

表面ブイ式波浪計の定常観測への適用

山 口 修*・葛西金助**・藤坂安雄***・難波嘉幸***

1. 緒 言

表面ブイ式波浪計は、大水深海域から浅海域までの広範囲の海域における波浪観測に適用できる観測機器として著者らが開発したものである。その1号機は富士海岸において測定精度や耐久性等の検証実験を行った後、東播海岸において、約4ケ年にわたって冬期を中心とする観測に使用された。同時に1号機を定常観測に適した形式に改良した2号機が製作され、1980年から青森県むつ小川原海岸において定常観測を開始した。本文は、2号機を使用した観測が約10ケ年を経過したことから、その観測結果をとりまとめたものであり、波浪観測の精度、計測システムや係留システムの信頼性や耐久性など、ブイを使用した観測システムの得失、またその設計法や維持管理手法を中心に報告するものである。

2. 表面ブイ式波浪計の概要

表面ブイ式波浪計は、図-1に示すようにブイ本体、計測システム、データ収録システム、係留システム、それに電源電池から構成されている。ブイ本体の形状は浮体の安定性から円筒形を基本形状として採用しており、たとえ荒天時に転覆する事態が生じても容易に復元できる。また上部に円盤型のフロートを、下部にスリット型のダンパーを取付け、上下揺と縦・横揺の応答特性を改良している。計測システムは鉛直加速度計、角速度計(2成分)、方位計から構成されており、観測されたデータはカートリッジ型磁気テープ装置(CMT)に収録される。また係留システムは合成繊維ロープと衝撃力吸収のために海底に長くおかれたチェーンから構成されている。電源電池は空気積層電池を使用している。

本波浪計では、波高や周期は傾斜補正等をされた鉛直加速度計を2重積分することによって、波向は鉛直加速度、角速度、それに方位を組合せてピッチ・ロールブイと同様な方法で計測される。本波浪計の諸元は表-1に示すとおりである。

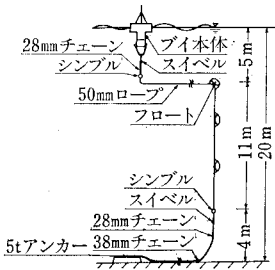


図-1 表面ブイ式波浪計

表-1 波浪計諸元

項 目	諸 元
ブ イ 本 体	寸法 (円筒径・フロート径・高さ) : 0.65m・1.60m・2.42m
	総浮力・自重 (機器・電池実装時) : 約1.6ton・約0.9ton
係 留 シ ス テ ム	方 式 : 1点係留
	係 留 索 : チェーン・テトロンロープ アンカー : コンクリートアンカー
計 測 シ ス テ ム	型式・特性 : サーボ型鉛直加速度計 ±2G
	型式・特性 : 角速度計 ±50°/秒 型式・特性 : 磁気コンパス 0~360°
データ収録システム (自動内部収録方式)	観測型式 (期間・間隔・時間) : 27日・2時間毎・15分間
	サンプリング間隔 : 加速度0.5秒・角速度および方位1.0秒
電 源 電 池	型 式・空気積層電池, 使用期間: 6ヶ月

3. 定常観測の概要

ここでは、むつ小川原海岸において実施されている定常観測についてその概要を述べる。

(1) 観 測 地 点

表面ブイ式波浪計は図-2に示すむつ小川原海岸の沖合2km、水深約20mの地点に1980年6月に設置された。この海域は大型の台風や低気圧が通過する際には、かなりの高波が来襲することが予想され、海象条件としては相当厳しい海域といえる。表面ブイ式波浪計も最大波で8~9mの高波を数回経験している。本波浪計のような小型のブイを、このような海域に設置して10ケ年以

* 正会員 工修 (財)リバーフロント整備センター研究第2部次長
** 正会員 建設省高瀬川総合開発工事事務所長
*** 正会員 建設省高瀬川総合開発工事事務所

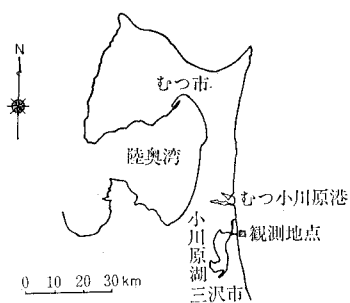


図-2 観測地点

上もの長期にわたり定常観測に適用した例はほとんど見当らないようであり、ブイを利用した波浪観測システムの信頼性を検証するには適した海域の一つといえる。

(2) 観測方法

本波浪計は1号機に比べてブイ本体の寸法が約1.2倍となっている。これはテレメータ装置の搭載や海洋生物の付着による余裕浮力の低下に備えたこと、また種々の制約から内部収録型のデータ収録方式を採用したため毎月の磁気テープ交換を海上で行えるよう配慮したことによる。波浪計の観測・維持管理体制としては、一月毎にテープ交換を行いデータの取得を行うとともに、半年毎にブイ本体を係留索から切離して八戸港まで曳航し、電源電池の交換やブイ本体の塗装などを実施している。

