

海中ブイ式波浪計による波浪観測

橋 本 宏*・山 口 修**

1. 緒 言

我国における波浪観測は官公庁機関を中心に 200 カ所以上の地点において実施されているが、それらはいずれも -20 m 以浅の浅海域における観測であり、沿岸大水深海域（-30~-100 m 程度）における定常的な観測はほとんどなされていないのが現状である。しかしながら、人間の活動の分野が拡がるにつれて、海洋開発も沿岸から外洋へと拡大する傾向にあり、沿岸大水深海域における波浪情報の不足は、今後これらの海洋開発の大きな障害になるものと考えられる。したがって、将来活発化すると考えられるこれらの海洋開発に備えるためには、現在から観測体制を確立し、波浪資料を集積していく必要がある。

著者らは、大水深海域における波浪観測法の一つとして、海中ブイ式波浪計を利用した波浪観測システムを開発し、約 1 カ年にわたって現地実験を行なってきたが、その結果このシステムによって、波および波向さらには潮流の観測が可能であることが明らかとなり、外洋における波浪観測の有力な手段となりうることが判明した。本論文では、この海中ブイ式波浪計によって得られたデータの解析結果をもとに、本システムの得失について報告する。

2. 海中ブイ式波浪計の概要

この波浪計は図-1 に示すように一点緊張係留の海中ブイ式波浪計であり、係留索長を変化させることによって設置水深を任意に設定できる。したがって、波浪外力を直接受けることなく、浅海域から大水深海域における波浪観測が可能である。

ブイ船体の形状は中空の楕円球を採用し、材質はゴムである。波浪計に搭載している観測機器は水圧式波高計、傾斜計（2 成分）、加速度計（水平 2 成分）、それに方位計であり、これらのセンサーによって波浪、波浪計の水平運動及び傾斜角、方位を測定する。

係留方式は一点緊張係留であり、係留索には張力計が

取付けてある。ウィークリンクは張力計を保護するために取付けたものであり、衝撃的な荷重が作用した場合に、張力計がその許容荷重に達する前にリンクが破断する構造である。リンクが破断した後は左右 2 本の補助鎖によってブイ船体を係留する。アンカーは空中重量 5 ton のコンクリート製アンカーである。

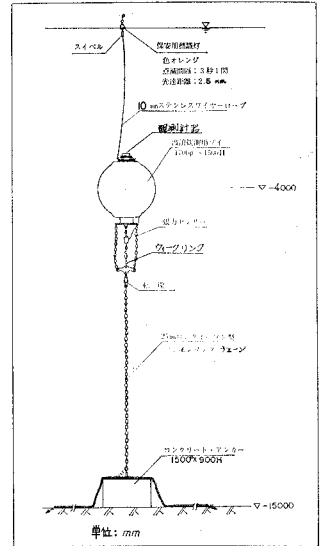


図-1 海中ブイ式波浪計

観測データの収録方法は、自動内部収録方式であり、各センサーによって得られた観測データを大記憶容量（2,300 万ビット）のカートリッジ型磁気テープ装置にデジタル記録し、約 1 カ月毎に収録装置を海中より引上げてデータの収集を行う。観測は通常 2 時間毎に行い、標準観測時間は 15 分である。観測機器の電源はニッケルカドミウム蓄電池を使用している。なお、このシステムの詳細な仕様については文献 1) を参照されたい。

3. 現地実験

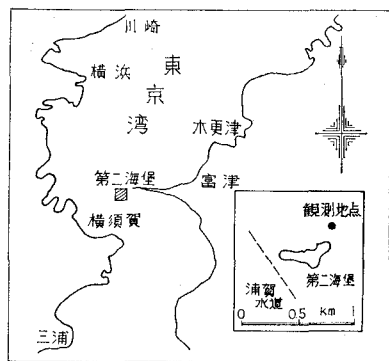
現地実験は 1977 年 3 月から 1978 年 3 月まで、約 1 カ年にわたって実施した。波浪計本体は耐久性を調べるために現在も海中に係留中であり、本年 12 月より観測機器を搭載して観測を再開する予定である。

3.1 観測地点

観測地点は図-2 に示すように東京湾第二海堡の北側の海域であり、波浪計は水面下約 4 m に係留してある。係留水深は、波浪計の固有周期、水圧式波高計の精度を考慮して決定したものである。設置位置の水深は約 15 m と比較的浅い。設置位置が第 2 海堡の陰にかくれるところであるため、台風期の波よりも冬期風浪による波の方

