

# 港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 860 Mar. 1997

波 浪 監 視 計 の 開 発

|   |   |   |     |
|---|---|---|-----|
| 菅 | 原 | 一 | 晃   |
| 永 | 井 | 紀 | 彦   |
| 橋 | 本 | 典 | 明   |
| 鈴 | 木 | 高 | 二 朗 |
| 清 | 水 | 康 | 男   |
| 浪 | 間 | 雅 | 晶   |

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1. まえがき .....                      | 4  |
| 2. 波浪監視計開発の経緯 .....                | 4  |
| 2.1 海中計測技術の動向調査からの提言 .....         | 4  |
| 2.2 既存波高計の問題点と波浪監視計 .....          | 4  |
| 2.3 水圧変動計測結果を用いた表面波形の推定手法の開発 ..... | 5  |
| 3. 波浪監視計の機能と構成 .....               | 8  |
| 3.1 機器構成の概要 .....                  | 8  |
| 3.2 海中部水圧センサー .....                | 11 |
| 3.3 小型プイと簡易無線を用いたデータ伝送 .....       | 11 |
| 3.4 データ受信装置 .....                  | 16 |
| 3.5 表示及びデータ記録方式 .....              | 16 |
| 4. アシカ島観測施設における現地実証実験 .....        | 18 |
| 4.1 現地実験 .....                     | 18 |
| 4.2 水圧変動結果を用いた表面波形換算結果の検証 .....    | 20 |
| 4.3 観測時間長の考察 .....                 | 20 |
| 5. 今後の課題 .....                     | 21 |
| 5.1 波浪監視計の長所と活用 .....              | 21 |
| 5.2 波浪諸元と人の安全 .....                | 22 |
| 6. あとがき .....                      | 24 |
| 参考文献 .....                         | 24 |

# Development of the Real-Time Shallow Wave Meter

Kazuteru SUGAHARA\*

Toshihiko NAGAI\*\*

Noriaki HASHIMOTO\*\*\*

Koujiro SUZUKI\*\*\*\*

Yasuo SHIMIZU\*\*\*\*\*

Masaaki NAMIMA\*\*\*\*\*

## Synopsis

This paper introduced the newly developed Real-Time Shallow Wave Meter. The Real-Time Shallow Wave Meter is able to observe shallow water wave heights and periods with sufficient accuracy by measuring seabed pressure fluctuations. Observed data are transmitted to the on-land personal computer by wireless, and appear on the display with warning signals.

The Real-Time Shallow Wave Meter will be applied to the beach safety control with reasonable low price, and will decrease human accidents in the coasts.

**Key Words :** Real-Time Shallow Wave Meter, Wave Gauge, Shallow Water, Water Temperature

---

\* Senior Research Engineer, Hydraulic Eng. Div.

\*\* Chief, Marine Obs. Lab., Hydraulic Eng. Div.

\*\*\* Chief, Hydrodynamics Lab., Marine Environmental Div.

\*\*\*\* Member, Marine Structures Lab., Hydraulic Eng. Div.

\*\*\*\*\* Kyowa-Shoko C.O.

# 波浪監視計の開発

菅 原 一 晃\*

永 井 紀 彦\*\*

橋 本 典 明\*\*\*

鈴 木 高 二 朗\*\*\*\*

清 水 康 男\*\*\*\*\*

浪 間 雅 晶\*\*\*\*\*

## 要 旨

浅水深における波浪諸元を簡易かつ安価に観測することができ、なおかつリアルタイムでモニターできる波浪監視計を開発した。

本資料は、波浪監視計の設計思想、すなわち機能と構成を示すとともに、当所アシカ島観測施設における現地実証実験結果を紹介するものである。

波浪監視計は、海底面に設置される水圧センサー、簡易無線装置を搭載した小型プイ、陸上部データ受信装置と表示・記録装置から構成されるものである。水圧変動記録の表面波形への高精度換算システムを組み込み、特定小電力無線によるリアルタイム波浪監視ができる波浪監視計は、従来の波高計に比べて、非常に簡易かつ安価なものであるが、現地実証実験の結果、以下の成果を得ることができた。

①有義波高が4 m近い時化にあたって、システムは正常に機能し、その安定性と、信頼性が確認されたこと

②波浪監視計に内蔵した水圧変動記録から高精度に表面波形を推定する数値フィルターは、その最大補正倍率を30程度とすることによって、その観測精度と信頼性が十分に満たされること

③波浪監視計では、データの速報性を高めるため、各観測におけるデータのサンプリング時間は、従来の波高計の半分の10分間に設定しているが、最高波諸元算出には若干のばらつきは見られるものの、有義波諸元に関しては、演算結果の安定性が確認されたこと

波浪監視計は、海水浴場等における安全監視に応用できる。このため、従来から当所が研究を進めている人の安全と気象・海象との関係に関する知見を反映させて、音声等による危険表示機能の付加が今後の課題となっている。

キーワード：波浪監視計，波高計，浅水深，水圧，水温，リアルタイム

---

\* 水工部主任研究官

\*\* 水工部海象調査研究室長

\*\*\* 海洋環境部水理研究室長

\*\*\*\* 水工部耐波研究室

\*\*\*\*\* 協和商工（株）取締役 技術部長

\*\*\*\*\* 協和商工（株）技術部

## 1. まえがき

昭和60年度から63年度にかけて、海洋科学技術センター（JAMSTEC）が実施した海中計測技術の動向調査結果の中で、その委員として参与した著者の一人菅原は、浅水深における波高計の必要性問題点について言及した。

1). 2). 3). 4) これは、20～50mの深水深の波浪条件を精度よく計測することを目的とした既存の波高計は、いずれも設置・撤去にあたっては規模の大きい海洋工事が必要となるものであり、相当の費用を要するものしか存在していなかったためである。

その後、約10年の歳月を経たが、港湾技術研究所と、波高計や各種海象観測機器の開発・製造に実績を有する協和商工株式会社は、「波浪監視計および観測システムの開発」という研究課題の下で平成8年から共同研究を開始し、この度、浅水深で簡易かつ安価に波浪実況を把握し、その観測結果を現場で表示する機能を有する、波浪監視計の開発に着手した。

本資料は、新しく開発した水深20m程度以浅において用いる波高計（波浪監視計）について述べたものであり、これまでに得られた成果をとりまとめた、いわば、中間報告としての位置づけを有している。波浪監視計は、その設置と撤去が簡単であり、価格も既存の波浪観測機器に比べてずっと安価となるものである。

波浪監視計は、海洋工事の施工管理、現地調査における基礎情報の収集など、簡易な波浪調査において活用範囲が広い。特に、海洋性レクリエーションの普及に伴い、海水浴場等の安全に関する問題意識が次第に社会一般に深まってきた中で、波浪監視計は、安全性の向上に大きく貢献することが期待されている。

本資料の執筆は、全般的には菅原と永井が行ったが、2.3は橋本が、3.は清水・浪間が、4.の一部は清水・浪間が、5.2は鈴木が、それぞれ担当した。

## 2. 波浪監視計開発の経緯

### 2.1 海中計測技術の動向調査からの提言

昭和60年度から4年間にかけて、科学技術庁海洋科学技術センターにおいて「海中計測技術の動向調査」委員会が設けられた。この調査の基本方針は、

「本調査は、海中計測技術に関連技術とともに総合的、体系的に整理し、現状における問題点を洗い出したうえで、その動向を明らかにしようとするものである。加えて、海中計測技術個々の技術向上に必要な研究開発に資することも目的の一つであり、広く一般に可能な報告書

を作成することを目指している。したがって、本調査は、海中の計測技術に関し、第一線で活躍されている研究者及び技術者にて構成される海中計測技術の動向調査委員会を中心に実施するものである」

とうたわれているが、その委員の一人として、運輸省港湾技術研究所から、著者の一人である菅原が、この基本方針の策定を担当した。

この調査は、海中計測技術に関する歴史・分類・現況については初年度に、また現状分析と問題点については第2年度に実施された。第3年度の調査には、第2年度の報告書の中に抽出されている多数の問題点の中から、特に重要と思われる問題事項を選定し、それらの問題にどのように対処したらよいかという観点にたって、問題解決に必要な方策の検討を中心として調査を行った。現状調査も継続して行っている。

菅原は「主要な海中計測技術の問題点とその動向」と題して第3年度報告書を発表している。この中で「水深の浅いところで用いる波高計の開発」の必要性の概観を提示している。さらに、第4年度においては「浅水深における波浪の観測技術」と題して、水深の浅いところにおける波高計に関する種々の項目について開発の方策を述べている。

### 2.2 既存波高計の問題点と波浪監視計

こうした海中計測技術の動向調査からの提言は、裏返せば、十分にこうしたニーズに適応する既存の波高計が存在しないことが問題点として指摘されているわけである。以下に既存波高計を概観する。既存の波高計は、主に、以下の3種類に分類可能であるが、それぞれ、上記の提言を実現するには至っていない。

#### ①ケーブル方式

現在重要な港湾に於いてはケーブル方式による波浪観測が行われている。この方式は、検出部を海底に設置し陸上の監視装置とを海底ケーブルで接続し、電源の供給と信号線によるデータの回収をリアルタイムで行うものである。この方式の長所・短所は概ね次のごとくである。

長所 監視装置から検出部の制御ができる。

データがリアルタイムで得られる。

短所 ケーブルの断線事故が発生する。

断線事故に対し修理期間が長期化することもあり、その間は欠測となる。

敷設工事も含めて費用が高価となる。

#### ②直記式

短期間の観測、多数の地点での観測が必要な場合直記式の装置が利用されている。この方式は海底に設置した検出部の内部にデータを収録し、後日装置を海底から引

揚げ、データを回収し解析処理を施すものである。この方式の長所・短所は概ね次のごとくである。

長所 観測地点を移動でき、簡単に設置・回収ができるので装置が有効に活用される。

低価格である。

短所 データがリアルタイムで得られない。

### ③ブイ式（加速度計を使用したもの）

この方式は、海面に浮上するブイに加速度計を搭載し、ブイが上下することで生じる加速度を捉え、2重積分により移動距離（波高）を観測するもので、傾斜計・コンパスを装備し波向のデータも得ている。得られたデータは無線装置で陸上の監視装置に送られ活用されている。この方式の長所・短所は概ね次のごとくである。

長所 データがリアルタイムで得られる。

短所 ブイの不要な動揺・応答特性により波高の周期に制限がある。特に長周期波は加速度が得られず観測できない。

電源をブイの内部にもつためブイの形状が大型になる。

大型化により風波の影響が大きく係留が困難となる場合もある。

ジンバル装置等の機構が複雑となる。

本波浪監視計は、これらの長所・短所をふまえた上で、提言の実現をめざしたものであり、波高の検出部には水圧センサーを使用している。30分毎に10分間0.5秒間隔で観測した水圧変動データは、港湾技術研究所が開発した精度と信頼性の高いシステムによって表面波浪諸元に換算される。観測記録は、特定小電力無線機で海岸に設置した受信装置によりリアルタイム情報として確認でき、

必要に応じて遠方の監視詰所等にデータ伝送することも可能である。比較的構造が簡単な水圧センサーと、軽量かつ取り扱いに特殊な許可や資格を要しない特定小電力無線システムを組み合わせることで導入することによって、波浪監視計は従来の波高計に比べて非常に簡易かつ安価なものとなっている。

## 2.3 水圧変動計測結果を用いた表面波形の推定手法の開発

### (1) 概要

波浪観測にあたっては、海面の上下変動を計測しなければならない。このため、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）における定常波浪観測にあたっては、通常は、海底面に設置したセンサーから超音波信号の発信と受信を繰り返し、水面の時々刻々の高さを正確に測定することができる超音波式波高計（USW）が採用されている。しかし、超音波式波高計は、その精度と信頼性が高い反面、水圧式センサーに比べて電力消費、海底設置作業などの観点から見て、相対的に価格が高くならざるを得ない。

波浪監視計は、一般への普及をめざすため、経済性を追求し、比較的安価な水圧センサーを採用しているが、最新の当所の研究成果を取り入れ、実用的には十分な精度で、海底面における水圧変動量から海面の上下変動を推定する。<sup>5)</sup>以下に、文献5)の概要を示す。

### (2) 水圧波から表面波への伝達特性に関する検討

図-2.1は、水深30m、計器設置水深28mの観測条件とし、周波数スペクトルとして $H_{1/3} = 5\text{ m}$ 、 $T H_{1/3} = 9.52\text{ 秒}$ のBretschneider・光易スペクトルおよび方向関数 $G(\theta | f)$ として光易型方向関数を用い、2次までの非線形性を含む表面波および水圧波の周波数スペクトル

