

# 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について

高山知司\* ・ 橋本典明\*\* ・ 永井紀彦\*\*\*  
高橋智晴\*\*\*\*・ 佐々木 弘\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

沿岸波浪観測機器としてはこれまでも種々のものが開発され、実用に供されている。しかしながら、多くの機種は波高・周期のみを対象とした波高計であり、簡易な施設で方向スペクトルを精度良く定期的に観測し得る計器にはいまだ満足すべきものがない。特に、現用の定置式波高計が水深 50 m 域まで使用可能であるのに対し、定置式波向計は 20 m 程度が使用限界であり、均整のとれた波浪諸元の測定技術の開発が待たれている。本研究はこうした要望に応えるために、水深 50 m を標準とする沿岸海域に使用可能で簡易かつ高精度な波向計を開発し、実用に供することを目的としている。

## 2. 超音波ドップラー式波向計

### (1) 測定方法

海洋波の方向スペクトルを測定する方法として、例えば水中での複数点の波による水粒子速度を測定する方法が考えられる。本開発では水中超音波のドップラー効果を応用した水粒子速度の測定機能と、超音波パルスの伝搬特性を応用した水位変動の測定機能を一体化して、沿岸波浪の観測に供する波向計を実現した。

試作した波向計の測定回路の系統図を図-1に示す。その回路は機能的には水中に設置される送受波器部、それに接続される送受信回路と受信信号を現象の波動データに変換する信号処理回路の2つからなる計測部と方向スペクトル等の計算を行う演算部とで構成されている。

測定においては、先ず水中に設置された超音波送受波器から水面に向けて超音波が送信される。この送受波器は、鉛直上方に超音波を発射し、水面エコーを受信して、その間の伝搬所要時間から水位変動を測定する波高測定機能と、鉛直より角度  $\alpha$  傾けて平面座標  $X$ ,  $Y$  軸上の4方向に超音波パルスを発射し、水面下各水深層から反射する後方散乱波を受信して、対象とする散乱層か

らの反射波のドロッパー周波数偏移から水粒子速度を測定する流速測定機能との複合センサーになっている。

計測部の送受信回路は、上記2つの機能による5方向の測定を時分割方式により短時間間隔で順次繰り返し行う。波高測定機能では測定水位を連続した波形信号に変換して出力する。流速測定機能ではヘテロダイン回路によって受信周波数を中間周波数信号に変換して出力する。信号処理回路では送受信回路の出力信号を受けて、波高測定機能で波形信号を A/D 変換して水位変動の時系列データに変換して出力する。また、流速測定機能では中間周波数信号のドロッパー周波数解析によって水粒子速度の時系列データとして出力する。なお、本機で測定する水粒子速度は発射する超音波のビーム軸方向の値である。

演算部は計測部の出力データを用いて方向スペクトル演算、あるいは波高・周期・波向についての代表値の統計処理を行い、その結果を波浪の測定データとして出力する。演算は、16ビットのパーソナルコンピュータを用い、波高・周期はゼロアップクロス法による有義波処理、方向スペクトルの演算は後述の拡張最尤法(EMLM; 磯部ら, 1984)とした。なお、実験では測定値の評価用データを同時に得る都合上、演算部の処理はオフラインで行った。試作機の仕様を表-1に示す。

### (2) 水粒子速度の検出法

水粒子速度は水中に存在する浮遊粒子や屈折率の変動領域からの音波の後方散乱受信信号をドロッパー周波数解析することにより測定される。

ドロッパー周波数偏移の検出方法には PLL (Phase Lock Loop) 法や Analog Filter Bank 法などのアナログ的な手法と FFT 法や CC (Complex Covariance) 法などのデジタル的な手法がある。計測に用いるマイクロコンピュータの CPU や周辺素子の高速化に伴って、最近ではデジタル手法の中でも FFT 法や CC 法はリアルタイムの処理にも用いられるようになってきた。FFT 法は使用周波数帯域全般のスペクトル密度が得られるので S/N 比の低い測定条件でも散乱受波の判別ができるが、CC 法ではスペクトルモーメントの計算が簡便であり、S/N 比がよい場合には FFT 法よりも良好

