

表面ブイ式波浪計による波向観測

橋 本 宏*・山 口 修**・弘 田 英 人*

1. 緒 言

波向を測定する方法はこれまでもいくつか提案されているが、波形観測ほど確立されたものではなく、実際海域において使用に耐えうる波向計は数少ないのが現状である。一般に波向を観測するには波動場を規定するいくつかの要素を精度よくしかも長期間安定して測定する必要があるが、厳しい海況条件に遭遇する実際海域においてはこの前提はかなり困難であることが多く、このことが波向計の開発を遅らせている主要原因と考えられる。また、波高計とは独立に波向計を設置することには経済的に負担が大きすぎるという問題もある。したがって、工学的に十分な精度で長期間安定して波形及び波向が観測できる計測装置が開発できれば、その有用性は大きなものと言えよう。

著者らはこういう観点に立って、実際海域において波形及び波向が同時に観測できる実用的なブイ式の波浪計の開発研究を行ってきた。著者らが開発した波浪計は表面ブイ式波浪計と呼んでいるが、この波浪計を用いた現地実験の結果によれば、波形観測の精度については全く問題のないことが明らかになっている^{1),2)}。しかしながら、波向観測の精度については十分な検討が行えなかったこともあって、不明な点がいくつか残されていた。本論文では水槽実験や現地実験によって波向観測の精度を検討した結果を報告し、ブイを使用した波向観測法の問題点を明らかにしたいと考える。

2. 波向測定の方法

2.1 測定系の構成

表面ブイ式波浪計のように波面追従型のブイを利用して海面の変動波形及び波向を測定するためには、ブイの鉛直変位、傾斜角それに磁北との関係をあらわす方位角を計測するのが最も簡単である。したがって、この波浪計でも測定機器の構成は、ブイの鉛直軸に固定された加速度計、水平面において直角方向に取付けられた2台の傾斜計、それに方位計を基本的に採用した。また、一連

の現地実験の後期においては傾斜角の代りに角速度計を使用した。角速度計を使用した理由は、傾斜計の測定精度が必ずしも十分でなかったことによるが、角速度計を使用した現地実験の結果によれば、測定精度の向上は顕著には認められなかったことから、値段も安く動作のチェックも簡単にできる傾斜計の方が実際海域において使用する場合には実用的なようである。使用した計測機器の特性を表—1に示す。

表—1 計測機器の特性

SENSOR	MAXIMUM RANGE	RESPONSE
ACCELEROMETER	±2 G	DC~500 Hz
TILT METER	±45°	5~100°/sec
RATE SENSOR	±50°/sec	0.005~5 Hz
MAGNET COMPASS	0~360°	3.2°/sec

2.2 波向測定の原理

表面ブイを利用して波向を測定する方法は、Longuet-Higgins et al.³⁾ によって研究され、我国においても光易ら⁴⁾が詳細な研究を行っている。傾斜計を使用した場合の解析方法は光易らと同様であるので、ここでは角速度計を使用した場合の解析方法を簡単に述べることにする。

表面ブイ式波浪計ではブイ本体の波に対する応答特性や計測機器の応答特性が完全なものであれば、加速度計や角速度計によって計測される信号はそれぞれ、波面の上下加速度 (ζu)、波面の勾配の時間変化 ($\zeta x_t, \zeta y_t$) に相当する。実際の計算では ζu よりも ζu を一回積分した上下速度 ζl を考える方が取扱いが容易であるので、($\zeta l, \zeta x_t, \zeta y_t$)=(ξ_1, ξ_2, ξ_3) の組合せを考える。このそれぞれの組合せについて次式で定義される共分散関数 C_{lm} が全部で6個計算できる。

$$C_{lm} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \xi_l(t) \cdot \xi_m(t+\tau) dt \quad (l, m=1 \sim 3) \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、 π で規格化された方向分布関数 $h(\sigma, \theta)$ 、($\sigma=2\pi f$, f は周波数, θ は角度) が

$$h(\sigma, \theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad \dots\dots (2)$$

