

表面ブイ式波浪計の実用化に関する研究

橋 本 宏*・山 口 修**

1. 緒 言

波を測定する方法には種々のものがあるが、その1つにブイ式の波浪計がある。これは海面の変動に正確に追従して運動する浮体の上下動や傾斜角を内蔵した加速度計や傾斜計によって測定し、波高や周期、波向を求める方法である。著者らは設置水深の制約が少なく、データの伝送にもテレメータシステムが利用できるこの波浪計が、外洋における波浪観測の有力な手段になりうるものと考えて、理論解析や模型実験の結果をもとにパイロットブイを試作し、その後、現地実験を通じてその実用化を図ってきた。その結果、実際海域においても十分に実用的な波浪計がほぼ完成した。本論文では2ケ年にわたる現地実験の結果をもとに、波浪観測の精度、ブイ本体の波に対する応答特性、係留システムの安全性、ブイ本体や計測装置の耐久性などについて検討した結果を報告する。

2. 表面ブイ式波浪計の概要

著者らが開発した表面ブイ式波浪計は別途に開発中の海中ブイ式波浪計¹⁾との関係から表面ブイ式波浪計と呼ぶことにする。この表面ブイ式波浪計は浮体の安定性から円筒型を基本形状として採用しており、波に対する上下揺の応答特性を円盤型に近いものに改良するために、上部に円盤型のフロートを、また縦揺と横揺の応答特性を改良するために下部にスリット型のダンパーを取付けている。この波浪計は荒天時にたとえ転覆する事態が生じても容易に復元するように設計されている²⁾。波浪計の概要を図-1に示す。

係留システムは図-1に示すようにチェーンと合成繊維ロープから構成されており、衝撃力の吸収機構としては海底部に長くチェーンを置くチェーン方式を採用した。中間フロートはチェーンを常に海底より立上げておくためのもので、これによってロープと海底地盤とが接触することを防ぐことができる。勿論、中間フロートを大量につければ衝撃力の吸収機構として利用できよう。

シンプルは合成樹脂の円形シンプルを使用し、シャックルは全てダブルナットのものを使用した。

データの計測・収録システムは海中ブイ式波浪計で使用したものを若干改良したものであり、計測機器の構成は鉛直加速度計、水平加速度計(2成分)、傾斜計(2成分)、それに方位計である。波

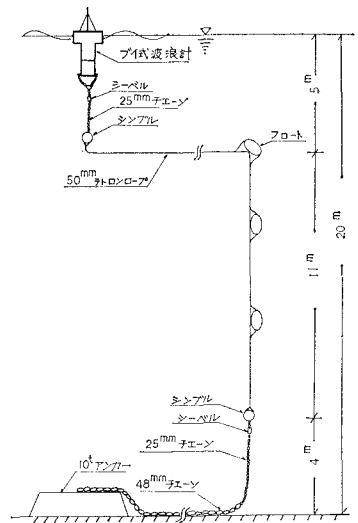


図-1 表面ブイ式波浪計

浪は傾斜補正がなされた鉛直加速度信号を組合せて、波向は傾斜信号と方位信号それに鉛直加速度信号を組合せて、ピッチ・ロールブイ³⁾と同様な方法で計測される。観測は2時間毎 15 分であり、データの交換周期は約 1 ケ月である。

3. 加速度波形から表面波形への換算法

波浪計の上下揺の周波数応答関数は理論的に推定可能であり、周期 2 秒程度までは海面の上下動に正確に追従する。この計算は線型理論に基づくものであるが、上下揺に関しては波高が高くなっても線型理論で十分な近似が与えられるものと考えられる。したがって、波浪計内部に搭載した加速度計によって正確な鉛直加速度が観測できれば、その信号を 2 重積分することによって、精度の高い波形観測ができることになる。ただし、この波浪計では、鉛直加速度計をジャイロ等の人工水平台に取付けていないために、波浪計が傾くことによる重力の影響が大きな誤差として含まれる。この影響は 2 成分の傾斜計信号を用いて次のようにして補正される。いま、2 成分の傾斜計から求められるブイの傾斜角を θ 、鉛直加速度計によって得られる加速度を $A_z(t)$ 、重力の加速度を

