

# 伊勢湾における短波海洋レーダを用いた面的波浪計測と精度向上に向けた検討

東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生員 ○島崎 穂波  
 東京理科大学理工学部土木工学科 正会員 片岡 智哉  
 東京理科大学理工学部土木工学科 正会員 二瓶 泰雄

## 1. 序論

沿岸域における波浪監視は、海象計や GPS 波浪計を用いた点的な観測に依存しているが、波浪は時空間的に成長・伝搬するため、面的な波浪計測ができることが望ましい。短波海洋（High frequency; HF）レーダは、陸上から電波を放射し、海面で散乱した電波の受信信号を解析することで、面的な波浪計測が可能である<sup>例え、<sup>1),2)</sup></sup>。しかしながら、HF レーダによる波浪計測精度が不明であるため、実用化に至っていない。特に、沿岸域では電波干渉や船舶等によるノイズの発生により、計測精度が低下する恐れがある。そこで、本研究では HF レーダを用いた面的波浪計測手法を確立するため、伊勢湾に設置されている HF レーダの実観測データを用いて波浪計測精度の把握と精度向上のための解析手法について検討する。

## 2. 研究方法

(1) 対象データ：国土交通省中部地方整備局が配備する伊勢湾沿岸 3 局（鍋田局・津松坂局・大湊局）の HF レーダ（図 1）で計測されたドップラースペクトル（図 2）を用いた。なお、ドップラースペクトルは、送信電波と受信電波の周波数差（ドップラー周波数）に対する受信電波のエネルギースペクトルである。計算日時は、台風 11 号が伊勢湾付近を通過し、比較的波高の高い 2015 年 7 月 16 日 22:00 及び 23:00 を対象にした。対象計算日時において国土交通省港湾局が整備する NOWPHAS の伊勢湾内の海象計で計測された有義波高を HF レーダによる波浪計測の精度検証に用いた。

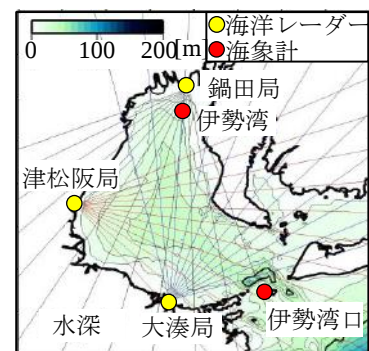


図 1 伊勢湾における波浪観測点

(2) HF レーダによる波浪計測手法：HF レーダによる波浪計測はドップラースペクトルの 2 次散乱を用いる（図 2）。2 次散乱は、2 つの波浪成分波の非線形干渉によって発生し、それら成分波の波浪エネルギーを被積分関数にもつ非線形積分方程式で定式化される<sup>3)</sup>。この非線形積分方程式の逆問題を逐次代入法で最適解を求めることで、周波数-波向の 2 次元スペクトル（以下、方向スペクトル）が計算できる。本研究では、片岡・永松<sup>4)</sup>のベイズモデルを用いた方向スペクトルの推定手法を適用して 2 局の HF レーダで計測されたドップラースペクトルから方向スペクトルを計算する。計算された方向スペクトルから有義波高を求め、海象計の計測結果と比較することで波浪精度を検証する。

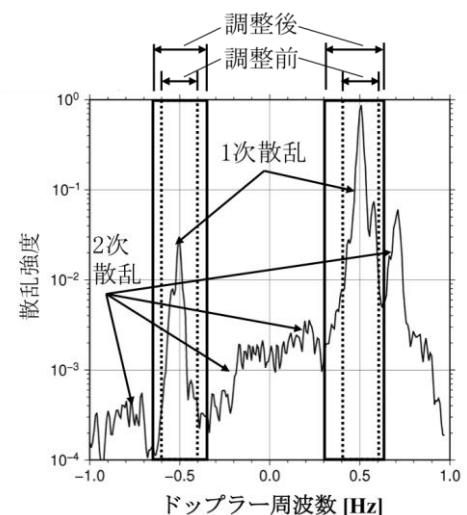


図 2 ドップラースペクトル計測事例

## 3. 計算結果と考察

(1) 海象計と HF レーダに基づく波浪計測結果の比較：海象計の波浪観測点（図 1 参照）における有義波高と有義波周期を HF レーダで得られたドップラースペクトルから計算し、海象計で計測された有義波高及び有義波周期と比較することで、HF レーダによる波浪計測精度を検証した（表 1）。海象計で計測された波高に対して 4%程度の誤差で波高が計測されていることから、HF レーダで計測された波高の妥当性が示唆された。

表 1 海象計と HF レーダによる波高比較

| 日時               | HF レーダ | 海象計    |
|------------------|--------|--------|
| 2015/07/16 22:00 | 1.26 m | 1.32 m |
| 2015/07/16 23:00 | 1.38 m | 1.33 m |

キーワード：短波海洋レーダ、面的波浪計測、ドップラースペクトル、ベイズモデル、伊勢湾

連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 TEL：04-7124-1501（内線 4069）FAX：04-7123-9766

