

海洋短波レーダによる波浪観測の高度化について

峰本健正*・小谷野喜二**・貞弘行雄***

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹

*** 前 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 技術開発課 技術開発第二係長

有明海は台風や高潮の常襲地帯であり、しばしばこれらの影響により従来の波浪観測網に支障を来すことがある。このため、防災上の観点から波浪観測網の整備が急務である。平成 18 年度より広域な波浪観測網整備に向けた海洋短波レーダの利用高度化を図るため、波浪測定精度の向上を図る検討を開始したので報告する。

キーワード: 有明海, 海洋短波レーダ, ノイズ除去, 解析手法の改良

1. はじめに

九州有明海海域は、台風の常襲地帯であり、また、地理的条件から集中豪雨が発生しやすいため、しばしば洪水や高潮が発生している。波浪観測機器においては、災害発生時に現行の空中発射型波高計が強風や砕波の影響により、観測データが欠落することがある。このため、気象や海象に影響されない機器により、従来の波浪観測網をバックアップする必要性が生じている。

気象や海象に影響されにくい海域の流況・波浪情報を観測できる機器の 1 つに「海洋短波レーダ」がある。有明海には、既に、有明海の環境再生に向けた取り組みの一環として平成 17 年 4 月に「海洋短波レーダ」が導入されている。「海洋短波レーダ」は、広域な海域の表層流況・波浪情報を面的にかつ準リアルタイムに観測できる特徴があり、九州地方整備局では、「海洋短波レーダ」導入後、活用方法や更なる技術の向上を目指した検討を鋭意進めているところである。

現在設置されている海洋短波レーダ局は、有明海沿岸に位置する長洲、多比良、河内及び宇土の 4 箇所となっている (図-1)。この 4 局で観測されたデータは、熊本港湾空港整備事務所有明・八代海海洋環境センターで解析され、その情報は、「有明海表層流況・波浪情報システム」においてインターネット上で公開、1 時間毎に更新されている。(図-2)

このような状況を踏まえ、平成 18 年度より「海洋短波レーダ」の利用を高度化し、広域な観測網を整備するため、波浪計測精度を向上させる取り組みを開始した。初年度は、波浪計測精度向上のためノイズ特性を把握するための現地調査、従来解析手法の見なおしなどを行ったので、本稿で報告することとする。

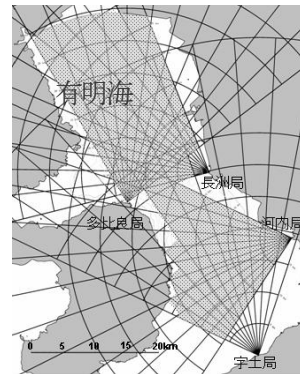


図-1 有明海 海洋短波レーダ局位置と観測エリア

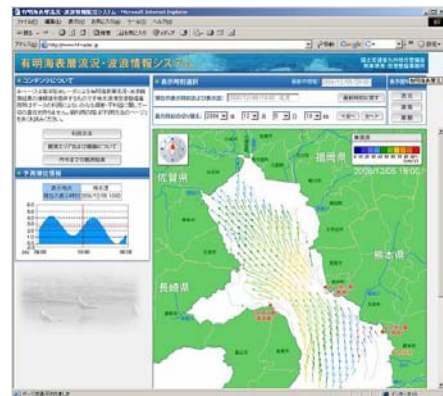


図-2 有明海の表層流況・波浪情報システム表示例

2. 海洋短波レーダ

2.1 海洋短波レーダの概要

「海洋短波レーダ」は、陸上に設置したアンテナ (図-3) から発射した電波により、数十 km 四方の表層流や波浪情報を測ることができる装置である。陸上のアンテナから海面に向けて短波帯 24.5 MHz の電波 (波長約 12 m) を照射すると、海面の波浪 (波長約 6 m) に共鳴散乱す

