

三本の波高計センサーによる波浪の方向特性の算出法—II.*

観測塔で観測されたうねりの方向特性

徳田正幸

国立防災科学技術センター平塚支所

A new method for measuring the directional wave spectrum of wind wave using an array of three wave detectors—II

By

Masayuki Tokuda

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

Abstract

It was indicated in part I of this series that the individual wave method was the most successful of the methods for the estimation of the two-dimensional characteristics of laboratory wind waves from a three-detector array.

This new method was applied to swell observed at the marine tower. The following facts were indicated:

- (I) The individual wave method was also useful for swell.
- (II) The directional spectrum of swell was virtually equivalent to that of the laboratory wind waves.

1. はじめに

本論文の I (徳田, 1982. これ以後 Part I と呼ぶ) で, 三本の波高計センサーによる波浪の方向特性に関する算出法を, 小型風洞水槽実験の風波のデータを使って, 成分波法と個々波法から検討した. 成分波法として, Mobarek 法をもとに Modified Mobarek 法を開発した. それによると, 成分波の主要進行方位角に関して信頼性の高い結果を示すが, 方向分布関数については定量的に期待できる結果を示さないことであった.

*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研究—波浪・長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

一方個々波法は Tokuda and Toba (1981, 1982) の方法を拡張し、より完全な方向特性を求めるものとなった。この方法は実際の水面の起伏の動きにもとづくために、成分波法で示される imaginary peak をもたらさないものである。結論として次のことが示された。風波の方向分布関数の特性を最小数の波高計センサーによるデータで解析する時、個々波法はもっとも有効的な解析法の一つと言える。

個々波法を適用する時もっとも注意することは、解析する波の場は常に一つのスペクトルピークしか有しない場であることである。例えば、局所的な風によって発達した風浪とうねりが混在する波浪の場は二つのスペクトルピークを有することになるので、個々波法によって直接的に解析することはできない。両者を適当なフィルターを用いて分離し、各々に個々波法を適用しなければならない。

今まで個々波法に適用されたデータはすべて実験室の風波のものであった。この方法を海の波浪のデータにも適用し、その特性を明らかにする必要がある。今回は第一段階としてもっとも単純なうねりの場について議論する。以上のことから、本論文で次のことを明らかにしたい。第一に、観測塔における波浪の方向特性に関する観測法を明らかにする。第二に、この方法を用いてうねりの観測を行い、得られたデータに個々波法を適用してうねりの場の特性を明らかにするとともに、個々波法の有効性を調べる。

2. 観測法

波長 20 m から 100 m の波浪の方向特性を観測するために、三本のセンサーからなるアレイ方式波高計を海上の観測塔に設置した。この計測システムについて、第一に波高計の特性、第二に波高計の構造、第三に波高計の設置そして第四にデータ収録の 4 項目にわけて議論する。

2.1 波高計の特性

観測塔で使用する波高計は小さい波高の波から高い波高の波まで測定しなければならない。このために、波高計の入出力特性は幅広い範囲において線形性が成立することが必要となる。また求めたい海象条件で長時間の波浪観測を実行するために、波高計の特性は安定性の良いものでなくてはならない。このような条件から、使用する波高計は外洋型容量式となる。用いた外洋型容量式波高計は次のような性能であった。

- | | |
|-------------|---------------------|
| (1) 測定範囲 | ±5 m |
| (2) 精度 | フルスケールに対して 1.5% の誤差 |
| (3) 測定周波数範囲 | 0~5 Hz |
| (4) 出力 | ±5 V |

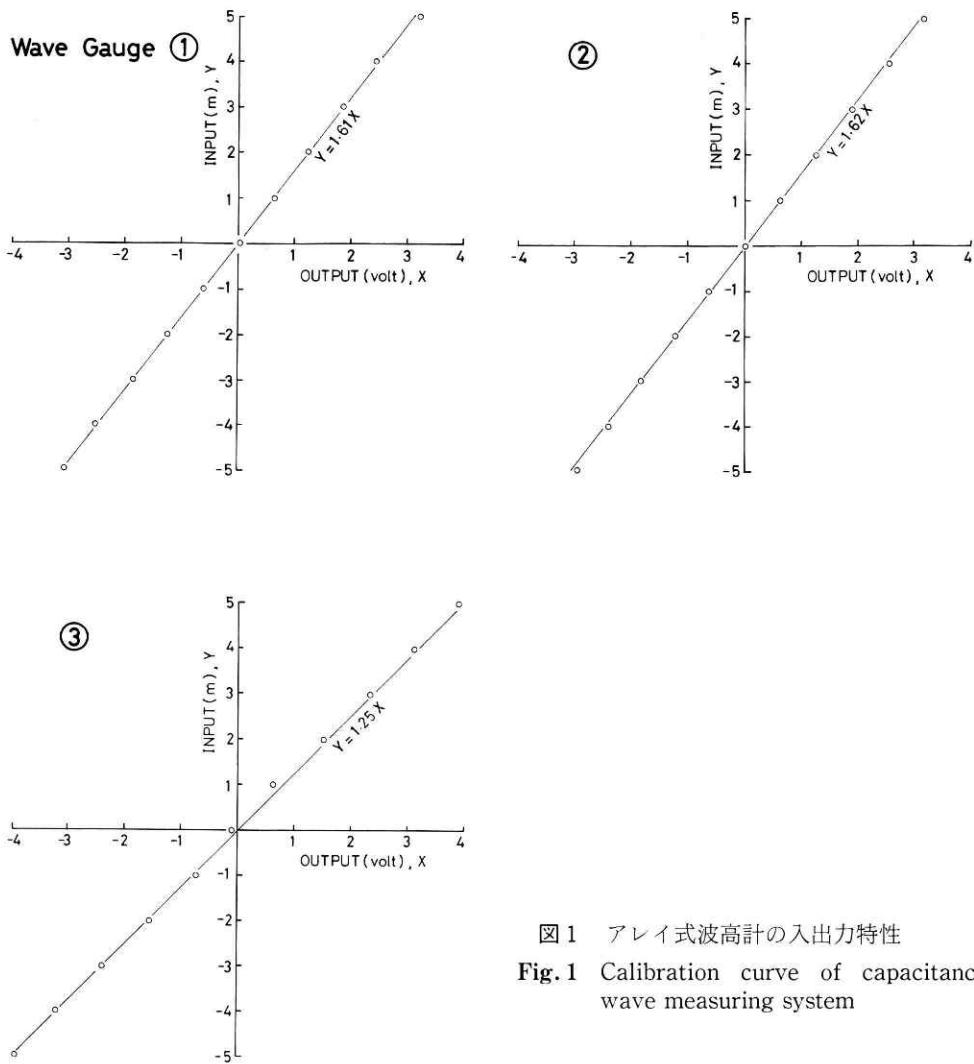


図1 アレイ式波高計の入出力特性
Fig.1 Calibration curve of capacitance wave measuring system

(1)により、測定できる最大波高は 10 m となる。図 1 は用いた三本の波高計センサーの入出力特性曲線である。これは後述する方法で観測塔で測定されたものである。この図から示されるように、波高計の入出力特性の線形性は ± 5 m の領域まで存在した。

(2)について、精度は主として入出力特性の線形性とセンサーの水切れによって決まる。前者は図 1 で示した。後者についてはセンサーの材質と太さが問題となる。センサーの材質として次のようなものを用いた。センサーの被覆絶縁材料として、カーボンブラックを含んだポリエチレン性のものを使用した。この材料は従来の塩化ビニールやテフロン等に比べて、水位変化時の水の表面張力による水切れ特性が優れている。このために精度はよくなる。一

