

水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発

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*****

1. はじめに

我が国沿岸における港湾工事の大水深化、広域化に伴い、これまで以上に詳細な海洋情報の必要性が求められている。しかしながら、多種多様な海象の観測は、一般に各々独自の手法や観測機器によって独立に行われることが多く、また地形その他の周辺条件による観測点の制約もあって、同一地点での多項目にわたる定常的同時観測は通常困難である場合が多い。

波浪、潮位、潮流を始めとする種々の海象は互いに密接な関係を有しており、これらの特性を一体的に把握することは、有用な成果を得るための必要条件である。このような背景のもとに、波浪観測あるいは流況観測においても深水域で単体のセンサーにより、精度良く波浪や潮位、潮流を観測し得る機器の開発が望まれていた。

本研究はこれらの要望に応えるため、先に開発した超音波ドップラー式波向計を改良し、多様な海象条件下においても、安定かつ高精度に多種の海象計測が可能な機器の開発、実用化を目的としたものである。

2. 超音波ドップラー式海象計

本研究で開発した超音波ドップラー式海象計は、水位変動を測定する超音波式波高計の機能と、超音波のドップラー効果を応用した多層式流速計の機能を有している。多層式流速計の測定層は任意で、陸上部より設定可能となっている。システム構成は先に開発したドップラー式波向計とほぼ同じであるが、送受波器の水粒子速度測定用振動子が4方向から、その後の検討により、3方向に変更された。これに伴って各データの測定周期が1秒から0.5秒に変更されている。また、送受波器内部には圧力計、方位計、傾斜計の各センサーが追加され、単に水位変動と水粒子速度の計測のみではなく、これらの追加されたセンサーの出力結果により、多方面からの測定

表-1 観測項目

	項 目	単 位
波高の統計値	波 数	
	平均波高, 周期	m, sec
	有義波高, 周期	m, sec
	1/10 最大波高, 周期	m, sec
	水位変動の標準偏差	m
	水位変動の歪度	
波向の統計値	水位変動の尖度	
	ピーク波向	deg(°)
	平均波向	deg(°)
	平均分散角	deg(°)
	波峰長パラメータ	
流向, 流速	流 向 (3 層)	deg(°)
	流 速 (3 層)	cm/sec
潮 位	潮 位 (超音波)	cm
	水 圧	g/cm ²

データの信頼性の向上が図れるようになっている。なお、本機では陸上部に設置されたデータ演算器により、表-1に示す各項目が出力される。

3. 現地観測および観測結果の検討

(1) 観 測 方 法

現地実験は1993年8月19日から開始され、図-1に示す岩手県釜石港の沖合、水深48.5mの海底に本機の送受波器を設置して行われた。送受波器の測定信号は、現在我が国の波浪観測で標準的に使用されている4芯海底ケーブルを使用して、陸上の観測所（運輸省第二港湾建設局釜石港工事事務所馬田ヶ崎気象海象観測所）に伝

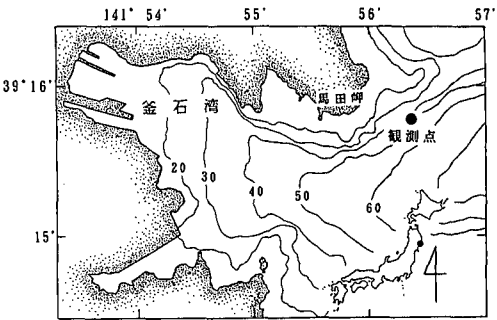


図-1 観測点図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋エネルギー利用研究室 長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所海象調査研究室長
*** 正会員 工博 京都大学防災研究所 教授
**** 正会員 (社)海洋調査協会 理事
***** (株)カイジョー 計測制御システム事業部 技術 部

表-2 観測条件

項目	水位の測定	水粒子速度の測定
観測地点	39° 15' 47.8" Lat, 141° 56' 21.0" Long	
測定方式	超音波パルス伝搬時間測定方式 鉛直1方向ビーム	超音波ドップラー方式 120°交差3方向ビーム
仕様周波数	200 kHz	500 kHz
音速	1500 m/sec一定	
測定/送信間隔	0.5 sec/0.125 sec	
センサ設置水深	48.5 m	
流速測定水深	10 m, 25 m, 38 m	
波向測定水深	10 m	
測定レンジ	20 m	0±5 m/sec
観測データ処理 平均化時間	波浪: 20分間	
	潮位: 3分間	
	潮流: 3分間	
観測間隔	波浪: 20分観測/毎2時間(偶数時)	
	潮位: 3分観測/毎20分	
	潮流: 3分観測/毎20分	
使用ケーブル	4芯シールドケーブル1400 m	