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長

** 〃 工修 建設省土木研究所海岸研究室



圖—2 觀測地点

が大きく、このブイ式波浪計によって観測された最大有義波高も冬期風浪によるもので 205 cm であった。

3.2 波浪計の故障例

海中ブイ式波浪計による現地観測は約1カ年にわたって実施したが、観測データは後半の4カ月間しか得られていない。これは、観測初期において、各種計測機器に種々のトラブルが生じたためである。特に、データ収録装置は新規に開発したこともあって故障することが多く、初期の観測では大きな支障となった。その他にもバッテリーの故障、コネクタの破損、観測機器の取扱いミスなどが生じたが、センサー、収録装置及び電源部を収納した耐水圧筐体に海水が入るなどの重大事故は生じなかった。また、波浪計の目印として海面上に浮べた標識灯が4回程故障したが、これは付近を通る釣船によって破損された場合が大半である。

係留索の切断事故はこれまでのところ起っていない。これは係留方式が緊張係留であり、波浪計が海中に係留された構造であるため、衝撃的な荷重が生じない係留システムであったことが大きな原因である。観測された係留力の有義値は最大のもので 462 kg であり、衝撃的な荷重は観測されていない。また、毎月のデータ交換時に水中写真を撮り、チェーン等の摩耗度を調べた結果では、ほとんど摩耗はみられない状態である。したがって、この係留システムは安全度が高いことが立証されたものと考えられる。

4. 観測データの整理

この波浪計によって観測されたデータを用いて、波および波向、波浪計の波と潮流に対する応答特性などについて検討した。波高は水压式波高計によって得られた水压データに一般に行われるように微小振幅波理論による応答関数を乗じて求め、その際の換算係数 n は 1 とした。これはフルード式波浪計によって測定された表面波形と波圧波形の較正結果から得られた値である。波高が大きい場合、あるいは波の卓越周期成分が波浪計の固有

周期に近い場合には、波浪計の運動が大きくなり、その影響が水圧データにも当然含まれるが、その補正は今回の解析では行っていない。

波向は方位計と加速度計あるいは傾斜計の観測データを組合せ、波浪計の運動方向を算定することにより測定できる。加速度計を利用した場合には、加速度計をジャイロなどの人工水平台上に載せていないため、その信号には波浪計が傾斜することによる重力の影響が含まれるが、これは傾斜計のデータを用いて補正した。

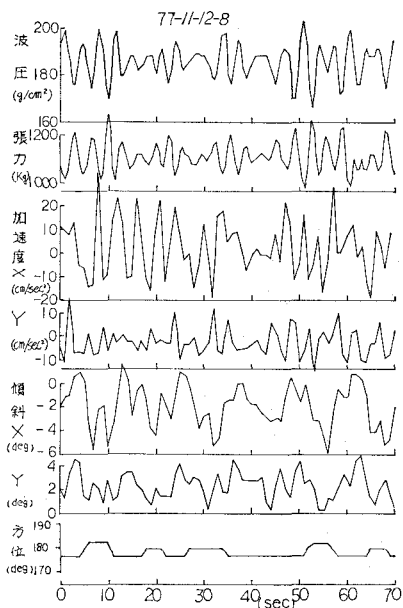
波浪に対する波浪計の応答特性については、スペクトル解析によって検討した。スペクトル解析には FFT 法を用いたが、入力データは、標準観測時間 15 分間に得られたデータの最後に 0 を付加えて 1024 あるいは 2048 個に編集したものを使用した。

潮流に対する応答特性については、傾斜データから観測時間中の傾斜角の平均値を計算し、方位データと組合せて潮流による波浪計の傾き角とその方向を求めた。

5. 觀測結果

5.1 波浪計の波に対する応答特性

観測された各測定要素の波形の 1 例を図—3 に、スペクトル解析例を図—4, 5 に示す。図—4, 5 からわかるように波圧とその他のパワースペクトルではその形状が少し異なっている。波圧のスペクトルは、 $f=0.24\text{ Hz}$ 付近にピークをもつ一山構造であり、このピークは来襲波の卓越周期に対応するが、波圧以外のスペクトルにはそれとは別に、 $f=0.08\sim 0.1\text{ Hz}$ 付近に波浪計の固有周期に対応するピークがみられる。図—4 は観測されたもの



