

伊勢湾海洋レーダによる波浪観測手法の検討

峯村 浩治*・守屋 正平**・恩田 充***・村上 裕幸****・金津 伸好*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (一財) 沿岸技術研究センター 業務執行理事

*** 前 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 所長

**** 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課 課長

***** 国際航業株式会社 技術本部 環境保全部 海洋エンジニアリンググループ

本稿は、沖合波浪観測における海洋レーダの活用を目的として、現在稼働している伊勢湾海洋レーダを用いて波浪観測手法の検討を行ったものである。海洋レーダによる波浪観測では、ノイズ (SN 比) の影響を大きく受け、一般的に SN 比が高い状態でなければ、精度の良い波浪観測はできないと言われており、伊勢湾においても河川出水に伴う海域表層の淡水化により SN 比が低下すると、波高の算出精度が低下することが確認された。波浪観測精度の確保のため、SN 比を閾値とした棄却により、3 局のうち精度の良いもののみを採用することで、検証波高と同等の観測値を得ることができた。SN 比と相関が高かったのは波高のみであり、周期や波向においての観測方法については今後の課題となった。

キーワード：海洋レーダ，波浪観測，SN 比，淡水化，観測精度

1. はじめに

海洋レーダは、陸上にレーダ局を設置し、電波を発信して、その反射エコー (ドップラーエコー) を受信・処理し、複数局の解析結果データを合成する事により、海の表層の流況 (流向・流速) を広範囲かつ面的に取得することができるリモートセンシング技術を利用した観測方法である。近年の解析機器の高速化および大容量化に伴い、計算処理速度が飛躍的に向上したことから、流況以外にも、波浪や津波に対する観測手法についての研究論文が数多く発表されている (例えば、日向ら¹⁾、片岡ら²⁾)。

中部地方整備局では、伊勢湾および三河湾に設置された伊勢湾海洋レーダによる観測網が稼働しており、リアルタイムの流況情報を一般に配信している。このレーダ観測システムのさらなる利活用のため、「海洋レーダ技術検討委員会」を設置して、レーダ観測技術の高度化に資する検討が進められている。

本稿は、湾内での港湾管理、工事、出港可否判断等の効率化のため、伊勢湾海洋レーダによる内湾波浪の観測手法に関する検討を行ったものである。

2. 伊勢湾海洋レーダの概要

中部地方整備局では海洋における浮遊ゴミの回収作業の効率化のため、伊勢湾および三河湾に計 6 基の海洋レーダ局と中央局で構成する「伊勢湾海洋レーダ」を設置している (図-1)。伊勢湾では 24.5MHz (観測距離 50km) の周波数のレーダを鍋田局、津松阪局、大湊局の計 3 局

に設置することにより、海面表層の流況情報を取得しており、伊勢湾環境データベース HP においてリアルタイムで公開している。

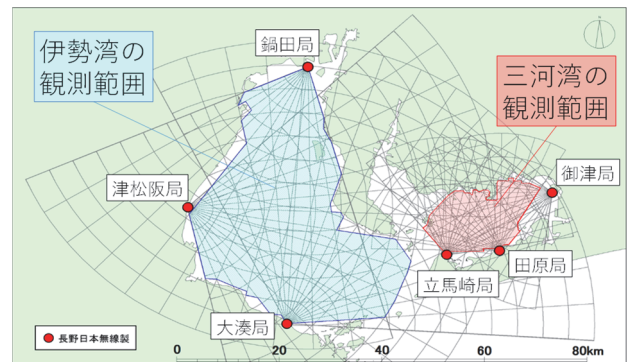


図-1 伊勢湾海洋レーダの観測範囲

3. 伊勢湾海洋レーダによる波浪観測の検討

3.1 波浪観測の手法

ある波浪の峰で散乱する電波は、1つ前の峰からの電波の散乱波と位相が一致するとき、お互いを強め合うブラッグ共鳴が発生する。この共鳴機構を利用して波浪からの散乱波を観測することで海洋の波浪情報を取得することが可能となる。この散乱波の時系列を FFT 解析することによりドップラースペクトル (図-2) が得られる。共鳴条件を満たす波に対する一次オーダーの散乱波を一次散乱波と呼び、この他に 2 つ以上の波浪成分波の干渉により出来たブラッグ共鳴条件を満たす波浪成分波を 2 次