* 建設省土木研究所 海岸研究室室長
** 正会員 工修 建設省土木研究所 海岸研究室研究員

g とすれば、補正された鉛直方向の加速度 $A_z(t)$ は次式で与えられる。

$$A_z(t) = A_z'(t) + g(1 - \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

この他にも加速度計の取付位置がブイの重心位置とズレていることによる誤差や前後揺・左右揺による誤差も含まれるが、この波浪計においては、これらの誤差は無視できる程度に小さい。

表面波形は $A_z(t)$ を2重積分することによって求められる。これまで行なわれてきた2重積分の方法には、電氣的に積分を行なうアナログ法と電算機を利用したディジタル法があるが、一般には任意のフィルターをかけることができるディジタル法が有利である。本文でも高速フーリエ変換を利用した周波数領域におけるディジタル積分法^{4),5)}を用いた。いま、加速度波形のフーリエ変換は

$$F_z(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A_z(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられるから、加速度計の応答補正フィルターを $F_a(f)$ 、ブイの波に対する応答補正フィルターを $F_b(f)$ とすれば補正された鉛直加速度のフーリエ変換は

$$F_z'(f) = F_z(f) \times F_a(f) \times F_b(f) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。したがって、表面波形 $z(t)$ は逆フーリエ変換によって次式で計算される。

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} -\frac{F_z'(f)}{4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df \quad \dots\dots\dots (4)$$

表面波のスペクトルを求めるだけであれば、鉛直加速度のスペクトルにそれぞれのフィルターゲインの2乗を乗ずればよく、波の特性量はスペクトルから E 値法によって簡単に計算できる。本文で以下に示す波の特性量は E 値法によって求めたもので、これらの値は波形より求めた値とほとんど一致することが確かめられている。

以上の手順によって加速度波形から表面波形、波の特性量は計算できるが、その際問題となるのは加速度信号に含まれる低周波数側のノイズが2重積分することによって増幅されることである。低周波数側のノイズの原因としては種々のものが考えられるが、現在のところ適切な防御法はなく、一種のフィルターをかけることによってノイズを排除する方法が一般的である。本文でも周期2秒～14秒の帯域数値フィルターをかけた後、表面波のスペクトルを計算した。

4. 現地実験の概要

現地実験は1978年3月に波浪計を設置してから1980年3月現在で2カ年が経過した。この間、波形観測や波向観測の精度の検証をはじめとして、種々の試験を行ってきた。その結果、波向観測の精度の検証を除いてほぼ初期の目的を達成することができた。波向観測に関しては継続して現地実験を行ない別途報告する予定であ

る。

(1) 観測地点

現地実験は図-2に示す静岡県富士海岸で実施した。この地点は駿河湾の湾奥部に位置し、我国でも有数の高波浪が来襲するところである。我国においては著者らが開発したような小型のブイを台風等による高波が予想される外洋に係留した例は数少ないことから、この海域は係留システムなどの耐久性を検証するには最適のところと考えられる。

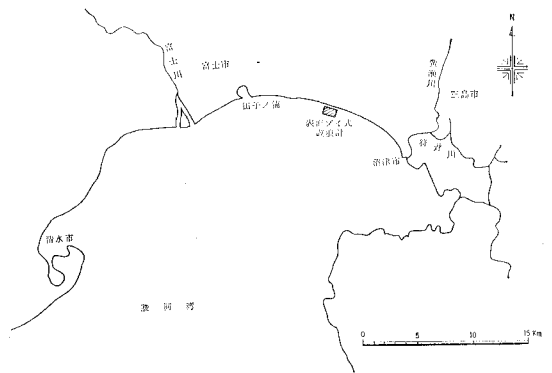


図-2 観測地点

(2) 来襲波の状況

現地実験の期間中、この波浪計はいくつかの高波を経験している。その中で最大のものは1979年10月の台風20号によるもので、波浪計の直下に設置されている水圧式波高計(建設省沼津工事事務所)の記録によれば有義波高10.2m(周期15秒)、最大波高16.3mの高波が4時間程度来襲している。この時にはその前後にも有義波高5～7mの波が合計10時間ほど観測された。この他にも有義波高で4m以上の高波を数回経験している。