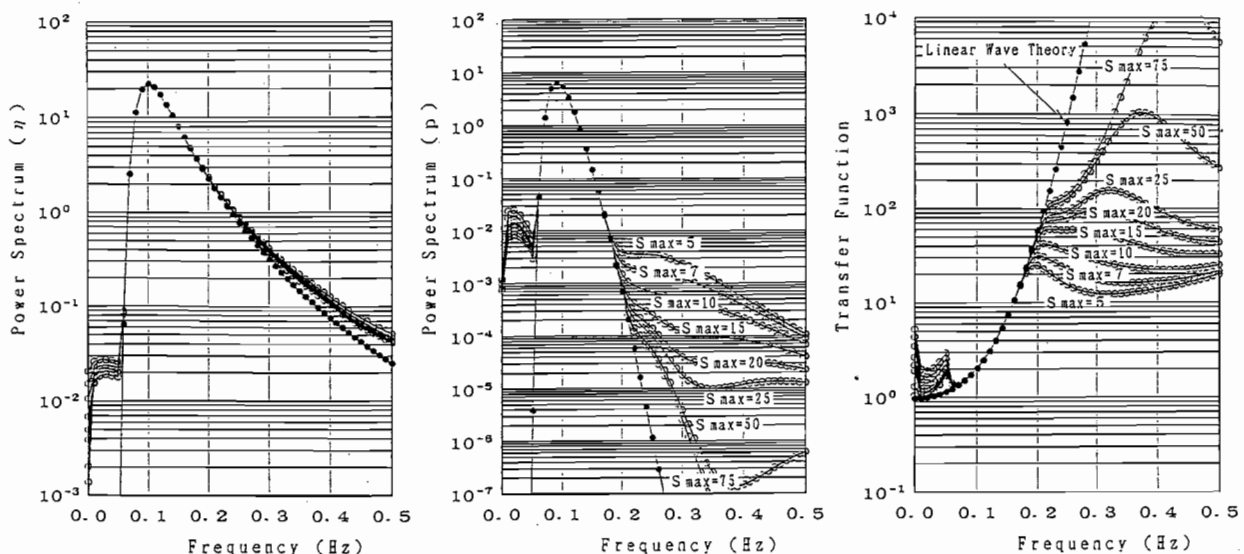


図-2.1 表面波と水圧波のパワースペクトルおよび伝達関数の特性（理論値）

ならびにそれらの比の平方根で与えられる水圧波から表面波への伝達関数を、方向集中度パラメータ  $S_{max}$  をパラメータとして計算したものである。図-2.1に見られるように、表面波の周波数スペクトルでは  $S_{max}$  の相違によるスペクトル形状の差異はそれほど顕著ではないが、水圧波のスペクトルには  $S_{max}$  に依存して特にその高周波数側に顕著な差異が見られ、 $S_{max}$  が小さいほど高周波数側のエネルギーが増大する。この影響のため、伝達関数にも低周波数側と高周波数側に線形理論値との差が顕著に現れ、 $S_{max}$  が小さいほど高周波数側および低周波数側では線形理論値から外れてくる。

これは多方向性を考慮したことにより、2次の非線形性による2つの線形成分波の波数ベクトルの和と差の絶対値の関係から、高周波数側では周波数に対応して分散関係式で与えられる波長よりも長い波長の2次成分波が生成され、逆に低周波数側では分散関係式で与えられる波長よりも短い波長の2次成分波が生成されるためである。これは入・反射波共存場における microseisms と同様の現象が、多方向性を有する一般の波浪場においても生じることを示している。

ここでは特定の観測条件、波浪条件のもとに  $S_{max}$  のみをパラメータとして伝達関数の特性を示したが、これらは水深や計器設置水深、有義波周期など他のパラメータによっても多様に変化し、これが、水圧波から表面波への換算法に経験的なパラメータを導入しなければならなかった理由の一つと考えられる。

このような現象は現地観測データにも認められる。図-2.2は常陸那珂港（水深30m、水圧計設置水深28m）で1990年10月23日に2時間ごとに観測された1日分の12ケー

スの表面波と水圧波の周波数スペクトルおよびこれらをもとに計算された水圧波から表面波への伝達関数の実測値を示したものである。表面波のスペクトルの高周波数側ではケース毎のばらつきは小さいものの、水圧波のスペクトルや伝達関数の高周波数側には、ケース毎に顕著な差異が現れている。これは、常陸那珂港ではこの日の前半は風波性の波浪、後半はうねり性の波浪に推移しており、方向スペクトル形状の変化によるものと思われる。

以上のように、水圧波から表面波への伝達関数の多様性は方向スペクトル形状の相違による影響が大きいことが判明したので、妥当と思われる方向関数を適宜与えながら多方向性と弱非線形性を考慮した伝達関数を理論的に計算して、水圧波から表面波への換算を行った。これにより方向関数の与え方によってはかなり高精度に表面波へ換算可能であるであることが分かった。

### （3）水圧波から表面波へ換算するための簡便法

以上述べたように、事前に妥当な形の方向関数が推定されるならば、理論的に妥当な伝達関数が計算によって得られ、表面波への高精度な換算が可能である。しかしながら、水圧記録のみが得られている状況では方向関数を事前に推定することは難しい。そこで、ここでは図-2.1および図-2.2に見られる特性をもとに考案した伝達関数の簡便な推定法について述べる。

図-2.1、図-2.2に見られるように、対数グラフ上に表示した水圧波のスペクトルはピーク周波数より約1.3倍程度から、特定の周波数までは、概して直線的に減衰する。

また、この特定周波数よりも高周波数側では滑らかな曲線となる。その境界となる周波数は方向関数の形状に

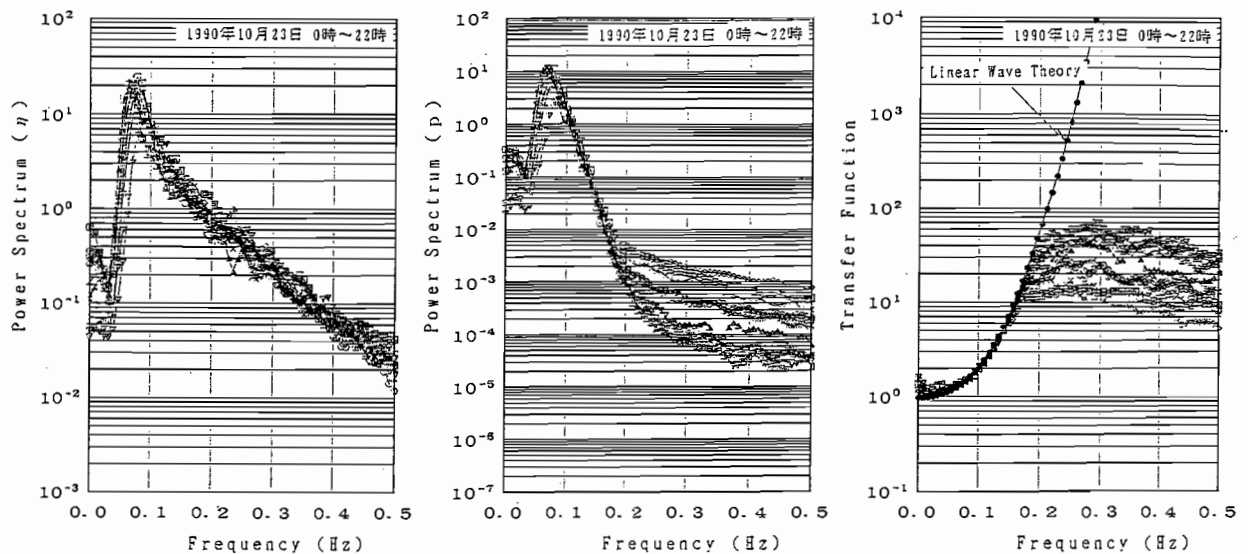


図-2.2 表面波と水圧波のパワースペクトルおよび伝達関数の特性（現在観測データ）

依存して変わり、伝達関数もその周波数を境界として線形理論値との差異が生じ、方向関数に依存してそれぞれ異なる挙動を示す。しかしながら、伝達関数の実測値はほぼ一定値の回りに変動する傾向が見られる。

そこで図-2.3に示すようにピーク周波数の1.3倍( $f_1$ )～5倍( $f_2$ )の範囲を周波数 $f_B$ を境界としてそれぞれ直線近似および放物線近似し、 $f_B$ を変えて計算し、生のスペクトルと近似式の誤差の分散が最小となる $f_B$ を求める。この境界周波数 $f_B$ よりも高周波数側では、図-2.3の右図に示すように、伝達関数の値として $f_B$ での線形理論値を用い一定値とする。通常の風波やうねりのスペクトルを対象とする場合には上記の方法によって観測データ毎に妥当な境界周波数 $f_B$ が推定可能である。しかしながら、顕著な二方向波浪、特に低周波数側にピークを有するうねりと高周波数側にピークを有する発達過程の風波の重合したスペクトル形を対象とする場合には $f_B$ は大きめに推定される場合がある。この問題に対処するために、図-2.1をもとに $f_B$ に上限値(図-2.1の場合には0.2Hz)を設け、推定された $f_B$ がこの上限値を越える場合には上限値を $f_B$ として採用することとした。

なお、実際の計算では、ピーク周波数の5倍の周波数までを伝達関数の有効範囲とし、それ以上の周波数では

伝達関数を0として無視している。しかしながら、このようになり高周波数の範囲まで伝達関数を考慮する場合、観測されたデータが有限長であり、データの端部で不連続である影響が現れるため、データの初めと終わり10%ずつの部分にcosine型のデータウィンドーをかけて上記の処理を行い、表面波に換算した後は、残りの80%のデータを用いて有義波等の統計処理を実施した。

図-2.4はUSWにより観測された表面波と本方法により推定された表面波の時系列を比較したものである。細線はUSWにより観測された表面波、太線は本方法により推定された表面波の時系列を示している。図-2.4に見られるように、本方法により推定される波形は波高