散乱波と呼ぶ。この2次散乱波の周波数と強度の特性は、波浪成分波の特性に強く依存するため、受信された散乱波を解析することで海象情報を抽出することができる。

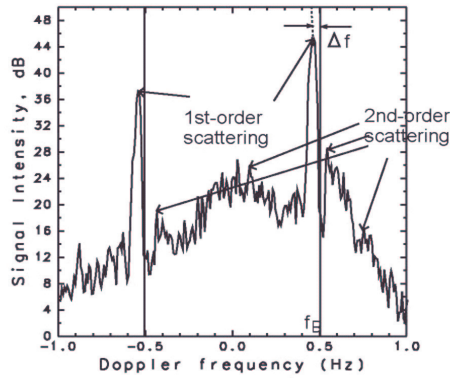


図-2 ドップラースペクトルの例

Barrick は、ドップラースペクトル分布において、波浪場を決める主要な第2次散乱の特性を調べた結果、それらが第1次散乱ピーク周波数付近に卓越することを見だして、非線形積分を線形積分で近似して観測されたドップラースペクトルに重み関数を掛け、かつ1次散乱スペクトルで規格化し、周波数積分することにより波浪場の波高と周期を求めるアルゴリズム(図-3、図-4)を開発³⁾した。これをバリック法と呼ぶ。

バリック法は、観測されたドップラースペクトルから、波浪諸元を直接的に解析することが可能であるため、速報性に優れることを重視して同法を採用した。ただし、求められる波浪諸元は平均波高と平均周期のみで、波向は算出できない。このため波向についてはドップラースペクトルの正負に存在する1次散乱波成分の比を用いた1次散乱比法(図-5)により解析を行った。

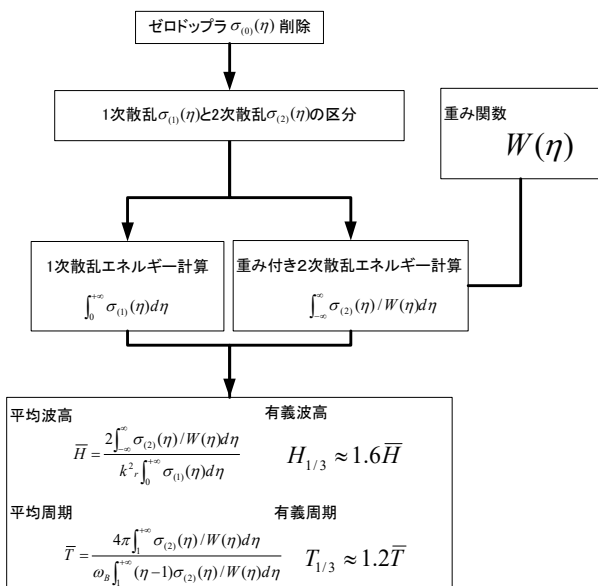


図-3 バリック法解析フロー

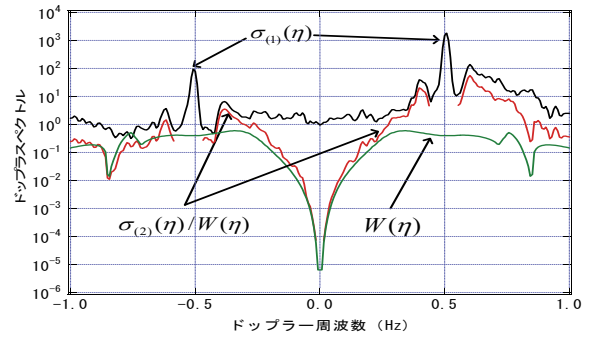


図-4 重み関数Wと重み関数がかかった2次散乱の例

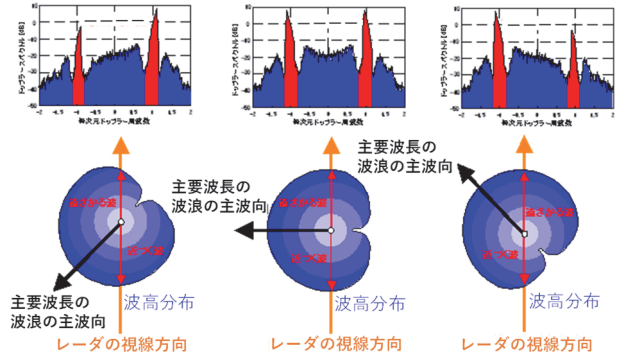


図-5 ドップラースペクトルと波向の関係

3.2 バリック法による波浪観測の精度の検証

(1) 検証地点および検証方法

検証は、伊勢湾内に位置する波浪観測地点であるシーバース(湾奥部)と4号灯標(湾中部)の2地点で行った。シーバースでは、波高・周期・波向の観測が、4号灯標では波高と周期の観測が実施されており、これらを検証値として用いた。