5. 現地実験の結果

現地実験の結果明らかになった波形(波高と周期)観測の精度、ブイの波に対する応答特性、係留システムの安全性、ブイ本体およびデータの計測・収録システムの耐久性について順次述べることにする。

(1) 波形観測の精度

表面ブイ式波浪計の精度検証には主として水圧式波高計を利用した。また、約9km離れた田子ノ浦防波堤前面に設置されている超音波式波高計の記録も参考として利用した。

図-3, 4はそれぞれ1978年10月と11月において、ブイ式、水圧式それに超音波式波高計によって観測された有義波高と平均周期を示したものである。ただし、11月の平均周期の観測値については10月の観測結果と傾向が全く同様であるため省いてある。水圧式における有

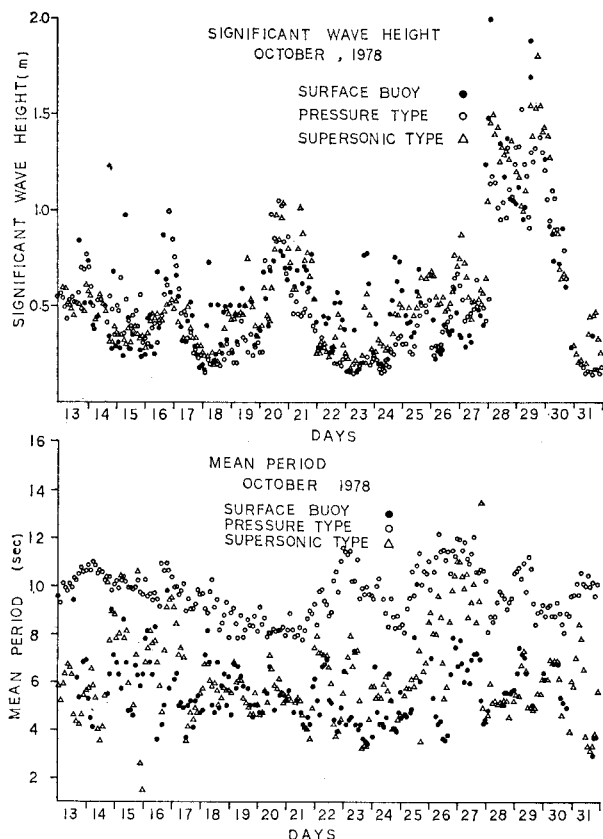


図-3 波浪観測結果 (1)

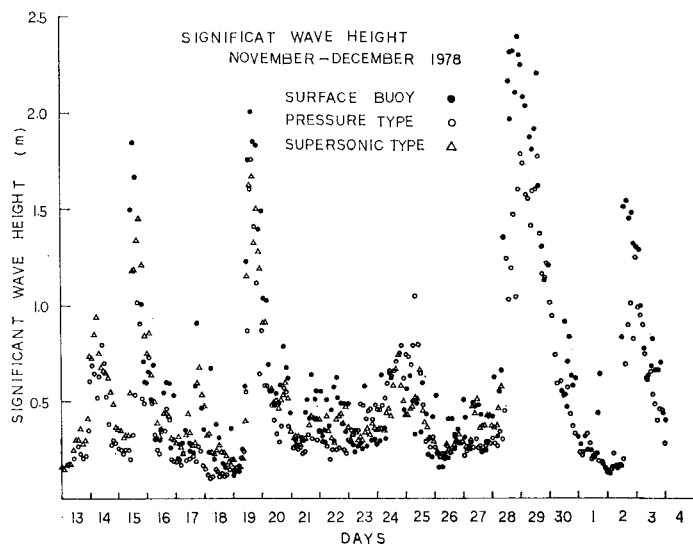


図-4 波浪観測結果 (2)