送された。なお、これら全ての測定信号は約1年半にわたり光磁気ディスクに収録された。観測条件の仕様を表-2に示す。

(2) 現地波高計との比較

現地実験期間中に本機により得られた有義波高等の統計値の妥当性は、本機設置点の南南西約100 m、水深50 mの地点にある既設の超音波式波高計(運輸省第二港湾建設局釜石工事事務所所有)の結果と比較することにより検討した。

図-2は本機と現地波高計の有義波高とを比較したものである。本機と現地波高計の有義波高の相関係数は0.99であり、両者間に良好な一致が認められる。

(3) 流況観測

本実験における流速の測定は、送受波器の振動子面から鉛直上方に10 m, 23 m, 38 mの3層を流速測定層に選定して行われた。流速値は、各観測時間に各層において計測された3方向の水粒子速度をもとに、以下の方法で算定した。

最初に、ビーム軸方向の水粒子速度の3分間(360データ)の時間平均で3本のビーム軸方向の平均流速をそれぞれ求める。次に、水粒子速度測定用振動子が鉛直軸より開角30°で平面投影交差角120°に配されていることか

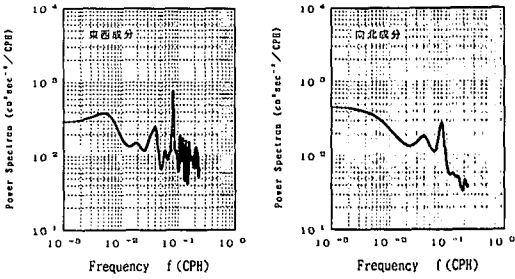


図-3 流速のパワースペクトル

ら、3方向の平均流速を座標変換し、それぞれ直交する3方向(X, Y, Z軸方向)の平均流速に変換する。このとき、本機では送受波器に内蔵された傾斜計のデータによって、送受波器の傾斜が自動的に補正されるようになっている。

釜石湾の過去の潮流観測結果によれば、湾口付近の送受波器設置点周辺の潮流は小さく、数cm/secであると報告されている。本機により測定された流速値もこれと同程度の値を示し、期間中の流速値はほとんど10 cm/sec以下であった。図-3は本機により得られた上層(海面下10 m)の東西成分および南北成分流速をMEMで解析したパワースペクトルである。これによると、東西成分と南北成分の卓越周期はいずれも日周潮および半日周潮の潮汐周期であることが分かる。特に東西成分には顕著な半日周潮の存在が認められる。

本機で計測された流速値の妥当性を検討するために、ロータータイプの係留式流速計を用い、1994年3月2日から約2週間にわたり本機と並行して流速を測定した。係留式流速計の設置位置は、送受波器の設置地点から約100 m隔てた地点で、本機の流速測定層の上層および中層に相当する海面下10 mおよび25 mの深度で流速を測定した。この結果、係留式流速計では本機で認められた潮汐周期の流速変動は認められなかった。図-4は係留式流速計の流速値と有義波高の関係を示したものである。図-4に見られるように、係留式流速計による流速値は波浪の増大に伴って増大する傾向が確認でき、両者間の相関係数は0.89とかなり高い相関係数を示している。一方、本機で得られた流速値と有義波高の相関係数は0.16であり、ほぼ無相関であった。このような結果から、釜石湾のような流速の小さい海域においては、係留式流速計では波浪に起因する機器の動揺の影響により、潮汐変動よりもむしろ波浪の影響を強く受けると推察される。一方、本機では上記のような影響はなく、当該水域の特徴的な流況を測定できるという有効性が確認された。