方太さについては、水切れを良くするために $4\text{ mm}\phi$ とした。このように細くできたのはセンサーの芯線材料としてステンレス線を用いたためである。またセンサーの取り扱いを容易にするために、このステンレス線は撚線になっている。以上のことにより、精度は全体としてフルスケールの約 1.5% と推定される。

(3) について、これは電気回路において高い搬送波周波数 (120 kHz) を使用しているために、主にセンサーの水切れによって決まる。(2) で述べたように、使用するセンサーは従来のものに比べて分解能と応答性が優れている。よって信頼できる測定周波数領域は $0\sim 5\text{ Hz}$ となった。

(4) について、 $\pm 5\text{ V}$ としたのはアナログ入力の電圧範囲が $\pm 5\text{ V}$ であったためである。

上記の性能の他に波高計の特性の安定性がある。これは主として野外におけるセンサーの材質の耐久性にある。上述した被覆絶縁材料は、従来のものに比べて耐塩水性と耐太陽光線性能が優れており、海上での長期の観測に適している。

2.2 波高計の構造

容量式波高計は、よく知られているように、海水とセンサーの芯線との間に被覆絶縁物が入った一種のコンデンサーを形成し、電気容量が海面の昇降に比例して変化する機構でもって水位変動を測定するものである。用いた外洋型容量式波高計は、センサーの材質と大きさ

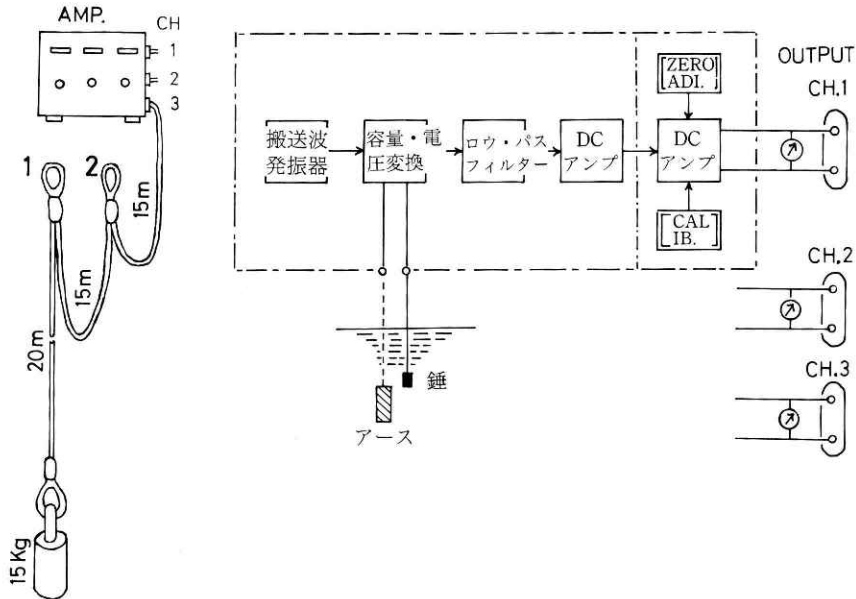


図 2 センサーワイヤの構造と波高計のブロックダイアグラム。1 は第一シンプル、2 は第二シンプルとする。

Fig. 2 Sketch of the sensor and block diagram of the wave gauge. The 1 and 2 denote the first thimble and the second thimble, respectively.

をのぞけば、本質的に稲田・渡部（1969）のものと同じである。彼らのセンサーの被覆絶縁材料は塩化ビニール樹脂で、その長さは約6 mにすぎなかった。彼らのセンサーの構造では、センサーと増幅器を結合している同軸ケーブルが高い波高の波浪によって海水に浸る可能性が大きい。よって高い波高の波は正確に測定ができない。渡部・藤縄（1979）は、観測塔における波浪の定時観測において、センサーを十分に長くすることによってこの点を改善した。図2の左図に示した波高計センサーは彼らのものを基にして、さらにセンサーの設置及び撤去そして検定の作業を容易にできるように工夫された。それは次の項目から構成される。

- | | |
|-------------|---------------------------|
| (1) 錘 | 15 kg |
| (2) センサーワイヤ | 3本, 4 mm ϕ で長さ 35 m |
| (3) 同軸ケーブル | 3本, 10 mm ϕ で長さ 35 m |
| (4) 増幅器 | 3チャンネル |

(1)について、波浪によるセンサーのワイヤの横揺れ振動を防止するためにできるだけ重い方がよいが、人力でワイヤを上下させることができる重さが望ましい。なぜなら、ワイヤにつく海藻類等の定期的な掃除や波高計の入出力特性の検定の際、人力でワイヤを上下させねばならないためである。このようなことから、上記の重さを決定した。センサーを固定しないで錘をつける方法は、たとえ重い錘であっても、非常に大きな波浪によってセンサーは振り子のように振動する欠点をもつ。しかし海上の塔で10 mの長さのセンサーの両端を固定し、かつ高波にも耐えるようにするために、非常に大きくてかつ丈夫な架台が必要である。また波高計の入出力特性を現場で調べるために、架台は上下に可動できる構造をもつことが必要となる。このような架台を観測塔に設置することは非常に困難なことである。錘を重くしセンサーの太さを十分に細くすれば、ほとんどの波浪に対してセンサーは振動せず、精度よく測定ができると考える。よって図2の左図に示された波高計センサーを採用した。

(2)について、図2の左図において、センサーワイヤは錘から第二シンプルまでとなる。このワイヤは芯線がステンレス燃線であるために、100 kgの張力に耐えるものである。センサーの長さが35 mで十分に長い。このセンサーの構造は第2・3節で述べるように、非常に高い波高の波浪に対しても観測できるものである。

(3)について、同軸ケーブルはセンサーワイヤ（第二シンプル）と増幅器をつなぐものである。同軸ケーブルにしたのは、ノイズを受けにくくするためである。

(4)について、増幅器の回路のブロックダイアグラムは、図2の右図に示されている。この回路は、非常に高い周波数の搬送波をもつことによって、復調回路の時定数が小さなり、高い応答性を有するものとなる。

2.3 波高計の設置

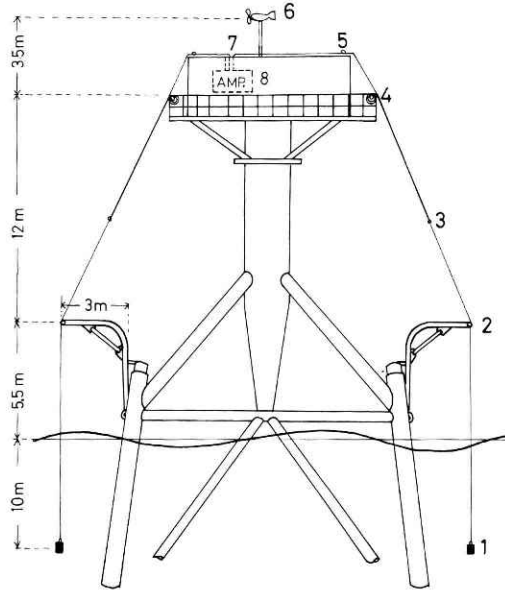


図3 アレイ式波高計の設置情況 1. 錘 2. センサーワイヤ取付け架台 3. 第一シンプル 4. 手摺 5. 第二シンプル 6. エアロベソ風向風速計 7. 同軸ケーブルの室内への入口 8. 増幅器 (観測室内)

Fig. 3 Sketch of capacitance wave measuring system. 1. weight 2. frame of wave gauge 3. the first thimble 4. guardrail 5. the second thimble 6. anemometer 7. inlet for signal cable 8. amplifier of wave gauge.

