

紹 介

レーダー式波浪計の概要について

池田 雅也 *1・鈴木 啓介 *2・永井 千春 *3

要 旨

気象庁では、全国 6 か所で実施している沿岸波浪観測について、海中設置型の超音波式波浪計から、陸上設置型のレーダー式波浪計への更新を進め、2012 年（平成 24 年）に全ての地点で装置の更新を完了した。本報告では、新たに整備したレーダー式波浪計の概要を紹介する。

1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国にとって、海洋は古くから様々な活動の場として重要であり続けてきた。それとともに、沿岸地域や周辺海域では、台風や発達した低気圧による高波の被害を度々受けてきた。船舶の航行や漁船の操業、沿岸域での海洋開発やマリレジャーなど、海洋に係る諸活動を行う上で、安全の確保は最も優先すべき事項となっている。

高波による被害を予防・軽減するためには、波浪の実況や予想に関する情報を適時適切に提供することが必要不可欠である。気象庁では、日々の波浪情報や波浪注意報・警報を発表するとともに、波浪実況図や波浪予想図を発表している。これらの情報を適切に発表するには波浪の実況を把握する必要がある。

波浪の実況を把握するための沿岸域における観測は、海中設置型の超音波式波浪計や陸上設置型のレーダー式波浪計、係留式のブイに搭載された GPS 波浪計、観測塔などの海面上から超音波や光波を用いる波浪計などにより行われている。また、外洋域における波浪観測は、気象庁等の観測

船に搭載された船舶用波浪計や漂流型海洋気象ブイロボット、定置ブイによる測器観測、一般商船や漁船等による目視観測、衛星や航空機に搭載されたレーダー高度計などが用いられている。

気象庁では、超音波式波浪計を用いて実施してきた沿岸波浪観測について、レーダー式波浪計への更新を進め、2012 年（平成 24 年）に全ての地点で更新を完了した。超音波式波浪計及びレーダー式波浪計の設置場所を第 1 図に示す。



第 1 図 沿岸波浪計の設置場所

*1 地球環境・海洋部海洋気象課（現 地震火山部地震津波防災対策室）

*2 地球環境・海洋部海洋気象課

*3 地球環境・海洋部海洋気象課（現 大阪管区气象台）

2. レーダー式波浪計の設置に至る経緯

2.1 超音波式波浪計による観測

気象庁では、1974年(昭和49年)から1984年(昭和59年)にかけて超音波式波浪計を整備し、沿岸波浪観測を実施してきた。

超音波式波浪計は、水深約50mの海底に設置した超音波送受波器と陸上のデータ送信装置、波浪計を管理する気象台に設置されたデータ受信装置及びデータ処理装置から構成される(第2図)。

超音波式波浪計の観測原理は、超音波が水中を伝播する速度がほぼ一定であることを利用して、海底の送受波器から海面に向かって超音波を発射し、その反射波を捉えるまでに要した時間から海面までの距離を測定する、というものである。海面までの距離を連続観測することで波高を算出することが可能となる。観測データは、海底ケーブルを通じて陸上に設置されているデータ送信装置に伝送され、NTT回線を通じて気象台に送られる。

2.2 次期沿岸波浪観測システムの検討

これまで運用していた超音波式波浪計は整備から20年以上が経過し、設備の老朽化が進むにつれて、海底ケーブルの切断などによる観測途絶が各観測地点で発生するようになった。海底に設置した機器に障害が発生すると、その復旧に長期の時間と多額の費用が必要となることから、安定的な観測の維持が困難となってきた。

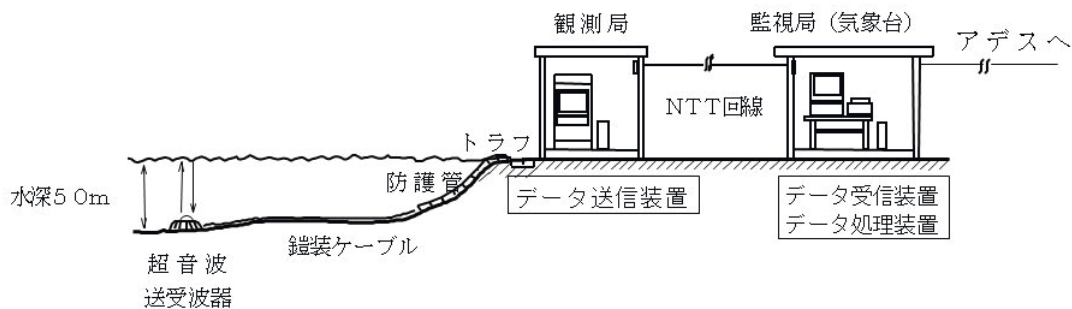
さらに、沿岸波浪モデルの高度化に資する波浪スペクトルなど、超音波式波浪計では取得できない観測データの重要性が増しており、最新の波浪観測技術を導入する必要性があった。このような