のようにフーリエ級数に展開できると仮定すれば、係数

* 正会員 建設省土木研究所 海岸研究室
** 正会員 工修 建設省近畿地方建設局

A_n, B_n は C_{lm} のクロススペクトルから次式のように計算できる。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{Q_{12}}{kK_{11}}, & A_2 &= \frac{K_{22} - K_{33}}{K_{22} + K_{33}} \\ B_1 &= \frac{Q_{13}}{kK_{11}}, & B_2 &= \frac{2K_{23}}{K_{22} + K_{33}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, $K_{lm} = \int_{-\infty}^{\infty} C_{lm} \cos \sigma \tau d\tau$, $Q_{lm} = \int_{-\infty}^{\infty} C_{lm} \sin \sigma \tau d\tau$, k は波数である。また方向スペクトルの測定精度を検証する式として次式が成立する。

$$k^2 K_{11} / (K_{22} + K_{33}) = 1 \dots\dots\dots (4)$$

以上のように角速度計を使用した場合でも波浪計によって得られる測定量から、真の方向分布関数 $h(\sigma, \theta)$ をフーリエ級数に展開した場合に $n=2$ まで決定できることになるが、このようにして得られる方向分布関数 $h_2(\sigma, \theta)$ は $h(\sigma, \theta)$ にある重み関数がかかった形となっている。この関数としては種々のものが考えられようが、本研究では文献 3) で提案されたものを使用した。

このように波浪計によって測定される方向分布関数はフーリエ級数の $n=2$ 以上を無視した近似的なものであること、また重み関数を使用するために方向分解能が低下することなどを考えあわせると、その測定精度は元来それほど高くはないと言える。

2.3 傾斜角の補正方法

2.2 で述べた解析方法は波浪計によって計測される諸量が海面変動の諸量と同値であることを前提としている。ところが波浪計によって計測される諸量には、ブイ本体の波に対する応答特性や計測機器の応答特性に起因する誤差が含まれており、海面の上下加速度や勾配などとは厳密な意味では同値ではない。したがって、解析に先立ちその補正を行う必要がある。本文で使用する補正法は加速度の補正に使用した周波数領域補正法^{1),2)}である。即ち、補正するデータの時系列をフーリエ変換によって周波数領域に変換した後、所定の補正用フィルターを作用させ、逆フーリエ変換で時系列にもどすという方法である。

まず、傾斜計を使用した場合の補正用フィルターとしては波浪計本体の波に対する応答特性の補正フィルターのみを使用する。このフィルターは図-1に示す縦揺周波数応答関数から得られる。なお図-1において θ_0 は縦揺の運動振幅、 k は波数、 ζ_0 は海面の変動波形の振

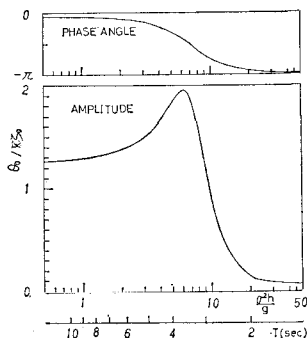


図-1 縦揺周波数応答関数

幅、したがって $k\zeta_0$ は波面の傾斜角を意味する。センサーの応答特性については問題がないわけではないが、その詳細が不明なために補正は行っていない。次に、角速度計を使用した場合にはセンサーのノイズ除去用のフィルターも使用したので、傾斜計で使用した補正フィルターの他にその補正用フィルターを作用させている。なお、この場合には波に対する応答特性の補正フィルターとしては図-1に示した縦揺の位相角曲線を $\pi/2$ だけずらしたものを使用する必要がある。