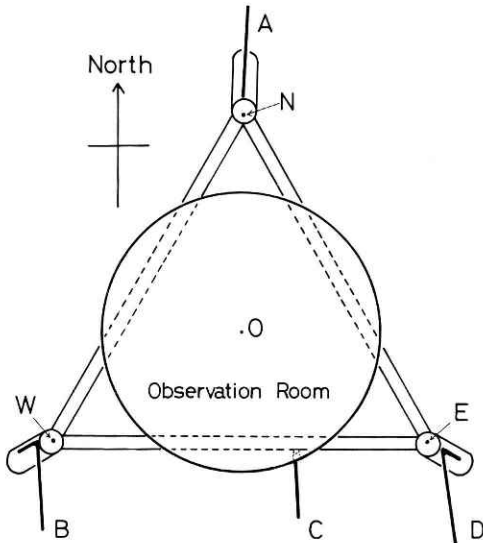


図4 観測室から見た波高計の架台の配置図. 点Oが観測塔の中心, 点N, E, Wはそれぞれ北, 西そして東に位置する観測塔の支柱の中心を示す.

Fig. 4 Schematic horizontal representation of the marine tower and the positions of wave detectors. Point O is the center of the marine tower. Points N, E and W are the centers of the three members.



写真1 観測塔でのアレイ式波高計センサーの架台

Photo.1 Distant view of the marine observation tower and the frame of the three-detector array



写真2 北側の架台 A に設置されたセンサーワイヤの情況

Photo.2 Sensor of wave gauge at the position A

上述した波高計によるアレイ方式波高計を平塚沖の観測塔に設置した。観測塔は平塚の海岸線より 1 km (北緯 $35^{\circ}18'07''9$ 東経 $139^{\circ}20'56''5$) にある。そこでの水深は約 20 m である。波高計の設置図は図 3 に示した。

(1) センサーワイヤの取付け架台

アレイ方式波高計センサーの設置のために、4 台のセンサーワイヤの取付け架台を製作した。波高計 3 チャンネルに対して 4 台の架台を設けた理由は、4 つの架台 (測定点) のうち 3 つの架台 (測定点) を選択することによって、観測したい波浪に対してできるだけ最適な波高計センサーの配置を実現するためである。これらの架台を観測塔の支柱に取り付けた。取付け架台は一般構造用炭素鋼管を加工したもので、高さ 4.2 m、張出し 3.0 m の大きさとなった。この架台の高さは図 3 に示したように、波高 10 m までの波浪を測定できるように決定した。また 3 m の張出しは観測塔の支柱 (80 cm ϕ) による波の反射の影響が小さくなる距離 (支柱の直径の約 3 倍) から決められた。架台の頭には滑車を取り付けてあり、その高さは平均水面から約 5.5 m となった。滑車は海水等に腐食しないナイロン性のものでできており、ワイヤ掃除や検定の際ワイヤの上下の移動を滑らかにするためのものである。図 4 は観測塔の観測室から見た 4 台の取付け架台の位置を示す。南側の支柱の中心 W と E を結んだ

線はほぼ東西の方向になっている。塔の南側は沖合に面しており、大島までの距離は約 55 km である。

(2) 波高計センサーの設置手順

設置手順を図 3 を使って説明する。はじめに同軸ケーブルを観測室の屋根を通じて室内に入れ、増幅器に接続する。次にセンサーワイヤの第一シンプルに長さ約 15 m 太さ 10 mmφ のナイロンロープをつけ、ロープの他端を手摺に固定する。ワイヤを架台の先端の滑車に通す。最後にワイヤの下端に錘をつけて海に静かに投下する。上述した手順に従って、三本の波高計センサーをそれぞれの架台に設置する。写真 1 は図 3 で示した波高計センサーワイヤの取付け架台を、写真 2 は北側の架台 A に設置したセンサーワイヤの情况进行を示す。

(3) センサーワイヤの位置の測定法

上述したようにアレイ式波高計が塔に設置されたので、波高計のセンサーワイヤの位置を正確に測定しておかねばならない。海上でワイヤの位置を正確に求めることは陸上の場合と比べて容易でない。使用した方法は比較的簡単な写真測量法である。この方法を図 4 を使って示すことにする。必要なことはワイヤの水平の位置だけなので、座標軸は原点を塔の中心点 O にとり、北方向に y 軸、東方向に x 軸となる二次元の座標系でよい。あらかじめ知っておかねばならない情報は、基準となる支柱の中心点 N, W, E の位置である。これらの位置は次のようになった。

$$N (0.0, 7.0), E (6.1, -3.5), W (6.1, -3.5)$$

ここで単位はメートルである。写真は塔から約 10 m~20 m 離れたところに船を浮べて取ったものである。位置が分っている三本の塔の支柱が写っている写真からカメラの位置が計算

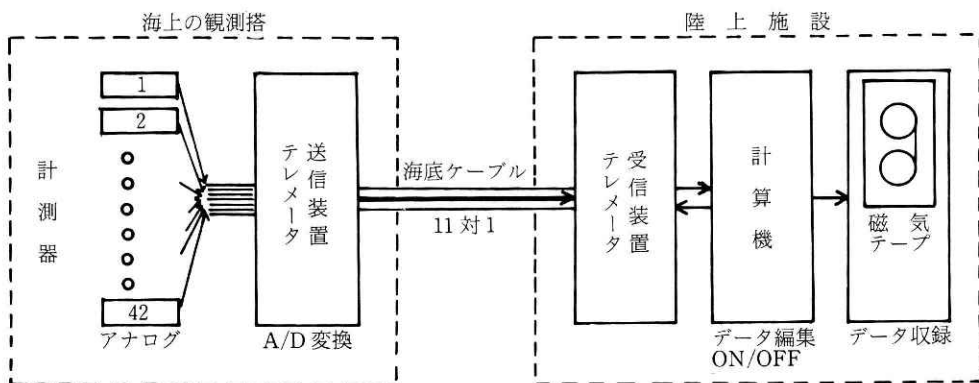


図 5 テレメータ装置によるデータ収録のブロックダイアグラム

Fig. 5 Block diagram of the telemetric system

される。カメラの位置が分ればワイヤの位置を知ることができる。具体的には、写真に写っている水平線を基準として位置を決めた。水平面上の位置を求めるために、支柱の中心点 **E**, **W**, **N** と三本のワイヤおよび水平線が判読できる写真を2方向以上の角度から取る必要がある。図4は5枚の写真をもとにワイヤの位置を求めた結果から描かれたものである。その場合5枚の写真の組合せから多くの解が得られた。これらの中から最も妥当な位置を得るために適当な加重平均を行った。精度としては約±5 cm であると考えられる。

2.4 データの収録

観測塔のアレイ方式波高計で得られたデータがどのように収録されるかを述べる。データは海底ケーブルを通じて塔から陸上の平塚支所の電子計算機へと伝送され、磁気テープに収録される。計算機を通じて、データのサンプリングの方法ばかりでなく、データ収録の ON/OFF を操作することができる。後者のことはとくに強風時の波浪観測において重要な意味をもつ。なぜならば1 km 沖にある観測塔への通船は、強風時にはほとんど欠航するからである。これらの操作はテレメータ送受信装置を通じて行われる。この装置によるデータ収録のブロックダイヤグラムは図5に示した。これは海上の観測塔内の計測器から観測データをアナログ信号として入力し、デジタル記号へ変換して伝送するものである。装置は塔内に設置された送信装置と陸上施設内にある受信装置から成り、伝送路は海底に敷設された11対の通信ケーブルである。受信装置の出力は計算機オンラインシステムに接続されている。波高計の出力をこのテレメータ送信装置に入力しておけば、波高のデータはつねに陸上施設にあるテレメータ受信装置のところまで伝送されていることになる。よって求める気象・海象条件に対して計算機を通じて、いつでもデータを磁気テープに収録することができる。次にアレイ方式波高計のデータを読み取る時の同時性について述べる。上記のテレメータ装置によるデータ収録において、3チャンネルのデータの同時性の誤差は最大で約6.5 ms である。波浪のデータの読み取り間隔時間を0.3秒とすると、3チャンネルのデータの同時性の誤差は約2%となる。