る。その後強い後方散乱波を受信し、当該受信データを周波数解析することにより海洋表層流、波浪情報を得ることができる。

現状における波浪観測精度は、波高・周期についてはほぼ実用レベルであるが、波向に関してはノイズ等の影響により安定的に解析することは難しい。したがって、その主な原因となる観測データに含まれるノイズの発生原因の特性を具体的に把握できれば、より安定的な波浪解析手法を見出すことができる。



図-3 有明海 海洋短波レーダ局アンテナ (宇土局)

2.2 海洋短波レーダによる波浪解析方法

「海洋短波レーダ」により観測されたドップラスペクトルデータからは、波浪情報として波高、周期、波向を計算することができる。図-4は、短波帯 24.5MHz のレーダで観測したドップラスペクトルの一例である。

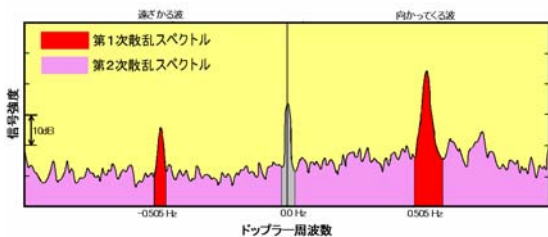


図-4 海洋短波レーダによるドップラスペクトル

横軸に示した周波数+0.505Hzと-0.505Hz付近に赤色で塗られた大きなピークがある。これは1次散乱ピークと呼ばれ、レーダ波と共鳴散乱を起こす海面波(24.5MHzのレーダでは波長約6mの海面波)によるものである。この1次散乱ピークの位置からは、レーダビーム視線方向の表層流速を知ることができる。一方、1次散乱のまわりには、小さいピークが多数現れる。これは2次散乱と呼ばれ海洋表面におけるあらゆる周期及び方向の波浪成分が関わっている。

従来からの主な解析手法としては、「海洋短波レーダ」で得られたドップラスペクトルデータより波高・周期を計算する「バリック法」、そして波高・周期に加えて波向まで計算できる「ベイズ法」がある^{2), 3)}。

バリック法は、2次散乱の基礎式である非線形積分方程式(図-5)を線形化することにより、波高・周期を求める方法である。

一方、ベイズ法は、基礎式の非線形積分方程式を線形化せずに逐次推定しながら方向スペクトル分布を推定することにより波高・周期・波向きを求める方法である³⁾。

$$\sigma_{(2)}(\omega) = 2^6 \pi K^4 \sum_{m_1=-1}^{+1} \sum_{m_2=-1}^{+1} \iint_{-\pi}^{\pi} \Gamma^2 S(m_1 \vec{K}_1) S(m_2 \vec{K}_2) \delta(\omega - m_1 \sqrt{gK_1} - m_2 \sqrt{gK_2}) dp dq$$

カップリング係数: Γ_E : 電磁気学的効果, Γ_H : 流体力学的効果

$$\Gamma_H = \frac{-i}{2} \left[K_1 + K_2 - \frac{(K_1 \cdot K_2)(K_1 \cdot K_2)(\omega^2 + \omega_B^2)}{m_1 m_2 \sqrt{K_1 K_2} (\omega^2 - \omega_B^2)} \right]$$

$$\Gamma_E = \frac{1}{2} \left[\frac{(K_1 \cdot K)(K_2 \cdot K) / K^2 - 2K_1 \cdot K_2}{\sqrt{K_1 \cdot K_2} - K\Delta} \right]$$

図-5 2次散乱の基礎式: 詳細は文献¹⁾を参照

この2次散乱から波浪方向スペクトルを求めることができれば、波高・周期だけでなく波向を知ることができる。

文献⁴⁾によると、ベイズ法はノイズの影響を強く受けた観測データを用いた場合、ノイズの混入が方向スペクトルの推定精度を低下させることが示されている。

このため、波浪観測精度の向上を目的に「海洋短波レーダ」の更なる高度利用を図っていくためには、ノイズ影響の軽減だけでなく、解析手法自体の改良を検討する必要がある。

3. 現地調査内容

3.1 ノイズ調査

前述のとおり、「海洋短波レーダ」で観測されたドップラスペクトルデータに含まれるノイズを可能な限り減らす、又は除去することにより、精度の高い波浪情報を抽出することが可能となる。