4. 定常観測の結果

ここでは、約10ケ年にわたる定常観測の結果明らかになった波形観測や波向観測の精度、計測システムやデータ収録システム、係留システムの耐久性、信頼性などについて順次述べることとする。

(1) 波形観測

表面ブイ式波浪計による波形観測の精度検証には、約5 km 離れたむつ小川原港の沖合約 50 m の場所に設置されている超音波式波高計の観測データと比較した。超

音波式波高計と本波浪計の観測データは設置場所や水深が異なるため直接的には比較できないが、周期が変化しないと仮定して、浅水変形や屈折の影響を計算した結果によれば、周期3秒～12秒程度の波では両地点の波高比は、0.93～1.00の間にあることが判明した。したがって両者の値を直接比較してもそれほど問題は生じない。

図-3、4には代表的気象擾乱時の本波浪計と超音波式の波形観測データを比較した結果を示しているが、波高・周期とも両者の値はほぼ一致していることがわかる。その他の気象擾乱時の場合もほぼ同様な傾向である。また波浪統計データの整理例として、表-2に1982年の年間の波高・周期別頻度表(測得率65%)を示して

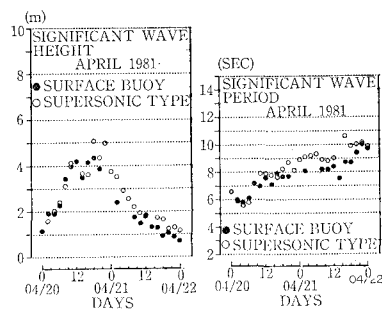


図-3 波形観測結果 (1)

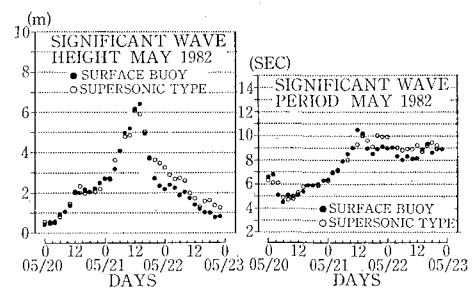


図-4 波形観測結果 (2)

表-2 波高・周期別頻度表

周期 (秒) \ 波高 (m)	0～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10	10～11	11～12	12～13	13～14	計
0.0～0.5	1	38	148	294	308	297	104	51	29	10			1280
0.5～1.0		15	126	211	257	204	130	85	48	12	3	1	1092
1.0～1.5			20	87	68	66	46	23	6			1	317
1.5～2.0				26	26	21	5	3	2				83
2.0～3.0				10	26	13	6	4	2				61
3.0～4.0						8	1						9
4.0～5.0						1	2						3
5.0～6.0							1						1
6.0以上									2				2
合 計	1	53	294	628	685	610	295	166	89	22	3	2	2848

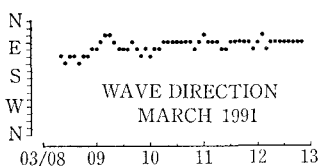


図-5 波向観測結果

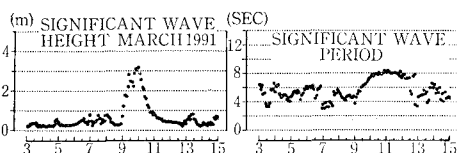


図-6 波高と周期

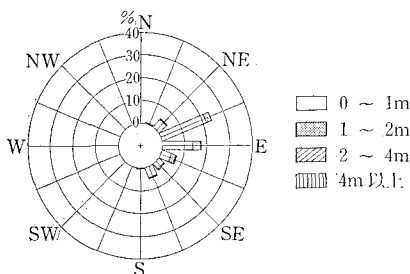


図-7 波高別波向頻度表

いる。10年間の観測結果によれば、この海域に来襲する波浪の特性は表と同様な傾向にある。

以上のように、波形観測についてはほぼ満足できる精度で長期間の観測が可能であることがわかる。

(2) 波向観測

波向観測は波形観測と異なり、数種類(数個)のセンサーが同等の精度で長期間正確に作動することが前提である。このことは実際海域では困難なことが多く、波向観測が遅れている主要な原因の一つとなっている。

