

超音波式流速計による長期潮流観測について

土屋義人*・吉岡 洋**・棚橋輝彦***
市川雅史****・土子良治*****

1. 緒 言

従来、海岸工学の分野では、超音波式流速計を海底に固定して、波浪に伴う水粒子の速度を計測することによって波向きの観測が行われてきた¹⁾。一方、この流速計からの信号に波浪成分を除去するローパスフィルターをかければ、潮流の観測が可能である。しかし、現状では、この波向観測用の超音波式流速計を長期の潮流観測に応用する場合には、1) 測器の長期安定性、2) センサーの方位特性、3) 計測時に混入する異常信号への対処、および 4) センサーへの生物付着の影響などについて十分な検討がなされなければならない。また、このような方法で得られる流れの観測データの特性に関しては、ほとんど調べられていない。

本研究では、以上の問題点に検討を加え、潮流観測における有効性を明確にするため、RC 200 型超音波式流速計を用いて、測器の検定試験や他種流速計との比較観測を行ったあと、長期間連続観測を実施したので、その結果について報告する。

2. 測定方法

2.1 原理および方式

本研究で用いた超音波式流速計は、従来、波浪に伴う水粒子の運動を計測することによって波向きの観測を行うことを目的として用いられてきたものである。その測定方式は、パルス伝播時間差法にシングアランド法を併用したものである²⁾。ここではこの超音波式流速計を用いて潮流を観測するために、本流速計に対して新たに追加、改良した点について述べる。

本流速計では、1 秒間に 18 回、流速の水平二成分が計測される。この計測信号から数分よりも長い周期の流速変動を得るためには、計測信号に適当なローパスフィルターをかける必要がある。そこで、本流速計では、計測信号を D/A 変換した後、カットオフ周波数 0.008 Hz、

減衰率 12 dB/oct のバターワース型ローパスフィルターで数分より長周期の流速変動を取り出すことにしている。カットオフ周波数を 0.008 Hz (約 2 分) とした理由は、この測器によって、潮汐周期の流れはもとより、港湾や沿岸海域に存在する副振動およびエッジ波などの周期数分から数十分の長周期波に伴う流速変動も測定することを目的としているからである。

ローパスフィルターからの出力信号は、1 分ごとにデジタルカセットレコーダーに、また、フィルター処理前の生信号も、従来通りディジタルカートリッジレコーダーに収録され、潮流および波浪の解析に用いた。

2.2 異常信号の除去

一般に、超音波式流速計では、プローブ間の超音波の伝播経路内に魚類などが入りこんだ場合には、計測が一時的に妨げられ、その結果、測定信号にスパイク状のノイズが出現することがある。しかし本流速計では、このような障害に対してある程度までノイズを除去し、測定信号の質を高める回路上の工夫がなされている。その原理を簡単に述べれば、次のようになる。すなわち、1 組のプローブでは、往路と復路における超音波の伝播時間の差は流速に比例するが、和はプローブ間の距離と音速によって決まり一定とみなせる。従って、一回の計測において、超音波の伝播時間の和を計測しておけば、正常信号と魚体妨害による異常信号との区別が可能になる。実際の回路には、異常信号検出のためのゲート回路のほかに、異常信号検出後の処置として、異常信号を前回の計測信号で置き換える回路が組み込まれている。

後述する長期間連続観測中に行った実験では、この異常信号の除去回路は、図-1 に示すように、ノイズの出現頻度の大半を占める単発的なパルス性ノイズに対して

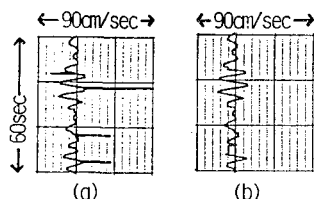


図-1 異常信号の除去前 (a)、後 (b) の計測信号例

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
** 理修 京都大学助手 防災研究所
*** (財) 日本気象協会東京本部 海洋気象室長
**** (財) 日本気象協会東京本部 海洋気象室
***** 海上電機(株) 営業本部長

非常に有効であることがわかった。一方、ノイズが頻繁に出現したり、一定時間異常値が継続したりすることがまれにあるが、そのような場合には完全にノイズを除去するには至っていない。

3. 検定試験

3.1 応答特性

超音波式流速計の検定は、京都大学防災研究所付属白浜海象観測所の検定水槽（長さ 17m, 幅 2m, 深さ 1.5m）を用い、 X および Y 軸のセンサー軸に対して、主軸方向が検定台車の移動方向と 0° および 45° の交差角をもつ場合について、流速 $2 \sim 50 \text{ cm/sec}$ の範囲内で行なった。その結果を図-2に示す。この検定結果から応答