背景から、気象庁は、2001年(平成13年)に次期沿岸波浪観測システムの検討を開始した。

当初は、復旧に時間を要する海中ケーブルが不要なブイ式波浪計の導入が有力であると判断し、2002年(平成14年)から、静岡県石廊崎沿岸で試験観測を行った。この結果、大型のブイでは、装置の設置・回収に大型の作業船が必要となるなど、運用に多額の経費がかかることが課題となり、ブイを小型化する必要がある、との結論に至った。これを受けて、小型化したブイ式波浪計による試験観測を、2003年(平成15年)から高知県佐喜浜沿岸で実施した。この結果、小型のブイでは、視認性が悪く、船舶等の衝突による破損や流出のリスクがあることや、ブイに係留するロープ等を軽量化する必要があるなどの課題が明らかとなった。以上のことから、ブイ式波浪計の導入は断念した。

改めて次期沿岸波浪観測システムを検討した結果、陸上に設置された機器のみで構成され、従来の超音波式波浪計よりも保守点検や障害対応が容易なレーダー式波浪計の導入が有力であるとの結論に至り、整備に向けた具体的な検討を進めた。

レーダー式波浪計は、利用する電波の周波数帯として、HF帯(3~30MHz)、VHF帯(30MHz~0.3GHz)、C帯(4~8GHz)、X帯(8~12GHz)のものが実用化されている。このうち、HF帯及びVHF帯の電波を利用するレーダーは、広範囲の観測が可能であるが、大掛かりな地上施設が必要となるため、選択肢から除外した。また、X帯のレーダーは、C帯のレーダーに比べて、降雨時の観測精度が落ちることが指摘されていた。このため、気象庁が整備するレーダー式波浪計で



第2図 超音波式波浪計のシステム構成

はC帯の電波を採用することとした。

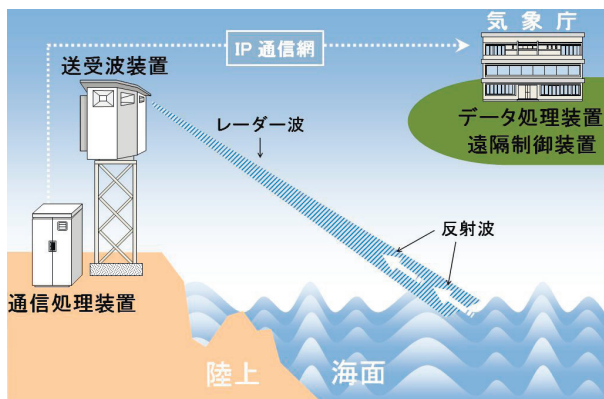
レーダー式波浪計の設置場所は、次の条件を満たす場所から選定した。(1)観測の継続性を確保する観点から、既存の超音波式沿岸波浪計の観測地点から遠くない場所にある。(2)海底の影響を受けて波が変化する浅海効果を除去するため、観測海域の水深が観測域中央部で40m以上、観測域周辺部で30m以上ある。(3)浅海効果の影響がない沖合の観測海域にレーダー波を照射する都合上、標高50m～100mの場所に設置できる。(4)レーダー波の不要な反射や散乱を防ぐため、沖合500m以遠に岩礁がない。

設置条件を満たす場所の選定を経て、レーダー式波浪計の整備を、2010年(平成22年)に石廊崎(静岡県)・経ヶ岬(京都府)の2地点で、2012年(平成24年)に上ノ国(北海道)・唐桑(宮城県)・生月島(長崎県)・屋久島(鹿児島県)の4地点で実施した。なお、従来の超音波式波浪計による観測は、レーダー式波浪計の運用開始に合わせて、2012年(平成24年)までに全て終了した。