検証の対象期間は2016年から2018年の3カ年において台風による高波をもたらせた高波高期間として代表的な以下の2擾乱を取り扱う。

高波期間①：2016/09/18～09/26

高波期間②：2018/08/19～08/27

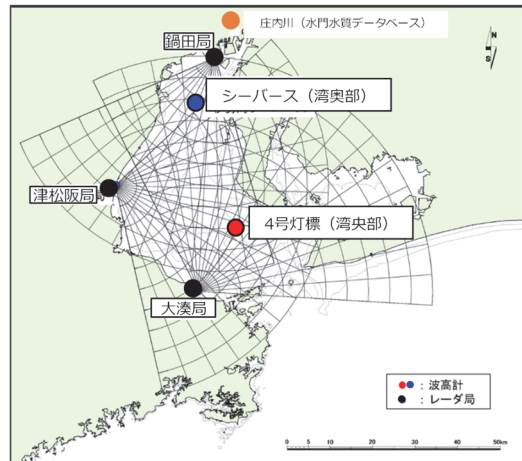


図-6 波浪検証地点位置図

(2) 波浪諸元の比較

図-7、図-8は高波期間①における伊勢湾レーダ3局から計測した湾奥部と湾中央部のSN比と波高の経時変化である。ここでのSN比は、ドップラースペクトルの1次散乱エネルギーピークと高周波数領域の平均エネルギーの比であり、SN比が高い場合にはノイズレベルが低く観測諸元が計測しやすい状況であることを示す。一般に流況を良好に観測するためにはSN比10dB以上が必要であるとされており、図-7の湾奥部においては擾乱の来襲前ではSN比が30dB程度はあるが、波高が卓越する9/20頃からSN比が低下し、擾乱通過後においても低下が継続する。一方で、図-8の湾中央部は擾乱期間全般において大きなSN比の変動は見られないが、鍋田局のSN比は波高ピーク後にやや減少する傾向が見られる。

したがって、各レーダ局による波高は、SN比の低下に伴い、観測波高よりも極端に大きな値が解析されるため、波高の発達と減衰が表現されていない。ただし、波高ピーク時刻近傍の高波高時にのみ、波高の表現が良くになっているのは両検証地点で共通している。

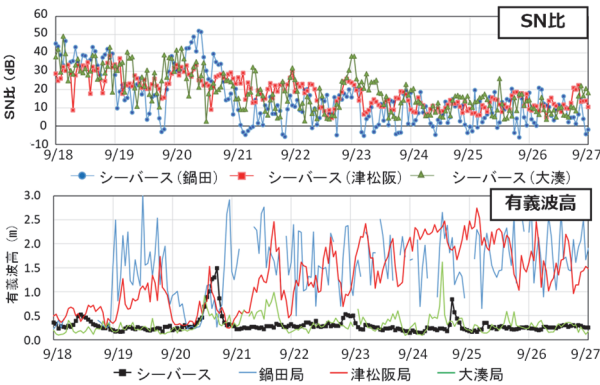


図-7 高波期間①湾奥部のSN比と波浪の経時変化

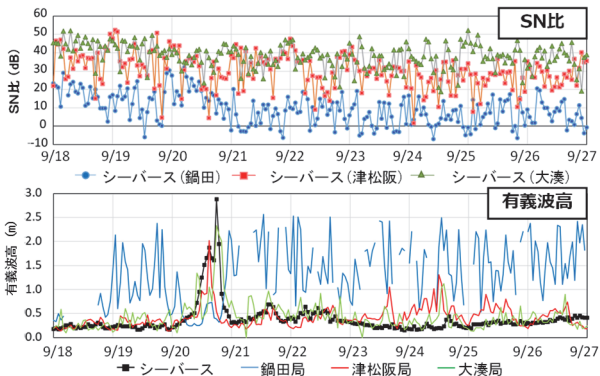


図-8 高波期間①湾中央部のSN比と波浪の経時変化

(3) 波浪観測に対するSN比の影響

図-7及び図-8の経時変化から、SN比に対する波高誤差(検証波高とレーダ観測波高の差)の相関性を確認した。

図-9左図はSN比と波高誤差の相関図であり、湾奥部、湾中央部共にSN比が高いほど、誤差が小さくなる傾向が確認できる。また、右図は局別のSN比別の波高誤差の平均値とRMSEであり、レーダ局から観測地点までの距離に応じて後方散乱強度が低下する現象として湾中央部では概ね

説明ができる。しかし、湾奥部では近接した鍋田局で誤差が大きく、離れた大湊局で誤差が小さくなっていることは、距離に応じた強度低下以外の要因が影響しているものと考えられる。