2.4 方位の修正

波浪計で測定される傾斜角(角速度)は2.3で述べた補正を行うことによって波面の勾配(勾配の時間変化)に変換できることになる。しかしながら、波浪計は波や流れによって平面的な回転を行うために、方位計による観測値を利用してある基準軸に変換した値に修正する必要がある。この変換は通常座標軸の変換(回転)公式を使用すればよいが、その際には回転角としてどのような値を用いればよいかが問題となる。勿論、方位計の応答が良好なものであればこのような問題は生じないが、表-1に示したようなマグネットコンパスを使用する限り応答特性を飛躍的に向上させることは困難である。したがって本文では方位計の応答特性を考慮して、15分間の観測データを20秒間隔に分割し、その時間内の方位の平均値を使用して、20秒間の個々のデータを基準座標に変換するという方法を採用した。変換されたデータ間のクロススペクトルを計算してみると、方位変動が大きい場合には変換前の結果に比べてコヒーレンシは同程度かもしくは高くなる場合が大半であったことから、この方法は妥当なものと考えられる。

3. 水槽実験及び現地実験

3.1 水槽実験

波浪計による波向観測の精度を確認する目的で大型平面水槽(長さ40m×幅30m×高さ4m)に実機を浮べて規則波による実験を実施した。波浪計は造波板のすぐ近くに設置した架台に1点係留し、入射波形は波浪計から2m程度離れたところに設置した容量式波高計によって測定した。この波高計は測定台車に取付けてある。実験では5分間にわたって規則波を作用させたが、波浪計による波向測定はデータ収録装置の記憶容量の関係からそ

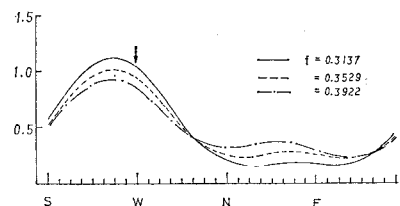


図-2 方向分布関数(規則波)

のうちの3分間しか行っていない。図-2は角速度計を使用した場合の波浪計によって観測された方向分布関数である。入射波は造波機の実験能力から、波高16cm、周期3.1secの規則波を使用した。水深は3.5mで一定である。また、2.2で述べた解析法の妥当性を確かめる意味で角速度を1回積分した傾斜角を使用して解析を行ったが、得られた方向分布関数は $f=0.3137\text{ Hz}$ の関数形とほとんど一致することが確かめられた。図中の矢印は造波板の方向から判断した入射波の進行方向を示したものである。図-2からわかるように入射波の進行方向と波浪計による波向とは約 20° ずれているが、これは方位計が巨大な鉄塊である計測台車の影響をうけていたためである。このずれは 20° 程度であったことから、その補正を行えば、波向計測値は入射波の進行方向と一致することになる。また、加速度計や角速度計の精度を検証するために、容量式波高計の計測値との比較や各測定量間のクロススペクトルの吟味を行った結果、実験の範囲内では十分な精度を有することが明らかとなった。したがって、規則波で小波高時については波浪計による波向観測の精度は問題ないことがわかる。不規則波や高波の場合については次の現地実験の結果から明らかとなる。

3.2 現地実験

現地実験は静岡県富士海岸で実施した。波浪計による波向観測の精度検証には目視による観測値、また、目視を行っていない場合には風向・風速の観測値を利用した。目視による波向観測は波浪計設置地点の背後約150mのところにあるT.P. 13mの高さの堤防の上から、平板とアリダードを使用して実施したものである。また風向・風速の記録は建設省沼津工事事務所によって堤防の背後で観測された記録を使用した。数回にわたる目視観測値と風向・風速の記録を比較してみると、風速7m/sec以上の強風がS~WSWの方向から吹いている場合には波向観測値と風向の記録はほぼ一致することが確かめられている。したがって、目視による観測値がない場合でも風向の記録が波向観測値として代用できる。

波浪計の設置地点を中心とした方位の関係は図-3に示す通りである。図-3からわかるように波の来襲方向

はE~Wに限定される。また、以下に示す波向や風向に関する観測や解析は全て32方位を基準として処理したものをを使用することにする。これ以上の細かい測定単位での検討は波浪計の方向分解能や目視及び風向の観測精度を考えると意味がない。