圖—3 觀測波形

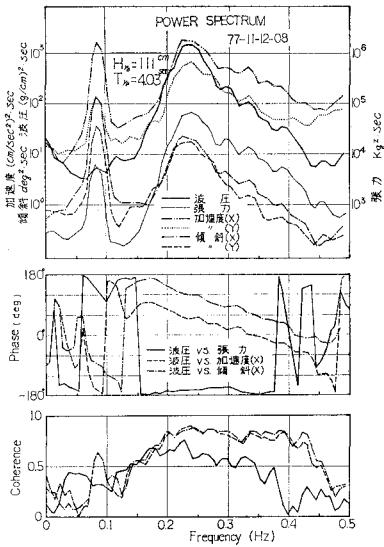


図-4 スペクトル解析例(1)

のうちで最も大きなピークが認められた場合であり、波浪計がこの付近の周波数をもつ成分波に共振していたことを示している。波圧のスペクトルには固有周期に対応するピークが認められないが、これは波浪計が 0.8 Hz 程度の成分波とともに運動したため、この成分波がうまく測定できなかったことによるものと考えられる。図-5

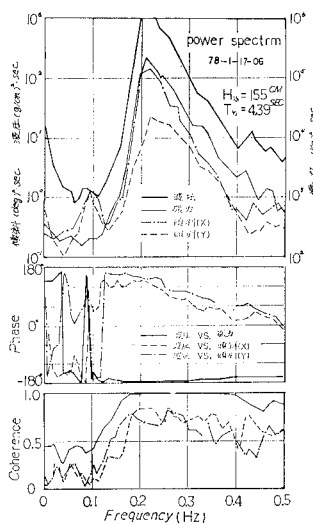


図-5 スペクトル解析例(2)

は来襲波の中で固有周期に近い成分波のパワーが小さく、共振が起っていない場合である。したがって、観測の精度は図-4 の場合が高いものと考えられ、この波浪計においては波浪計の固有周期をどの程度に定めるかが問題となる。

一般に、この波浪計のように浮力をきかせて海中に係留された浮体は、一種の振り子の運動を行い、その固有周期はブイ船体の質量、余裕浮力、係留索の長さによって決定される。この波浪計の固有周期は計算及び模型実験から 10~12 秒と推定されており、現地観測の結果もこれを裏付けている。東京湾においては、卓越周期は通常 3~6 秒に集中しているため、大きく共振した例は観測されていないが、うねりが卓越するような海域で使用

する場合には、固有周期をもっと長くする必要がある。固有周期を長くするには、係留索を長くするか、ブイ船体の重量を大きくするかあるいは余裕浮力を小さくすればよいが、この波浪計を大水深海域に設置する場合には、必然的に係留索が長くなるため固有周期も大きくなる。したがって、通常の波とは共振しなくなり、精度のよい観測が可能であると考えられる。因に、この波浪計において固有周期を 20 秒程度にするためには係留索長を 30~35 m 程度にすればよい。また、この波浪計においては、表面波形は波圧波形によって測定されるため、波圧とその他のセンサーとの位相関係、コヒーレンスを調べることによって、波圧波形が表面波形を正しく捉えているかどうかを検証できる。この点については理論解析、模型実験の結果も踏えて検討中であり、稿をあらためて報告する予定である。

5.2 波浪計の較正方法

海中ブイ式波浪計によって測定される波圧データには、5.1 で検討したように波浪計が運動することによって生ずる誤差が含まれる。この誤差を定量的に把握するためには、この波浪計によって得られたデータを長期間にわたって別の波浪計による同時観測記録と比較することが最も望ましい。しかしながら、観測地点付近には波浪観測を実施しているところがないため、簡易な較正方法としてフルード式波浪計を用いた表面波形の測定を数回実施し、波浪計の水圧記録と比較した。

このフルード式波浪計は目盛のついた標尺にフロート部、安定板それに錘りがついた構造であり²⁾、海面上に直立した標尺を 8 mm カメラで撮影して表面波形を観測するものである。図-6 にそれぞれの波浪計によって観測された波浪のパワースペクトルの 1 例を示す。両者の観測時間は約 15 分ずれているが、その間に海況の著し