3. レーダー式波浪計の概要

レーダー式波浪計は、送受波装置から発射されたレーダー波が海面で反射する際に、海面の動きに応じたドップラー効果によって変調される反射波を測定することにより、波浪の状況を観測する装置である。

レーダー式波浪計の主な特徴は、次のとおりである。(1)波高や周期に加えて、周波数及び方位角に対する波のエネルギー分布(波浪スペクト



第3図 レーダー式波浪計のシステム構成

ル)も観測できる。(2)超音波式波浪計よりも高い波高を精度よく観測できる。(3)装置が全て陸上にあるため、障害時の速やかな対応が可能であり、長期にわたる欠測がない。(4)一方で、風により生じる海面の小さな波による反射波を用いて観測しているため、海上の風が弱い場合は、海面からの反射が弱くなり観測できないことがある。

レーダー式波浪計のシステム構成を第3図に示す。観測されたデータ及び装置の運用情報は、通信処理装置から専用回線を通じて、気象庁本庁のデータ処理装置にリアルタイムで集約される。なお、装置に異常が発生した際は、気象庁本庁にある遠隔制御装置から運転を停止することが可能となっている。

また、波浪計を管理する現地の気象官署には、監視制御端末を設置しており、装置の運用状況及び観測データを常時監視している。監視制御端末の監視画面を第4図に示す。

3.1 レーダー式波浪計の仕様

気象庁が整備したレーダー式波浪計は、ノルウェーのMiros社が製造しているSM-050 Wave and Current Radarである。装置の外観を写真1に示す。また、装置の諸元を第1表に、観測の諸元を第2表に示す。

観測情報(項目)		項目内容	
観測日付(UTC)	2013/08/26		
観測時刻(UTC)	02:40		
有義波高(m) / 周期(秒)	1.30	6.6	
最大波高(m) / 周期(秒)	2.10	8.5	
最新(02:55)有義波高(m) / 周期(秒)	1.21	6.7	
障害情報(項目)		項目内容	
送受波装置	正常		
送受波装置 電源供給	ON		
電源制御装置	正常		
筐体内温度(°C)	29.2		
筐体内湿度(%)	76		
屋外風向(360方位) / 屋外風速(m/s)	280 / 1.1		
無停電電源装置(運転状態)	正常		
無停電電源装置(警報)	正常		
空調(運転状態)	停止		
空調(警報)	警報なし		
通信処理装置	正常		
ハロウケイ電報送信時間(UTC)	--日一時		

第4図 監視制御端末の監視画面



写真 1 レーダー式波浪計の外観

第 1 表 SM-050 Wave and Current Radar の諸元

外観	
高さ	900mm
幅	1100mm
奥行き	980mm
重量	125kg
観測環境の条件	
温度	-15~+40°C
湿度	0~100%RH
耐風速	75m/s以下
レーダーの電氣的仕様	
動作周波数	5.82GHz (波長5.17cm)
パルスバンド幅	20MHz
アンテナビーム幅	24°(3dB)
アンテナ利得	18dB
アンテナの数	6
送信パワー	10W最大, 275mW平均
消費電力	500W以下

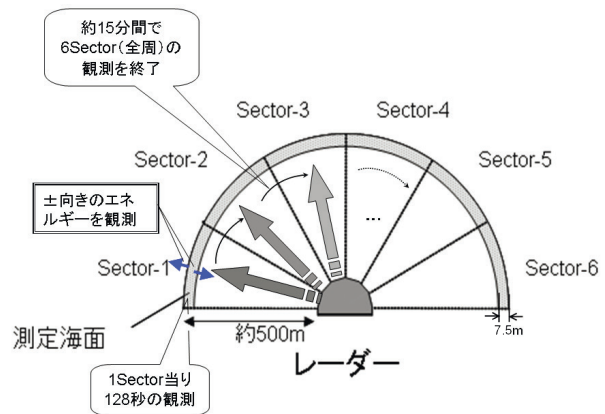
第 2 表 SM-050 Wave and Current Radar の観測諸元