本波浪計による波向観測は、測定原理、ブイ本体の波に対する応答特性、波によるブイの回転、センサーの測定精度などを考慮に入ると、測定精度や方向分解能は元来それほど高いものではないが、来襲波の卓越波向が安定して観測できることからその有用性は高いと考えられる。

図-5は波向観測の1例である。ここで波向はスペクトル解析から周波数別に求められる平均波向のうち、波のスペクトルのピーク付近のもので代表している。波高と周期の経時変化は図-6に示しているが、周期8秒程度のうねり性の波が3月9日の0時頃から観測海域に来襲していることがわかる。気象庁の実況天気図に基づく波浪推算によれば、この波は本州東岸を通過した低気圧によって発生したもので、津軽海峡での予報値は波向E

で波高約2m、周期7秒という結果になっている。これは本波浪計によって観測された波浪特性とほぼ一致している。また図-7には1982年の年間の波高別波向頻度表を示しているが、この海域では地形上来襲波の波向は、SE~NEのEのが卓越すると考えられ、このことはむつ小川原海岸の漂砂特性とも矛盾しないようである。

以上のように、本波浪計で観測される波向はほぼ妥当なものと考えられるが精度の検証は十分とはいえないことから、今後とも応答特性のより秀れたセンサーの採用や観測データの集積を図っていく必要がある。

(3) 観測システムの耐久性と信頼性

ここでは表面ブイ式波浪計の観測システムを構成する計測システム、データ収録システム、ブイ本体、係留システム、電源電池のそれぞれについて、その故障履歴から耐久性や信頼性について検討した結果を述べる。

(a) 波浪計の故障の原因別分類

本波浪計は約10年間にわたる観測期間中ブイ本体の漂流事故を2回、ブイ本体内部への漏水事故を1回経験している。これらの事故はいずれも何らかの外部的要因が原因である可能性が高い。漂流事故はシャックルピンの脱落という形で発生しており、1度目は合成繊維ロープとブイ本体を、2度目はロープと海底部のチェーンを繋ぐ部分である。またブイ本体内部への漏水事故は空気積層電池への空気取入口として設置した上部ヤグラから海水が侵入したものである。これらの事故はいずれも波浪計を設置した海域が良好な漁場ということもあって、船舶の航行に関連した事故と推定されているが、こうした海域へ設置する際には、標識灯の光達距離や接続金具の脱落防止について一層の配慮が必要となる。漂流事故や漏水事故が発生するとそれに伴う二次故障が発生する確率が高く、その修理にもかなり長期間を要することになる。本波浪計でも電源電池などに海水の侵入による故障が発生している。

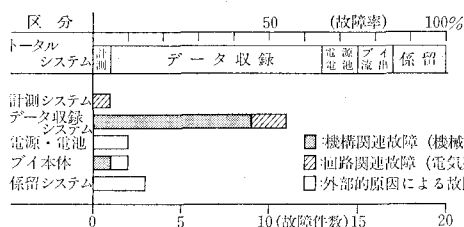


図-8 故障の原因別分類

故障の原因別分類をとりまとめたものが図-8である。ここで機構関連故障とは機械系統の故障という意味であり、ブイ本体や係留システム、データ収録システムのCMT等の故障である。また回路関連故障とは電気系統の故障という意味であり、電子回路やセンサー等の故

障である。外部的原因による故障とは、外部の人為的行為等によって発生したと想定される故障であり、事故によって発生した機構・回路関連の故障を含んだものとして定義している。

図からわかるように、トータルシステムの故障発生総件数は19件であり、その内訳は計測システム1件、データ収録システム11件、電源電池2件、ブイ本体2件、係留システム3件である。故障原因の大半はデータ収録システムに起因するものであり、約60%を占めている。計測システムの故障はCMTとの接続回路である信号変換回路の故障であり、センサー自身の故障は発生していない。ブイ本体の故障は2件であり、空気取入口の海水侵入防止弁の取り付けと、漂流時に生じた上部ヤグラの変形であり、いずれも軽微なものである。係留システムについては前述のようなシャックルピンの脱落と漂流時に発生した係留ロープの外層被覆の破損である。