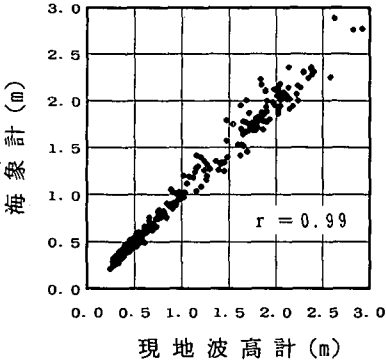


図-2 有義波高の比較

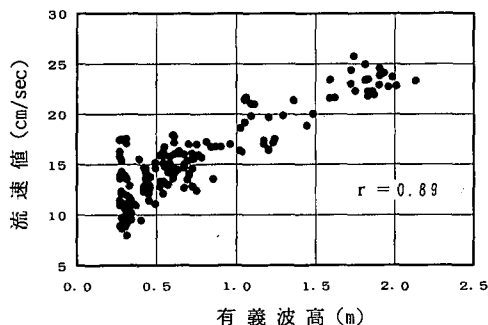


図-4 係留式流速計の流速値と有義波高の関係

(4) 潮位変動

本機による潮位は、0.5秒間隔で得られた水位変動記録あるいは水圧記録を、潮流と同様に3分間の時間平均を行うことにより推定した。

図-5は本機の水圧変動記録と水圧記録のそれぞれから得られた潮位と、湾奥部の既設潮位計で観測された潮位の関係を示したものである。図-5のいずれの図にも良好な相関関係が認められる。ただし、水圧記録により得られた潮位には気圧補正が加えられており、水位変動記録から得られた潮位には超音波の水温等による音速補正は加えられていない。

表-3は本機の超音波式波高計で観測された潮位と既設潮位計による潮位データを調和解析した結果を用い、主要4分潮の振幅を示したものである。両者の各調和定数の振幅は非常に近い値を示し、また日周潮と半日周潮の比 $(K1+O1)/(M2+S2)$ がほぼ1.0である特徴を良くとらえていることが分かる。このような結果は、これまでに観測事例が少ない沖合い潮位観測での、本機の適用可能性を示唆しているものと思われる。

(5) 気圧観測

本機の超音波および水圧のそれぞれより得られる水位の差は海面気圧により生じるものと仮定すれば、図-5とは逆に、両者の水位差から海面気圧を推定できるはずである。

図-6は水位変動記録と水圧記録をもとに推定された

表-3 調和定数の振幅

分 潮	超音波式波高計 (cm)	現地潮位計 (cm)
M2	32.15	28.78
S2	13.28	12.41
K1	30.16	26.35
O1	20.55	18.46

海面気圧と観測地点から約30 km離れた大船渡で観測された気圧との関係を示したものである。気圧の観測地点が約30 km離れているため厳密な精度の検討はできないが、図-6に見られるように、本機で推定された海面気圧と気圧の観測値には良好な相関関係が認められ、海中の情報から海面気圧をある程度の誤差範囲内で推定できるという興味深い結果が得られた。これはまた、超音波および水圧それぞれから得られる水位情報の信頼性の高さを示すものと推察される。

(6) 波向観測

本機では、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精度の良い拡張最尤法 (EMLM) (磯部ら, 1984) を用いて方向スペクトル解析を行う機能が組み込まれている。方向スペクトル解析は、超音波による水位変動および上層 (海面下10 m) における3方向の水粒子速度の合計4成分の時系列データを用いて行われる。また、波浪の伝搬方向および方向集中度等の代表諸元を得るために、方向スペクトルのモーメントから算定される平均波向 ($\bar{\theta}$)、平均分散角 (θ_k)、波峰長パラメータ (γ) 等のパラメータも出力される。

図-7は観測結果の一例で、1993年11月に観測された波浪諸元の経時変化を示したものである。図-7の中段に見られるように、釜石湾に來襲する波浪の伝搬方向は、東からやや北よりの80°付近を中心にほぼ±30°以内で変動し、常時湾口方向の東方から來襲する波浪が卓越している。この期間中の有義波高の経時変化図 (図-7の上位) と比較すると、平均波向と (方向スペクトルのピーク方向で定義される) ピーク波向は、高波浪時にはほと