方向スペクトル			
方向成分		36	
方向分解能		10°	
周波数成分		32	
周波数分解能		0.01Hz	
周波数範囲		0.0~0.3Hz	
方向スペクトルからの波データ			
	範囲	誤差	分解能
波高	0~30m	±5%	0.1m
周期	3~30s	±5%	0.1s
波向	1~360°	±7°	1°
観測値更新間隔	2.5分		
平均期間	45分間分のデータを平均		

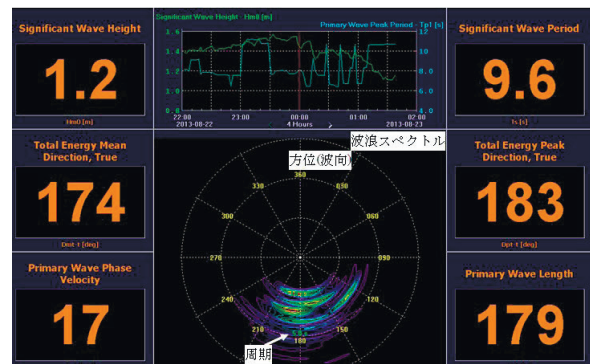
3.2 レーダー式波浪計による観測

レーダー式波浪計による観測方法の模式図を第 5 図に示す。レーダーは、水平方向 30 度ごとに 6 方向に分かれた 6 つのアンテナから電波を順番に発射して、アンテナの方向ごとに測定する。1 方向の測定は約 2 分間 (128 秒) で、6 方向を約 15 分間で走査する。これを 3 回繰り返した結果を平均処理することで、周波数及び方位角に対する波のエネルギー分布 (波浪スペクトル) を計算する。

波浪スペクトルは、波のエネルギー、すなわち波の高さの周期 (周波数) と波向 (方向) の 2 次元スペクトルであることから、多方向から来る風浪やうねりを区別することができる。レーダー式波浪計で計算された波浪スペクトル図及び波浪統計値の例を第 6 図に示す。図の例では、有義波高 1.2m の合成波高を観測し、その成分は南から周期約 10 秒と周期約 7 秒のうねり及び南東から周期約 6 秒の風浪が混在する場であることを表している。



第 5 図 レーダー式波浪計による観測方法の模式図



第 6 図 レーダー式波浪計で計算された波浪スペクトル図及び波浪統計値の例

3.2.1 観測原理

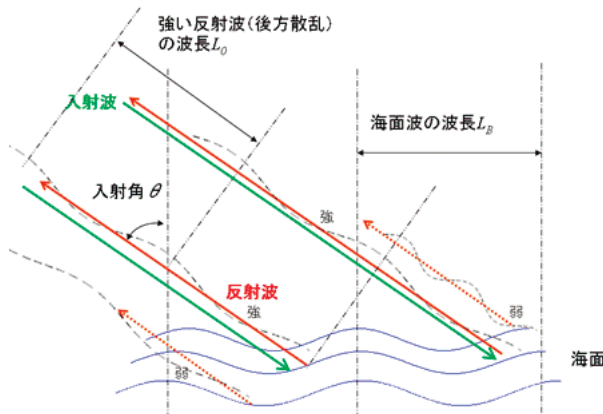
波浪スペクトルの計算は、まず入射波と反射波の周波数変化量から海面水粒子の速度の時系列値を求め、スペクトル解析により速度の周波数スペクトルを計算した後、適当な変換関数を用いて波高のスペクトルに変換する。次に、各アンテナで求めた波高のスペクトルを、6方向で合成するという方法で行う。以下にその詳細を述べる。

レーダーから海面に入射した電波は、海面で様々な方向に散乱する。特に入射方向へ戻る散乱波を後方散乱波という。電波と海面とのなす角が小さい場合、後方散乱波はマイクロ波の波長 L_0 と入射角 θ 及び海面の波の波長 L_B の関数になる。特に以下の関係が成り立つ場合に大きなエネルギーを持つ。

$$L_0 = 2L_B \sin \theta$$

これをブラッグ散乱という（第7図）。レーダーが発射するマイクロ波の周波数は約 5.82GHz なので、 L_0 は約 5.2cm である。また、 θ は約 80 度になるよう固定されている。したがって、レーダーは海面の波長 L_B が約 2.6cm の成分による反射波を測定していることになる。これは、風によって発生するさざ波、すなわち表面張力波に相当する。このため、表面張力波が発生しない程に海面の風が弱い場合、レーダー式波浪計は観測精度が低下する。