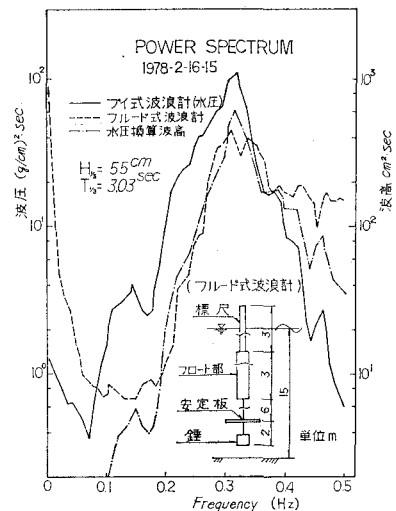


図-6 ブイ式波浪計の較正結果

い変化は生じていない。図中には換算係数 n を 1 とし、波圧を表面波に換算した換算スペクトルも示しているが、それぞれの波浪計によって測定された表面波形のスペクトルは 10 秒以下の周期ではほとんど一致していることがわかる。観測時間中の有義波高は 55 cm、傾斜波形の有義振幅値（全振幅）は 2.0 度であり、これをブイ船体の中心位置における水平方向の移動量に換算すれば 35 cm となる。したがって、波浪計の動揺が小さい場合には、良好な精度で観測可能であることが明らかである。

最も問題となる波浪計の運動が大きい場合については、上述の方法では校正を行うことができないため、観測の精度は明らかではないが、スペクトルの解析結果は波高が小さい場合と同様な傾向を示しており、波浪計が動揺することによって生じる水圧式波高計近傍の圧力変化も無視できる程度と考えられることから、今回の観測では実用的に問題のない精度で観測されたものと考えられる。因に、観測された傾斜波形の有義振幅値の最大は 15.3 度であり、これをブイ船体中心位置における水平及び鉛直移動量に換算するとそれぞれ 260 cm、9 cm となり、それほど大きなものではない。

5.3 波向観測

この波浪計においては、波向はストレインゲージ型の波向計³⁾と同様に波浪計の運動方向から測定される。したがって、波向を精度よく測定するためには、波浪計が波高測定の精度を損わない範囲である程度運動することが条件である。また、波浪計の運動方向が π だけずれるため、波向を特定するためには別の情報が必要となるが、実際には波浪計の設置位置、風向観測の結果などにより容易に判断できると考えられる。

波浪計には測定機器の精度、耐久性を検証する意味もあって、運動測定用のセンサーとして加速度計ならびに傾斜計を搭載した。したがって、方位データと組合せることによって、二通りの方法で波浪計の運動が測定できるが、両者の観測結果から求められた波向はほとんど一致することが確認された。しかしながら、加速度計のみによって波向を測定する場合にはジャイロなどの人工水平台を使用する必要があるが、加速度計は外部からの振動をノイズとして拾いやすいことから、係留水深が比較的浅い場合には傾斜計によって測定の方が容易である。

図-7, 8 には波向観測結果を示すが、これは傾斜波形からブイ船体の中心位置における移動量を計算し、その波形の $\pm$ のピーク値をプロットしたものである。図-7 に比べて 図-8 の場合は波高が約 2 倍と大きく、波の周期も長いことから、当然波浪計の運動が大きくなっており、波向の卓越方向もより明瞭である。観測日に第二海堡灯台において測定された風向はいずれも北であり、したがって波向はそれぞれ N10°W, N45°W 付近であったことが推定できる。波浪計がどの程度運動すれば精

度よく波向が求まるかについては、測定機器及びデータ収録装置の精度にもよるが、これまでの観測結果を整理した結果では、ブイ船体の中心位置における移動量が有義値で 60 cm 以上でないと波向が正しく求まらないようである。

以上のようにこの波浪計によって波向と波浪を同時に測定するには両者が相反する機構で測定されるために、自ら測定範囲が限定されるが、観測海域の海象条件を考慮に入れて、波浪計の設置水深及び係留水深を決定すれば、良好な精度で波および波向の観測が可能になると考えられる。

5.4 波浪計の潮流に対する応答特性

波浪計の潮流に対する応答特性については、流速が大きい場合が問題となる。潮流が速くなると波高計が大きく傾く、あるいはブイ船体が回転することによって、波浪観測に悪影響を及ぼすことが考えられ、またブイ船体の後方に形成される渦列のために一種のフラッター現象が起り、観測が不可能になる場合もありうる。これらの点について検討するために、大潮時の観測記録を整理した結果が 図-9 である。観測期間中の有義波高は 15~40 cm であり、波の影響はほとんど無視できる場合である。