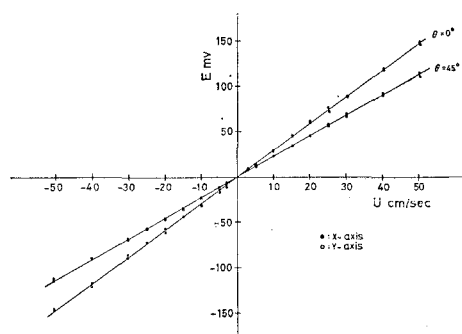


図-2 超音波式流速計の検定結果

特性は直線的であり、 X 軸と Y 軸とで応答特性に差がないことが確かめられた。

台車の速度 ($U \text{ cm/sec}$) と出力電圧 ($E \text{ mV}$) との関係をも $E=fU$ として、感度 f を求めると、交差角 (θ) が 0° および 45° の場合には、 f はそれぞれ 2.93 および 2.26 であった。この f 値は図-3に×印で示してある。図中に示した○および●印は、今回の検定とは別に得られた感度の方向特性を示したものである。なお、

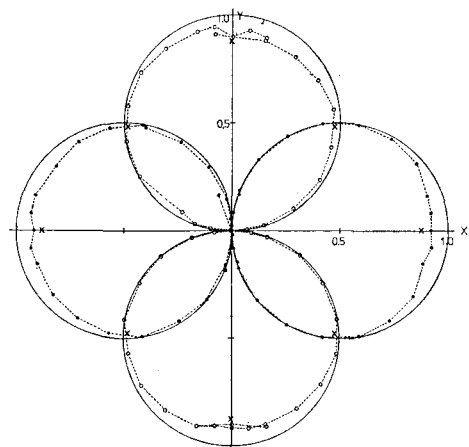


図-3 超音波式流速計の方向特性

これらの値は、測器の設計上決定される感度 $f=3.33$ ($\theta=0^\circ$) で規格化されている。そして、図中の実線で表した円は、感度の方向特性が理想的な余弦特性をもつとした時の値を示す。これから明らかなように、本流速計は測定軸と流れの交差角が 45° 以上の場合、感度の方向特性は理想的な余弦特性をもつが、 45° 以下ではそれからのずれが生じ感度が若干低下する。例えば、交差角が 0° の場合、すなわち測定軸の方向に流向が一致する場合、感度低下は最大となり、 $8 \sim 10\%$ に達する。これはセンサーヘッドが大きき（直径 2cm, 長さ 10cm の円柱状）をもつことから、ヘッドの後流部に乱れが発生し、その結果流速の欠損が生じるためである。

実際の流速データの処理にあたっては、計測された X および Y 軸の出力電圧から単純に流向を算出し、その流向に対する流速感度の方向特性を求めて、真の流速および流向を推定している。

3.2 長期安定性

超音波式流速計を用いた波浪の観測では、短周期の流速変動にのみ注目するので、特に流速計の零点の安定性が問題になることは少ない。しかし、通常の流速計として長期間の測流を行う場合には、一般に対象とする流速そのものが微弱であるうえに、観測期間が長いことから、零点の精度と安定性が重要となる。そこで、1981年7月から翌年6月までの通年観測の期間中、1~2か月ごとに合計9回の零点の検定を行い、流速計の長期安定性について検討した。

超音波式流速計のゼロ点の検定は、次のように行った。すなわち、通常の計測状態のまま流速計のプロープの間にパイプを取り付け、プロープ間の海水の動きを完全に止めておき、その時の流速値 U_d を測定した。その結果を図-4に示すが、9回にわたる零点測定の平均値は、 X および Y 軸でそれぞれ 0.2 および -0.8 cm/sec

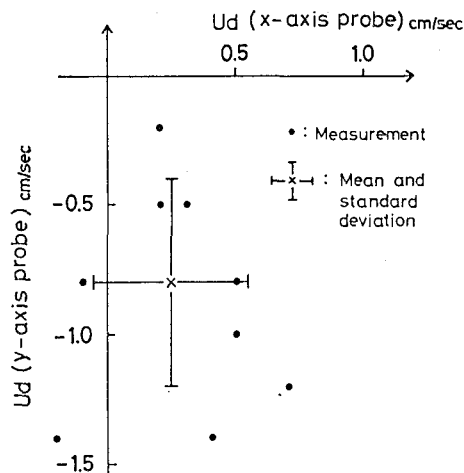
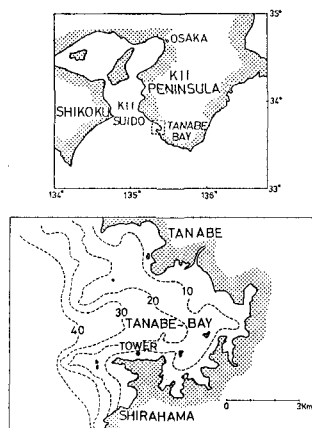