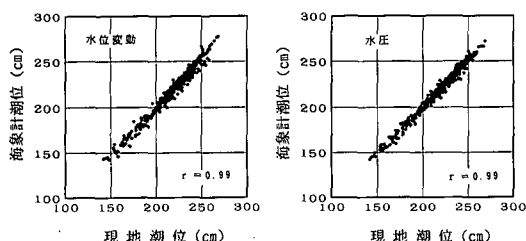


図-5 潮位の比較

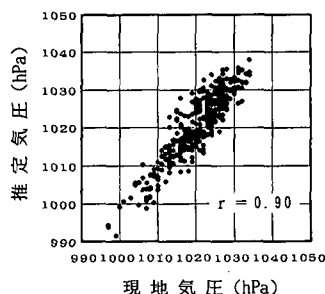


図-6 本機の気圧の推定値と気圧の観測値との比較

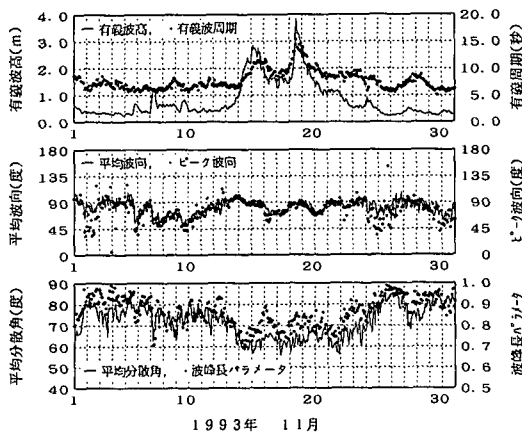


図-7 波浪諸元の経時変化

んど一致する方向を示す。低波浪時にはピーク波向の変動が平均波向よりもやや大きく現れているが、概してよく一致していると言えよう。また、図-7の下段の平均分散角と波峰長パラメータは、互いに値域が異なるので同一基準で比較することは難しいが、両者ともよく一致する変動傾向を示している。

図-8は有義波高と平均分散角および波峰長パラメータの関係を示したものである。図中の実線が波峰長パラメータ、ヒストグラムが平均分散角である。有義波高の増大に伴い平均分散角と波峰長パラメータは共にその値が減少する傾向があり、釜石湾の波浪は波高の増大に伴って湾内に来襲する波浪の方向集中度が高まることが確認された。

これら一連の結果は、荒天時および静穏時を含む多様な海象状況下においても、本機により計測される諸量が妥当であることを示すものと思われる。

(7) 流速情報から水位情報への換算

従来の超音波式波高計では荒天時に、波の碎波に伴い表面付近に巻き込まれた気泡による音波の散乱、吸収のため、正常な波形記録を取得できない難点がある。本機は水圧センサーを内蔵しており、線形理論等に基づく変換を行えば、原理的には水圧記録から水位変動に変換可能である。しかしながら、本機は本来水深 50 m 程度の深水域までカバーする目的を有しており、このような深水

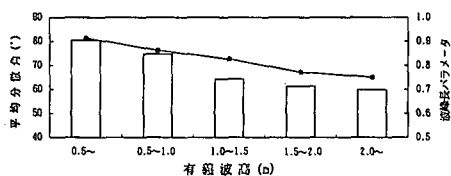


図-8 有義波高と平均分散角および波峰長パラメータの関係

域を対象とする場合には、水圧から水位変動への換算は波浪条件によっては困難である。そこでここでは、このような場合にも水位変動に関する情報を得る方法として、水中で計測された 3 成分の水粒子速度のデータを利用して水位変動のパワースペクトルを推定する方法を検討した。

方向スペクトルと任意の観測波動量間のクロススペクトルとの関係は次式で与えられる。

$$\Phi_{mn}(f) = S(f) \int_0^{2\pi} H_n(f, \theta) G(\theta|f) d\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\Phi_{mn}(f)$ は任意の波動量間のクロススペクトル、 $S(f)$ は水位変動のパワースペクトル、 $G(\theta|f)$ は方向関数、 $H_n(f, \theta)$ は水位変動から任意の波動量への伝達関数で、本機の伝達関数は前報 (高山ら, 1992) で報告したとおりである。

$[0, 2\pi]$ の全方向で定義される方向スペクトルを推定するためには 3 成分以上の観測波動量が必要がある。水位変動が観測できない条件下では方向スペクトルは直接には推定できないが、ドップラー式海象計では 3 成分の水粒子速度を計測しており、方向関数 $G(\theta|f)$ の方向に関する積分が 1 になる性質を利用すれば、式 (1) から $G(\theta|f)$ を推定可能である。したがって、EMLM 等の既往の方向スペクトル推定法により $G(\theta|f)$ が得られれば、式 (1) の右辺の数値積分を行い、水位変動のパワースペクトル $S(f)$ が求められる。