義波圧から有義波高への換算は微小振幅波理論によるもので、その際の換算係数 n は 1.35 を使用している。

図-3, 4 からわかるように、ブイ式、水圧式それに超音波式による有義波高の観測値は大略一致しているが、

図-3 にみられるように波高が大きい場合にはブイ式の方が多少大きめの値を示している。平均周期については図-3 からわかるように超音波式とブイ式は大略一致しているが、水圧式ではかなり大きくなっている。水圧式において平均周期が大きくなる原因は、水圧式が水面下 20 m の海底に設置されているため、波の高周波成分による圧力変動が小さくなり、圧力センサーでは感知できないことによる。また 図-3, 4 においては波高が大きい場合には全て 10 m 以上の強風が南の方から吹いており、周期の短い風波が卓越していることが明らかとなったが、この風波の部分が水圧式においてはうまく捕えられていないために、両者の観測値が異なる結果になるものと考えられる。このことは水圧式とブイ式によって観測された表面波のスペクトルを比較することによって明らかとなる。例えば、10月27日22時のブイ式と水圧式によって観測された表面波のスペクトル形状を比較したのが図-5である。この時にはブイ式によればうねりと同時に周期4秒程度の風波が卓越していたことがわかるが、水圧式では風波の部分をうまく捕えられておらず、単一ピークに近いスペクトル形状となっている。これに対して 図-6 はうねりのみが卓越していた場合であるが、この場合には両者の観測スペクトルはよく一致すること

がわかる。図-3, 4 においてみられる両者の観測値の違いは、スペクトル形状の比較から大半是水圧式において、風波の成分波をうまく測定できなかったことに起因しているが明らかとなった。ブイ式においても低周波数側でエネルギー密度が水圧式よりも高くなる例もみられたが、数値フィルターをかけてあるために、有義波高等の計算にはほとんど影響はなかった。また、スペクトル形状の比較から図-7に示すような近接したピークをもつ二つ山型のスペクトルの場合にも、スペクトル形状そのものはよく一致しているが、有義波高そのものの計算値はかなり違っていることが明らかとなった。これは水圧式の波高換算手法に問題がある場合であり、水圧式の本質的な欠点ではない。

以上述べたように、表面ブイ式波浪計はかなりの精度で波浪の観測が可能であることが明らかとなった。観測結果から判断すると、図-3, 4 に示した程度の波高では超音波式と同等の精度を有するものと考えられる。ま

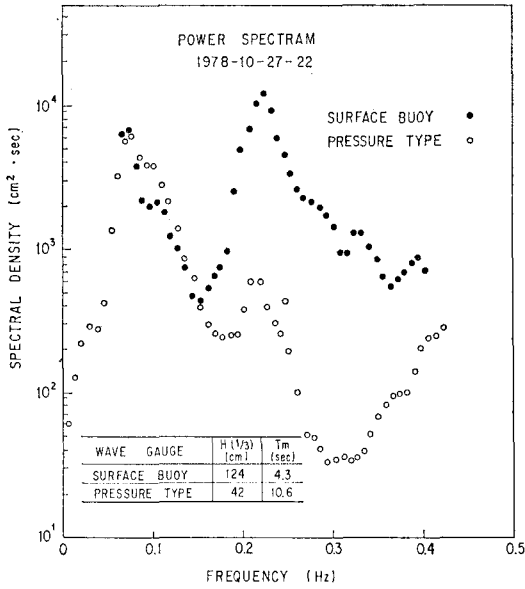


図-5 スペクトル形状の比較(うねり+風波)

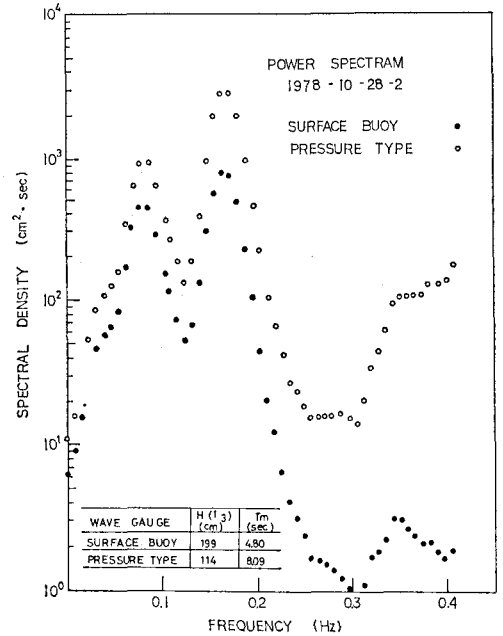


図-7 スペクトル形状の比較(2つ山型)