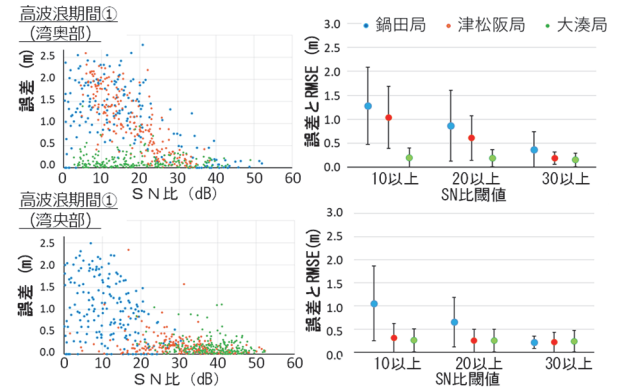


図-9 SN比と波高の誤差の相関関係

(4) SN比低下の気象要因

レーダ観測では、その観測原理から塩分濃度が低下すると後方散乱強度が低下して十分な観測精度が得られない。鍋田局は、木曾三川をはじめとした多くの河川の河口に位置し、鍋田局付近の海域は、淡水の流入量が多い。図-10と図-11は、庄内川の河道内水位と、湾奥部、湾中央部の塩分とSN比の経時変化である。図-10に示す湾奥部では、河川からの出水により塩分濃度が低下するとともにSN比も低下している。また、図-11の湾中央部では、河川出水後も塩分濃度は低下しないが、鍋田局のみSN比がやや低下している。これは、鍋田局が常にレーダ照射線上に淡水域を含むことから、塩分濃度の低下が及ばない遠方の観測地点であってもSN比が低下し易いためであると考えられる。これらのことから、レーダによる波浪観測では、海面の淡水化により、観測精度に大きな影響を及ぼすことが現地の観測データから確認された。

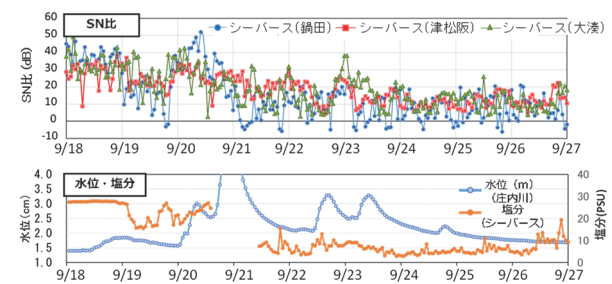


図-10 高波期間①湾奥部のSN比、水位・塩分の経時変化

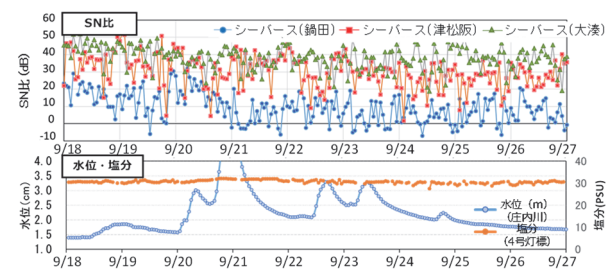


図-11 高波期間①湾中央部のSN比、水位・塩分の経時変化

(5) SN比によるスクリーニングの検討

以上の検討から、SN比が低下する状況では、波浪観測精度が確保できないことが確認された。そこで、SN比を基準とした足切りによるスクリーニング効果を確認するため、SN比の閾値を段階的に変化させた際の、観測精度の確認を行った。