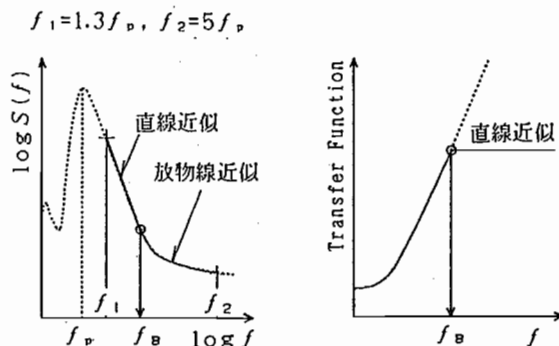


図-2.3 伝達関数の近似的表現

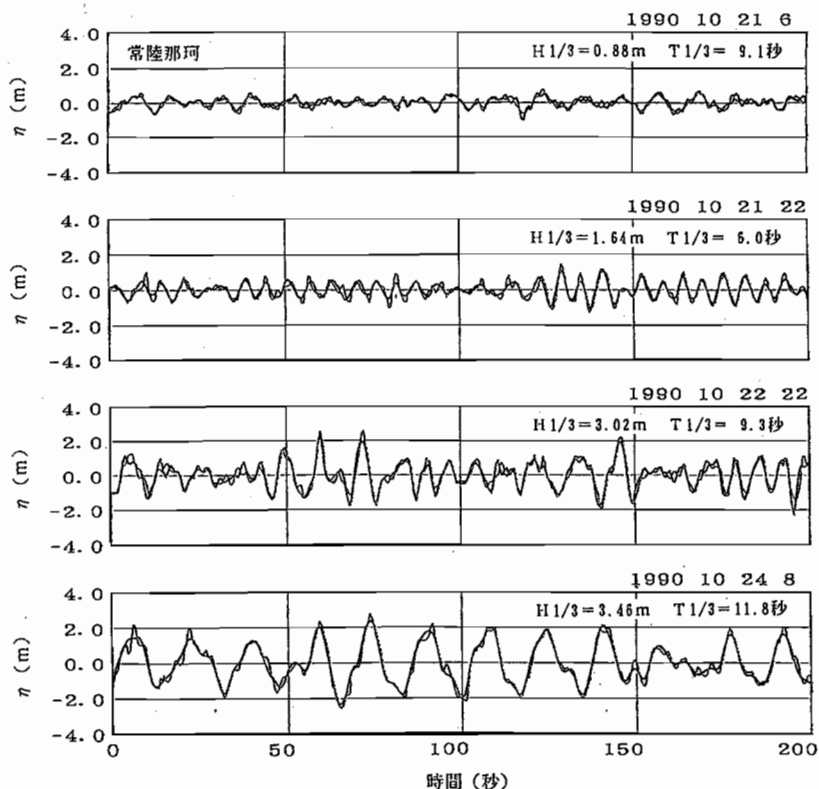


図-2.4 表面波の実測波形と推定波形の比較

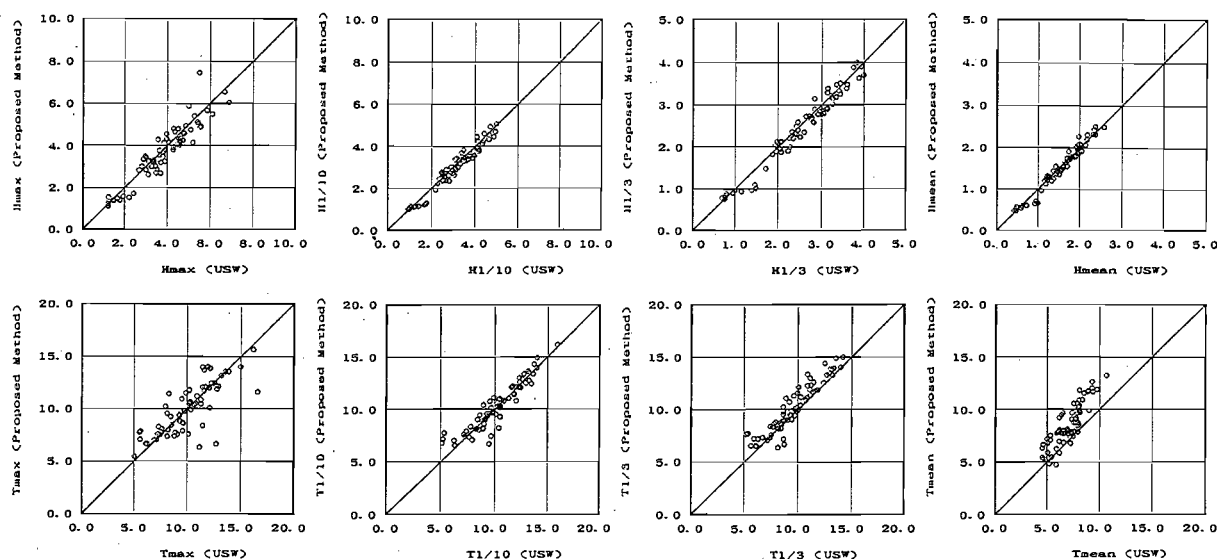


図-2.5 観測された波浪諸元と推定された波浪諸元の比較

の低い場合や高波浪時の場合にもほぼ妥当に表面波を推定し得ることが分かる。図-2.5は種々の波浪条件72ケースを対象として、USW および本方法で推定された時系列記録をもとに波浪解析した結果を比較したものである。本方法による結果は最高波諸元の推定には若干の変動誤差を伴うものの、有義波高に関しては、周期ともに USW による結果とよく一致した。有義波周期に関しても、若干の片寄りは見られるものの、これまでの換算法に比べれば、非常に良好な一致を示している。

### 3. 波浪監視計の機能と構成

#### 3.1 機器構成の概要

図-3.1は、波浪監視計の概要を示したものである。波浪監視計の構成を、表-3.1に、ブロックダイアグラムを図-3.2に、波浪監視計の諸元を表-3.2に示す。なお、図-3.1中で点線で囲っている太陽電池、大型表示盤およびモデムの部分は、本稿執筆時点ではまだシステム中に組み込まれておらず、今後の開発課題として残されて

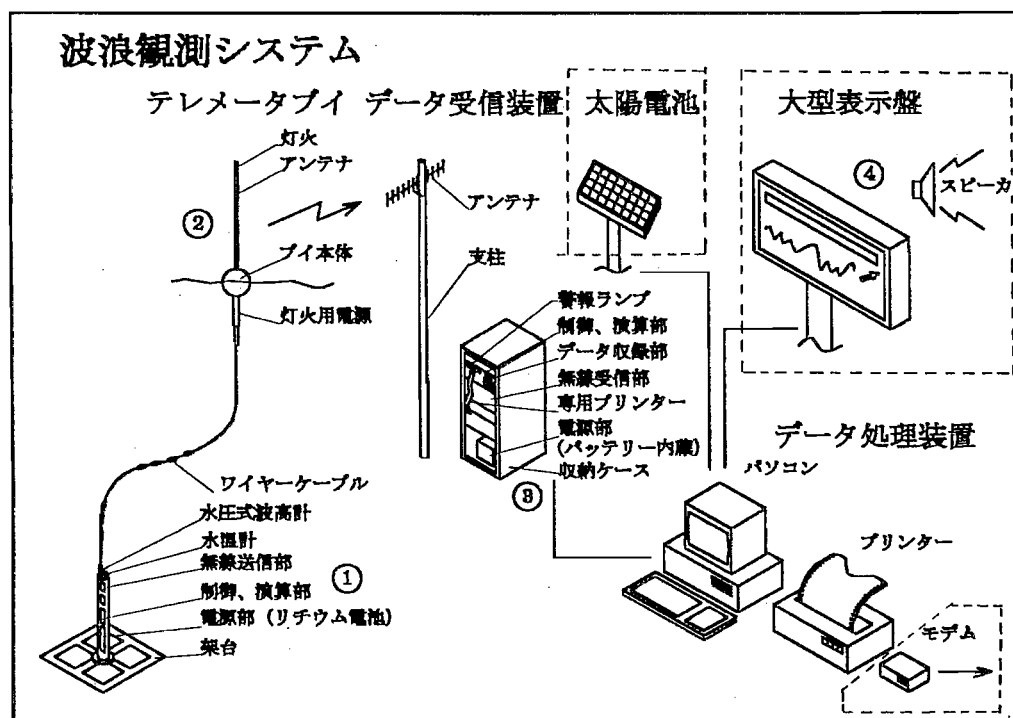


図-3.1 波浪監視計システム構成図

表-3.1 波浪監視計の構成

| 名 称                                                                   | 数量  |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 波高検出装置<br>水圧センサー<br>水温センサー<br>無線送信部<br>制御・演算部<br>電源<br>収納 ケース<br>設置架台 | 1 式 |
| テレメータブイ<br>灯火<br>アンテナ<br>ブイ本体<br>灯火用電源<br>ワイヤーケーブル                    | 1 式 |
| データ受信装置<br>無線受信機<br>制御・演算部<br>専用プリンター<br>電源部<br>収納 ケース                | 1 式 |
| データ処理装置<br>CPU 本体<br>CRT<br>PRN<br>モデム・ユニット                           | 1 式 |
| 大型表示盤<br>音声出力                                                         | 1 式 |
| 太陽電池                                                                  | 1 式 |

いる部分である。

ここで開発する波浪監視計には、次のような事項が満足されなければならないと考えられる。

- ①データがリアルタイムで得られる。
- ②観測地点を移動でき、簡単に設置・回収ができる。
- ③長期間の観測が可能である。
- ④低価格である。

これらは、2.2で述べた既存の各方式による観測の長所のみ取り上げたことになり、実用化されれば観測に携わる関係機関に対しての貢献は大きい。そこで、目標とする海象観測システムは、図-3.1に示す通り、

- ①海中部水圧変動計測センサー
  - ②海上小型ブイと簡易無線によるデータ伝送システム
  - ③陸上データ受信装置
  - ④波浪観測結果の表示・記録システム
- から成り立つものである。

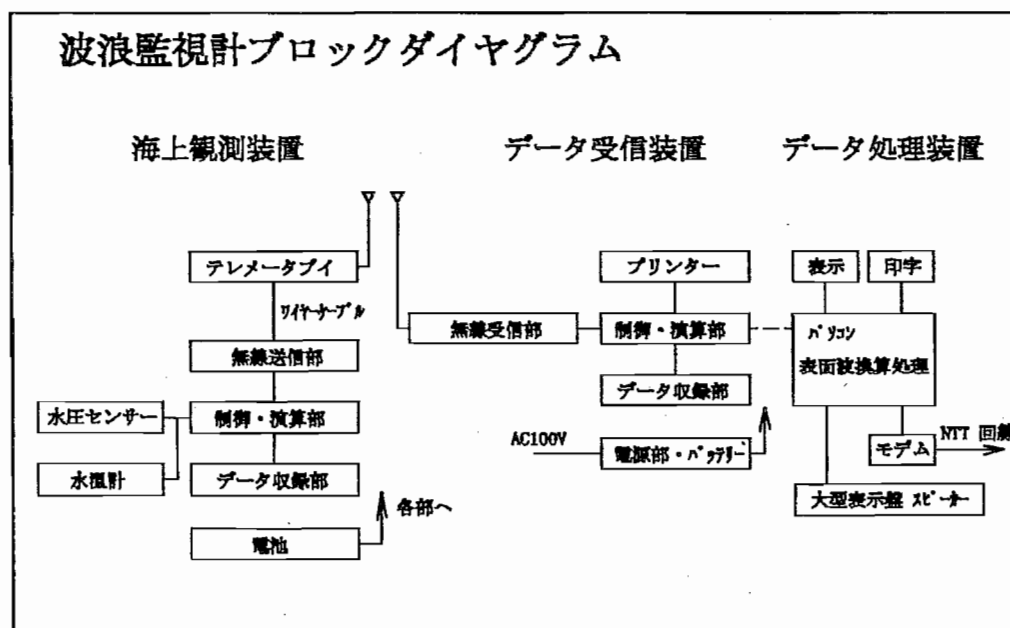


図-3.2 波浪監視計ブロックダイアグラム

表-3.2 波浪監視計の諸元

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>波高検出装置</b></p> <p>水圧センサー<br/>測定範囲 3kg/cm<sup>2</sup><br/>測定精度 ± 1 % FS<br/>分解能 ± 1 cm</p> <p>水温センサー<br/>測定範囲 -10 ~ 40 °C<br/>測定精度 ± 0.5 %<br/>分解能 ± 0.2 °C</p> <p>無線送信機<br/>無線機 特定小電力無線機<br/>送信出力 10 mW<br/>周波数 429.25 MHz 帯<br/>アンテナ ロッドアンテナ 高さ約 2m</p> <p>制御・演算<br/>観測制御 CPU による制御<br/>時刻精度 ± 30 秒/月<br/>観測モード 10/30 分観測<br/>サンプリング 0.5 秒<br/>データ収録 生データ</p> <p>表示内容 LCD、4 行・24 桁<br/>時刻・演算結果等</p> <p>電源 バッテリー 12V 60 AH</p> <p>収納ケース<br/>材質 SUS-304<br/>外形寸法 600 H・φ120 mm<br/>重量 約 20 kg</p> <p>設置架台<br/>材質 SUS-304<br/>寸法 約 800・800mm<br/>重量 約 10 kg</p> | <p><b>データ受信装置</b></p> <p>無線受信機<br/>無線機 特定小電力無線機<br/>周波数 429.25 MHz 帯<br/>アンテナ 八木 8 素子使用</p> <p>制御<br/>観測制御 CPU による制御<br/>時刻精度 ± 30 秒/月<br/>時刻合わせ キースイッチ による<br/>観測モード 10/30 分観測</p> <p>演算<br/>演算項目 表面波換算<br/>波浪諸元を出力<br/>最高波・周期<br/>1/10最大波・周期<br/>有義波・周期<br/>平均波・周期<br/>平均水温<br/>平均水位 (略潮位)</p> <p>表示<br/>表示内容 LCD、4 行・24 桁<br/>時刻・演算結果等</p> <p>印字出力<br/>時刻 観測時刻<br/>出力項目 最高波・周期<br/>有義波・周期<br/>生データ・演算結果</p> <p>データ収録<br/>収納ケース 鉄板 樹脂 塗装<br/>外形寸法 650W・900H・670D</p> |
| <p><b>テレメータブイ</b></p> <p>ブイ本体<br/>浮力 約 50 kg<br/>灯火 到達距離 約 5 km<br/>4 秒 1 閃光</p> <p>外形寸法 3500 H・約φ500 mm<br/>重量 約 25 kg</p> <p>ワイヤケーブル<br/>抗張力 約 500 kg<br/>信号線 4 芯 0.75 sq<br/>同軸ケーブル SD-5V</p> <p>外形 約 φ16 mm</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>警告・表示及びデータ記録方式</b></p> <p>データ処理装置<br/>CPU 本体 PC-98 シリーズ<br/>CRT カラー 14 インチ<br/>PRN 15 インチ 連続紙使用<br/>モデムユニット NTT 一般公衆回線<br/>また、専用回線</p> <p>大型表示盤<br/>表示項目 模擬波形<br/>波の消長<br/>警報等の告知</p> <p>音声出力<br/>太陽電池<br/>最大出力 16.2V-1.5A<br/>重量 約 8 Kg</p>                                                                                                                                                                                                                     |