図-4 超音波式流速計の零点の変動



図—5 長期観測実施地点

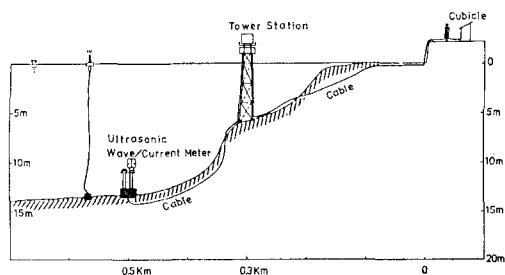
であり、その標準偏差は、それぞれ 0.3 および 0.4 cm/sec であった。通常、長期の測流結果からは、いわゆる恒流成分を求めることが多く、内湾ではその大きさは数 cm/sec から十数 cm/sec の程度である。したがって、この零点の変動は、恒流などの現象の特性値に対して十分に小さく本流速計の長期安定性は満足できるものである。

なお、上記の零点の測定は、プローブに付着した生物のかき落しを行う前後で実施したが、かき落しの前後で、零点の有意な変化は見られなかった。またプローブを含むセンサー全体に、生物付着防止塗料を塗布することで、生物の付着はほとんど見られなくなった。

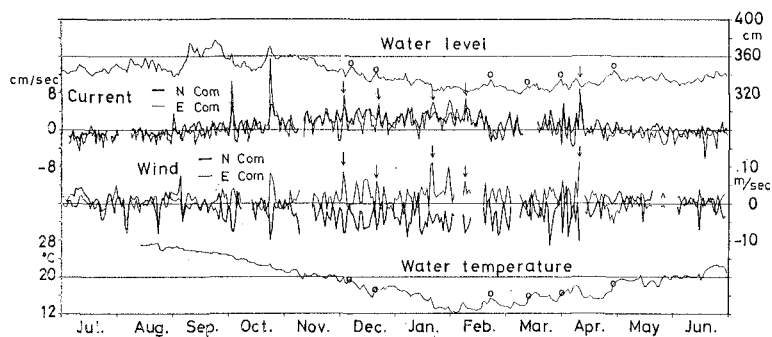
4. 長期連続観測

4.1 観測方法

1981年7月から、田辺湾(図—5)の京都大学防災研究所付属白浜海洋観測塔の沖 200m の地点(水深 13.5m)の海底上 3.5m に本流速計とともに、超音波式波高計および水温計を設置(図—6)して、通年の観測を実施した。この設置方法の特徴的なことは、海底に流速計を完全に固定し、不動の計測点を得ていることである。センサーの設置方位は、水中ジャイロコンパスにより求めた。2.1 で述べたように、計測信号のうち、潮流二成分、水位および水温は、1分間隔で連続的にカセットテープに、



図—6 長期観測の実施方法



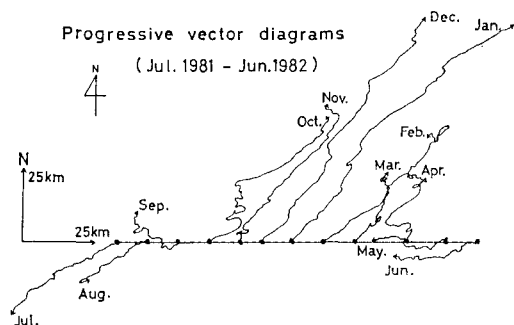
図—7 長期観測の結果(1981~1982)

また波浪にもとづく水粒子速度と波高は、0.5 秒間隔で 2 時間ごとに 20 分間カートリッジテープに収録された。

4.2 観測結果の概略

図—7 に得られた流速、水温および観測塔の風、気象庁白浜検潮所の潮位の年変化を示す。短周期の変動を除去するために、25 時間の移動平均をしたものが図示されている。この図からわかるように、恒流(25 時間の移動平均値)の変動は年間を通して小さく、10 cm/sec を越えることはまれである。10 月に顕著な流速のピークが出現しているが、これは台風(22 号および 24 号)の影響によるものである。また全体を通じて数日~十数日の長周期変動がみられ、恒流のピークは風のピークとの対応がよく(図中↓印)、水温のジャンプは潮位(気圧補正済み)のピークとの対応がよい(図中○印)。