\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部長

\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所主任研究官

\*\*\* 正会員 運輸省港湾技術研究所海象調査研究室長

\*\*\*\* 正会員 (社)海洋調査協会 理事

\*\*\*\*\* 正会員 (株)カイジョー 計測制御システム事業部 技術部

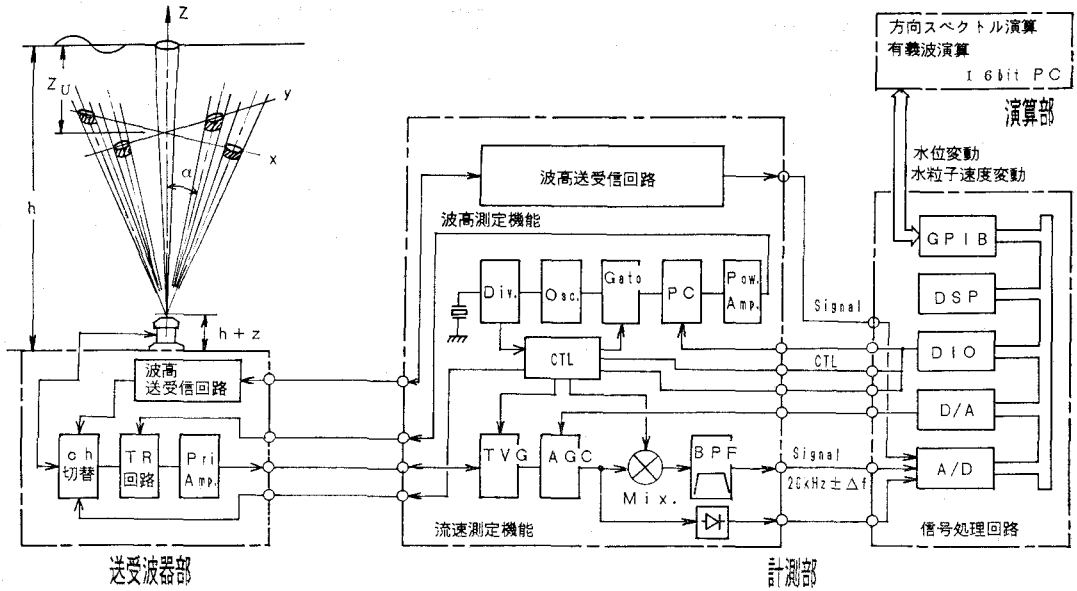


図-1 測定回路機能系統図

な周波数分解能が期待できるという長所がある。

CC 法は 図-2 に示すように、入力周波数信号を互いに  $90^\circ$  位相のずれた局所発信周波数信号でビートダウンし、両者の出力  $X_r(t)$  と  $X_i(t)$  から計算される時間間隔  $\tau$  の複素共分散関数  $R(\tau)$  の実数部と虚数部から、入力信号の一次モーメント  $\mu_1$  (平均周波数) を求める方法である。すなわち、入力信号  $\omega_{in}$  を局所発信信号  $\omega_0$  の  $\cos$  成分と  $\sin$  成分で混合するとそれぞれ和と差の周波数成分が得られる。これをローパスフィルタ (LPF) に通して差の成分のみを取り出し、これを A/D 変換して得られるデータ数  $N$  の複素サンプル  $Z(t_n) = X_r(t_n) + iX_i(t_n)$  を用いて、次式により  $\mu_1$  が計算される。

$$\mu_1 = \frac{1}{2\pi\tau} \tan^{-1} \frac{\text{Im}[R(\tau)]}{\text{Re}[R(\tau)]} \quad \text{.....(1)}$$

$$R(\tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} Z(t_n)Z^*(t_n+\tau) \quad \text{.....(2)}$$

表-1 試作波向計の仕様

| 項 目      | 流速測定機能    | 波高測定機能   |
|----------|-----------|----------|
| 測定方式     | 超音波ドップラー法 | 伝搬時間測定法  |
| 測定チャンネル  | 直交 4 ch   | 鉛直 1 ch  |
| 超音波周波数   | 500kHz    | 200kHz   |
| 指向角 R1/2 | 1 deg.    | 3 deg.   |
| ビーム傾斜角   | 30deg.    | —        |
| 送信パワー    | 300W 以下   | —        |
| 距離レンジ    | 50m 以上    | 65m 以上   |
| 測定レンジ    | 0 ~ 5 m/s | 30m max. |
| 測定散乱層厚   | 約2.3m     | —        |
| 送信間隔     | 165ms     | 165ms    |
| 測定周期     | 990ms     | 495ms    |