図-9はこのようにして推定されたパワースペクトルと実際の水位変動のパワースペクトルを比較したものである。式 (1) から分かるように、この場合にはクロススペクトルの個数だけ $S(f)$ が求められ、図-9にはこれらの内の幾つかのパワースペクトルを示した。いずれの推定値も水位変動のパワースペクトルのピーク周波数を含む広い範囲で、実際のそれと良く一致することが分かる。

図-10は、図-9の水位変動のパワースペクトルの推定値と、3 成分の水粒子速度のみから推定された方向関数を用いて、間接的に方向スペクトルを推定した結果の

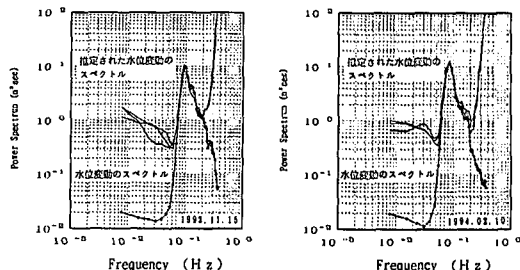


図-9 水粒子速度より推定した水位変動のパワースペクトル

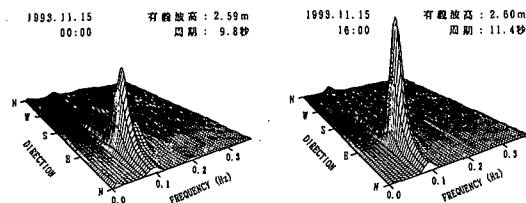


図-10 推定された水位変動のパワースペクトルを利用した方向スペクトルの解析例

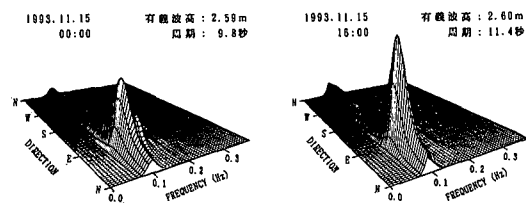


図-11 水位変動と3成分の水粒子速度を用いた方向スペクトルの解析例

一例である。また、図-11は水位変動と3成分の水粒子速度成分の全てを用いて図-10に対応する方向スペクトルを解析した結果である。図-10と図-11を比較すると、水位変動を含む4成分の全てを用いて推定された方向スペクトルの方が、方向スペクトルがやや広がった形に推定され、ピーク値もやや低く推定されている。しかしながら、ピーク方向は両者で一致しており、方向スペクトル形状もほぼ一致していることから、本機では超音波式波高計機能が不能な場合にも、3成分の水粒子速度のデータを利用して妥当な方向スペクトルの推定値が得られると言える。

本機のこのような機能は、今後の波浪観測における、特に荒天時の波浪情報の測得率の向上に資することができるものと期待される。

4. おわりに

沿岸域を対象とした海象観測機器としては、これまでも種々のものが開発され、使用されてきた。しかしながら、既往の測定機器には観測条件や観測項目が限定されたものが多く、多種多様な海象を観測するためには一般に複数の機器が必要となる場合が多い。また、長期間の定常的な観測を実施する場合には、機器の耐久性等の問題から使用可能な機器も限定され、選択の余地があまり残されていないのが一般である。

波浪、潮位、潮流を始めとする種々の海象は互いに密接な関係を有しており、これらの特性を一体的に把握することは、有用な成果を得るための必要条件である。本研究で開発した超音波ドップラー式海象計は、50 m程度までの深水域を対象として、単体のセンサーによって長期間安定して波浪、潮位、潮流等の多様な海象の同時観測が可能である。特に、方向スペクトルの場合には、これまでの大規模なアレイ観測と同程度の精度で、単体のセンサーによる観測が可能であり、今後、多様な海象を調査、研究する上で、本機は有用な海象観測機器の一つであると考えられる。

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、海洋調査協会内に設置された海象計開発委員会(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。ここに記して関係各位の方々に謝意を表します。

参考文献

- 高山知司・橋本典明・永井紀彦・高橋智晴・佐々木弘 (1992): 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, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 176-180.
- 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.