以上述べたように、データ収録システムの故障と外部的原因による故障を組合せた件数は、故障発生総件数の約90%を占めている。したがって、本波浪計のシステムとしての信頼性は、CMTの信頼性と外部的原因による故障の発生率に規定されることがわかる。

以下にそれぞれのシステムの詳細について述べる。

(b) 計測システム

計測システムは鉛直加速度計、角速度計、方位計から構成されている。これらのセンサーについては、観測期間中特性に特段の変化はみられず修理を行った実績もない。観測開始10ヶ年経過を契機に実施した特性試験では、鉛直加速度計、角速度計の成分それぞれに方位計については規格値を十分に満足していること、角速度のY成分についてはスケールファクターが規格値から0.1%程度外れているが、この程度の数値はほとんど問題にならないことが確かめられている。特性試験の結果から明らかに、本波浪計に搭載した各センサーは10ヶ年以上にわたって正常に作動しており、十分な耐久性を有しているといえる。これは苛酷な海象条件に耐えうることを目的として、可動部が少ないセンサーを選定したことによる。

(c) データ収録システム

前述のように故障の原因の大半はデータ収録システムに起因するものである。故障の内容としてはテープのカラミや回転数の異常など、CMTの可動部の不良が大半である。このような故障は東播海岸における定常観測ではそれほど発生しておらず、その原因は定期点検の頻度や海象条件の差によるものと推定される。したがって、データ収録システムの故障履歴に基づく信頼性の検討は本波浪計の測得率向上の観点から重要なことと考えられる。

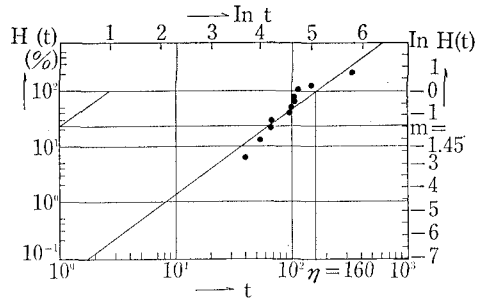


図-9 パラメータの推定

一般的に製品の寿命時間の分布はワイブル分布に従うものとして取扱われることが多い。図-9は1980年6月から1989年12月までのデータを対象として、故障率関数のパラメータを推定するために、ワイブル分布用累積ハザード紙にプロットしたものである。ここで $H(t)$ は故障率関数を積分した形で定義される累積ハザード関数、 t は故障日数である。図からわかるように、故障率の形状パラメータ m は約1.45であり、尺度パラメータは約160となっている。 $m=1$ の場合は指数分布と一致することから、データ収録システムの寿命時間の分布は指数分布に近いといえる。これらの値を用いて平均故障間隔を求めると145日ということになる。また指数分布をあてはめた場合の平均故障間隔の区間推定値を計算すると、システムの信頼性を常に50%以上に維持するには約3ヶ月毎の点検整備が必要となる。一般に可動部を含む製品の寿命は固体素子化された構成部品に比べて短かく、特にCMTのような精密機械はブイのように常に動揺する環境の下では、平均故障間隔の低下は避けられない。内部収録型のデータ収録システムはテレメータ方式と違って大がかりな施設が不要であり経済的という利点もあることから、今後とも改善を図っていく必要がある。

(d) 係留システム

係留システムについては3件の故障が発生している。漂流事故の原因となったシャックルは、ダブルナットのものを使用しており、容易には外れない構造となっている。富士海岸や東播海岸での観測においてもシャックルピンの脱落という例はなく、今後人為的にもより外れにくい構造を検討する必要がある。その他係留システムの弱点としては合成繊維ロープの長期使用による強度低下やブイ本体に作用する衝撃力によるロープの切断が考えられる。衝撃力によるロープの切断事故は、海底におかれたチェーンの効果もあって発生していない。合成繊維ロープの強度低下については明確な資料に乏しく、本波浪計においても当初は1～2年で交換していたが、経済的にも負担が大きいことから最近では相当長期間にわたって連続使用をしている。そこで強度低下に関する資料

表-3 残存強度試験結果

	実 測 径 (mm)	リ ー ド (mm)	残存強度率 (%)	伸 び 率 (%)
供試体 (A)	50.3	328	45.5	13.0
供試体 (B)	49.3	330	94.9	15.5