波浪計による波向観測の精度を検証するためには、まず方位の変動がどの程度かを調べてみる必要がある。15分間の観測時間中に方位が大きく変動することは、例え2.4で述べた方位の修正を行っても、計測機器の測定精度を考えると波向観測の方向分解能を低下させる直接の大きな原因となる。ブイの方位がどの程度変動するかは海象条件によって大きく左右される。1例として現地実験中に最も大きい方位変動を記録した1978年11月~12月の観測記録を図-4に示す。図の上段が観測時間中の方位の平均値を32方位で示したものであり、下段が方位のばらつきを一つの尺度で表現するために、以下で述べる方法で計算した方位変動の標準偏差である。

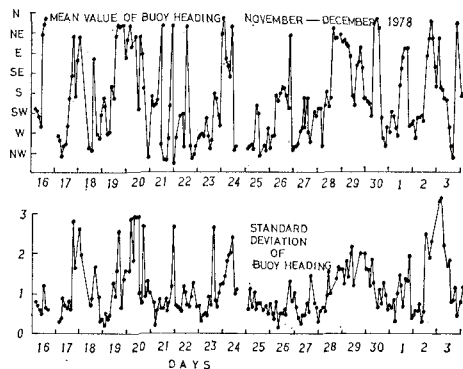


図-4 方位変動

いま、方位の観測値を磁北を基準として時計回りに32方位に分類し、各クラスに順番に1から32まで番号をつける。このとき各クラスの度数を x_n とすると標準偏差 S は

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{32} x_n (n - \bar{n})^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で計算される。ここで、 $N = \sum_{n=1}^{32} x_n$ 、 $\bar{n} = \sum_{n=1}^{32} nx_n / N$ である。

図-4からわかるように観測期間中に方位の平均値はかなり変動している。また、図-5に示す波形観測の結果と対比すれば明らかなように、一般に波高が大きい場合には観測時間中の標準偏差もかなり大きなものとなっている。方位のばらつきと標準偏差の関係を一言で表現するのは難しいが、観測結果から判断すると標準偏差が1程度の場合には方位の値が4~5方位(約 50° の範囲)に均等に分散している場合が多いと考えてよい。したがって、標準偏差が大きい場合には相対的に波向観測の精度が低下していると考えられる。このように波高が