そこで、平成18年度は、観測されたドップラスペクトルデータに含まれるノイズ影響を評価するため、現地レーダ局で受信される生信号(A/Dデータ)を解析し、ノイズ特性を分析した。ドップラスペクトルに含まれるノイズは、主に以下の3種類に分けることができる。

- ①装置そのものが発生するノイズ (内部ノイズ)
- ②自然または人間活動により発生し、レーダの外部から来るノイズ (外部ノイズ)
- ③同一周波数で運用されているレーダ局間の電波干渉によるノイズ (他局レーダの混信によるノイズ)

現地調査では、レーダ局において送受信装置とアンテナ接続との組み合わせにより3種類のノイズを評価できるよう観測を行った。

一例として外部ノイズ測定手法を図-6に示す。この測定手法は、自局のレーダ電波を送信せず、外部から受信アンテナに入ってくるノイズを記録する手法である。記録された信号波形(A/Dデータ)を解析することで、ノイズ特性や頻度などを知ることが出来る。

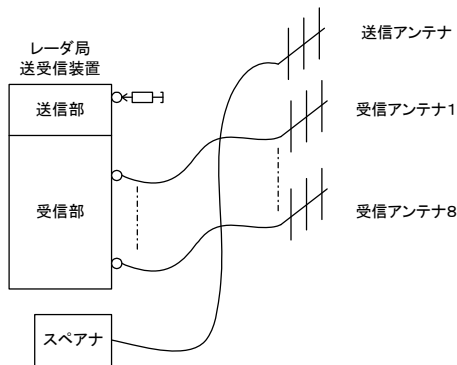


図-6 外部ノイズ調査方法

3.2 現地観測調査

現地観測調査の結果、観測された A/D データ波形形状からノイズ特性を以下の3つのタイプに分けることができた。

- ①観測時間中、最初から最後まで周期的に大きなノイズが混入するタイプ
- ②観測時間中、一部にのみ連続して大きなノイズが混入するタイプ
- ③観測時間中、全体を通じて数回大きなノイズが混入するタイプ

一例として、タイプ①の結果を図-7に示す。本検討において、ノイズ特性を分析し、発生源の推定を試みた。現時点では、発生源を厳密に特定することはできていないが、今後のノイズ除去方法への検討に重要な結果を得ることができた。

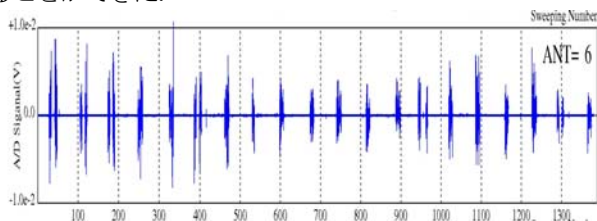


図-7 ノイズ混入時のA/Dデータ (タイプ①)

3.3 波浪解析手法の改良検討

ベイズ法は、2次散乱の基礎式(図-5)に、方向スペクトルが満たすことが望ましい先験条件を付加し、非線形最適化問題を逆解析によって解く方法である。一方でベイズ法はノイズに弱い性質を有しているため、ノイズが多く含まれている場合、計算が発散してしまい、波向計算ができないか、または計算できたとしても安定した形状の方向スペクトルを得ることができない。

波浪解析手法の改良については、まず、ベイズ法の実験条件に着目し改良を行った。

従来法の実験条件は、波高、周期及び波向きが未知な方向スペクトル分布の条件であった。これに対して今回の改良では、まずバリック法で計算された波高・周期から Bretschneider-光易モデルにより周波数スペクトルを求め、かつドップラスペクトルの周波数領域の1次散乱

