. *海と空*, **43**, 113—124.
- 5) 光易恒ら(1973): 海洋波の計測法の開発研究(1). 九州大学応用力学研究所報, 第39号, 105—181.
- 6) 田口賢士・外山嵩(1966): 内海における航路付近の波浪について(1). 造船協会論文集, 第120号, 87—98.
- 7) 徳田正幸・内藤玄一・都司嘉宜・渡部勲(1981): 圧力式波浪計による相模湾での波浪観測. 国立防災科学技術センター研究報告, 第26号, 133—154.
- 8) 徳田正幸・江口純弘(1982): 圧力式ジンバル波浪計の開発研究. 国立防災科学技術センター研究報告, 第27号, 247—278.
- 9) 谷口中(1958): 吊り下げ型波浪計について. 西部造船会会報, **16**, 31—43.

(1983年6月9日 原稿受理)