電波が観測者に対して移動する物体に反射すると、反射の前後で周波数の変調が発生する。これ



第7図 後方散乱とブラッグ散乱のイメージ

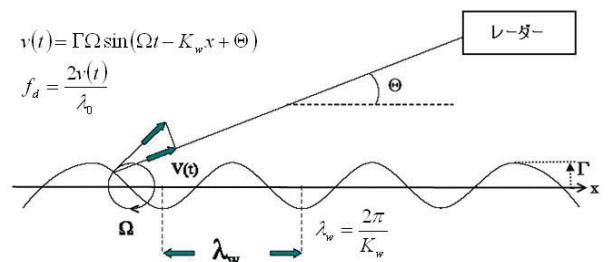
をドップラーシフトという。物体の相対速度を v [m/s]、電波の波長を λ [m] とすると、ドップラー周波数 f_d [Hz] は、 $f_d = 2v/\lambda$ となる。

水深が重力波の波長の 1/2 以上の場合、海面上の水粒子は、重力波の波高が円の直径となる円運動を行う。表面張力波は重力波の表面、つまり海面上に存在しているので、後方散乱波には水粒子の運動に伴うドップラーシフトが発生している。表面張力波は重力波に対して動きが遅く、静止しているとみなせるので、周波数の変化量を解析すれば、水粒子自体の速度を計算することができる。水粒子の速度と重力波（正弦波の場合）の高さとの関係を第8図に示す。

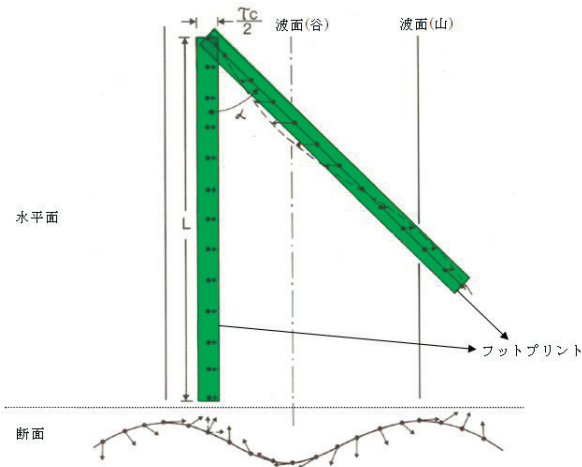
反射波のドップラー周波数は、水粒子の速度の動径方向成分 $v(t)$ に比例し、水粒子の速度は波の高さ Γ に正比例する。第8図の場合、波の高さは、速度を波の周波数 Ω で割ることによって得られることが分かる。このように適当な変換関数を用いてスケールすれば、速度を波高に変換することができる。

海面は異なる周期を持つ個々の波成分の重ね合わせで表現できるため、ドップラー周波数から得られた速度を個々の成分波に対応する水粒子の速度のベクトル和と考えれば、ドップラー周波数から速度スペクトルが計算できる。具体的には、水粒子の速度を 128 秒間の時系列データ（0.5 秒ごと 256 サンプル）として収集し、FFT（高速フーリエ変換）を用いてスペクトルを計算した後、変換関数を用いて波高のスペクトルに変換している。

1つのレーダーアンテナが測定する海面の拡大図を第9図に示す。レーダーが発射した電波の信号強度が一定となる領域を、フットプリントとい



第8図 水粒子の速度と成分波の高さとの関係



第9図 測定海面の拡大図

う。簡単のため、レーダーのフットプリントを長方形と考える。

フットプリントに対し波面が並行な場合は、水粒子の速度のレーダーに向かう成分は全て等しいため、ドップラー周波数はフットプリント全体で一定になる。しかし、波面がフットプリントと角度をなす場合、水粒子の速度は場所によって正〜負と変化するため、ドップラー周波数は平均で0になり、この波に対し応答しない (Miros, 2010)。

つまり、レーダーの1つのアンテナが観測可能な波向きは、アンテナごとに全て異なり、重複しない。したがって、アンテナごとに計算したスペクトルを6方向で合成すれば、全方位の波の方向スペクトルを計算することができる。