の比から求めることができる風向を波向きと仮定し、光易型方向分布関数に与えることによって方向スペクトルを初期分布としてモデル化した。(図-8)。

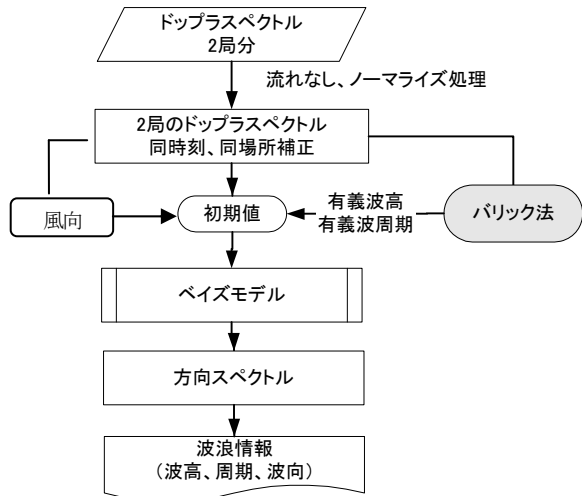
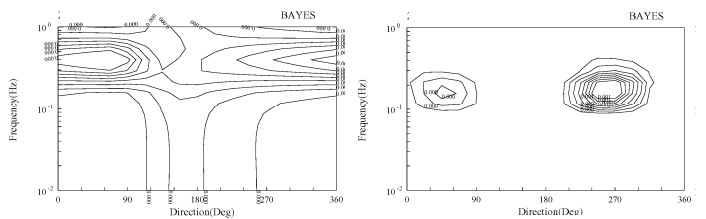


図-8 波浪解析手法の改良 (ベイズ法)

この改良を行う前後での方向スペクトル計算結果を比較した結果、改良前に比べ改良後の方向スペクトル分布の方がより収束・安定した形状となった。(図-9)



【改良前】 【改良後】
図-9 改良ベイズ法の方向スペクトル計算結果

3.4 熊本港における波向観測データ結果との比較

今回改良したベイズ法により波向計算を行い、その計算結果を九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所が管理している現地波高・波向計による熊本港の波向データと比較を行った。

熊本港では、現在2時間に1回、波高、周期及び波向を計測している。図-10に改良したベイズ法を用いた波向計算結果(上)と熊本港における波向観測結果(下)を、図-11に観測地点を示す。

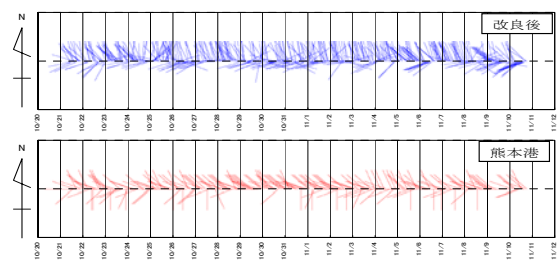


図-10 海洋短波レーダと熊本港の波向時系列
上:ベイズ法を用いた波向計算結果, 下:熊本港における波向観測結果

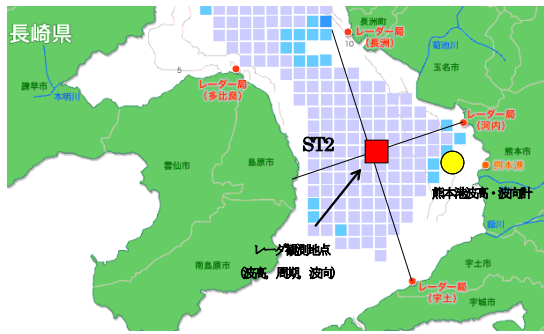


図-11 レーダ観測地点と熊本港波高・波向計観測地点

波向きに関する海洋短波レーダによる観測地点と熊本港の観測地点は、まったくの同一地点ではないため、波向きの分布が完全に一致することはないものの、双方の変化傾向がほぼ一致する結果となった。なお、平成18年度に実施できなかった同一地点における波向きの比較は、今後の課題としたい。