3. うねりの方向特性に関する観測

前節で、アレイ方式波高計の観測塔への設置と陸上の計算機による観測データの収録のシステムが示された。これによって二次元の波浪観測体制が確立された。うねりの観測を述べる前に、波高計の入出力特性の観測について議論する。

3.1 波高計入出力特性の観測

入出力特性観測は徴風時の穏やかな海面の日に実行された。三本の波高計センサーは、本観測(図3)と同じように設置された。得られた結果は図1に示されている。この観測は次のような手順で行った。各々のセンサーの零点を平均水面のレベルに合わせた後、5 m までセン

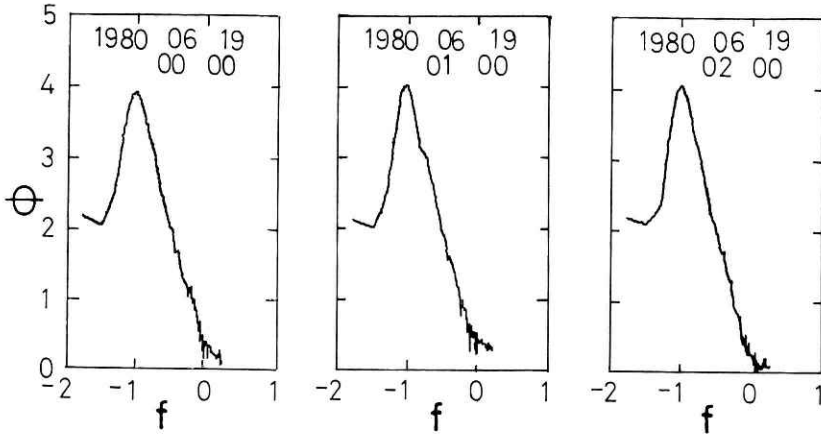


図6 センサー③で観測されたうねりのパワースペクトル分布の時間的变化
x軸とy軸の数字は常用対数を示す。

Fig. 6 Power spectra of sea surface displacement from 0 to 3 a.m. on June 19th, 1980.

サーウィヤを引き上げておき、検定観測開始とともに1 m ずつワイヤを降しながら水位の出力を測定した。観測時間は一つのレベルごとに1分間とした。出力の計算法は読み取り間隔時間0.3秒で200個(1分間)を読み取り、それからの平均値を求めるものである。平均を行った理由は風浪等の短周期の変動成分を除去するためである。この特性観測は三本のセンサーについて同時に行われ、要した時間は約40分間であった。その間の潮位の変化は10 cm以下で無視できるものであった。容量式波高計や抵抗式波高計の入出力特性観測は、実際の観測場所と同じ場所であつて同じ設置状況で実行することが望ましい。なぜなら、これらの特性は一般に観測場所の電気的な環境に微妙に影響されやすいからである。

3.2 うねりの観測

波高計の入出力特性が観測されたので、うねりの観測ができる。この観測は1980年6月18日から同月20日まで行った。解析したデータは6月19日午前1時から約51分間のものであった。この時刻に観測されたうねりの場は、風が止まってから約19時間後の波浪であった。波浪が純粹のうねりであるかどうかの厳密な判定はむずかしい。観測塔で得られるうねりは経験的に、局所的な風が十分に長い時間にわたって吹かない天候下であつて7.5秒以上長い周期である波浪となる。観測されたうねりは上述した条件を満している。このうねりは大陸からの発達した低気圧が早い速度で日本海からアリューシャン列島へと移動した時の風で発達した風浪からのものである。このようなことから、今後上記の波浪をうねりと呼ぶことにする。観測されたうねりはきわめて定常性の高いものであった。このことは図6に示したパワースペクトル分布の形がほとんど一定であつたことから分る。うねりはPart Iで議論した実験室の風波と類似して、たぶん一次元性の強い波であると考えられる。

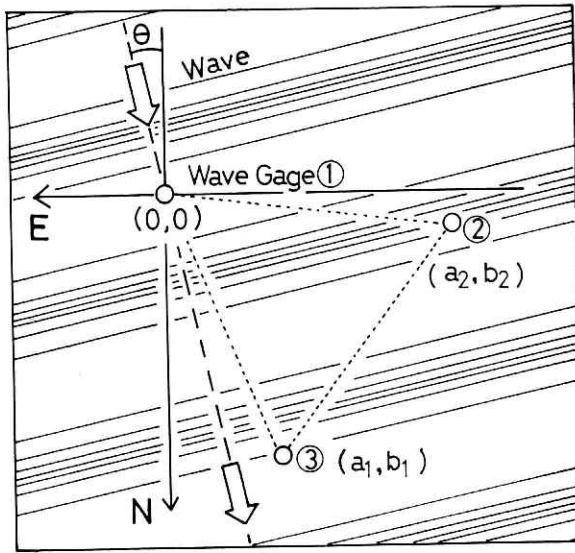


図7 アレイ方式波高計の三本のセンサーの配置図
 $(a_1, b_1) = (-6.7 \text{ m}, 17.5 \text{ m})$, $(a_2, b_2) = (-13.4 \text{ m}, 0.4 \text{ m})$

Fig. 7 Arrangement of three wave detectors

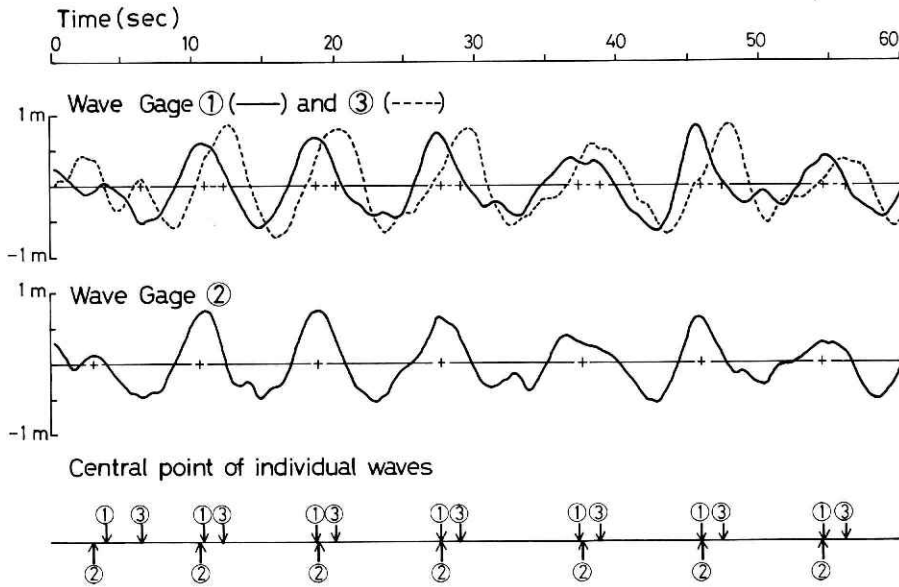


図8 三本の波高計センサーの記録の一部と対応する個々波の関係

Fig. 8 Central point of the corresponding individual waves from the three wave records