ここに、 $Z^*(t_n)$  は  $Z(t_n)$  の共役複素数である。

今回はこのビートダウンの操作をソフトウェアを用いたデジタル計算により簡易化した SHCC (Simple Homodyne Complex Covariance) 法で行った (Ito et. al., 1989)。図-3 は SHCC 法のホモダイン検波の過程をブロックで示したものである。A/D 変換のサンプリング間隔を受信信号の中間周波数の 4 倍 (本機では 80 kHz) にとると局所発信信号のデータ列の  $\cos$  成分と  $\sin$  成分は、

$$\begin{aligned} \cos \phi &= (1, 0, -1, 0, 1, 0, -1, \dots) \\ \sin \phi &= (0, 1, 0, -1, 0, 1, 0, \dots) \end{aligned} \quad \text{.....(3)}$$

と簡単に示すことができる。その結果、 $\phi(t)$  に局所発信信号のデータ列を作用させて得られるデジタルミキシング出力は、

$$\begin{aligned} \phi(t) \cos \phi &= \phi'(0), 0, -\phi'(2), 0, \phi'(4), 0, \dots \\ \phi(t) \sin \phi &= 0, \phi'(1), 0, -\phi'(3), 0, \phi'(5), \dots \end{aligned} \quad \text{.....(4)}$$

となる。すなわち、もとの受信信号データ列の符号の正負反転と 0 の交互の割り当てを行うことによりビートダ

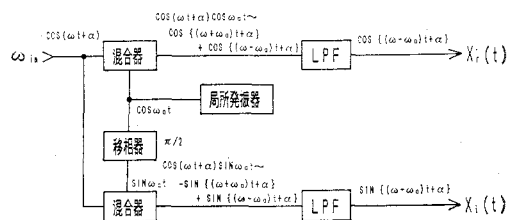


図-2 アナログ回路による複素信号発生法

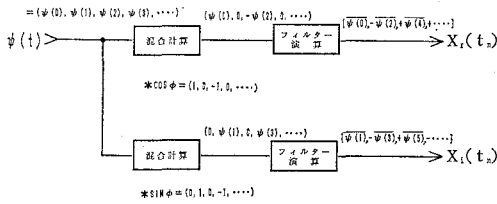


図-3 SHCC 法による複素信号発生法

ンを実現できることになる。混合により生じる和の周波数成分の除去は、データの移動平均をとることによってローパスフィルタの作用をさせる。

今回の試作機では、この方法により実海域相当の S/N 比において流速平均誤差 2~6 cm/s、標準偏差 1~2 cm/s 程度の流速検出精度が得られることが分かった。

### (3) 方向スペクトル解析法

本機で観測された水位変動および流速の時系列データをもとに方向スペクトル解析するに際しては、現地でのデータ解析の即時性を考慮して、計算が容易で、比較的高い精度の高い EMLM を採用した。

いま、図-4 に示すような極座標を用いれば、座標  $(\alpha, \beta, r)$  での  $r$  方向の水粒子速度成分  $U$  は、その真上の水位変動  $\eta$  と伝達関数  $H$  により次式で表される。

$$\begin{aligned} U(\alpha, \beta, r, h, z_0; \omega, \theta) \\ = H(\alpha, \beta, r, h, z_0; \omega, \theta) \times \eta(\alpha, \beta, r; \omega, \theta) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、伝達関数  $H$  は

$$\begin{aligned} H(\alpha, \beta, r, h, z_0; \omega, \theta) \\ = \frac{\omega}{\sinh kh} [\cosh \{k(r \cos \alpha + z_0)\} \\ \times \sin \alpha \cos(\theta - \beta) \\ - i \sinh \{k(r \cos \alpha + z_0)\} \cos \alpha] \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

で表される。また、 $h$  は水深、 $k$  は波数、 $\omega$  は角周波数、 $\theta$  は波の伝播方向、 $z_0$  は海底からの機器設置高を表す。

座標原点上の水位変動を基準にとれば、式(6)に

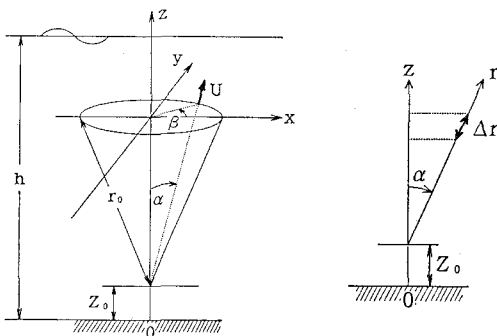


図-4 流速測定位置の極座標表示

$\exp[i\{kr \sin \alpha \cos(\theta - \beta) - \omega \Delta t\}]$  を乗じて、

$$\begin{aligned} H_0(\alpha, \beta, r, h, z_0; \omega, \theta) \\ = \frac{\omega \exp(-i\omega \Delta t)}{\sinh kh} [\cosh \{k(r \cos \alpha + z_0)\} \\ \times \sin \alpha \cos(\theta - \beta) - i \sinh \{k(r \cos \alpha + z_0)\} \\ \times \cos \alpha] \exp\{ikr \sin \alpha \cos(\theta - \beta)\} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