図の上段は水圧データの平均値から求められた観測潮

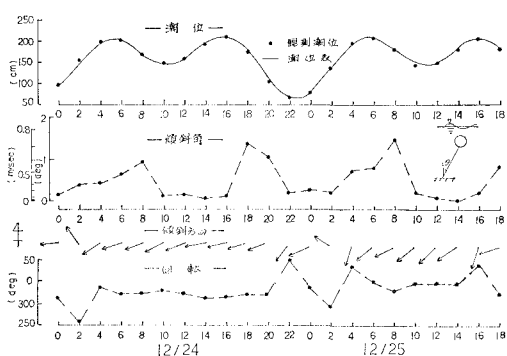


図-9 潮流に対する応答特性

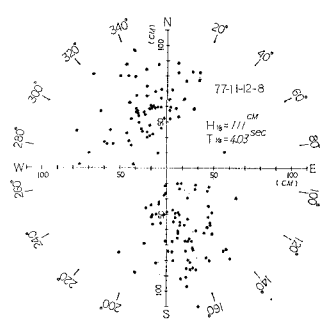


図-7 波向観測例 (1)

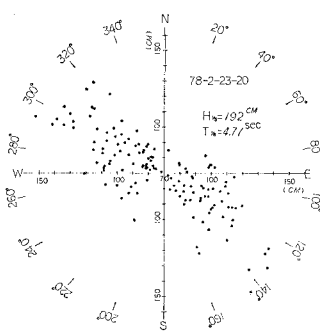


図-8 波向観測例 (2)

位と気象庁発行の潮位表に記載されている計算潮位とを比較したものである。両者はほとんど一致している。中段は傾斜データの平均値から求められた波浪計の傾斜角の経時変化である。傾斜角は下げ潮の時に大きくなっており、そのピークは満潮と干潮の中間の時間帯にあらわれている。傾斜角は最大約1.6度であり、潮流による傾斜角はブイ船体の余裕浮力が大きい場合には問題とならない。縦軸には抗力係数を0.5とし、流れによる抗力が流速の二乗に比例すると仮定して、傾斜角を流速に換算した座標軸も併記しているが、これによると流速の最大値は0.7 m/sec程度であったことがわかる。下段は波浪計の傾斜方向と回転を示したものである。矢印は上方向を北とした座標系で波浪計の傾斜方向をあらわしたもので、波浪計はほとんど南西の方向に傾いていることがわかる。また波浪計は潮止りでゆっくりと回転しており、この時間帯で流向が変化することを示している。個々の観測時間内においても不規則な方位変化は観測されていない。したがって、波浪観測を行う上で、潮流の影響はほとんど無視できるものと考えられる。また、第二海堡付近の潮流については著者らの研究室でも、流向流速計を設置して観測を行なったが、その結果、下げ潮時に流速のピークがあらわれ、大潮時にはその値は0.6~0.8 m/sec程度に達すること、その時の流向はほぼ南西方向であること、潮止りでは流向が不規則に変化していること、などが明らかとなっている。波浪計によって観測された結果も、上述の通りこれらの観測結果とほとんど一致するものであり、潮流に対して波浪計が不自然な運動を起していないことが明らかである。また、波高が大きい場合の観測結果も同様な傾向を示しており、この波浪計によっても流向流速がかなり正確に測定できると考えられる。

6. 結 言

海中ブイを利用した波浪観測法について検討した。その結果、このブイ式波浪計によって波および波向さらには潮流の観測が可能であることが明らかとなった。波浪計の運動が大きい場合においても得られたデータを補正することによって、かなりの精度で観測できるものと考えられる。今後は長期間にわたって別の測定機器と比較対照してみる必要があるであろう。またデータの伝送システムの開発は、この波浪計によって定常的な観測を行う場合の残された大きな問題である。海中ブイを利用しているため伝送システムには工夫が必要であるが、現在のシステムの改良を含めて検討していく予定である。

謝辞： 波浪観測法について検討していただいた東京大学本間 仁名誉教授、東京大学堀川清司教授、中央大学服部昌太郎教授、東京工業大学日野幹雄教授、東北大学首藤伸夫教授、東洋大学荻原国宏教授、東京大学渡辺晃講師に感謝致します。また、波浪計の製作をお願いした新日本気象海洋株式会社の方々、波浪計の監視および貴重な観測データを提供していただいた海上保安庁横須賀航路標識事務所の方々に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所： 波浪・海浜流に現する現地観測調査（その4）、土木研究所資料（第1230号）、1977.
- 2) 久保雅史・遠藤茂勝： 波高測定用浮きスタッフに関する一考察、第26回年次講演会講演集、pp. 83-84, 1971.
- 3) 高橋智晴、他： 定置式波向計（抵抗ひずみ線型）について、第17回海岸工学講演会講演集、pp. 395-401, 1970.