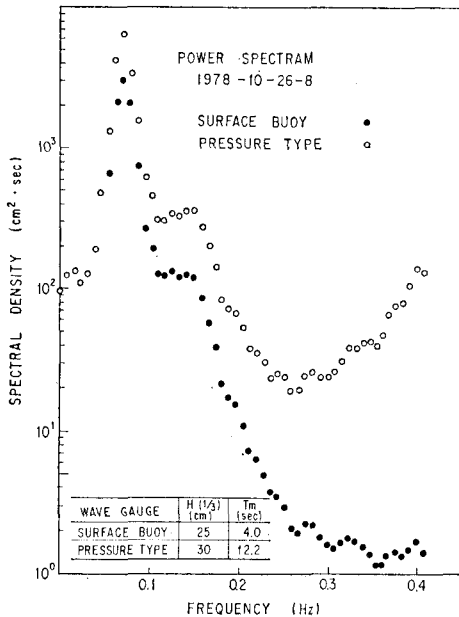


図-6 スペクトル形状の比較(うねり)

た、係留索が波浪計の運動特性に悪影響を与えている観測例は全く見当らなかった。したがって、著者らが採用した係留システムはその点でも良好なものといえよう。

(2) プイの波に対する応答特性

プイ式波浪計による波浪観測の精度を検証するもう一つの方法は、観測された表面波のスペクトルを使って、プイの縦揺スペクトルを計算し、実測値と比較することである。このことは線型理論によって計算された縦揺の周波数応答関数の検証にもなり、波向観測の精度検証に

も役立つ。いま、表面波のスペクトル $S_{\eta\eta}(f)$ と縦揺の応答関数 $H_p(f)$ から、縦揺のスペクトル $S_{pp}(f)$ は次式で計算される。

$$S_{pp}(f) = |H_p(f)|^2 S_{\eta\eta}(f) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式によって実測値と観測値を比較する場合には、縦揺角が微小という線型近似が成立する範囲でなければならず、入射角も一方向のみから侵入してくることが条件である。ところが、実際の海の波は個々に方向性をもった成分波の重なりであるため、後者の条件を完全に満足するのは困難であるが、プイの方位変動が少なく、波向の卓越方向も一定であれば、その比較は可能である。

図-8 は波向の卓越方向が傾斜測定の X 軸方向と大略一致していたと考えられる場合について計算値と実測値を比較したものである。 $H(1/3)=69$ cm, $T(m)=6.6$ 秒と波高も比較的大きい場合であるが、計算値と実測値はよく一致しているといえよう。 Y 軸についても、波向の卓越方向が X 軸と7度ずれていたとすれば、計算値にその成分 ($\sin^2 7^\circ = 0.015$) を乗ずればよく、実測値と計算値はほぼ一致することになる。したがって、プイの縦揺・横揺はこの程度の波高でも線型理論によって計算できることがわかる。このことは裏返して言えば、この波浪計による波形観測の精度がかなり高いことを意味する。