が座標原点上の水位変動  $\eta$  と座標  $(\alpha, \beta, r)$  の  $r$  方向の水粒子速度成分の伝達関数となる。ここに、 $\Delta t$  は各水粒子速度成分  $U$  と水位変動  $\eta$  の計測時刻のズレを表す。

ドップラー式波浪計で観測される流速成分は、水中の特定点での水粒子速度ではなく、ある幅を有する体積中の平均的水粒子速度である。そこで図-4 に示す  $r$  軸回りの幅を無視し、式(7)を  $r$  軸方向に  $\Delta r$  の距離で積分して平均し、次式のような近似的な伝達関数を方向スペクトル解析に用いることとした。

$$\begin{aligned} \bar{H}(\alpha, \beta, r_0, \Delta r, z_0; \omega, \theta) \\ = \frac{1}{\Delta r} \int_{r_0 - \Delta r/2}^{r_0 + \Delta r/2} H_0(\alpha, \beta, r, h, z_0; \omega, \theta) dr \\ = \frac{-i\omega \exp(-i\omega \Delta t)}{\Delta r k \sinh kh} [\cosh \{k(r \cos \alpha + z_0)\} \\ \times \exp\{ikr \sin \alpha \cos(\theta - \beta)\}]_{r_0 - \Delta r/2}^{r_0 + \Delta r/2} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

上式を用いれば、EMLM の方向スペクトルの推定式は次式で与えられる。

$$S(f, \theta) = \frac{\kappa}{\mathbf{H}^* \Phi^{-1} \mathbf{H}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\mathbf{H}$  は式(8)で与えられる各波動量の伝達関数から構成される行列、 $\mathbf{H}^*$  は  $\mathbf{H}$  の複素共役の転置行列、 $\Phi^{-1}$  は各波動量間のクロススペクトル  $\Phi_{mn}(f)$  から構成される行列  $\Phi$  の逆行列、 $\kappa$  は方向スペクトルのエネルギーを正規化するための定数である。

## 3. 現地観測

現地観測は図-5 に示す岩手県釜石港の湾口防波堤(予定)の沖合、水深 35 m の海底に試作機のセンサーを設置して行った。送受波器の測定信号は海底ケーブルで陸上の観測所(運輸省第二港湾建設局宮古港工事事務所馬田ヶ崎気象海象観測所)に伝送し、水粒子速度と水位変動をデジタル時系列データに変換して光磁気ディスクに記録した。観測データの取得状況を表-2 に示す。

試作機の測定要素は水位変動 1 ch(Z)、水粒子速度 4 ch(X+, X-, Y+, Y-) の合計 5 ch であるが、全成分を含む 1 回の測定の繰り返しの中で Z の測定を 2 回行っている。したがって、測定 ch 数は 6 ch となっている。測定サンプリング周期は 0.99 秒で Z, Y+, Y-, Z, X+, X- の順に 0.99/6 秒ごとに各方向に音波を発



図-5 観測場所の位置

射する時分割方式で行った。

センサーは架台に取りつけて海底に設置しており、水粒子速度測定用の超音波振動子の設置高さは海底より 0.95 m、水位測定用のそれは 1 m である。水粒子速度の測定水深位置 ( $Z_V$ ) は振動子面を基準に 25 m 上方にとつてある。すなわち、海面を  $Z=0$ 、水深  $h=35$  m とすると  $Z_V=-9.05$  m となる。試作機では水中音速を 1500 m/s 一定として振動子から  $Z_V$  までの距離に相当する時間を計算し、音波の発射から計算時間後に入力した後方散乱受波を測定対象信号として切り出している。切出した散乱層の厚さは音波のビーム軸方向に約 2.3 m である。音波ビーム軸の鉛直からの傾斜角は  $30^\circ$  とした。

水位変動の測定は現在、沿岸波浪の定常観測で用いられている超音波式波高計の機能を利用したもので水中音速を 1500 m/s 一定として振動子面から水面までの鉛直距離を伝搬時間測定法で求めている。