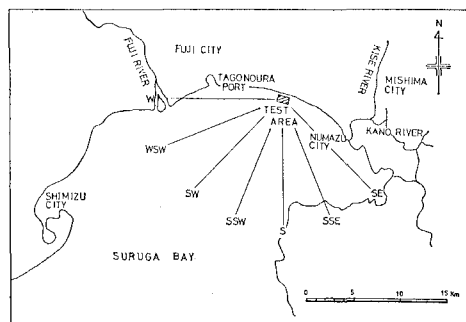


図-3 観測地点と方位関係

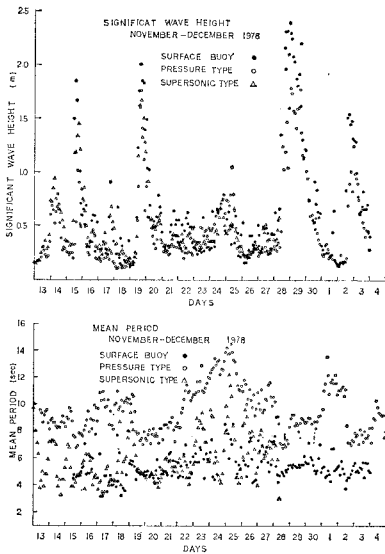


図-5 波形観測結果

小さい場合に比べて重要度の高い高波高時の観測精度が相対的に低下することは、海面に浮べたブイを利用して波向観測を行う方法の固有の欠点の1つと言える。

次に波浪計による波向観測値と目視や風向の観測値とを比較検討してみるが、その際に問題となるのは測定方法そのものが異なるために、得られた測定値が必ずしも同一のものを観測した結果とは言えないことである。例えば複数のピークをもつスペクトル形状の波を考えると、波浪計においては原理的に各周波数別の方向分布関数、即ち波向が観測可能であるが、目視観測や風向観測においてはそれぞれの成分波の進行方向が同一の場合を除いて正しい観測値を得ることができず、結果的には最も卓越した成分波の平均的な波向のみを観測していると考えられる。したがって、両者の観測値の比較を容易にするために、波浪計による波向は以下の手順で求めたものを平均波向として定義した。まず、(1) 観測対象周波数 (0.10~0.33 Hz) の範囲内の各周波数別の方向分布関数においてピークの値を示す方位角をその周波数の卓越波向とする。(2) (1) によって得られた各周波数別の卓越波向の頻度分布をとり、最も高い度数を示す方位角を観測時間中の平均波向とする。平均波向の整理方法としてはこの他にも、波形のスペクトルのピークを与える周波数の卓越波向を平均波向として定義する方法が考えられるが、この方法で整理しても先に述べた方法と大差のない結果を与える。なお、観測対象周波数を 0.10~0.33 Hz としたのは計測機器の応答特性及び観測時間、データ数から規定されるスペクトル解析の統計的信頼性などを考慮したためである。

図-6 に 1978 年 11 月~12 月における波浪計による波向観測結果及び風向・風速の観測値を示す。この時には

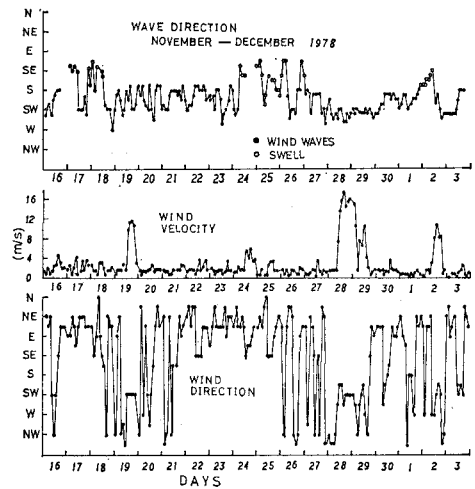


図-6 波向及び風向・風速の観測結果

目視観測は行っていないので風向の観測値を目視観測値の代用として使用する。まず、風向・風速の記録をみると 11 月 19 日、11 月 28 日~29 日においては 7 m/sec を超える強風が SW の方向から吹いているのが観測されており、図-5 に示した波浪計による波形観測からはこの強風によって発達した周期 5 秒程度の風波が観測されている。この時の波向観測値を調べてみると SW であり風向の観測値と一致している。したがって、波浪計によって測定された波向はほぼ正確なものと考えられる。しかしながら、図-4 に示したように荒天時にはかなりの方位変動が認められることから、その測定精度について

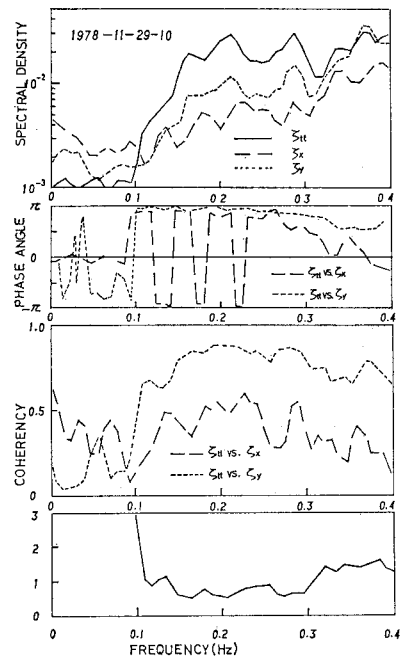


図-7 スペクトル解析結果

でもう少し詳しく調べる必要がある。

図-7, 8にはその1例として10月29日の10時の場合のスペクトル解析の結果と方向分布関数をそれぞれ示している。

図-7 からわかるように、鉛直加速度(ζ_{zz})と傾斜角(ζ_x)は0.10~0.33 Hzの間ではコヒーレンシ

も高く、位相差もほぼ $+\pi$ である。また波向観測の精度検証式として(4)式に対応する値も図-7に示しているが、0.10~0.3 Hzの間ではほぼ1に近い値となっている。したがって、測定精度としてはそれほど問題ないと考えられる。しかしながら、図-8の方向分布関数を調べてみるとピークが必ずしも明瞭ではなく、しかもSWから π だけずれたところにもみかけ上のピークが認められる。方位変動が小さい場合には方向分解能は比較的良好な場合が多いことから、これは方位変動による方向分解能の低下が原因と考えられる。また図-6で