(2) HF レーダに基づく波浪面的観測結果：2015 年 7 月 16 日 22:00 から 23:00 において HF レーダで計測された波高分布を図 3 に示す。湾内全体で 1 m 前後の波高であり、湾中央部に比べて北部や南西部の波高が相対的に高い傾向がある。これは湾中央部から北部や南西部にかけて水深が浅くなるため（図 1）、波浪の浅水変形により、波高が高くなったと考えられる。一方で、22:00 と 23:00 の波高分布を比較すると、1 時間にも関わらず、北部と南西部において急激に波高が変化していた。これはレーダ局からの距離が遠いため、計測精度が悪化している可能性がある。HF レーダはレーダ局から遠くなると受信電波の信号強度が弱くなるため、ノイズが卓越して良質なドップラースペクトル（特に、2 次散乱）が得られない。これは HF レーダの電波周波数にも依存するが、伊勢湾に設置する 24.5MHz の HF レーダで良質な 2 次散乱が計測できる範囲は概ね 30km 以内である。南西部は鍋田局と津松阪局の HF レーダで計測されたドップラースペクトルから方向スペクトルを計算している。津松阪局からは 30 km 以内であるが、鍋田局から 30 km 以上離れており、良質な 2 次散乱が得られなかったことが波浪計測精度の悪化の要因として考えられる。

(3) HF レーダによる波浪計測精度向上に向けた検討：北部と南西部において波高の計測精度が悪化した観測点の方向スペクトルを図 4(a)に示す。0.1Hz 以下の低周波数帯で波浪エネルギーが異常値となっている。低周波数帯の波浪エネルギーはドップラースペクトルの 1 次散乱周辺の 2 次散乱に寄与するため、大きな散乱強度をもつ 1 次散乱によって波浪エネルギーが過大評価されたと考えられる。そこで、1 次散乱と 2 次散乱の境界のドップラー周波数を調整することで、波浪計測精度を向上できるか試みた。図 4(a)の方向スペクトルは、図 1 の破線を 1 次散乱と 2 次散乱の境界のドップラー周波数として定義したが、図 1 の実線に定義し直して方向スペクトルを再計算したところ、低周波数帯にあった異常な波浪エネルギーを除去することに成功した（図 4(b)）。波浪エネルギーのピークの波向が北から時計回りに  $150^\circ$  であることから、南東から波が卓越していることがわかる。2015 年 7 月 16 日 22:00 から 23:00 にかけて東南東の風が卓越しており、風向と対応していることから妥当な方向スペクトルが得られた。従って、1 次散乱と 2 次散乱の境界となるドップラー周波数を正確に定義することが HF レーダによる波浪計測において重要であることが示唆された。

まとめ：伊勢湾沿岸の HF レーダを用いて面的波浪計測を実施し、海象計で計測された有義波高と比較したところ、4%程度の計測誤差であり、HF レーダで計測された波高の妥当性が示唆された。また、ドップラースペクトルから方向スペクトルを精度よく計算するためには、1 次散乱と 2 次散乱の境界のドップラー周波数を正確に定義することで波浪計測精度が向上できることが示唆された。今後、1 次散乱と 2 次散乱の自動分離アルゴリズムを開発し、波浪計測精度の向上を目指す予定である。

謝辞：本研究で使用した HF レーダのドップラースペクトル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より提供頂いた。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献：1) Hisaki, Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 120, pp. 1725-1740, 2015., 2) 橋本ら, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, pp. 1411-1415, 2000., 3) Lipa and Barrick, Radio Science, Vol. 21, pp. 81-100, 1986., 4) 片岡・永松, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, pp. I\_1711-I\_1716, 2016.

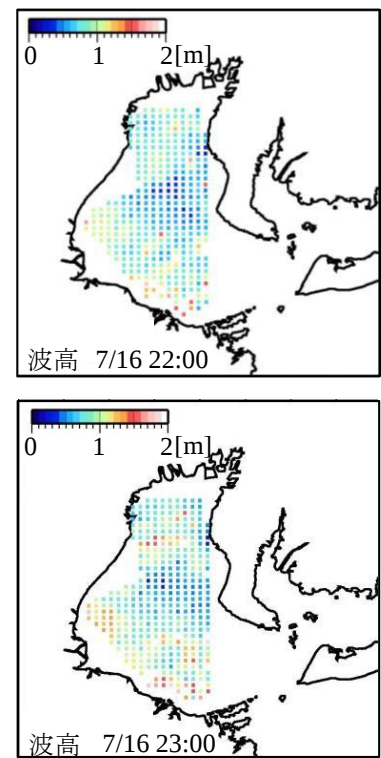


図 3 HF レーダで計測された波高分布の時間的変化

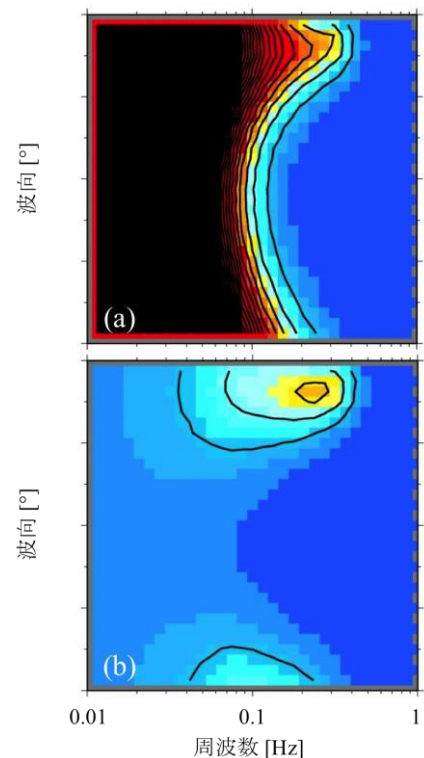


図 4 方向スペクトルの HF レーダで計測された波高分布の時系列変化