

海洋短波レーダーによる有明海広域表層流況・ 波浪観測の高度化について

UPGRADING OF THE HIGH-FREQUENCY OCEANIC RADAR SYSTEM FOR
MEASURING SURFACE CURRENTS AND WAVES IN ARIAKE SEA

中島謙二郎¹・野村茂²・宮石晶史³・橋本典明⁴・日向博文⁵・峰本健正⁶
Kenjiro NAKASHIMA, Shigeru NOMURA, Akifumi MIYAISHI, Noriaki HASHIMOTO,
Hirofumi HINATA and Takemasa MINEMOTO

1正会員 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 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)

2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 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)

3国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所 (〒861-4115 熊本市川尻2丁目8-61)

4フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

5正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

6財団法人沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

The Kyushu Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has placed four High-Frequency Oceanic Radar (HF radar) at the Ariake Sea since 2005. The system named “The Ariake Sea current and ocean wave information system” provides the real-time information on surface currents and waves on the Internet.

This paper presents the results of the comprehensive investigations on (1) the accuracy of HF radar observation, (2) the expansion of the current observation area, and (3) the improvement of the ocean wave observation. These inclusive studies come to the conclusions that the accuracy of ocean radar was verified satisfactory, and the expected improvements of the system for measuring currents as well as waves were successfully achieved.

Key Words : Ariake Sea, ocean environmental reproduction, high-frequency(HF) Oceanic radars, wave observation, current observation, system development

1. はじめに

有明・八代海においては、近年、浮泥の堆積など海域環境の悪化、二枚貝その他底生生物等の減少といった環境問題が生じており、深刻化した環境異変の原因究明、海域環境の保全・再生施策が求められている。このような状況を受け、国、地方自治体、大学等関係機関は、有明・八代海の総合的な海域環境の保全・再生を目的とした取り組みを本格化しているところである。

国土交通省九州地方整備局では、有明海の流況・波浪の把握のため、有明海全域を準リアルタイムで観測可能な「海洋短波レーダー」(HFレーダー)(図-1)を導入し、平成18年度より「有明海表層流況・波浪観測システム」を運用開始している¹⁾。

平成18年度は、同システムの流況観測データを活用し環境整備船「海輝」の浮遊ゴミ回収業務を支援する「有明海海況情報表示・ゴミ回収支援システム」の開発・実用化²⁾を行った。平成19年度は、同システムの観測表層流況・波浪観測の高度化を目的

として、精度の検証、波向観測など技術課題解決のため、海底設置型ドップラー式流向流速計(ADCP)及び波高計による流況・波浪観測を行い、流況・波浪観測精度、流況観測の浅海域への拡大、波浪観測の高度化について検討・評価を行った。



図-1 海洋短波レーダー観測施設(宇土局)

2. システムの概要と技術課題の検討

(1) 海洋短波レーダーの概要と観測原理

海洋短波レーダーでは、レーダー局よりレーダー波を海面に送信し戻ってきた散乱波をフーリエ解析してドップラースペクトルを得る(図-2)。レーダー波の1/2の波長を持つ波浪成分に強く散乱するものが一次散乱で視線方向流速が解析できる。

また、2方向から来る波浪成分波によって形成される見かけの波浪成分波(K_1+K_2)とレーダー波 k が $-2k=K_1+K_2$ の条件を満たす散乱波が二次散乱で波浪情報が解析できる。解析理論では、有義波高・周期の解析はBarrick(1977)³⁾によって提案されたバリック法が使用されているが、波浪の方向スペクトル解析では橋本・徳田(1998)⁴⁾が提案したベイズ法による理論が確立されその有効性が検証されている⁵⁾。