### 3.2 海中部水圧センサー

#### (1) 構成

本システムに使用している水圧センサー部は、次のような特徴があり、構造図を図-3.3に示す。また、外観を写真3.1に示す。

- ①圧力検出部に絶対圧型の半導体圧力センサーを使用
- ②信号変換基板を内蔵しているので出力が大きい
- ③信号をパルス変換し、ノイズ対策を実施
- ④受圧部の構造を工夫し、長期間のメンテナンスフリーを実現

すなわち、絶対圧型のセンサーであるため、平均水面高さの検出も可能であり、波浪諸元に加えて潮位変動の概略をあわせて検出することが可能である。また、信号出力を高くし、かつ、ノイズを低減させているため、波浪諸元算定における精度と信頼性が高められている。

併設される水温計にも半導体温度センサーを採用した。これは、白金温度計に比べ精度は多少劣るものの、小

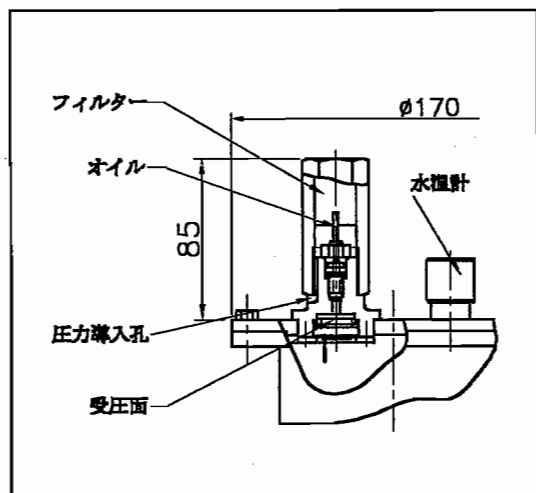


図-3.3 水圧センサー構造図

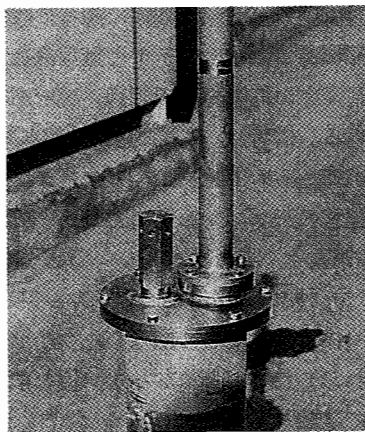


写真-3.1 水圧センサー

型であり低消費電力等に優れた点があり、波浪監視計のセンサーとして十分な性能であると判断したためである。

#### (2) 機能

水圧センサー部の機能について、以下に説明する。

##### ①受圧面

受圧面は、ダイヤフラム形式のもので材質はSUS-316を使用している。圧力は、オイルを介して伝達されるので通常は海水に触れることはなく腐食等の心配はない。

##### ②圧力導入孔

水圧はこの導入孔より内部に加圧される。

##### ③オイル

オイル注入部は、図-3.3に示すようになっており、オイルが流出しにくい構造になっているが、さらに安全を期して粘性の高いエンジンオイルNo.30を使用し、工場から出荷されたままの状態ではキャップをつけずに海底設置しても、オイルが外部に流出することはないようになっている。

##### ④フィルター

水圧センサー部の波高・潮汐の変動により海水が外部から内部へ、また内部から外部へと移動することはないが、海水中に浮遊する孢子等の侵入を防止するために設けてある。

##### ⑤水温計

半導体温度センサーを使用し、低消費電力化を行った。

#### (3) 保守・点検

水圧センサー部の保守・点検時は、船上に引き揚げた上で、カバーを取り外し内部の清掃を行い、フィルターを交換して実施する。また、必要に応じてオイルキャップを交換し、オイルを注入することで作業を終了するので容易に行うことができる。水温計は、上部水温検出面を清掃することで完了する。

### 3.3 小型ブイと簡易無線を用いたデータ伝送

#### (1) 概要

リアルタイムで波浪諸元や水温等の監視を行うためには、陸上へのデータ伝送が必要である。

データ伝送方式には次の二式が存在する。一つは、受感部から直接ケーブルにより監視装置に接続するものであり、他の一つは、小型ブイを経由した無線伝送方式である。波浪監視計では、海底ケーブルの設置を伴わない、より簡易かつ安価な方式である後者を採用した。

すなわち、水深の浅い海底に受感部（圧力センサー）を設置し、フロート（ブイ）を海面に標立し、この先に無線アンテナを立てて、特定小電力無線機によりデータ伝送し、陸上の監視装置に受信して波高の計算を為し、必要な出力を行う。

こうしたブイによるデータ伝送が順調に行われるためには、センサーが海中にしっかりと固定されているとともに、小型ブイの係留装置が確実に、且つ安定して機能することが必要とされる。

## (2) ワイヤークーブル

### 1) 概要

ブイの係留に用いられている既存の方法はさまざまな方式がその使用目的に応じて選定されている。たとえば、標識ブイ等に見られるように、流失を防止するために単に係留するだけのもので比較的穏やかな航路等に設置されるものや、大型のブイで電源・信号等を伝送する必要がある、3～4点で係留し併せてケーブルを敷設したもの等がある。

しかし、本システムに使用するブイの係留は、そのような大がかりなものではなく、海底に設置した水圧センサーと簡易無線機の電源・信号の送受が可能で容易に取り扱えることを前提として新規に開発した。

本システムに使用するブイの係留の主要部分であるワイヤークーブルは次の事項について考慮・検討した。

- ①十分な張力を持つこと
- ②捻(ねじ)れることがないこと
- ③キンクしないこと
- ④海底に接触する恐れがないこと
- ⑤電源・信号線を有していること

4. で後述するように、波浪監視計は、今までの現地実験の結果、有義波高3.6mまでは十分に安定して設置されることが確認されている。以下順にその詳細について述べる。

### 2) ワイヤークーブルの構造

図-3.4はワイヤークーブルの断面構造を示したもの

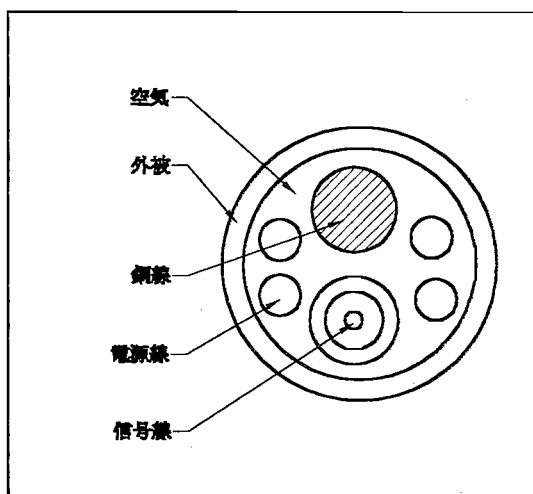


図-3.4 ワイヤークーブルの構造図

である。

### ①鋼線

ワイヤークーブルの中心となる部分で、外径  $\phi 6 \text{ mm}$  の特殊鋼線を使用。

### ②外被

ナイロンフレキシブルチューブを使用。

### ③信号線

同軸ケーブルを使用。

### ④電源線

制御・電源用として4芯を使用。

### ⑤介在物

通常の電線のような介在物は使用せず空気である。

### 3) 鋼線

ここで使用している特殊鋼線は、製造過程の圧延の段階で曲がることなく直線に仕上げられ、バネ鋼としてもいわゆるピアノ線に匹敵する高抗張力を持つもので、手軽に取り扱える限界の太さを、外径  $\phi 6 \text{ mm}$  として選定した。この高抗張力は、ワイヤークーブルの使用目的に添ったものである。

### 4) 外被

外被にはナイロンフレキシブルチューブを使用し、空隙を設け浮力を確保している。これは鋼線・信号線を防水し海水から絶縁するもので、弾力があり水圧に耐え、繰り返しの曲げにも強いことで選定した。

外被チューブにケーブルのような介在物がなく、空気がワイヤークーブルの浮力を補い水中重量を軽くしている。このことは鋼線の弾力とあいまってワイヤークーブルの中間が下方に垂れ下がることを防止している。また、ワイヤークーブルが曲げられた場合に、鋼線、信号線・電源線は互いに僅かではあるが移動し無理に引っ張られることなく、信号線・電源線の断線を防止している。

### 5) 信号線・電源線

信号線として同軸ケーブルを、制御・電源線としては4本を装備している。各線は鋼線に添って収められていて、ブイ内部にある送信アンテナと無線機とはデータの送受があり、4本の線で電源の制御、データの吸い取り等を行っている。信号は、一般的なRS-232Cに準拠したシリアル伝送であるので、ブイ中のコネクターをはずせば、船上で通常のパソコンを用いてデータを回収することも可能である。

### 6) 捻(ねじ)れ

ブイは波浪により動揺して回転し、ワイヤークーブルは当然捻(ねじ)れることになるが、捻れに対する反力を室内実験で確認した。

すなわち、長さ20mのワイヤークーブルを水平に緊張

した状態で捻りを与えた結果、その反力として、1回転あたり30kgfcmの反力を得た。このことは、ブイの部分で生じた回転力は、ワイヤーで吸収され捻れが生ずることなく、海底の架台まで伝達されることを意味している。

#### 7) キンク

キンクがどのような状態で発生するかを考えると、ワイヤーケーブル長にゆとりがあり、輪となりそれが急激に小さくなる時に起きると考えられる。ワイヤーケーブルが一定の輪より小さくなるためには鋼線の反力より大きな外力が必要である。

ここで使用している鋼線は、先にも述べたように圧延の過程で「直」になるように加工、焼き入れされている。即ち、外力により曲げられても「直」になる復元力を備えている。このような力は海中で発生することは考えられず、たとえ発生しても横方向に弾けることで、キンクに至らないものと考えられる。

#### 8) ワイヤーケーブルの保持

ワイヤーケーブルは、一方はブイの下端にもう一方は海底の検出部装置に固定されている。この固定される部分、即ち、可撓性の部分から硬い部分に移行する部所に応力が発生し、繰り返し曲げ疲労による破断が起こることが考えられる。

ここでは、この部分にも改良を加え急に曲がらないように、徐々に力が分散するようにしている。ワイヤーケーブルの長さは通常水深の1.5～2倍程度に取るのでS字曲線を描くことになる。ブイはある程度自由に移動し下端部分も傾斜するなどして極端に曲がることを防ぐことがそれ自体で行われている。

しかし、海底の装置から立ち上がった部分は逃げ場がないので、力がその部分に集中するが、集中しても大丈夫なように補強し垂直に立つようにしている。この垂直に立つことはもう一つの効果を期待している。

先に述べたごとく、ワイヤーケーブルの長さは水深の1.5～2倍程度に設定してあるので、水位が低下し波高の谷がきたときワイヤーケーブルの中間部分が海底に接触する恐れがでてくる。仮に接触する事態になれば、ワイヤーケーブルはたちまち擦れて穴があき信号線・電源線は絶縁低下し、引続き鋼線も断線することになる。

即ち、海底の装置から立ち上がった部分が垂直に立ち上がっていることは、ワイヤーケーブルが極端なS字とならず海底に接触することなく良好に機能することを保証しているとも言える。

具体的には、外皮ホースの外側にスプリングホースをかぶせ、パイプで海底の検出部装置に固定している。スプリングホースの長さはワイヤーケーブルの長さにより

決まりワイヤーケーブル全長の約1/10程度としている。

なお、ワイヤーケーブルが海底に接触しないことに限り、ワイヤーケーブルの中間に円筒状の浮子を設け、浮力を補強している。円筒状の浮子に穴加工を施し、ワイヤーケーブルを通しづれないように固定している。

#### (3) テレメータブイ

ブイは、さまざまな形態のものがその目的に添って作られ使用されている。ここでは冒頭でも述べたごとく、容易に取り扱え、低価格で、データ伝送の機能を持つ、テレメータブイの開発を行った。ブイ本体である浮体部分は、波浪によって受ける抵抗が最も少ないと考えられる球形とし、海面から上の部分はできるだけ軽い構造とし、頭頂部に灯火をその直下送信アンテナを内蔵するもので、支柱の材質は強度等を考慮し、グラスファイバーを使用した。

灯火用の電源は乾電池を使用し、ブイのバランスウェイトを兼ねて下部に、他の観測用電源と独立して装備されている。ワイヤーケーブルの引き留め部分はモールドされ万一の断線・浸水に備えている。