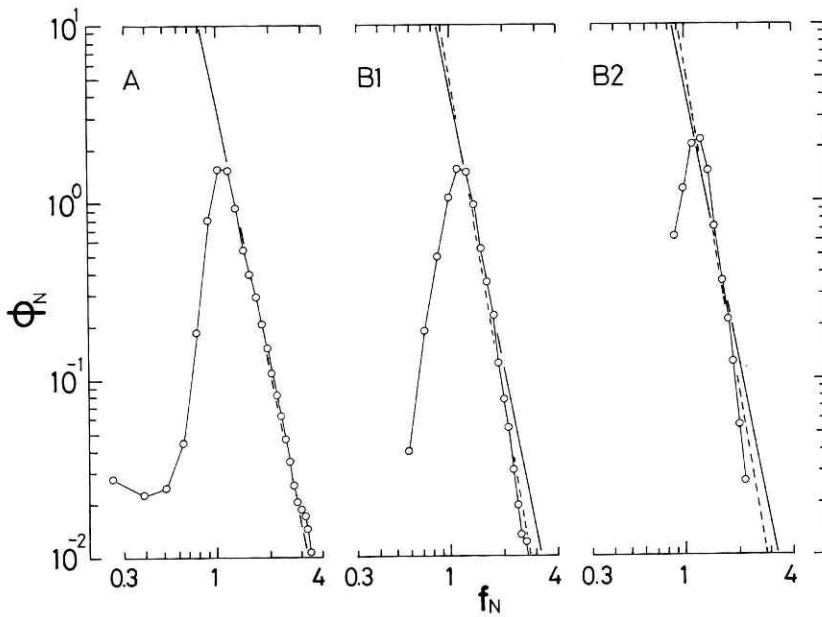


図9 無次元パワースペクトル分布, Aは成分波法, B1とB2は個々波法によるもので, それぞれ Part I の図 11 と同じ意味をもつ. 実録と点線はそれぞれ f_N^{-5} と f_N^{-6} を表す.

Fig. 9 Comparison of normalized energy spectra between the component waves and individual waves for swell. A: traditional energy spectra for the component waves. B1, B2: energy spectra for individual waves. These symbols are the same as those of Fig. 11 of part I. The heavy line and the dotted line represent f_N^{-5} and f_N^{-6} , respectively.

4. うねりの個々波解析の結果

うねりの方向特性の個々波解析は2つの点をのぞいて, Part I で示したものと同じである. 第一は, 読み取り間隔時間である. 実験室の風波では 0.02 秒 (データの長さ 3.4 分間) に対して, うねりは 0.3 秒 (データの長さ約 51.2 分間) である. 第二は三本の波高計センサーの配置である. 実験室の風波に対して Part I の図 1 となり, うねりは図 7 となる. この図により, うねりの進行方位角 θ と二次元位相速度 C は

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{b_2 - b_1 t}{a_2 - a_1 t}\right), \quad t = t_{12}/t_{13} \quad (1)$$

$$C = \left(\frac{b_1 + a_2 \tan \theta}{t_{13}}\right) \cos \theta \quad (2)$$

ここで t , t_{12} , t_{13} は Part I 式 (40), (42) でのものと同じ意味をもつ. 座標 (a_1, b_1) と (a_2, b_2) は, 波高計センサー①を原点とした時のセンサー②と③の位置を示す. 式(1)において a_1

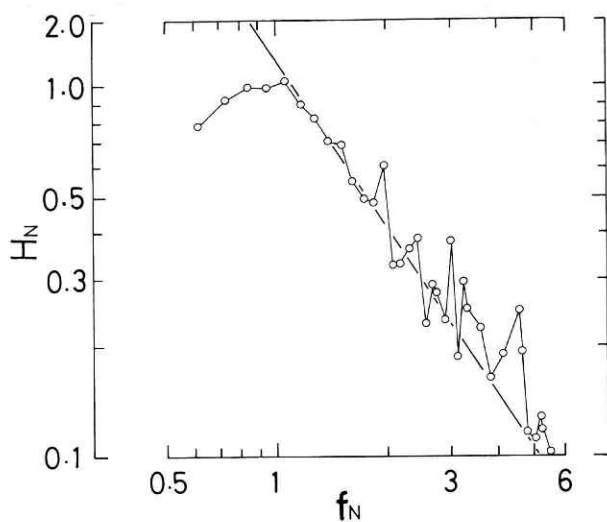


図 10 規格化された 3/2 乗法則. 実線は 3/2 乗法則, 式(4)を表す.

Fig. 10 Normalized wave height. The heavy line indicates Eq. (4)

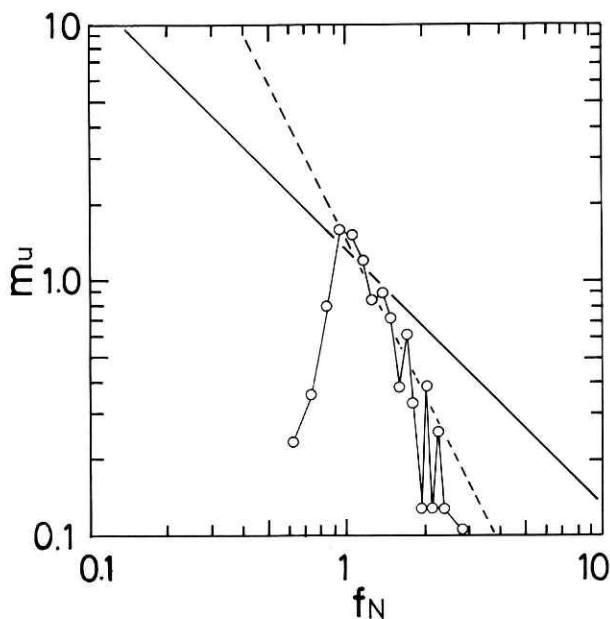


図 11 単位時間・単位周波数帯幅当りの個々波の個数分布. 実線と点線はそれぞれ f_N^{-1} と f_N^{-2} に比例する直線である.

Fig. 11 Number distribution of individual waves. The heavy line and the dotted line represent f_N^{-1} and f_N^{-2} , respectively.

= 0 とすると、この式は Part I の式 (41) と一致する。式(2)も同様に Part I の式(42)と一致する。図 8 はうねりの記録の一部と対応する個々波の中心の関係を示した。この図から分るように、実験室の風波と同様に、3つの観測点のうねりの個々波は波形が保存され、よく対応づけができる。以上のことにより、うねりの個々波解析は実験室の風波の解析と同様にできる。これ以後出てくる記号のうち、特に断らない限り Part I と同じものとする。次にうねりの解析結果を示すことにする。

4.1 パワースペクトルに関する結果

a. 無次元パワースペクトル分布, 図 9

この図より次のことが示される。個々波法による分布は実験室の風波の場合と同様に、主要周波数領域 ($0.7 \leq f_N \leq 1.5$) において成分波法のもとよく一致した。しかしスペクトル分布の形に関しては、うねりの分布はマイナス 5 乗則に近似される。

$$\phi \propto f^{-5} \quad f_N \geq 1 \quad (3)$$

さらに、個々波のスペクトル分布 (B2) は (B1) の分布とあまりよく一致していない。これは主に波高分布において観測塔の方が実験室より一様でなかったことによる。一方成分波のスペクトル分布 (A) において、実験室の風波で観測されたピーク波の高調波による第二ピークはうねりに対してほとんど存在していないことである。これはたぶん波形勾配が小さいことによると推定される。ピーク波の波形勾配の値は、実験室の風波に対して約 0.08 に対して、うねりは約 0.01 であった。

b. 規格化された 3/2 乗法則, 図 10

この図の分布はセンサー①によって得られたものである。うねりの波高分布は実験室の風波と同様にほぼ 3/2 乗法則 (下式) が成立するものとなった。

$$H_N = f_N^{-3/2} \quad (4)$$

c. 単位時間・単位周波数帯幅当たりの個々波の個数分布, 図 11

高周波領域 ($f_N \geq 1$) でパワースペクトル分布 (式(3)) と 3/2 乗法則 (式(4)) から Part I の式(45)を使うと、個数分布 m_u が次のように与えられる。

$$m_u \propto f_N^{-1} \quad (5)$$

図 11 から式(5)と観測値は主要周波数領域ではほぼ一致するが、全体的には f_N^{-2} に比例する直線によく近似される。この分布は規格化されたピークスペクトル分布 $\phi_N \propto f_N^{-6}$ とすると得られるものである。