3.2.2 統計値の計算

波の方向スペクトル $S_d(f, \theta)$ [$\text{m}^2/(\text{rad}\cdot\text{Hz})$] と周波数スペクトル $S_n(f)$ [m^2/Hz] の関係は以下のようになる。

$$S_n(f) = \int S_d(f, \theta) d\theta \cong \sum_{i=1}^{nd} S_d(f, \theta_i) \Delta\theta$$

ただし、 $\Delta\theta = \pi/18$ (rad) であり、 $nd=36$ (方向成分の数) である (Miros, 2000)。ここで、 m_n を以下のように定義する。

$$m_n = \int f^n S_n(f) df \cong \sum_{i=1}^{nfq} (i \cdot \Delta f)^n S_n(f_i) \Delta f$$

ただし、 $\Delta f = 0.0078125$ [Hz] であり、 nfq は周波数成分の数である (Miros, 2000)。一般に、波高の確率密度分布はレイリー分布に従うことが知られており、この時、有義波高 H_{m0} [m] は以下のとおり計算できる (Miros, 2000)。

$$H_{m0} = 4.0\sqrt{m_0}$$

周波数スペクトル S_n のピーク周波数を f_{p1} [Hz]、その逆数を T_{p1} [s] とすると、有義波周期 T_s [s] は以下の式で計算できる (Miros, 2000)。

$$T_s = 0.9T_{p1} = \frac{0.9}{f_{p1}}$$

また、ゼロアップクロス法による波の平均周期 T_z [s] は、

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

となり (Miros, 2000)、レーダー式波浪計では、最大波 H_{max} [m] 及び最大波の周期 $T_{H_{max}}$ [s] は、観測時間 T [s] を用いて以下の式で定義される (Miros, 2000)。

$$H_{max} = 1.84H_{m0} \left[\sqrt{0.125 \ln\left(\frac{T}{T_z}\right)} + \frac{0.57722}{\sqrt{32 \ln\left(\frac{T}{T_z}\right)}} \right],$$

$$T_{H_{max}} = 1.23T_z$$

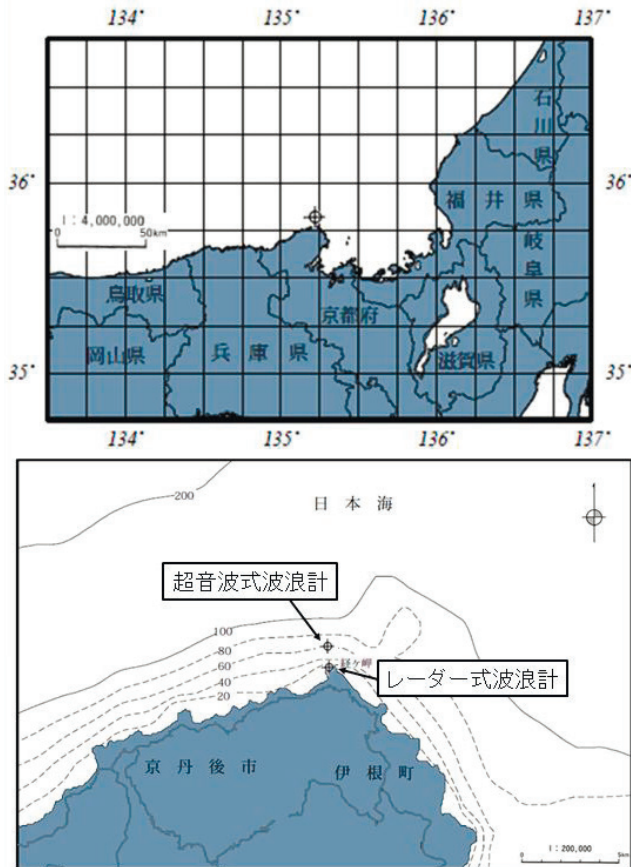
4. レーダー式波浪計の運用開始

気象庁では、レーダー式波浪計の運用を開始するにあたり、観測精度に問題がないことを確認するため、京都府経ヶ岬において運用中の超音波式波浪計と新たに設置したレーダー式波浪計の並行運用を行い、双方の有義波高を比較する試験観測を実施した (第10図)。

比較期間は2009年 (平成21年) 12月25日から2010年 (平成22年) 1月24日までである。この期間中、強い冬型の気圧配置となった際には、5m以上の波高も観測された。観測データの比較結果を第11図に示す。