テレメータブイの構造を、図-3.5に、外観を写真-3.2に示し、以下に説明する。

##### ①灯火

夜間に点灯し、海面上約2mとした。

##### ②アンテナ

特定小電力無線機用送信アンテナである。

##### ③支柱

灯火を支え送信アンテナを海水から保護している。

##### ④ブイ

外周をSUS-316で球状に加工し、波浪による抵抗を受けにくい構造とした。

##### ⑤電池収納部

灯火用電池を内蔵している。

##### ⑥ワイヤーケーブル引き留め部

ワイヤーケーブルを引き留め、ブイを係留する。

#### (4) 特定小電力無線機

郵政省は、微弱電波の基準を厳しくした代わりに1989年に特定小電力の制度を導入した。

この簡易無線機は、「特定小電力無線局 テレメータ用及びテレコントロール用無線設備標準規格(RCR STD-16)」に合致し技術適合基準に合格した無線機で、産業分野での無線データ伝送の無線モデムとして、計測や制御用として需要が高まり、1994年に開発されたものである。

この特定小電力無線機は、テレメータ用に割当てられた400MHz帯の周波数を使用しており、40チャンネルか

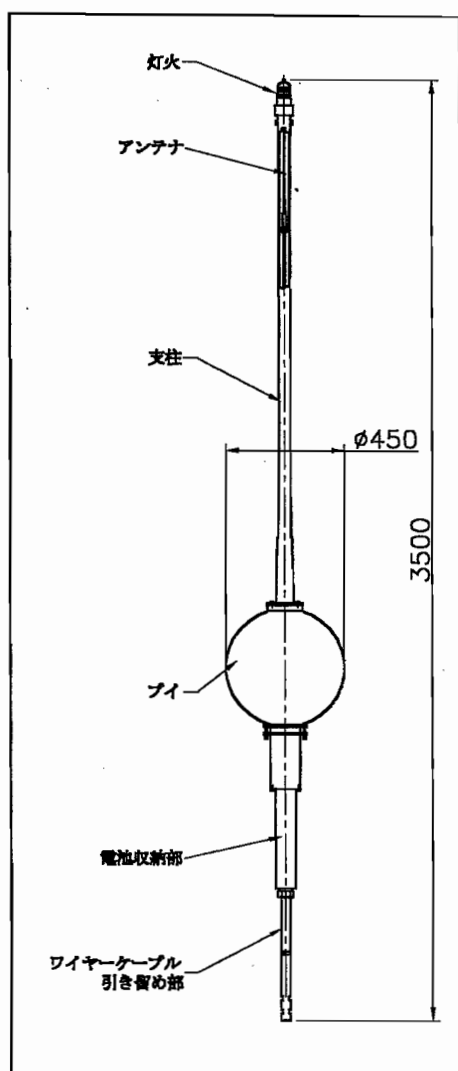


図-3.5 テレメータブイ構造図

ら1チャンネルを選択して使用できる。無線回線上の伝送速度は、2400bpsで、特殊な誤り訂正符号を用い、高品位のデータ品質を確保し、また、制御部とのデータのやりとりは、RS-232Cシリアルデータ伝送で行い次のような特徴がある。

- ①約100m～2 kmの通信が可能である。
- ②開局手続きは一切不要である。
- ③RS-232Cシリアルデータ伝送が行える。
- ④通信速度は、9600/4800/2400/1200bpsのいずれかを選択できる。(ここでは2400bps)
- ⑤軽量コンパクトである。

このような特定小電力無線機を使用するに当たって、波浪監視計の使用に適したものであるかどうかを海上に於てマージンテストを行い到達距離を実測した、その結果、十分な能力があることを確認した。また偶然に実験

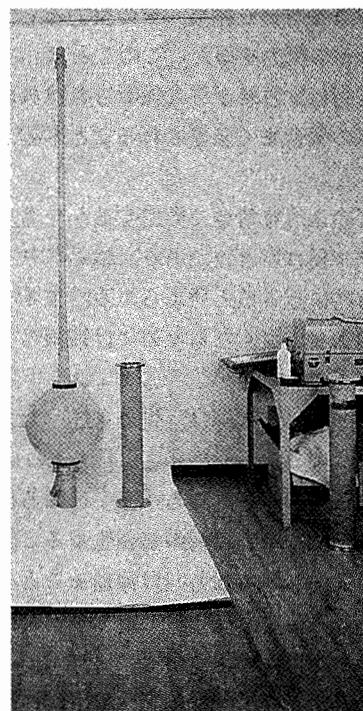


写真-3.2 テレメータブイ

の途中で、送・受信機の間を船舶が通過したが受信信号にノイズの混信等の問題はなく良好であった。

海上に於けるマージンテストの概況図を図-3.6に示す。図の縦軸はマージンの度合を[dB]表示したもの、横軸は電波の到達距離である。海上アンテナは約3m、陸上アンテナは約12mであったが、約1500mで10dBのマージンを得た。

実際の運用に当たっては、受信部に増幅器を設けることが可能で、さらに24dBのマージンが見込めることから、陸上部のアンテナの高さ等に制限がある場所への対応も可能であると考えられる。

#### (5) 制御・演算部

海中部に組み込まれている制御・演算部は次の各部で構成される。

##### ①制御・演算部

観測時間の制御等を行う。

##### ②無線送信部

観測したデータを陸上データ受信装置に伝送する。

##### ③電源部

リチウム電池を使用し、各部に供給する。

##### ④水圧センサー

波高計として圧力を検出する。

##### ⑤水温計

水温を検出する。

##### ⑥収納ケース

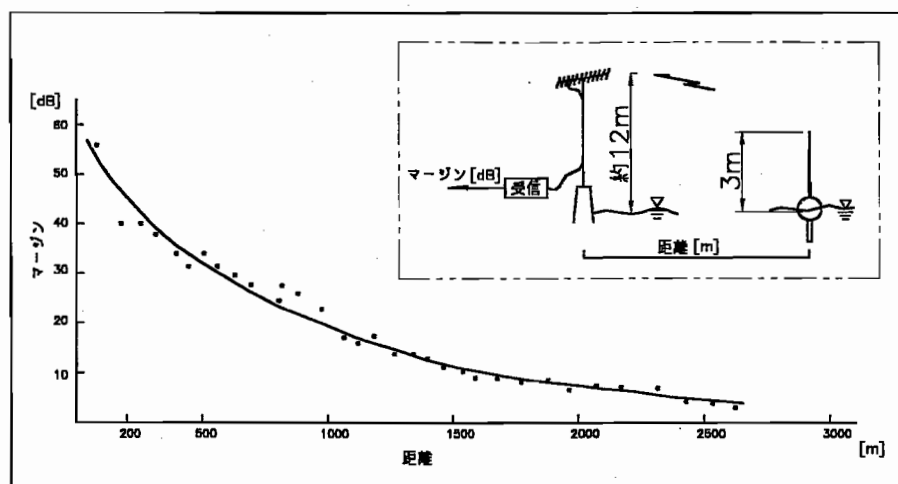


図-3.6 海上に於けるマージンテストの概況図

水圧センサー及び水温計の埋設を防止するため円筒を細長く製作した。

⑦ワイヤーケーブル引き留め部

3.3.(2) 参照。

制御・演算部の構造図を図-3.7に、取付架台を写真-

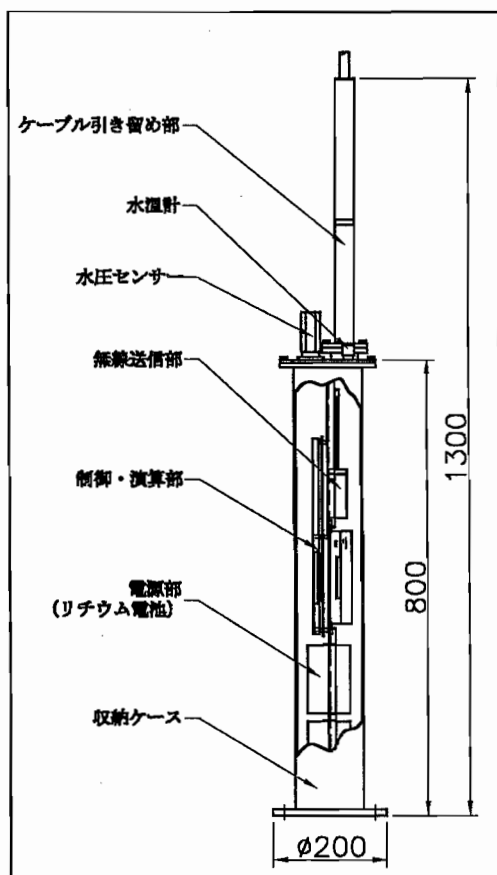


図-3.7 制御・演算部の構造図

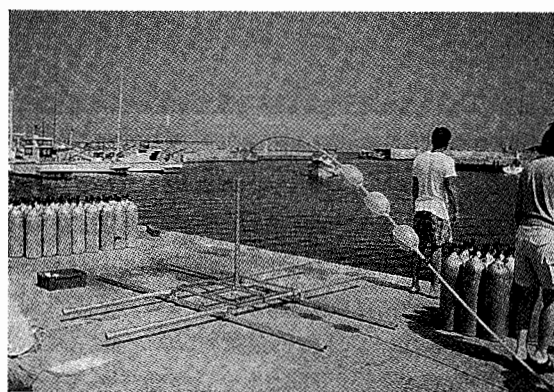


写真-3.3 センサー取付架台

3.3に示す。また、ダイバーによる海底での設置状況写真を写真-3.4に示し、その機能等について説明する。

1) 制御

観測制御は、10分間観測/30分間隔を標準としている。従来の波浪観測は、多くの場合20分間観測/2時間間隔で行われており、そうした設定も可能である。

その他制御内容には、観測したデータを無線装置に出力すること、データを一時的にメモリーに収録すること、電源の監視を行うこと等があり、一連の制御を8ビットCPUで行っている。

操作方法の詳細はここでは省略するが、時刻設定、観測時間/観測間隔の設定等があり、設置前にスイッチ設定が可能である。設定内容は、液晶表示パネルで確認することができる。

2) 演算

水圧式波高計で観測したデータは、0.5秒毎にサンプル



写真-3.4 海中部水圧センサー設置状況

リングしたのち、生データとして一時的に収録され、観測終了後に陸上に送信される。観測時刻と共に収録された内容は、点検時には液晶表示パネルでその内容を確認することができる。

### 3) 通信制御方式

特定小電力無線機を使用し、10分間の観測終了後に生データを伝送する訳であるが、ブイは動揺し、特に波の高い時点では波間に送信アンテナが隠れることがあり電波が届かない事態が生じる。このようなことも想定し、過去に取得した数回分のデータも同時に伝送する。また、このことは混信によるノイズ対策ともなりデータ異常の場合はキャンセルし、正常と思われるデータのみ回収することを可能にした。

### 4) 海底における設置の安定性

4. で後述するように、波浪監視計は、今までの現地実験の結果、有義波高3.6mまでは十分に安定して設置されることが確認されている。写真-3.3に示す取付架台と、海底での設置状況を示す写真-3.4からわかるように、波浪監視計の海中部は、取付架台上に設置された重し(土のう)によって、波浪等の外力に抵抗している。

### 3.4 データ受信装置

海上テレメータブイから送られてきたデータを受信し、データ処理を施し、出力する装置で、ラックマウントタ

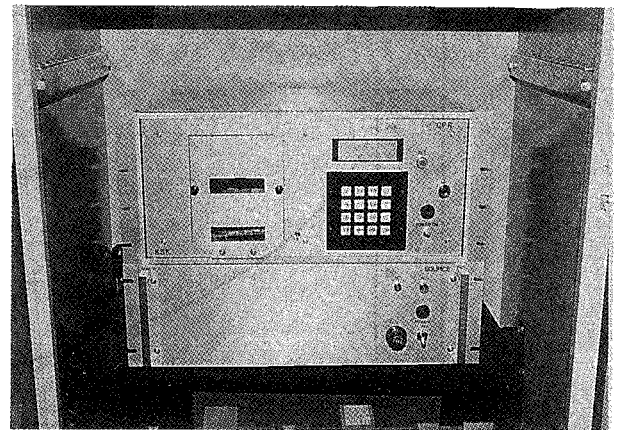


写真-3.5 データ受信装置

イプ、可搬型タイプ、の2種類を計画したが、以下の理由によりラックマウントタイプ写真-3.5を採用することとした。

機能的には概ね同じであるが相違点は次の通りである。

#### 1) ラックマウントタイプ

- ①拡張性を重視して設計してオプションの増設等が行える。
- ②屋外用の収納ケースが用意されている。
- ③プリンター等を装備し、演算結果を印字できる。
- ④モデム等で遠隔地にデータ伝送ができる。
- ⑤大型バッテリー等も収納でき8時間程度の停電対策が可能である。