以上、主要周波数領域におけるパワースペクトル分布に関する結果をまとめると次のようになる。第一に、うねりのパワースペクトル分布に関して個々波法と成分波法の結果を比較

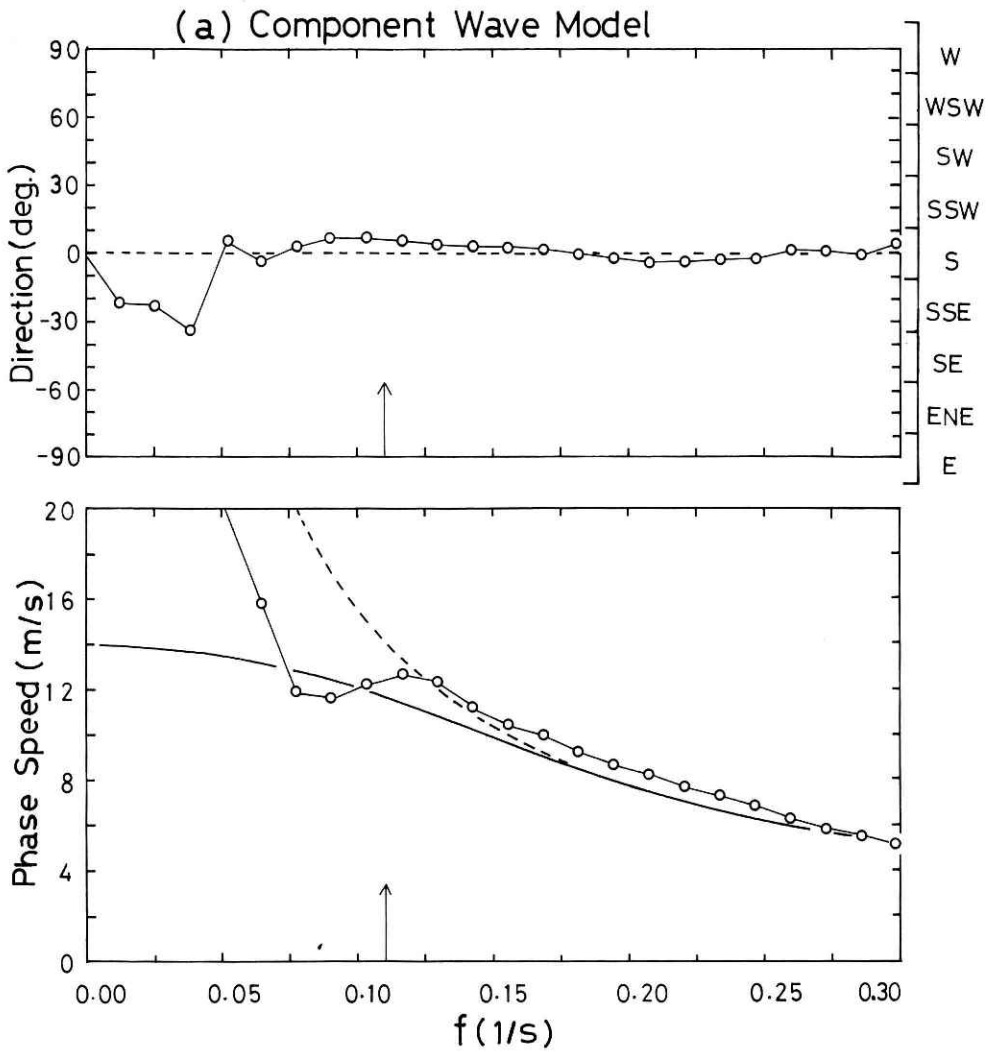


図 12 位相速度分布と主要進行方位角に関して個々波法と成分波法の結果の比較。(a)成分波法。矢印はスペクトルピーク周波数の位置を示す。位相速度分布において、実線と点線はそれぞれ深さ 20 cm と深さ無限大の水の波の理論値を表す。

Fig. 12 Comparison of phase speed and main wave direction between the component waves determined from cross-spectra and the individual waves for swell. Peak frequencies are indicated by arrows. The heavy line and the dotted line indicate in the lower diagram the phase speeds of linear deep water waves and shallow water waves, respectively.(a) the component wave method.

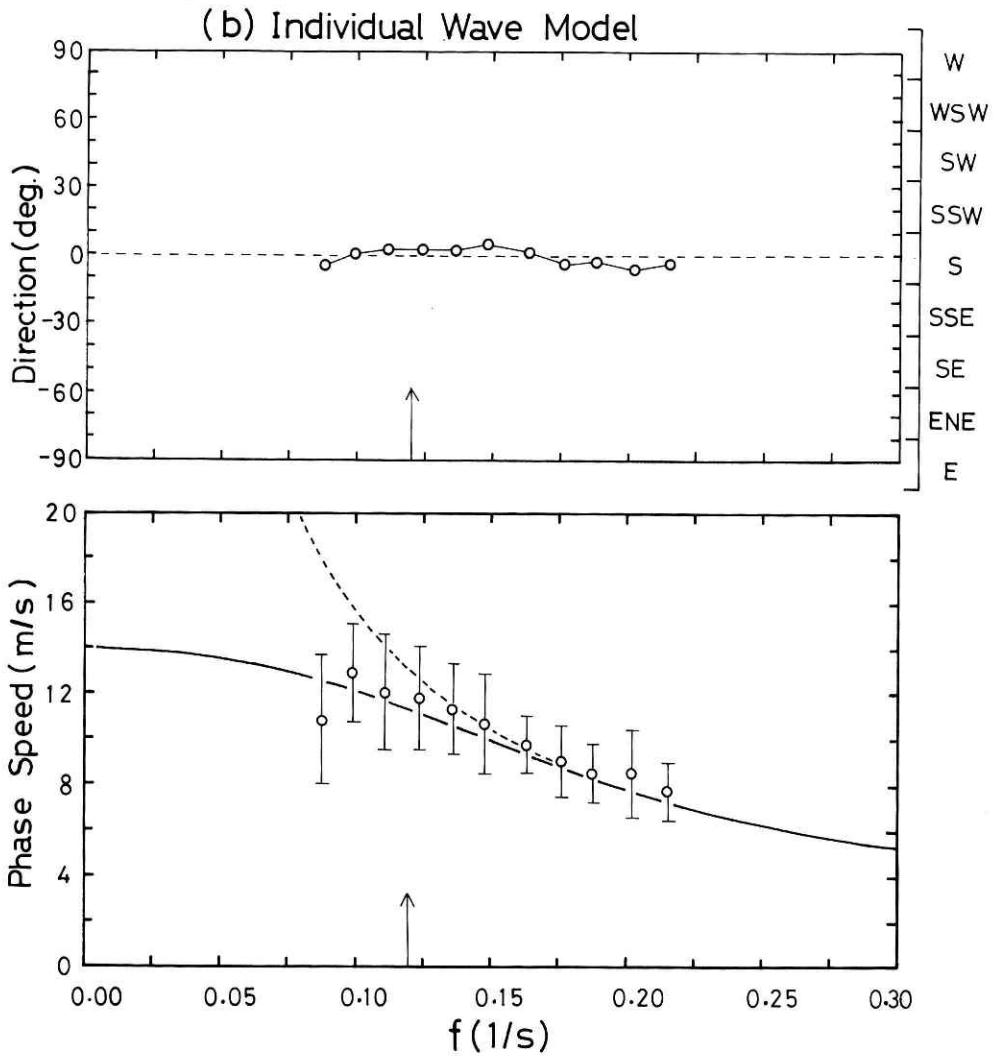


図 12 位相速度分布と主要進行方位角に関して個々波法と成分波法の結果の比較。(b)個々波法、矢印はスペクトルピークの周波数の位置を示す。位相速度分布において、実線と点線はそれぞれ深さ 20 cm と深さ無限大の水の理論値を表す。

Fig. 12 Comparison of phase speed and main wave direction between the component waves determined from cross-spectra and the individual waves for swell. Peak frequencies are indicated by arrows. The heavy line and the dotted line indicate in the lower diagram the phase speeds of linear deep water waves and shallow water waves, respectively. (b) the individual wave method.