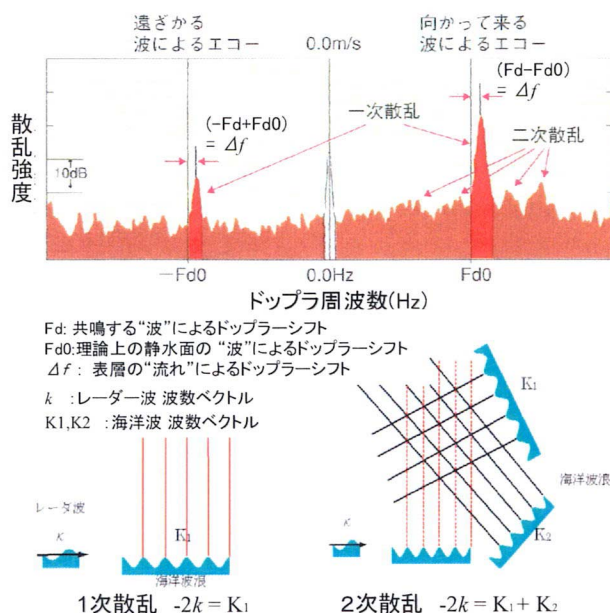


図-2 ドップラースペクトルの概要

(2) 有明海表層流況・波浪情報システムの概要

有明海は、水域約1,700km²、平均水深20m、平均潮位差が5.4m、海域の約1割程度が干潟である浅海域を有する閉鎖性海域である。この有明海の再生・保全のために必要な潮流等の現象解明や対策技術向上に重要な、有明海全域の流況や波浪を広域的かつ同時に把握することは、これまで困難であった。

「有明海表層流況・波浪観測システム」は、有明海にDBF(デジタル・ビーム・フォーミング)方式レーダー局4基を配置し、レーダー中央局(有明・八代海海洋環境センター内)に配置された中央局処理システムで、観測データを解析・管理を行っている。HFレーダーの観測分解能は視線方向距離1.5km、方位7.5度であり、測定水深0.5mで、5m以深の観測海域で1.5kmの格子に空間補完したものを1時間間隔の準リアルタイムで流向・流速・波高・周期を観測

しており、「有明海表層流況・波浪情報」としてインターネットで公開している(図-3、表-1)。

(<http://www.ariake-yatsushiro-system.jp/>)

(3) 技術課題の検討

海洋短波レーダーの特徴として、波高計や流速計等の従来の海象観測システムが点の観測であるのに対し、広域・連続・準リアルタイムに観測できる点が最大の長所である。しかし、全国的にも海洋短波レーダーによる流況・波浪観測の実績はまだ少なく、特に浅海域が多く閉鎖性海域である有明海での適用性は不明のため、平成17年度に国土技術政策総合研究所と共同で同研究所所有のフェイズドアレイ方式HFレーダー(FA方式)2基を有明海湾奥部に設置し、試験観測を行った⁶⁾。さらに、平成18年度及び平成19年度に技術検討委員会を開催して専門委員による審議のもと、(1)流況・波浪観測の精度検証、(2)流況観測の浅海域への拡大、(3)波浪観測の高度化について技術課題の検討を進めてきた。