#### 2) 可搬型タイプ

- ①小型で場所を取らず、移動して観測できる。
- ②オプションの機能の増設ができない訳ではないが、かなり困難である。

データ受信装置は次の各部で構成される。

#### ①アンテナ

受信感度を上げるために8素子八木アンテナを使用。

#### ②無線機

特定小電力無線機を使用している。専用アンプの増設ができ、マージンの改善が可能。

#### ③制御

海上テレメータ装置の時刻との遅速を見込み受信タイミングを決める。決められた時刻に受信状態となる。

#### ④演算

平均波法の演算を行う。演算結果等を外部装置に出力する。受信したデータをメモリーに収録する。

#### ⑤電源

約8時間の停電対策を行う。

### 3.5 表示及びデータ記録方式

データ処理装置は、パソコンPC-98をベースに構築さ

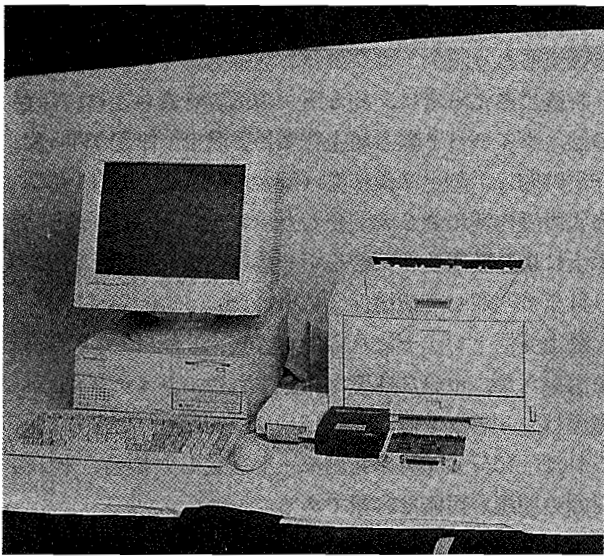


写真-3.6 データ処理装置

れている、外観を写真3.6に示す。当然携帯型パソコンでも、連続使用が可能なものであれば使用可能である。

データ処理装置の主な機能は、

- ①デジタルフィルターによる表面波への換算
  - ②外部装置への出力
  - ③観測データの収録
- 等がある。

#### (1) デジタルフィルターによる表面波への換算<sup>6), 7)</sup>

データ処理装置は、データ受信装置より生データを受け取り水圧波から表面波への換算を行う。水圧式波高計は数々の利点があり、表面波への換算が簡易に行えれば有用性は増大すると考えられる。

波浪監視計では、ほぼリアルタイム的に表面波への換算を行うことにした。ここで、ほぼリアルタイム的と言うのは、データ伝送と改定に設置された水圧式波高計の電源等に制約されるため、10分間観測後直ちに結果が出力されることを意味する。

この表面波への換算の理論は、2.2で紹介したもので、図-2.3で示される周波数特性をもつ伝達関数を用いて変換する。図-2.3において、縦軸の伝達関数の値は、計測される波高に対する補正倍率で、この補正倍率が計測される波の周波数によって異なることを示している。また、2.3で述べた波の多方向性と非線型性のため、この補正倍率の曲線は、ある点から水平に変化する特性をもっている。ここでは、この水平に変化する点の縦軸の値を最大補正倍率と呼ぶことにする。

波浪監視計では、表面波換算の計算をリアルタイムで実施するため、水圧波形をFFT（高速フーリエ変換）で周波数成分に分け、その成分に図-2.3で示される補正

倍率を乗じ、それを逆フーリエ変換で合成するかわりにデジタルフィルターを採用している。これは、データ長の時間区切りで現象が繰り返すと考えるFFTでは、いわゆる“回り込み”が生じ、正しい応答計算ができないためである。ある種の工夫をすれば、FFT計算でも正しく応答計算ができるが、デジタルフィルターを用いると、この問題を容易に解決できる。

ここでは、この換算計算を、図-2.3で示される周波数特性をもつ伝達要素に、水圧信号が入力され、その出力信号として表面波が出力されるという応答問題として考える。上述の周波数成分に補正倍率を乗じる処理は、一般に、無限のインパルス応答をもつ伝達要素を用いた処理になる。このため、図-2.3で示される周波数特性をもつデジタルフィルターを作成し、それに、計測データを通過させる方式を採用した。このデジタルフィルターは、いわゆる対称FIR型フィルターである。

デジタルフィルターの計算手法の特徴は、次の通りである。

- ①無限のインパルス応答を、有限のインパルス応答に窓関数を用いて変換する。
- ②応答計算は、この有限のインパルス応答を用いて、畳み込み演算で行う。畳み込み演算は、無限の時間区間を扱うので、回り込みの問題が生じない。

図-3.8に、このインパルス応答を求める手順を示す。

文献5)の変換手法とデジタルフィルターによる変換手法は、図-2.3の周波数特性をフーリエ変換してインパルス応答を求めるまでは同じである。しかし、次の相違点がある。前者は、計測データに窓関数をかけ、バッチ処理を行う。これに対し、後者は、計測データに窓関数をかけないで、インパルス応答に窓関数をかける。従って、後者の方法は、無限長の計測データを連続的にリア

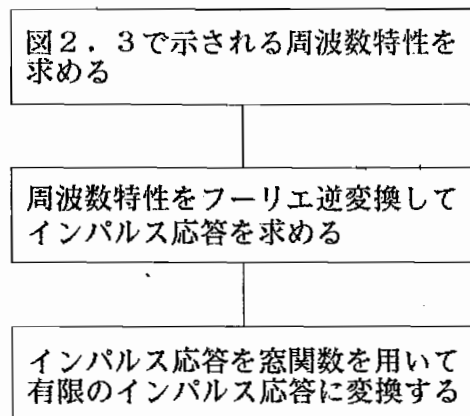


図-3.8 デジタルフィルターに用いる  
インパルス応答の求め方

ルタイムに処理できる特徴がある。

このデジタルフィルターによる変換動作は、オーディオ装置のグラフィックイコライザーを用いて、リアルタイムに高音域を増強して、音楽を聞くと類似したものである。

デジタルフィルターを用いて、リアルタイムに表面波へ換算するには、最適な最大補正倍率を決定することが必要である。このため、最大補正倍率の異なるデジタルフィルターを複数個作成し、最適な最大補正倍率を実験的に求めた。そして、その結果と2.2で示した理論値との対比を行った。この実験成果はアシカ島観測所近傍で行ったものを4. で後述する。

#### (2) 観測データの収録

観測したデータはメモリーに収録し、統計資料作成等に当たって、有効に生かされるよう配慮されている。

### 4. アシカ島観測施設における現地実証実験

#### 4.1 現地実験

##### (1) 実験の概要

波浪監視計の開発に先立ち、当所構内より南東約2kmに位置するアシカ島(写真-4.1に示す)に於て、波浪変形観測を実施した。折から、1996年3月30日から31日にかけては低気圧が日本海を通過し、希にみる波高を観測し、貴重なデータを取得することができた。以下はそのデータを解析し取りまとめたものである。

観測期間は、再記すると次のごとくである。

観測開始 1996年3月26日

観測終了 1996年3月31日

##### (2) 設置概略位置

観測装置の設置区域は、底質が岩であり凸凹が激しい海域であるので、この中よりなるべく平坦な場所を捜査確認し、土のう(重量約30kg)20個にて底面を均した

上に平架台及び装置を据置、その上にさらに土のうを置き固定した。

設置にあたっては、約5トンの漁船を借り上げ、船長の他、ダイバー2名と船上作業員2名で、作業を行った。作業時間は、陸上準備作業(架台の組立等)に約1時間、海底設置作業に約2時間要した。また、観測終了後、潜水士により装置及び架台を引き揚げた後、使用した土のうは全て回収して環境保全に努めた。

陸上受信アンテナは八木アンテナ(10素子、長さ1.2m)を用いたが、十分な感度が確認された。ブイに搭載した電源は、リチウム電池4個(12V、60AH)であった。これは、10分/30分の観測モード設定した場合、約120日間の観測が可能な容量である。

アシカ島波浪観測施設、および設置位置、設置水深等の概要を図-4.1および図-4.2に示す。

##### (3) 時系列による検討

観測期間に於ける、最大波高・周期、有義波高・周期を時系列表現したものを図-4.3に示す。(1)は観測期間中、(2)は波高の大きい部分のみを拡大したものである。また、観測期間中で既設装置と同時刻に対応する2時間の時刻については、黒丸●、それ以外の観測については、白丸○で示した。

波浪監視計では、観測モードの設定を10分観測/30分間隔としているが、このことで従来の2時間毎の観測では見逃されたかも知れない波高・周期の消長を読み取ることができた。

観測期間中の有義波高は最大約3.6m、有義波周期は最長約7sであり、低波浪状態から高波浪状態に至る幅広い範囲の波浪諸元を得ることができた。このように、幅広い範囲の波浪諸元を、途中欠測なく測得できたことは、波浪監視計のシステムとしての安定性が確認されたことを示している。



写真-4.1 アシカ島観測所と灯標

#### (4) 既設置装置との比較

アシカ島波浪観測施設に於いては、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）の一環として、水深22m地点に波高計を設置し2時間毎に定常的に観測を行っている。こ

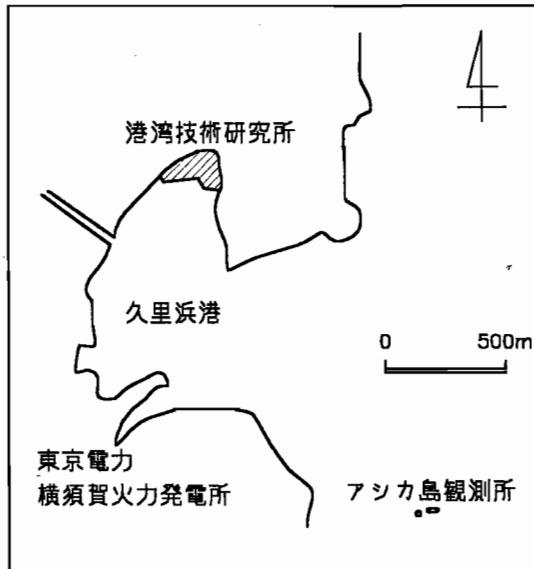


図-4.1 アシカ島波浪観測施設図

こではこのデータと比較した。

波浪監視計の実験位置は、図-4.2に示すとおりで、その水深は8.5mである。一方、定常観測地点の水深は22mであり、約250mの距離を隔てている。

上記観測地点水深22m、8.5mにおける水深・沖波波長比 $h/L_0$ をそれぞれ計算し表-4.1にまとめた。<sup>8)</sup>これによれば、水深22m、8.5mを波が通過する場合、周期によって浅水変形係数が異なり、0.934~1.10の値を

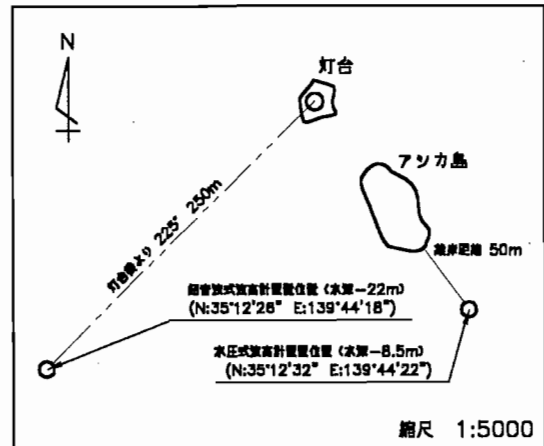
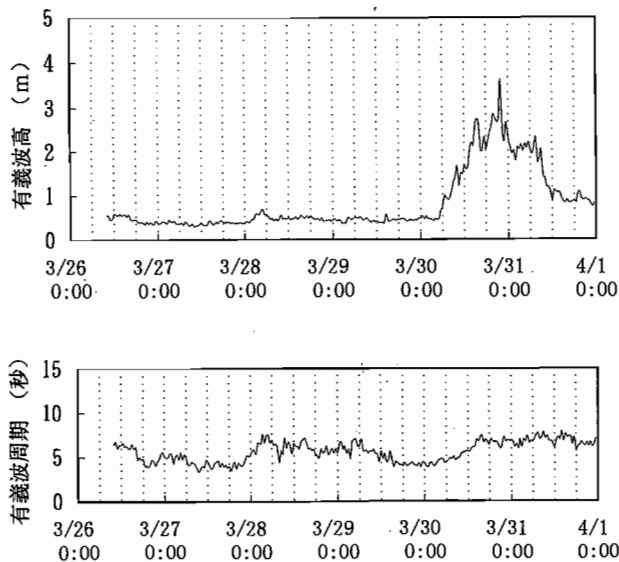
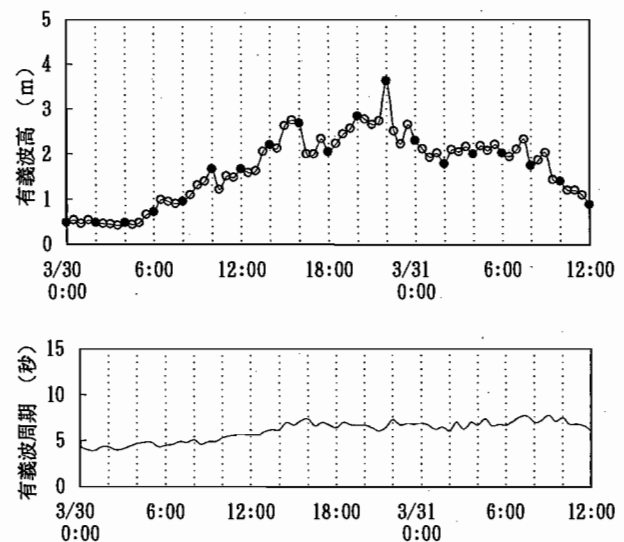