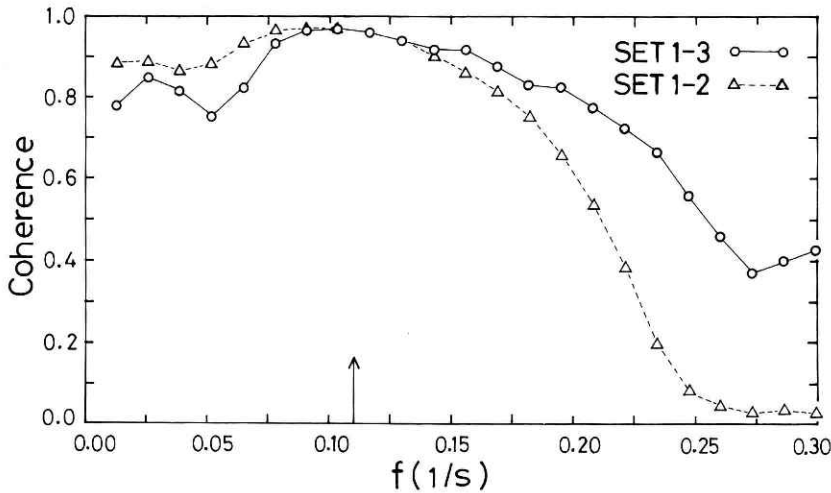


図 13 成分波法によるコヒーレンス分布. 矢印はスペクピーク周波数の位置を示す.

Fig. 13 Coherence of component waves for swell. The arrow indicates the peak frequency.

すると、実験室の風波の場合と同様に両者はよく一致した。第二に、実験室の風波と海のうねりのパワースペクトル分布を比較すると、前者は f_N^{-9} に対して後者は f_N^{-5} となった。この相違は個々波の個数分布の相違によるものと言える。第三に、うねりの波高分布は実験室の風波の場合と同様に $3/2$ 乗法則に従う。この物理的な根拠の解明は今後の課題となる。

4.2 方向特性に関する結果

a. 位相速度分布と主要進行方位角分布, 図 11

これらの分布に関して、個々波法と成分波法の比較は図 12 に示された。これによると、Part I の図 14 で述べられた実験室の風波の結果のうち、第一から第三までのことはうねりの場においても成立することである。

うねりの主要進行方位角はほとんど真南となったが、これは目視観測と完全に一致した。実測されたうねりの位相速度は、深さ $h=20$ m (観測塔の水深) の水の波の線形理論値とよく一致した。このことは成分波の結果よりも個々波の結果に明確に見られる。線形理論によれば位相速度 C はよく知られているように下式となる。

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh}, \quad h = 20 \text{ m} \quad (6)$$

ここで g と k はそれぞれ重力加速度とうねりの波数を示す。実験室の風波の位相速度は、Part I の図 14 に示されているように線形理論と一致しなかった。それは卓越した吹送流が存在するためであった。うねりの場合すでに述べたように無風状態が長時間続いたので、卓越した吹送流は発達しなかったと推定される。このために、うねりの位相速度は実験室の風

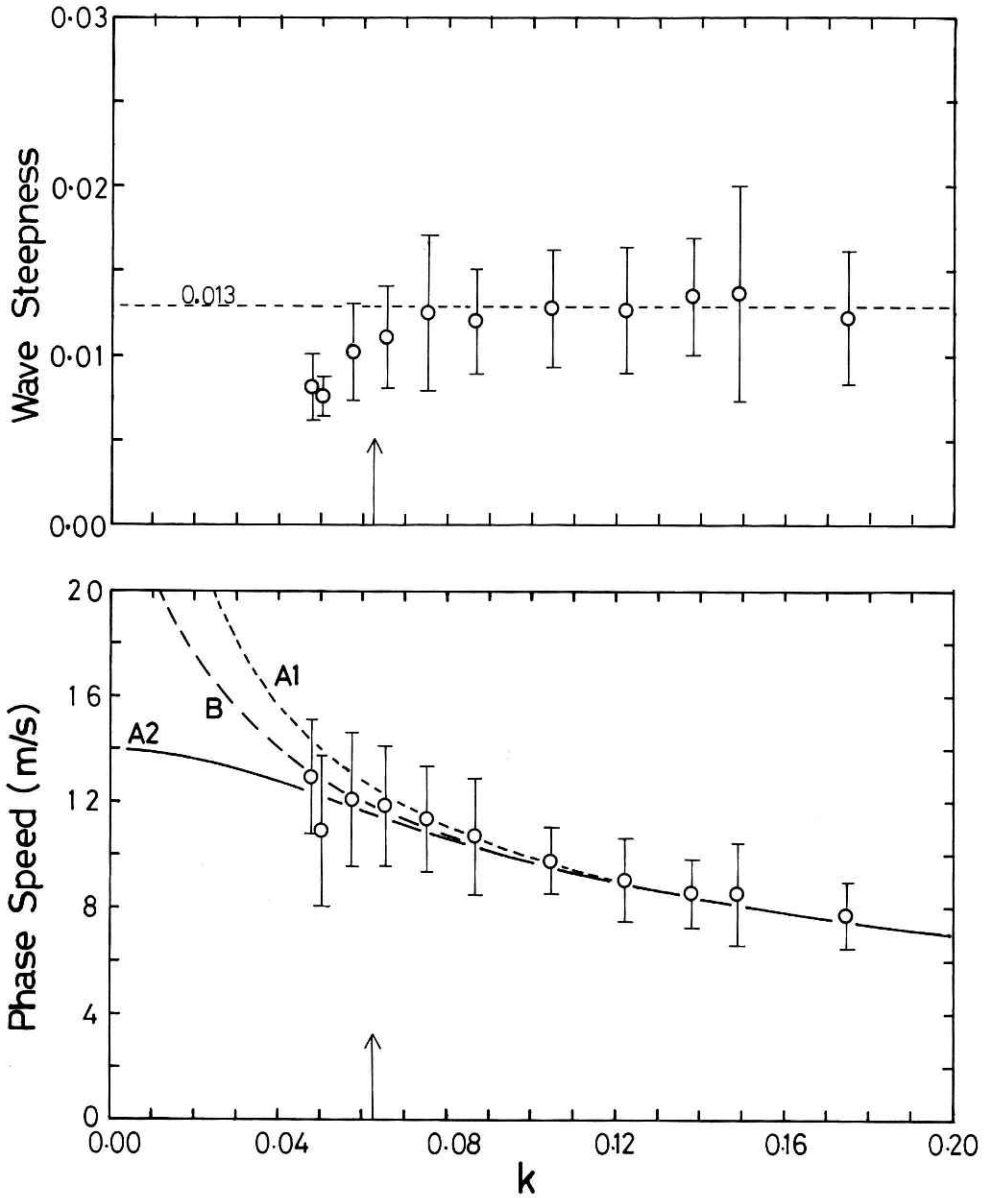


図 14 波数に対する個々波の位相速分布と波形勾配分布。矢印はスペクトルピーク波の波数の位置を示す。下図において、実線 (A 2) と点線 (A 1) は図 12 と同様に水の波の理論値を、点線 (B) は式 (12) を示す。

Fig. 14 Distribution of phase speed and wave steepness of individual waves for swell. The symbols A 1, A 2 and B represent the phase speeds of linear deep water waves, shallow water waves and Eq. (12), respectively.