(3) 係留システムの安全性

この波浪計では特殊な係留方式を開発したため、模型実験や理論解析では不明な点もいくつか残されていた。例えば、(1) プイの運動特性に与える影響、(2) 荒天時の

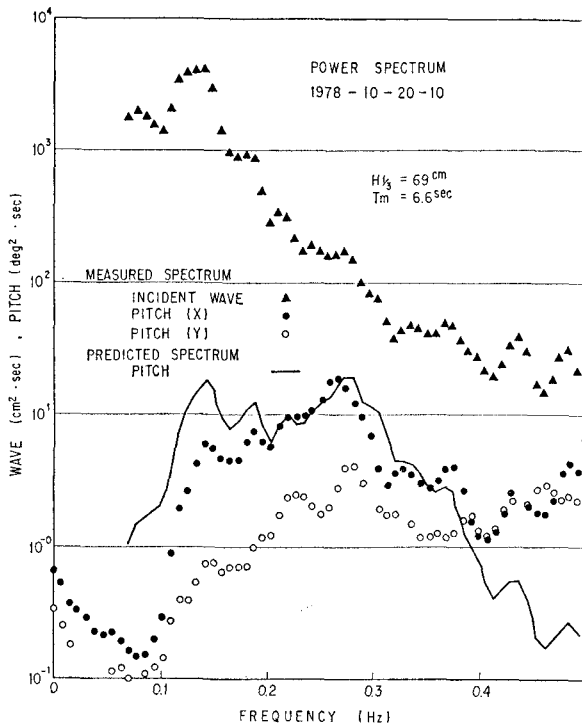


図-8 計算値と実測値の比較(縦揺)

耐久性, (3) 合成繊維ロープやチェーンの疲労による強度低下の程度, (4) ロープのカラムの問題, (5) 海洋生物の付着の影響などである。現地実験によって (1)~(4) についてはほぼ問題ないことが判明したが, (5) については夏期にかなり大量の生物が係留索にも付着し問題となった。係留索に生物が付着するとロープが重くなり, 中間フロートの余裕浮力が低下するが, そうなると, ロープの部分が海底を擦るということにもなりかねず, 維持管理の面で大きな問題となる。この問題については設置海域の条件によっても異なるものであり, 有効な対策はないが, 生物付着による中間フロートの余裕浮力の低下をあらかじめ見込んでシステムを設計する必要がある。このように多少の問題はあるが, この係留システムはこの種のブイの係留方式として十分に実用的なものと考えられる。

(4) 計測・収録システムの耐久性

計測システムとしては, ジャイロなど耐衝撃性や消費電力に問題がある計器は使用せずに, 機構部がなるべく簡単で故障が少ないものを使用した, これらの計測機器は荒天時においても問題なく作動した。この点は収録システムも同様である。したがって, 著者らが使用してきた計測・収録システムはかなり信頼性が高いと考えら

れる。

(5) ブイ本体の耐久性

ブイ本体にはこれまでのところ形状の変形や電蝕などは認められないが, 係留索と同様, 夏期にはかなり大量の生物が付着した。ブイが海面近くに係留されているため生物の付着は避けられないが, 夏期を含む約6カ月間にカキ落しをせずに放置した結果では, 吃水が15cm上昇した。これを重量に換算すれば約150kgになる。したがってブイ本体の耐久性については問題ないが, 設置する海域によってはかなりの頻度でカキ落しが必要となる。特にスリット型ダンパー部などは生物が付着しやすく, 波に対する良好な応答特性を保持するためには, 定期的なカキ落しが必要である。この波浪計は小型であるためこの程度の作業は静穏な日であれば, ダイバー2人によって1~2時間で終了する。

6. 結 論

表面ブイ式波浪計の実用化に関して著者らがこれまで検討してきた点についてその概要を述べてきた。本研究によって明らかとなった事柄をまとめると以下ようになる。

- (1) この表面ブイ式波浪計は実際海域において使用する波浪計として十分な精度と実用性を有する。
- (2) ブイの波に対する応答特性は線型理論によって計算でき, 計算値と実測値はほぼ一致する。
- (3) この波浪計の係留方式として開発した方式は衝撃力を吸収することができ, 有用である。
- (4) ブイ本体および計測収録システムは十分な耐久性を有し, 長期にわたる観測にも使用できる。

この波浪計の残された最も大きな問題点は波向観測の精度の検証である。この点は現地実験を継続して検討中であり, 別途報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏・山口 修: 海中ブイ式波浪計による波浪観測, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 60~64, 1978.
- 2) 橋本 宏・山口 修: 表面ブイ式波浪計の開発, 第9回海洋開発シンポジウム, pp. 1~7, 1978.
- 3) Longuet-Higgins, M. S., Cartwright, D. E. and Smith, N. D.: 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・田才他: 海洋波の計測法の開発研究(1), 九州大学応用力学研究所所報第39号, pp. 105~108, 1973.
- 5) 井合 進・倉田栄一・土田 肇: 強震記録のデジタル化と補正, 港湾技術研究所資料 No. 286, March, 1978.