超音波式波浪計とレーダー式波浪計が観測した

有義波高は、期間を通じてよく一致しており、レーダー式波浪計の観測精度が十分に確保できていることが確認できる。この結果を受け、気象庁としては最初のレーダー式波浪計による沿岸波浪観測を、2010年（平成22年）2月8日から正式に京都府経ヶ岬で開始した。



第10図 比較を行った超音波式波浪計とレーダー式波浪計の設置場所

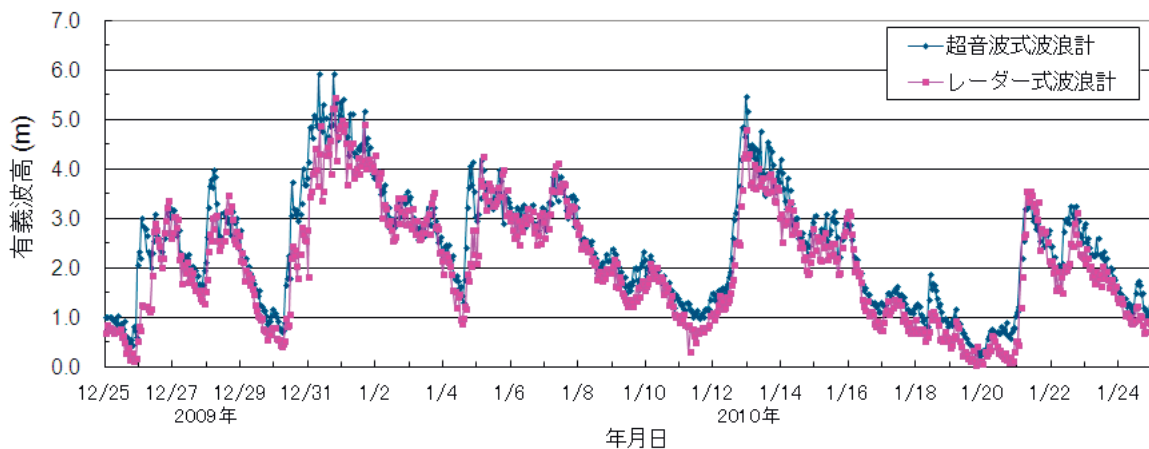
5. まとめ

波浪計の観測方式を、従来の超音波式からレーダー式に変更することにより、海中の機器やケーブル等が不要となったことや、観測施設の耐久性が向上することで、保守点検等の維持管理や障害時の復旧作業も容易にかつ速やかに行えるようになった。これにより、従来以上に安定的な沿岸波浪観測が可能になった。

気象庁では、波浪の実況解析や波浪の空間分布の推定、客観解析による波浪モデル解析値の修正など、日々の波浪情報や波浪注意報・警報の適時適切な発表に観測データを利用している。また、観測データは、波浪モデルへの取り込み（データ同化）に加え、波浪モデルの結果と比較することで、その特性を把握し、波浪モデルを改良することにも活用している。

さらに、観測データは、気象庁ホームページなどで公表しており、沿岸海域の利活用や港湾施設の整備における基礎資料などとして、幅広く利用されている。また、観測データを反映した沿岸及び外洋の波浪実況図及び波浪予想図は、気象庁ホームページや気象無線模写通報（JMH）などを通じて毎日発表されており、船舶の安全確保や経済的な運航などに活用されている。

今後は、レーダー式波浪計による安定的な観測を継続し、新たに観測が可能となった波浪スペクトルから得られる波向（波が向かってくる方向）をはじめとする観測データの蓄積から各観測地点における波浪の特性を調査・把握することで、波



第11図 超音波式波浪計とレーダー式波浪計の観測データの比較

浪情報の精度を向上させ、よりの確な情報の発表に努める計画である。

最後に、この場をお借りして、レーダー式波浪計の導入に尽力された関係各位に敬意を表すとともに、本稿執筆に協力いただいた皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

Miros (2000): Description of Wave Parameters. MIROS WAVE & CURRENT RADAR, **1100/DD/001/D**, 4-14.

Miros (2010): Principles of Operation. MIROS WAVE & CURRENT RADAR, **1100/DD/012**, 6-20.