次に、各月ごとの恒流進行ベクトルを図—8 に示す。



図—8 各月の恒流進行ベクトル

それらは、ほぼ等深線に沿う傾向が強く、特に冬期には北東に、夏期には南西に向うことが特徴的である。冬期に著しく北東に向うことは、この時期北西の風が卓越して、田辺湾に反時計まわりの環流が形成されるためである。

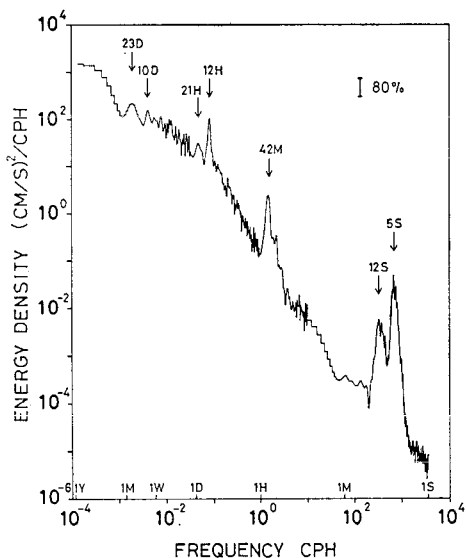
以上、流速の長周期変動について簡単に触れたが、次に、田辺湾に存在する流れの全体を概括するために、周期数秒から 1 年にわたる広い周期帯で、流速のパワースペクトルを計算したものを図—9 に示す。ただし解析の都合上、これは 4 つの周期帯ごとに計算されたスペクト

表—1 スペクトル解析の諸条件

周期域	計算に用いたデータの平均時間	計算に用いたデータの時間間隔	データの期間
1秒～5分	1秒	0.5秒	1981年8月23日 11時50分～12時10分
5分～1時間	2分	1分	1981年11月4日～5日
1時間～1日	5分	5分	1981年8月7日～ 9月3日
1日～1年	1時間	1時間	1981年7月1日～ 1982年6月6日

ルをつなぎ並べたものである。各周期帯での計算条件を表—1に示す。

図—9によれば、田辺湾における流速の変動にはいくつかのスペクトルピークが存在する。長周期のものからあげれば、まず、周波数 10^{-4} cph 付近から 10^{-3} cph に



図—9 流速変動のパワースペクトル

かけて年変化および季節変動に対応するエネルギーの高まりが見られる。次に周波数 10^{-3} cph から 10^{-2} cph の周波数帯では、風や外洋の海況変動に伴う周期数日から十数日程度の種々のピークが存在する。これらのピークより短周期側では、21時間の慣性周期および12時間の半日周潮周期に対応するピークが現れている。さらに、これより高周波側の周波数 10^3 cph までのスペクトルの傾きは、 $-5/3$ 乗則によく対応しているが、周期42分には、従来より注目されていた田辺湾の副振動に対応する顕著なピークが見られる。そして最も高周波の領域では、周期12秒のうねりおよび周期5秒の風浪に対応する振動流が、それぞれ高いエネルギーピークを形成していることがわかる。

5. 比較観測

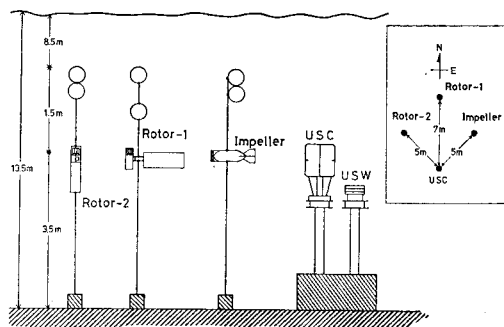
5.1 観測方法

本超音波式流速計で得られるデータの特徴を、従来用いられている流速計との比較によって明確にするために、1981年8月7日から9月5日までの30日間、前述した長期観測と並行して比較観測を行った。

比較に用いた流速計は、超音波式流速計 (USC)、インペラー式流速計 (Impeller) およびローター式流速計2種 (Rotor-1, Rotor-2) で、それらによる流向流速計測の概略仕様を表—2に示す。各流速計は図—10に示すように、超音波式流速計から5～7m離して設置された。