#### (1) 伝達関数の妥当性に関する検討

式 (8) で表される伝達関数の妥当性を実測データを用いて直接検証することは出来ない。しかしながら、微

表-2 観測データ取得状況

| 観測<br>ケース | 観測<br>年月 | 観測<br>回数 | 波高<br>(m)     | 周期<br>(s)    | 水深<br>(m)       | $Z_u$<br>(m)   |
|-----------|----------|----------|---------------|--------------|-----------------|----------------|
| 第1回       | '90/08   | 12       | 0.69<br>~1.51 | 9.8<br>~10.6 | 34.51<br>~35.6  | 3.56<br>~9.90  |
| 第2回       | '90/11   | 44       | 0.32<br>~1.00 | 6.3<br>~13.3 | 34.94<br>~36.12 | 8.99<br>~10.17 |
| 第3回       | '90/12   | 20       | 1.16<br>~1.88 | 9.3<br>~12.7 | 35.08<br>~36.32 | 9.13<br>~10.37 |
| 第4回       | '91/03   | 44       | 0.76<br>~1.84 | 5.6<br>~10.6 | 35.56<br>~36.46 | 9.01<br>~10.51 |

波高は47mm, 周期はスペクトルのピークエネルギー位置1/fp

小振幅波理論では  $\{Re[\bar{H}]\}^2 + 2\{Im[\bar{H}]\}^2$  は、 $X$  軸および  $Y$  軸上の  $r$  方向の水粒子速度のパワースペクトルの和を水位変動のパワースペクトルで除した値で近似的に与えられる。図-6 はこれら両者の比を示したものである。周波数が 0.08~0.15 Hz の範囲では、両者の比は 1 に近く、式 (8) で与えられる伝達関数はほぼ妥当なものと考えられる。

#### (2) 方向スペクトル解析結果の検討

図-7 はクロススペクトル解析結果の一例を示したものである。図-7 の対角線上に各波動量のパワースペクトル、右上に各波動量間のコヒーレンス、左下にフェイズを図示している。図-7 に見られるように、水位変動 ( $Z$ ) のパワースペクトルのピーク周波数近傍では、各波動量間のコヒーレンスは高く、フェイズも周波数が 0.06~0.2 Hz の範囲で連続的な変動を示しており、得られた各クロススペクトルは妥当な特性を示すことが認められる。

図-8 は EMLM により方向スペクトル解析した結果の一例を図示したものである。本実験では前記のように 5 ch の波動量を測定する機器を使用したため、方向スペクトル解析に際しては、種々の波動量の組み合わせによる解析が可能である。図-8 では 3 つ以上の組み合わせによる全ての解析結果を示している。釜石湾の湾口は