4. まとめ

4.1 ノイズ調査結果

平成18年度における現地調査結果におけるノイズ特性について以下にまとめた。

① 内部ノイズ

レーダ受信信号に含まれるスプリアス波（不要波）が確認された。これは高精度な波浪解析を阻害するため、今後は、エネルギーレベルを下げる、または除去するなどの対策が必要である。

② 外部ノイズ（受信のみの試験及び通常観測試験）

頻度は少ないが突発的に発生する原因不明な外来からのノイズが発見された。これらは観測時間に対するノイズ占有時間が短ければ、除去そのものは可能となるが、その占有率が高くなるにつれて除去方法が難しくなる。このため、今後の検討課題として、観測データに含まれる外部ノイズの影響度等から解析対象とすかどうかの可否を判断する指標を検討する必要がある。

③ 他局レーダの混信によるノイズ

向かい合うレーダ局からの送信波を受信することによる電波干渉の影響が確認された。これは、GPS時刻同期してのタイムディレイを設定して、送受信のタイミングをずらしても発生する。このため、今後の検討課題として、ハード的な対策と合わせて2局の観測時間そのものをずらす試験が必要である。

4.2 解析手法の改良

解析手法は、前述のとおり波浪解析手法の改良（ベイズ法の先験条件としてバリック法による波高・周期を入力）した結果、従来方法と比べるとより明瞭な方向スペクトル形状の計算が可能となった。

4.3 波向観測データの比較検証

改良された解析手法による計算結果を熊本港の現地波高・波向計による観測結果と比較したところ、波高だけでなく、波向の変化傾向もほぼ一致することが確認できた。これは、これまで相関関係のレベルが低かった波向の精度向上に期待できる結果となった。

5. 今後の課題

平成18年度の成果を踏まえ、次年度では、主に次に掲げる3つの課題に対応していく。

① ノイズ影響・除去方法の検討

昨年度に引き続き、ノイズ影響の軽減を図るため、観測時間をずらした混信試験などを実施し、ノイズの特性やその除去方法を検討する。

② 波浪解析手法検討・比較検証

平成18年度において改良した波浪解析手法で計算されたデータを現地海象計及び流速計の観測データとあわせて波浪推算シミュレーションとの比較検証を行うことにより、面的な分布状況についても波浪観測精度の検証を行う。

③ 浅海域における流況情報算出の検討

波浪高度化と合わせて流況情報についても高度化を検討する。「海洋短波レーダ」がこれまで対象としていなかった有明海全体の約12%を占める水深の浅い干潟海域（水深5m以浅海域）での測定精度を現地流速計などの結果と比較して検証し、流況情報算出範囲を拡大させるものである。

最後に、本調査は「海洋短波レーダ活用高度化技術検討委員会（委員長：橋本典明九州大学大学院工学研究院教授）」のご指導のもとに進められたものであり、熊本港湾空港整備事務所をはじめ関係者各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Barrick, D.E. : Remote sensing of sea state by radar, Chapter 12 of Remote Sensing of the Troposphere, V.E. Derr, Editor, NOAA/Environmental Research Laboratories, Boulder, CO, pp. 12.1-12.6, 1972.
- 2) Hisaki : Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar, RADIO SCIENCE, Vol. 31, No. 1, pp. 25-39, 1996.
- 3) 橋本 典明, 徳田 正幸 : 海洋短波レーダによる方向スペクトルの推定, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1271-1275, 1998.
- 4) 児島 正一郎, 橋本 典明, 徳田 正幸 : 海洋短波レーダによる波浪観測に関する基礎的研究-受信信号中のノイズの影響評価-, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1446-1450, 2001.