図-4.2 設置位置図



(1) 期間中有義波諸元図



(2) 波高の大きい部分の拡大図

図-4.3 実証実験期間中の有義波諸元図

表-4.1 水深22m、8.5mにおける $h/L_0$ の比較

| 水深m\周期sec | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 22        | 1.0  | 0.99  | 0.98  | 0.94  | 0.93  | 0.915 | 0.915 |
| 8.5       | 0.97 | 0.925 | 0.915 | 0.925 | 0.945 | 0.97  | 1.01  |
| 8.5/22    | 0.97 | 0.934 | 0.934 | 0.984 | 1.016 | 1.06  | 1.10  |

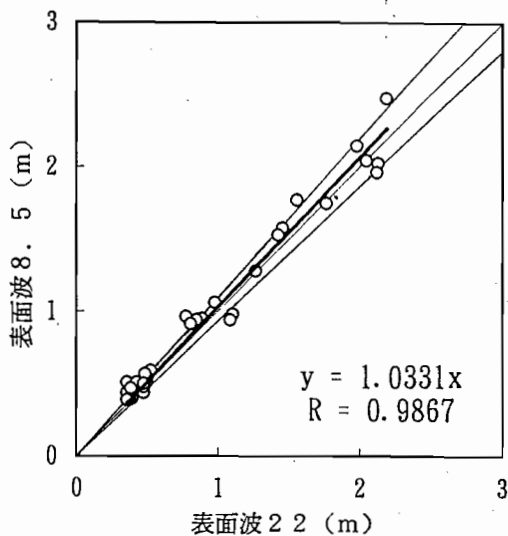


図-4.4 有義波高による水深8.5mと22mの比較図

とることがわかる。

図-4.4は、両地点で得られた有義波高を比較したものである。両者の一致は良好であり、図中の斜め細線で示された、表-4.1で確認された0.934~1.10の範囲内にほとんどの観測データがプロットされていることがわかる。もっとも、有義波高そのものが、統計量であり、時間的空間的変動性を有することを考えると、10%程度の変動性は、浅水変形係数を持ち出さなくても、十分に予測されるものである。いずれにせよ、水圧変動記録から推定される有義波高値は、妥当なものであると判断される。

#### 4.2 水圧変動結果を用いた表面波形換算結果の検証

波浪監視計ではデジタルフィルターを用いて、表面波への換算を行うがその際、表面波への換算を行うに当たっては、適切な最大補正倍率（前出図-2.3における直線近似される縦軸（Transfer Functionの値）を決定することが必要である。ここではその最大補正倍率を10, 30,

50の3通りを選び、換算有義波高の比較を行った。これらの値は、前述した図-2.1あるいは図-2.2で示されるように、水深30m地点で計算・実測された縦軸の Transfer Function の値から推定される範囲となっている。

比較結果を図-4.5に示す。最大補正倍率を大きく設定するほど、換算される有義波高は大きくなるが、その最も適切な値は、センサーのS/N比等によって異なったものとなるため、理論的に決定することは困難である。ここでは、水深8.5mの場合に限定されるものの、幅広い波高範囲と周期範囲におけるデータを全般的に見て、最大補正倍率を30とした場合が最も換算比が1に近く、適切であることが示された。<sup>5)</sup>

#### 4.3 観測時間長の考察

波浪監視計は、その用途・機能から現在の波高を監視することを第一の目的としている。検出部で得られた波高データを時々刻々リアルタイムで表示、印字し、利用者が波の状況を把握し、適切な処置を施せることが望ましい。

合田<sup>9)</sup>は、100波サンプリングの場合有義波高の変動性は標準偏差で評価して約6%であることを数値シミュレーションで明らかにしており、通常の波浪観測データの解析にあたっては、少なくとも100波以上のサンプリングが望ましいと一般的に考えられている。

他方、波浪監視計は、リアルタイム性に重点を置いているため、データサンプリングを通常の定常波浪観測で採用されている20分間の半分の10分間に設定しているため、算出される有義波諸元の値の統計的安定性に関しては、検証が必要となる。図-4.3で示した本現地実証実験においては、有義波周期は最長でも7s程度であったため、ほぼ100波のサンプリングが満たされていたが、さらに周期の長い波浪の場合も考慮しなければならないので、ここでは、仮に、各10分間の観測を前後2回の5分間観測に分割した場合について、10分間の観測から得

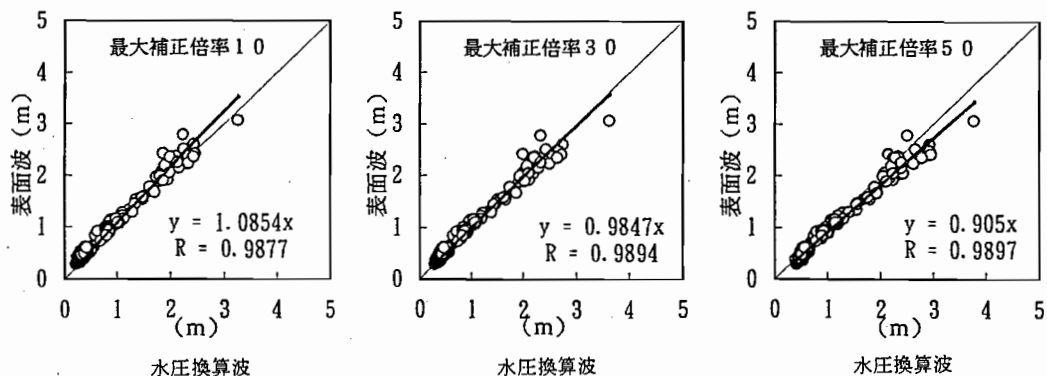
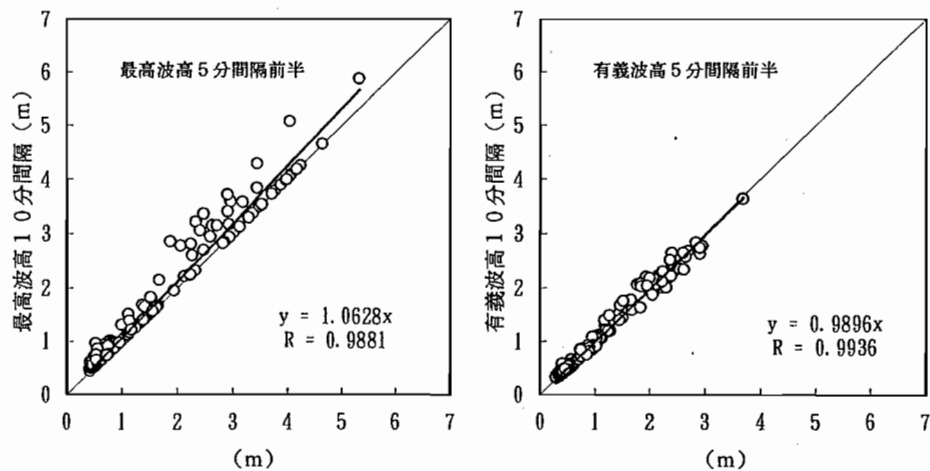
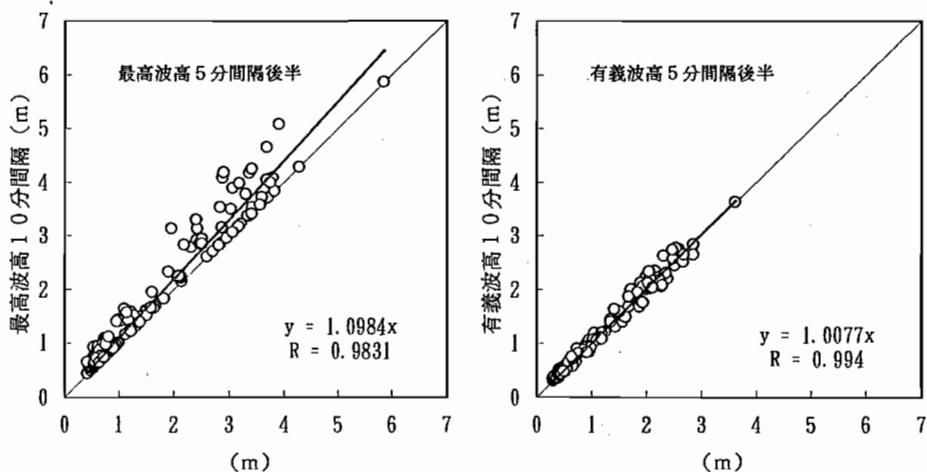


図-4.5 最大補正倍率による表面波換算比較図



(1) 前半 5 分観測との比較



(2) 後半 5 分観測との比較

図-4.6 観測時間による有義波高演算結果図

られる値との比較を試みた。

比較結果を図-4.6に示す。この比較では、10分間観測と5分間観測の差は、最高波に見られるものの、有義波では概ね一致がみられる。すなわち、本現地実験の2倍程度の周期の長い波浪に対しても、波浪監視計で10分間のサンプリングから得られる有義波諸元は、妥当なものと考えられる。

## 5. 今後の課題

### 5.1 波浪監視計の長所と活用

以上、波浪監視計の構成と現地実験結果を紹介した。波浪監視計は、簡易かつ安価に浅海域の波浪諸元をリアルタイムで観測できる画期的な波高計であり、さらに、水温や平均水面高（概略潮位）のモニターも可能である。水圧センサーを検出媒体とした波浪監視計は種々な長所

を有している。

- ①水深が浅くなると碎波し、あるいは海中に砂が舞い上がり浮遊物が多くなるが、波浪監視計では水圧センサーを用いることにより欠測なく良好な波形が得られる。
- ②ブイ式テレメータでは、ケーブル切断の心配がない。
- ③受感部は多少傾斜してもデータ取得には影響はない。

このため、波浪監視計は、港内の静穏度調査や環境調査など、さまざまな現地調査における基礎情報の取得・モニターに活用が期待される。また、海上工事の施工安全管理にあたっては活用可能である。さらに、海洋性レクリエーションの普及に伴い、海水浴場等の安全に関する問題意識が次第に社会一般に深まってきた中で、波浪監視計は、安全性の向上に大きく貢献することが期待される。

こうした、波浪監視計の多用途の活用のために、上記

の検討結果に加えて、今後、以下の開発に取り組む予定である。

#### (1) 表示警告機能

海水浴場等の安全管理に資するためには、観測演算された波浪諸元等を適切にわかりやすく表示し、必要に応じて警告を自動的に発信する機能が必要となる。このためには、ハード・ソフト両面における以下の開発が必要となる。

##### 1) ハード面

遠くから一般の遊泳者が見ても識別できる、大型表示盤の開発が望まれる。波浪演算結果の大型表示盤による表示例としては、例えば運輸省第二港湾建設局釜石港工事事務所の表示装置（平成7年設置）などが現存している。しかし、こうした表示装置は、まだ設置事例が少ない上に、価格が高い難点がある。今後、より安価で実用的な表示ができる大型表示盤の開発が必要である。

また、視覚ばかりでなく聴覚にも訴える、スピーカー等による警告機能も重要である。

##### 2) ソフト面

警告を発信する際、その限界値の設定は、重要な研究課題である。人の安全と波浪をはじめとした気象・海象要因との関係については、5.2で紹介する研究を実施中であり、こうした今後の研究成果を波浪監視計に組み込んでいくことが望まれる。

また、警告を表示する場合、大型表示盤の画面のデザインやスピーカー等による警告内容についても、今後、十分な吟味が必要である。

例えば、大型表示盤では、波のようすをアナログ的に表現し波のイメージを保ちながらディスプレイするのがよいと考えられる。そして、波高のレベルを3段階程度に分割し、

危険：赤

注意：橙

静穏：緑

等の色分け表示を行うと同時に、波高の消長、即ち今より波は大きくなるのか、小さくなるのかを直感的に分かりやすくアピールすることが望ましい。危険・注意・静穏のしきい値、判定レベルについては、5.2で述べるように、今後データ積み重ねることにより検討を進めたいと考えている。