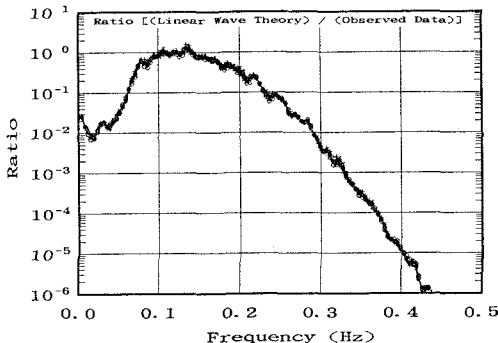


図-6 伝達関数の妥当性に関する検討

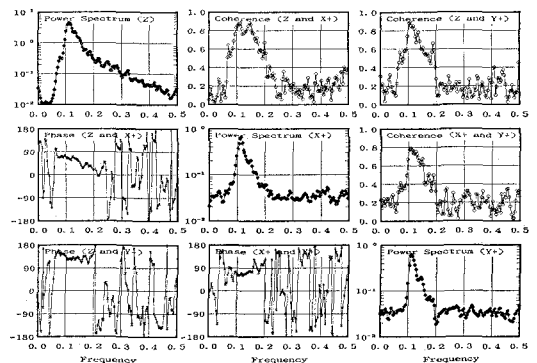


図-7 クロススペクトルの解析例

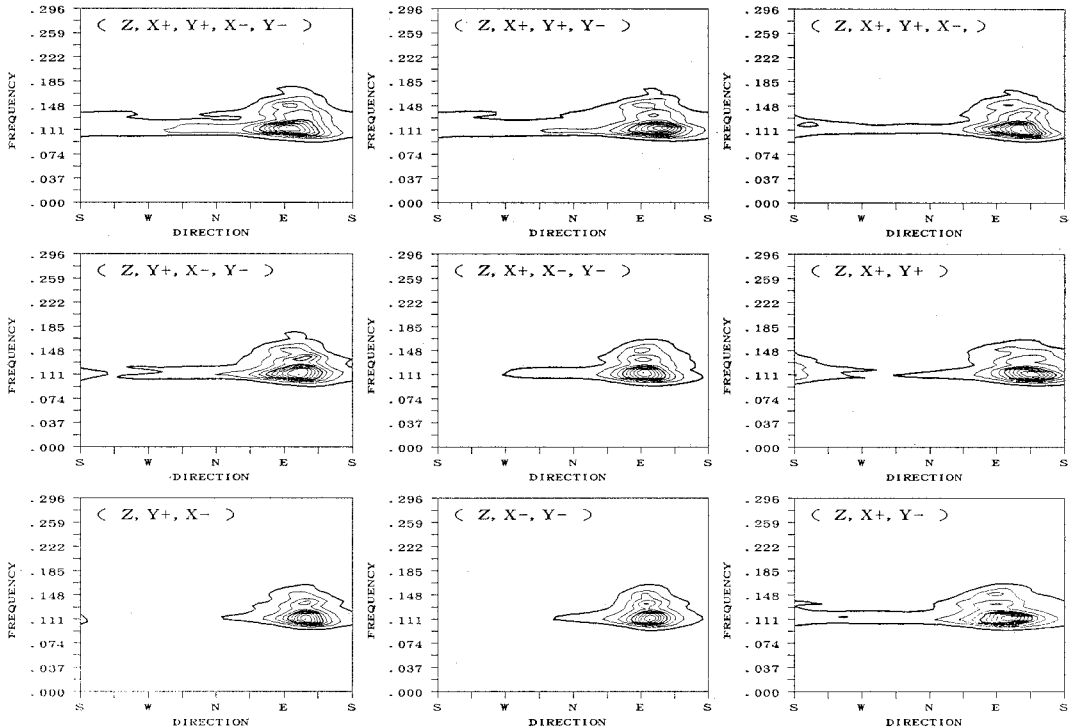


図-8 種々の波動量を用いた方向スペクトルの解析例

東方に開いており、いずれの組み合わせによる結果も妥当な方向から方向集中度の高い波浪が来襲していることが明確に示されている。

この他、表-2 に示す全観測ケースについて方向スペクトルの計算を行った結果、122 観測の内 99 観測で方向スペクトルが求められた。演算不能であった 23 観測の内 16 ケースは海面波形データにノイズが混入したものであり、測定データの不良によるものは 7 ケースであった。

演算が良好であったケースについてみると、 $Z_U$  が 9 ~ 10 m の場合、波の周期が 10 秒程度あれば有義波高 35 cm 程度でも測定が可能である。また、周期が 6 秒付近では有義波高が 1 m 程度で測定が可能であった。今回の観測では有義波高 1.88 m が最高で、高波のケースがなかったが、ある程度波高が大きい場合には  $Z_U$  を大きくとることで対応可能と思われる。

#### 4. おわりに

港湾・海岸工学上の諸問題において方向スペクトルに関する知識が不可欠であることは言うまでもない。しかしながら、方向スペクトル観測の困難さのために、今なお不十分な情報しか蓄積されておらず、方向スペクトルに関する調査・研究は今後精力的に取り組まなければ

ならない重要な課題の一つである。本開発で製作したドップラー式波向計は、1 台で複数の波浪計の役割を果たし、これまで困難であったアレイによる高精度な方向スペクトル観測が可能である。また、本機は我国で広く用いられている超音波式波高計の既設の海底ケーブルをそのまま転用できる利点も有しており、今後、方向スペクトルに関する調査・研究を実施する上での有用な測器の一つと考えられる。

本開発は運輸省港湾技術研究所と(社)海洋調査協会の共同研究として、海洋調査協会に設置された海底設置式波浪計開発委員会(委員長 合田良実横浜国立大学教授)の御指導の下で実施した。また、運輸省第二港湾建設局には現地観測に際し、便宜をはかって頂いた。ここに関係各位の方々に謝意を表します。

#### 参考文献

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司(1984): 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177.
- Ito, Y., Y. Kobori, M. Horiguti, M. Takehisa and Y. Mituta (1989): Development of Wind Profiling Sodar, J. Atmos. Oceanic Tech., Vol. 6, pp. 779-784.