表—2 各流速計の概略

測器名称	USC	Rotor-1	Rotor-2	Impeller
流速センサー	超音波水平2軸スパン50cm	サボニアスライクローター 径10.5cm 高7cm	サボニアスローター 径7cm 高8cm	インペラー 径20.6cm
流向センサー	なし	ベーン 縦36cm 横100cm	ベーン 縦7cm 横4.5cm	尾翼 縦35cm 横36cm
流速測定	毎秒18回計測 120秒平均	5分間積算	5秒間積算4回 4回の流向流速をベクトル平均	3分間積算
流向測定	流速2成分から算出	瞬時値	5秒間隔瞬時値4回	瞬時値
記録時間間隔	1分	5分	5分	20分
設置方法	海底固定	係留	係留	係留



図—10 比較観測の方法

5.2 観測結果

比較観測結果の一例として、流速の絶対値の変動を図—11に示す。USCのデータには、流速値0に近い微弱流速が存在するが、他のものにはそれが見られない。この図の最下段の波高の記録が示すように、観測期間中台風の影響による高波浪時が2回あったが、明らかにこの時期に対応してUSC以外の流速値は増大している。とくにローター式流速計の記録で著しく、超音波式流速計による値の4倍近い流速値を示すこともある。すなわち、従来のローター式およびインペラー式の流速計は高

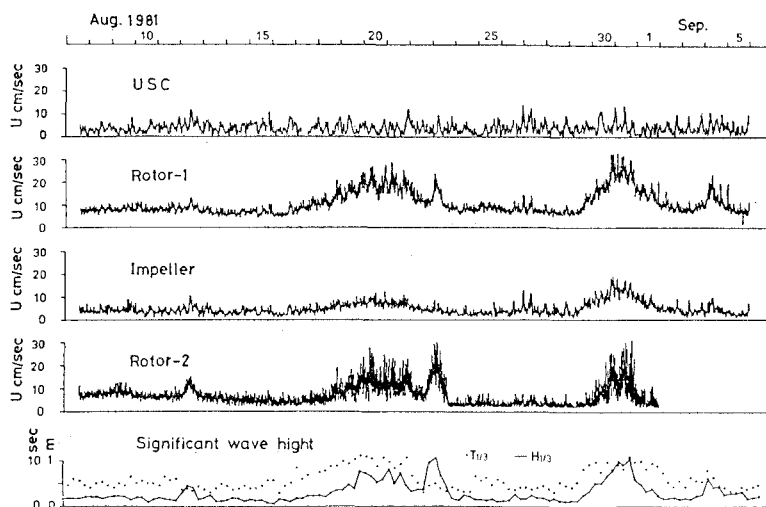


図-11 比較観測の結果

波浪時には流速を著しく過大評価する傾向があるのに対し、超音波式流速計では、波の影響がほとんど現れない、海底設置型の超音波式流速計におけるこの特徴は、波の影響の大きい沿岸浅海域での潮流観測にとって、非常に好都合である。

6. 結 語

従来、波向計として用いられてきた超音波式流速計の長期潮流観測への有効性が、一年間の長期連続観測および他種流速計との比較観測によって明らかになった。すなわち、本超音波式流速計は、数 cm/sec の微弱流速まで計測でき、高波浪時においても、波浪の影響を受けず、

高周波域までの測流を長期間安定した精度で行うことができることがわかった。

また、本流速計を用いた田辺湾における長期連続観測の結果をスペクトル解析し、風浪の周期から季節変動に至る広い周期帯域で流れの特性を明らかにすることができた。

最後に、本観測を実施するに当たり、田辺湾周辺の白浜、田辺、湊浦、南部町、堅田および新庄の各漁業組合および白浜町役場の関係諸官の格別のご協力をいただいた。ここに記して厚く感謝する。また、

本研究は海象（流れ）観測グルー

プによる協同研究²⁾の一部であり、協同研究者としてご協力いただいた、京都大学防災研究所附属白浜海象観測所の中村重久助教授、芹澤重厚技官、片山富晴技術補佐員、同理学部の国司秀明教授、西勝也助手、(財)日本気象協会東京本部の富永政英博士、森谷誠生博士、および海上電機株式会社の森田行司氏に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 副島 毅・高橋智晴・柳橋輝彦・土子良治：波向観測法等の一例について、第23回海岸工学講演会論文集, pp. 340~344, 1976.
- 2) 海象（流れ）観測グループ（代表土屋義人）：田辺湾における流れの長期連続観測、京大防災研年報, 第26号B, 1983（印刷中）。