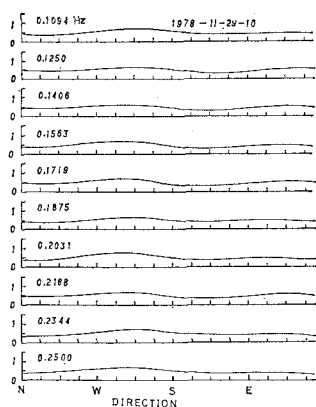


図-8 方向分布関数(荒天時)

は波形のスペクトルのピークが0.1 Hz以下の場合をうねりとして示しているが、観測値はSEの場合が多く、図-3の方位関係から判断するとこの波向は不自然である。この原因は図-7に示したコヒーレンシからも明らかのように測定機器の測定精度やスペクトル解析の統計的信頼性にあるものと考えられる。この点は今後改善すべき問題点の1つである。また波浪計による波向は変動が大きい、これは方向分解能が低いために図-4に示した方位の平均値の変動がのったためと考えられる。

図-9は1979年2月に観測された波浪計と目視による波向観測の結果である。この観測には角速度計を使用した。測定レンジが不適であったために大波高時にはスケールアウトが生じており、小波高時の観測値しか得られていない。なお図中の水圧式波高計による観測値はタッカー法によって求められたものである。目視と波浪計による観測値を比較すると大略一致しているが、やはり波浪計による波向は変動が大きい。

4. 結 言

以上述べたように、表面ブイ式波浪計によって長期間にわたる波向観測が可能であるが、その測定精度や方向分解能は、(1) 測定原理、(2) ブイ本体の波に対する応答特性、(3) ブイ本体の平面的な回転、(4) センサーの測定精度、などに起因して必ずしも良好なものとはいえない。しかも観測時間やデータ数から制限されるスペクトル解析の統計的信頼性の影響も加わって測定可能な周波数が限定されるという欠点がある。しかしながら、この波浪計では波向と同時に波形が高精度で観測できるという大きな長所があり、その有用性は高いものと考えられる。既に波浪計の2号機は定常観測に使用されているが、さらに今後とも改良を加えていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏・山口 修: 表面ブイ式波浪計の実用化に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, 1980.
- 2) Hashimoto, H. and O. Yamaguchi: Development of a Surface Buoy Wave Meter, Coastal Eng. in Japan, Vol. 23, 1980.
- 3) Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith: Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, Ocean Wave Spectra, New Jersey, Prentice Hall Inc., 1963.
- 4) 光易 恒・田才福造他: 海洋波の計測法の開発研究(1), (2), 九州大学応用力学研究所報第39号, 40号, 1973.

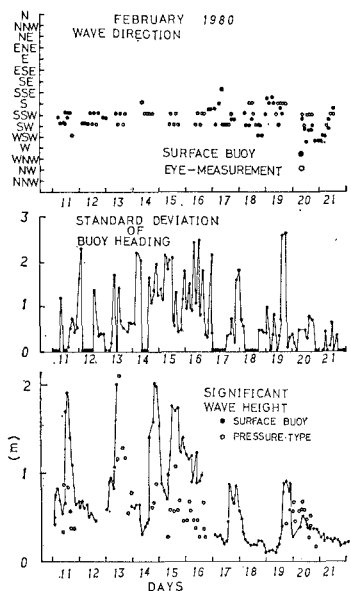


図-9 角速度計を用いた波向観測結果