をうるために、1987年から1990年の約4ケ年にわたって使用したロープの残存強度試験結果を表-3に示す。表において供試体Aは外層被覆が破損している部分のものであり、一方供試体Bは外層に軽度の擦れのみしか確認されなかった部分のものである。規格の破断荷重 31 tf に対して、残存強度はそれぞれ45.5%、94.9%となっており、残存強度が外層被覆の損傷の程度によって大きく異なることがわかる。この外層被覆の損傷は漂流事故によって生じたものであり、通常の使用状態であれば外層被覆の損傷が発生することは考えにくい。したがって、採用した合成繊維ロープは少なくとも4ケ年程度の連続使用には十分耐えうるものと考えられる。また係留索のカミヤスィベル、シンブル、チェーンなど他の構成品についての異常は生じていない。

(e) ブイ本体

ブイ本体は、半年毎に陸上に引上げ、カキ落としや防蝕版の交換、ブイ本体の塗装などの維持補修を行っている。ブイ本体については上部ヤグラの変形を除いて外観上の変化などはみられない。ただし、ポリエチレンフォーム製のフロートには多少の損傷や変形が認められる。海洋生物の付着については富士海岸や東播海岸に比べて少ないが、やはり半年程度の間隔でカキ落としが必要である。

5. テレメータ化の検討

内部収録方式には荒天時など最も必要な時に、リアルタイムでデータが入手できないという根本的問題があり、テレメータ方式によるデータ伝送が可能になれば、本波浪計の使用性能が格段に向上することになる。テレメータ方式は様々な分野の通信手段として使用され、技術的にはほぼ確立しているといえる。ところが本波浪計のように運動を行う物体からの送受信装置としてテレメータを使用する場合には、陸上の場合と異なり海面の影響とブイ本体の動揺の影響を考慮に入れる必要がある。海面の反射や波による遮へいなど海面の影響を軽減するためには、ブイ本体側の空中線を高い位置に取付ける必要がある。当然ながらブイの運動性能に影響を与えない小型軽量のものであることが条件であり、無線周波数は

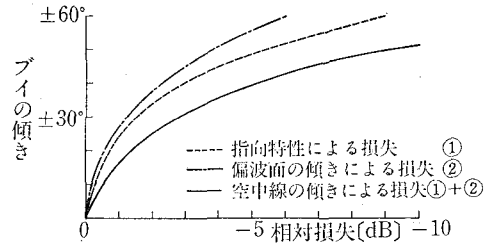


図-10 電波伝播の相対損失

電波の減衰特性を考慮すれば 400 MHz 帯が望ましい。これらの条件を満足する空中線の採用は技術的には十分可能である。またブイ本体の動揺が電波伝播に与える影響としては、傾きによる指向特性の方向損失と偏波面のズレによる損失が考えられる。図-10はこれらの影響を、ブイ本体に無指向性空中線としてスリーブ形を搭載した場合について計算した結果を示している。図からわかるように、ブイ本体が45度傾くと相対感度が10 dB程度低下することになる。過去の観測データから判断すれば、ブイ本体が45度以上傾いた状態が長時間継続することは考えられないことから、10 dB程度の余裕を見込んだ回線設計を行うことによって十分な感度を確保できる。

7. 結 言

本文では、表面ブイ式波浪計を適用した長期にわたる定常観測の結果について報告した。観測結果から、本波浪計はむつ小川原海岸のように相当厳しい海象条件の下でも、工学的に十分な精度で波高・周期や波向の観測が可能であり、定常的な観測システムとしての信頼性も高いことが明らかになったものと考えられる。現在、テレメータ装置や応答特性がよくブイの動揺の影響をうけることが少ないセンサーを搭載した3号機が製作中であり、定常観測に適用される予定となっている。その結果については稿を改めて報告したい。

最後に、定常観測の実施にあたり、御協力頂いた環境計測システム(株)、日本無線(株)の担当者の方々に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 電子通信学会編 (1974): 電子通信ハンドブック, pp. 1507-1535.
- 橋本 宏・山口 修・弘田英人 (1981): 表面ブイ式波浪計による波向観測, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 158-162.
- 牧野鉄治・野中保雄 (1983): 信頼性工学, 日科技連, p.22.
- 高橋智晴他 (1983): 沿岸波浪観測年報 (昭和56年), 港湾技研資料 No. 445.