スピーカーによる放送は、上記の大型表示盤と併設が望ましいが費用に制約のある場合等、単独での設置も可能である。放送の内容、繰り返しの間隔、回数等は、今後検討する項目である。

#### (2) 情報ネットワーク化

パソコンで処理・解析された観測データは、モデムによって電話回線に乗せ、ネットワーク化することが可能である。将来、数多くの地点に波浪監視計が導入された場合、その情報価値を高めるため、各地点における観測波浪諸元を同時にモニターするシステムがあれば、より一層、安全管理等に寄与することができるものと考えられる。

さらに、気象実況・予報データや全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）波浪観測実況・予測値を一元的に把握できる情報システム（COMEINS：Coastal Oceanic MEteoric INformation System：沿岸気象海象情報配信システム）ともあわせたネットワーク化なども、今後の研究課題である。

#### (3) 電源供給への工夫（太陽電池の活用）

太陽電池の活用も、消費電力の低減によるバッテリー寿命の延長（メンテナンス周期の延伸）を考える際には有効であるので、今後の検討と実用化が必要である。

太陽電池の使用に当たっては、消費電力、日照時間、充電効率等を考慮して太陽電池の容量を決め、無日照の日数を想定してバッテリー容量を決定する。海水浴場等の太陽電池の使用条件は、かなり有効なものと考えられている。夜間の観測を控える等の制限を加えれば、一層消費電力を節減できる。

#### (4) ケーブル方式の可能性の検討

本資料では、データ伝送については簡易無線について検討してきた。しかし、一方、海底ケーブルを使用した方式には、

①波高検出部が簡素化できる。

②電源は陸上より供給し、連続観測が可能となる。

③海底が砂で、極く浅い場所で波高もそれほど大きくないことを想定すれば、安価な非鎧装ケーブルの使用も可能である。

④検出部と監視装置の距離が近い場合は、断線事故に対しても多くの費用を必要とせず補修が可能である。

等の見逃せない長所もある。設置条件によっては、ケーブル方式の方が有利な場合も有り得るので、ケーブル方式についても、今後検討を進めることが望ましい。この際は、ケーブルの露出部分には「波浪監視計用ケーブル」等の名称を表示して、破損されないように注意を喚起することが必要であろう。

#### 5.2 波浪諸元と人の安全

毎年、海水浴中の事故は繰り返されており、日本全国での1994年の死亡事故は207件、磯遊中に死亡事故に遭った事例を含めると272件にも及んでいる。<sup>10)</sup>しかしながら、事象の難しさや、事故が夏の限られた時期に各地で

散在して発生すること、などに阻害され、事故原因を海岸工学の面から本格的に調べるといった試みはほとんどなされていないのが現状である。

このため、港湾技術研究所は、1993年度より第二港湾建設局、ライフセービング協会、マリナービーチ協会と共同で海水浴場における海水浴者の安全性について調査を行っている。調査は、

①首都圏を中心とする11の海水浴場における事故原因の調査

②特定の海岸における集中的な調査

に分けて行われている。特に②では沿岸構造物の影響も含め、海象・気象条件と海水浴の安全性との関連性について定量的な検討を進めている。

表-5.1は1993年度の夏季に首都圏を中心とする11の外海に面した海浜で発生した事故原因を示したものである。<sup>11)</sup> 計113人が事故に遭遇しているが、原因の整理は複数回答としている。事故の原因は潮に流されたとするもの(58%)、風に流されたもの(36%)、および、波に巻かれたもの(13%)となっている。

表-5.2は佐々木ら(1974)による九十九里浜での波高と管理情報の関係であり、目視による碎波波高で0.6mから1.4m程度の場合に遊泳注意が発令されている<sup>12)</sup>。ただし、佐々木らは、1.2-1.4mの間の注意発令件数が多いことをもって波高1.2-1.4mを基準とするこ

とは望ましくなく、多くの一般遊泳者に対しては波高0.6m以下を基準とすべきことを述べている。

また、最近、港湾技術研究所が伊豆の1海岸および東京の離島の1海岸で行った調査では、目視による碎波波高でそれぞれ0.8m、1.0m程度から遊泳注意が発令されていることが明らかにされている。

このように遊泳注意や禁止が発令される基準は、他の気象海象条件を考慮の上、管理者が個別に経験的に判断しているのが現状である。このため、遊泳注意が発令される限界波高は、必ずしも統一されていないが、結果的には、概ね、0.6mから1.4mの間になっているようである。流れによる事故の多くは、波浪を外力とする海浜流(離岸流や沿岸流)によるものが多いと推定されることや、海浜周辺の流れの場合は複雑でかつ局所的に流速は大きく異なっていること、を考えあわせると、遊泳注意の発令にあたっては、目視碎波波高が重要なめやすとなっているようである。

現在、遊泳注意や遊泳禁止の発令は、多くの場合、各浜のライフガードによって行われている。図-5.1は、1996年8月に、東京の離島で波浪監視計によって計測した沖波有義波高とライフガードにより目視で計測された汀線付近での最終碎波波高との関係を示したものである。ただし波浪監視計は、汀線より450m沖合の水深8m地点に設置されている。

表-5.1 事故の原因

|      | 潮に<br>流された | 風に<br>流された | 波に<br>巻かれた | 泳力不足 | 深みに<br>はまった | パニック | 睡眠不足 | けいれん | その他 |
|------|------------|------------|------------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 事故者数 | 66         | 41         | 15         | 13   | 7           | 4    | 2    | 1    | 6   |

表-5.2 遊泳注意あるいは遊泳禁止報  
発令時の碎波波高分布

| 波 高       | 注 意 | 部分禁止 |
|-----------|-----|------|
| 0.6m      | 2   | 0    |
| 0.61~0.8" | 3   | 5    |
| 0.81~1.0" | 3   | 6    |
| 1.01~1.2" | 2   | 1    |
| 1.21~1.4" | 10  | 0    |
| 1.4 ~ "   | 9   | 5    |

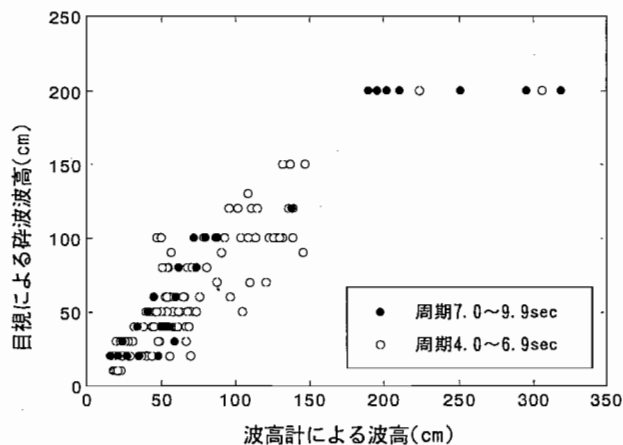


図-5.6 有義波高とライフガードによる  
目視波高との比較

目視碎波波高は、碎波変形の影響のためと思われるが、2 m以上のデータは無く、また、浅水変形の影響のためと思われるが、同じ観測波高に対して周期の長い波の方が碎波波高が大きく出る傾向があることがわかる。しかしながら、両者には顕著な相関性が認められ、観測有義波高が2 m以下の場合には、両者の値が一致する45°の直線の近傍に、多くのプロットが集まっていることが認められる。このことは、波浪監視計によって客観的に示される波浪諸元は、経験豊かなライフガードの目視観測値と概ね一致していることを意味している。

ただし、波浪監視計の実際の適用にあたっては、波浪諸元だけでなく、流況、風などに加えて、水温・気温等も考慮しなければならない。従って、将来的には、海浜流や風による吹送流の様子、および気象情報を含めた情報を、海水浴客に与える総合的な情報システムが望まれる。

波浪監視計は、このような総合的なシステムの重要なパートとなり得るとともに、5.1で述べた情報ネットワーク化によって、さらに付加価値が高まるものと期待される。さらに、今後の、気象・海象条件と人の安全に関する研究にあたって、重要なデータを提供することも、あわせて期待されている。

## 6. あとがき

波浪監視計によって、碎波が頻繁に発生する浅海域の波浪諸元を、リアルタイムかつ簡易・安価に、実用上十分な精度と信頼性をもって観測できることが、本資料で示された。波浪監視計によって観測される浅水深のデータは、沖合水深20mから50mに多く設置されている、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）の超音波式波高計や海象計<sup>13), 14)</sup>による沖合観測データや、気象情報とあわせて、有効活用されることが望まれる。

1987年から1989年にかけて、著者の一人菅原が、海洋科学技術センターの「海中計測技術の動向調査委員会」の委員として従事した当時は、浅水深の波浪観測機器には、超音波を利用した波高計を想定していた。しかし、その後高感度の水圧センサーの登場、水圧変動記録から表面波を換算する手法の改良、デジタルフィルターの出現、パソコンの高度化・普及、特定小電力無線制度の運用等を背景に、ここで紹介した波浪監視計の開発が行われた。

波浪監視計開発の動機づけとなった表記委員会に、著者の一人菅原が参加できる機会を与えていただいた、海洋科学技術センターに深甚の感謝を申し上げます。

また、戸嶋英樹港湾技術研究所長には、著者らに本研

究の有用性を再認識させていただくとともに、種々のご指導をたまわった。小島朗史水工部長には、本資料の構成・内容に関して、詳細なご指導をいただいた。高橋重雄水工部耐波研究室長には5.2の執筆その他の助言をしていただいた。あわせて感謝の意を捧げたい。

波浪監視計の開発の必要性については、著者の一人菅原は、長年にわたって、機会がある毎に説明を続けてきた。こうした中で、わが国での波浪観測機器のメーカーである協和商工（株）元会長岩崎秀人氏には、長い間種々の機器の開発・試用実験において業務と一緒にさせていただき、その人柄には大きなものを得たと思っている。改めて、お礼を申し上げる。

本資料の作成にあたっては、協和商工（株）取締役（元港湾技術研究所機械技術部長）岩崎峯夫氏、営業部長桑垣和雄氏には、著者に準ずるご助力をいただいた。さらに当所海象調査研究室の渡邊弘および川口浩二各研究官には、図表等の作成にあたって、労をかけた。この場を借りて謝意を表する。

（1996年11月27日受付）

## 参考文献

- 1) 海洋科学技術センター：海中計測動向調査報告書，181P.，1988
- 2) 海洋科学技術センター：海中計測動向調査報告書，220P.，1989
- 3) 入江 功・菅原一晃・滑川伸孝：宇久須港海岸人工海浜造成に関する水理模型実験，港湾技研資料，No. 602，59P.，1987
- 4) （社）日本マリーナ・ビーチ協会：ビーチ計画・設計マニュアル，118P.，1992
- 5) 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・朴 慶寿：波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について，港湾技術研究所報告，Vol.32，No.1，pp27～51，1992
- 6) 中村尚吾：デジタルフィルター，東京電機大学出版局，1994
- 7) 岩崎峯夫：デジタルフィルターを用いた津波計，カイジョー技報，（株）カイジョー，Vol. 2，No. 4，pp51～58，1995
- 8) 合田良実，浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，Vol.14，No. 3，pp59～106，1974
- 9) Y.GODA：Numerical Experiments on Statistical Variability of Ocean Waves，港湾技術研究所報告，Vol.16，No.2，pp 3～26，1976
- 10) 財団法人 日本海洋レジャー安全・振興協会：平成

6年における海洋レジャーに伴う海浜事故, 平成7年  
3月

- 11) 塩見雅樹・戸引 勲・太田耕栄・高橋重雄・鈴木高  
二郎・岡村知光・蓮見隆・小林雅彦: 海岸における市  
民の安全性に関する一調査, 海洋開発論文集, Vol.11,  
pp.381~386, 1995
- 12) 佐々木民雄・堀田新太郎・五十嵐 元・久保田 進:  
海洋性レクリエーションに関する研究(第2報)  
—九十九里海岸における海水浴の現地調査—, 第21回  
海岸工学論文集, pp.471~475, 1974
- 13) T.TAKAYAMA, N.HASHIMOTO, T.NAGAI,  
T.TAKAHASHI, H.SASAKI, and Y.ITO: Develop-  
ment of Submerged Doppler-type Directional  
Wave Meter, Proceedings of the 24th Internation-  
al Conference on Coastal Engineering (ICCE'94),  
pp.624-634 1994.
- 14) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正  
雄・磯部憲雄・鈴木敏夫: 水中超音波のドップラー効  
果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集第42巻,  
土木学会, pp.1081-1085, 1995