波と異なって線形理論と一致する分布となったと考えられる。これについては、後述する個々波の特性間の関係のところ、さらに議論する。

b. コヒーレンス分布, 図 13

成分波法によるうねりのコヒーレンス分布は、センサー①と③の方向（波の進行方向と約 60 度なす方向）、①と②の方向（波の進行方向とほぼ直角方向）で求められた。両者の分布はほとんど類似した形を有し、周波数 $f < 0.25$ の周波数領域で高い値となっている。この周波数領域を波長領域で表すと、波長 $L > 25\text{m}$ となる。すなわち、コヒーレンスの値が低下するうねりの波長は約 25 m 以下のものとなる。このことは代表的な波高計センサー間隔①③が約 17 m になることから妥当なものと言える。センサー①②の方向に関して一様なコヒーレンスの特徴は、実験室の風波の場合と異なっている。実験室の風波の分布が水槽の直角方向に低い値になったことは、水槽の壁の影響によるものと思われる。

c. 個々波の特性間の関係

これを議論する前に波数に対しての個々波の位相速度を求め、それによって波形勾配分布を求めておく必要がある。その結果は図 14 に示した。うねりの波数に対しての位相速度分布は図 12 の周波数に対しての分布と同様に、深さ 20 m の水の波の線形理論値とよく一致した。波形勾配分布は、スペクトルピーク波の波数より少し高めの波数から一定値 0.013 となった。このように、高周波領域で一定値の波形勾配は、実験室の風波の場合と類似したものになった。

以上うねりの個々波解析の結果より、波高分布 (3/2 乗法則)、位相速度分布そして波形勾

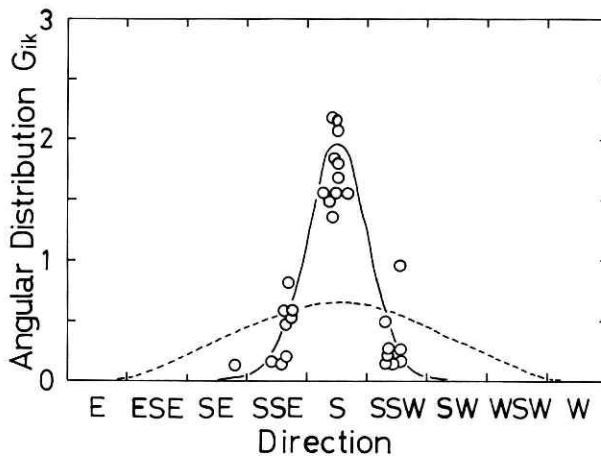


図 15 うねりの方向分布関数。点線と実線は Part I の図 21 と同じものである。

Fig. 15 Normalized directional spectra for swell. The heavy line and the broken line are the same as that of Fig. 21 of part I.

配分布が明らかとなった。これらの分布は明らかにお互いに独立な関係でない。観測で得られた分布がお互いに矛盾しない分布であるかを調べる。議論する波数領域をスペクトルピーク波の波数より高波数の領域とする。波形勾配 δ と位相速度 C の定義式より下式を得る。

$$S = H/L = H/(CT) \quad (7)$$

図 10 の 3/2 乗法則から

$$H = AT^{3/2}, A = H_p T_p^{-3/2}, k_N \geq 1 \quad (8)$$

上式から

$$C = A\delta^{-1} f^{-1/2} \quad k_N \geq 1 \quad (9)$$

さらに位相速度の定義式を使うと

$$C = Bk_N^{-1/3}, B = (\sqrt{2\pi} A/\delta)^{2/3} \quad k_N \geq 1 \quad (10)$$

図 14 の上図から、波形勾配分布は次のように近似される。

$$\delta = \delta_p = \text{const}, k_N \geq 1 \quad (11)$$

よって B は定数となる。係数 B を観測データから求める。観測データから、 $T_p = 8.38$ 秒、 $H_p = 1.05$ m、 $\delta_p = 0.0107$ であるので、 $B = 4.68$ となる。式(10)は次のようになる。

$$C = 4.68k^{-1/3} \quad k_N \geq 1 \quad (12)$$

図 14 の下図から次のことが示される。式(12)は深さ 20 m の線形理論値と同様に、観測値とよく一致した。よって観測された波高分布、位相速度分布そして波形勾配分布は、互いにほぼ矛盾のない分布であると言える。式(12)は定数項をのぞけば、実験室の風波の分布 (Part I の式(5)) と一致する。両者が $k^{-1/3}$ の分布で表されたことは次のことによると考えられる。実験室の風波の場合は卓越した吹送流の効果であり、一方うねりの場合は深さ 20 m の浅海波の理論値が波数領域 $0.04 \leq k \leq 0.18$ で $k^{-1/3}$ に近い分布となることである。

d. 方向分布関数, 図 15

第 3.2 節で推定したように、うねりは一次元性の強い波である。この方向分布関数はほとんど実験室の風波のものと一致した。

以上のうねりの個々波解析の結果をまとめると次のようになる。

(1) 個々波法による方向特性の解析法は、実験室の風波の場合と同様に、うねりに対しても有効な方法である。

(2) うねりの方向分布関数は、実験室の風波の分布と類似した幅の狭いものとなった。

(3) うねりのパワースペクトル分布は高周波領域でマイナス 5 乗となり、波高分布は $3/2$ 乗則となった。

(4) うねりの位相速度分布は、波数のマイナス $1/3$ 乗で近似されかつ水の波の理論値と一致した。

5. 結論

観測塔を利用して波浪の方向特性に関する観測を行うために、波高計の性能、波高計の設置法、データの収録法そして解析法を検討した。第一段階として、うねりについて十分な精度で観測できるアレイ式波高計測システムを開発した。Part I で開発された個々波法をうねりのデータに適用し、この方法の有効性を示すとともに、うねりの方向特性を明らかにした。今後の課題として次のことが示される。

- (1) 上記の観測システムを風浪にも適用して、その有効性を調べる。
- (2) 計算機による個々波の対応づけを行うソフトウェアの開発を行うこと。
- (3) 成分波法による高精度の方向スペクトルの算出法の開発を行うこと。

6. 謝辞

波高計の性能とデータの収録・処理において多くの助言と助力をいただいた当センターの渡部勲氏に、波高計センサーの位置決定について指導していただいた当センターの都司嘉宣博士に、またアレイ波高計の製作にご協力頂いた電子工業株式会社 福田甲子郎及び 鈴木辰造両氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲田亘・渡部勲(1969)：容量型波高計について、国立防災科学技術センター研究報告，第 2 号。
- 2) 徳田正幸 (1982)：三本の波高計センサーによる波浪の方向特性の算出法-I。実験室の風波の方向特性。国立防災科学技術センター研究報告，第 29 号，157-192。
- 3) Tokuda, M. and Y. Toba (1981): Statistical characteristics of individual waves in laboratory wind waves. I. Individual wave spectra and similarity structure. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **37**, 243-258.
- 4) Tokuda, M. and Y. Toba (1982): Statistical characteristics of individual waves in laboratory wind waves. II. Self-consistent similarity regime. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**, 8-14.
- 5) 渡部勲・藤縄幸雄 (1979)：平塚沖波浪観測資料(1)。防災科学技術研究資料，第 39 号，1-108。
(1982 年 11 月 18 日 原稿受理)