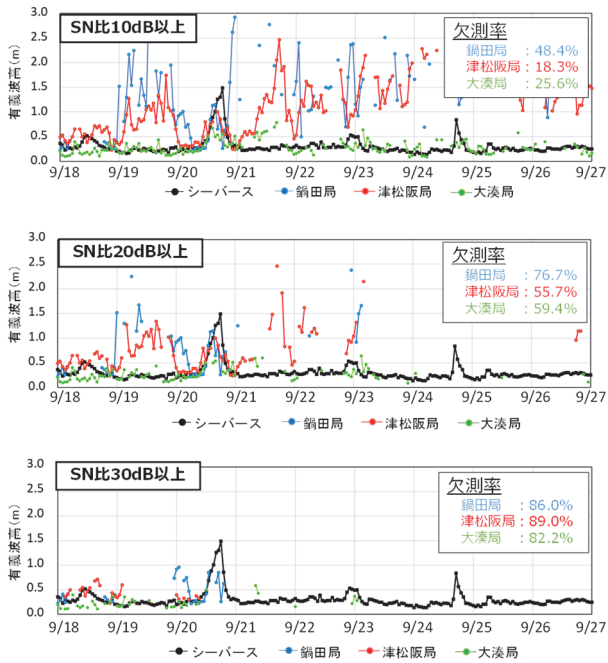


図-12 高波期間①湾奥部 SN比に応じた波浪の棄却

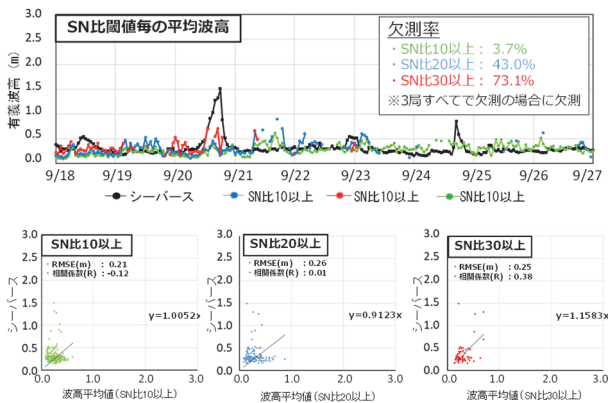


図-13 高波期間①湾奥部 SN比閾値毎の平均波高

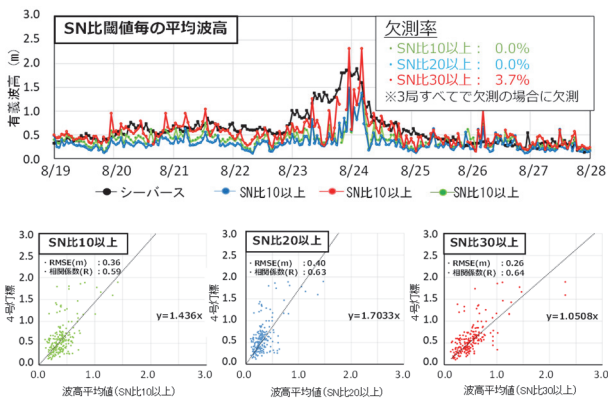


図-14 高波期間②湾中部 SN比閾値毎の平均波高

図-12は、SN比の閾値を10、20、30dBとして足切りした場合の波高を示したものであり、SN比の低下による極端に大きく算出される波高を除外するには、閾値を30dBに設定することが適切であることが分かった。しかし、欠測が多くなり採択データ数が極度に減少する。このため、検証値との回帰式によりレーダ観測値を現地相当に補正して、閾値を満足する局の平均値として算出した結果が図-13、図-14である。この結果、SN比の閾値によらず、測得数を維持したまま検証波高の経時変化を概ね再現できた。このとき、高波高時の表現が良いのはSN比30dB以上の閾値を設定した場合であることが分かった。

4. まとめ

伊勢湾海洋レーダを用いて波浪観測手法の検討を行った。現地の波浪観測と概ね一致する波高を算出するには、湾内で発生する海面の淡水化の影響を除外することが重要であり、SN比30dBを閾値として、鍋田、津松阪、大湊の3局に対して、現地波高との回帰式による補正を施した波高の平均値を採用することが必要となった。

なお、周期や波向についても同様に検討を行ったが、伊勢湾の陸上地形による反射や、航行船舶による乱れ等の背景ノイズの影響により、2次散乱波ピークが不明確となることで有意な結果は得られなかった。

委員会においては、今回用いたバリック法は外洋の深海条件において近似的に導かれた手法であり、内湾の浅海域で陸上からの反射波が存在する海域での適用は難しいとの指摘があった。今後さらに、ノイズの処理技術の向上や、新たな解析手法の適用により海洋レーダによる波浪観測技術の発展が期待される。

謝辞

本稿は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所発注の「海洋レーダによる海象観測技術高度化検討業務」の成果の一部をまとめたものである。業務実施にあたっては、海洋レーダ技術検討委員会(委員長:名古屋大学 水谷教授)の各委員から貴重なご指導をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤良太郎, 日向博文, 藤井智史, 永松宏, 小笠原勇, 伊藤浩之, 片岡智哉, 高橋 智幸: 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波検知距離の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学) 71 巻 2 号, p. I_337-I_342, 2015
- 2) 片岡智哉, 永松宏: 浅海域における海洋レーダを用いた方向スペクトル推定法, 土木学会論文集 B2(海岸工学) 72 巻 2 号 p. I_1711-I_1716, 2016
- 3) Barrick, D. E: Remote sensing of sea state by radar, Remote sensing of the Troposphere, V. E. Derr, Editor, U. S., Govt. Printing Office, Washington, D. C., 12. 1972
- 4) 土木学会: 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 2001