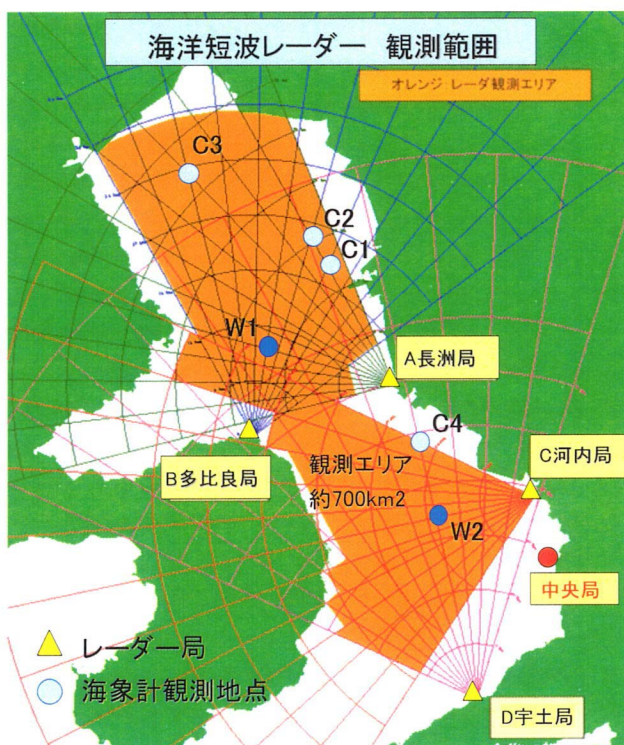


図-3 レーダー設置位置及び観測範囲

表-1 導入システムの概要

①海洋短波レーダー仕様	
・周波数帯	24.5MHz±50kHz (HF帯 波長12m)
・観測距離	50km
・素子八木8列アレイアンテナ 方向探知方式	DBF(デジタル・ビーム・フォーミング)方式
②取得情報	
・広域表層流況・波浪情報	(流向・流速・波高・周期)
③分解能・観測時間・視程	
・分解能	距離1.5km 方位7.5度
・観測時間間隔	通常1時間毎(観測 各時 0-10分)

3. 海底設置式海象計による観測概要

流況観測については、海上保安庁海洋情報部が平成13年度に有明海の12箇所で15日間実施したADCPの測定結果及びFA方式HFレーダーによる試験観測（平成17年1月～10月）と、DBF方式HFレーダーによる運用観測（平成18年7月～9月）のデータについて調和解析を行い、潮流楕円の形が近似していることから、海洋短波レーダーによる良好な観測が可能であることが確認されている⁶⁾。

平成19年度の波浪・流況観測では、波浪観測及び湾央と沿岸浅海域における流況観測の測定精度検証を目的として海洋短波レーダーと海象計で同時観測を実施した。海底設置式のADCP及び波高計の機器の設定・設置概要を表-2及び図-4に示す。現地観測位置は、図-3に示す有明海の計6カ所に計測機器を設置し、平成19年9月～10月に約30昼夜連続で流況および波浪を観測した。

流況の観測水深については、ADCPの特性から表層流（水深の概ね1割）の観測精度が保証されていないことから、判断基準として、1回の観測アンサンブル（発信回数：240～300回）の有効データの割合（%Good）の平均が80%以上について採用することとし、最浅の解析深度は表-2のとおりとなった。

表-2 海象観測機器の設定

観測地点	設置水深(海面下)		ADCP		波高計		
	最高(m)	最低(m)	解析深度(m)	観測精度(cm/s)	超音波式	水圧式	波向観測精度(%)
C-1	-14.4	-9.1	-2.0	1.56	-	-	-
C-2	-8.9	-3.4	-0.5	1.25	-	-	-
C-2	-8.3	-2.8	-1.0	1.25	-	-	-
C-4	-17.8	-13	-2.0	1.56	-	-	-
W-1	-19.6	-14.3	-	-	±0.3%	±1%	±1%
W-2	-28.8	-24	-3.0	1.25	±0.3%	±1%	±1%

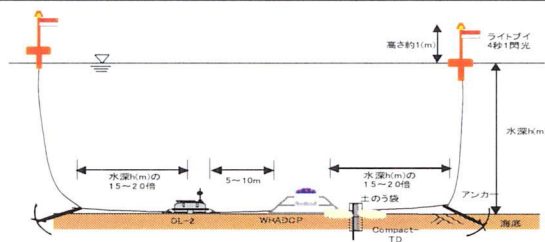


図-4 海底設置式海象計設置状況

4. 湾央及び沿岸浅海域の流況観測精度評価

(1) 海洋短波レーダーとADCPによる精度検証

流況観測の精度検証は、ADCPによる30日間の観測データとHFレーダー観測データを直接比較して解析を行った。図-5はADCPとHFレーダーの視線方向流速観測の回帰分析結果の一例で、すべての観測地点をまとめた観測エリア全域及びB局（多比良局）からC1地点のケースを示している。表-4に全域と各レーダー局と観測地点の一部について、相関と標準誤差を示した。観測エリア全域で相関係数0.90、C1～C4

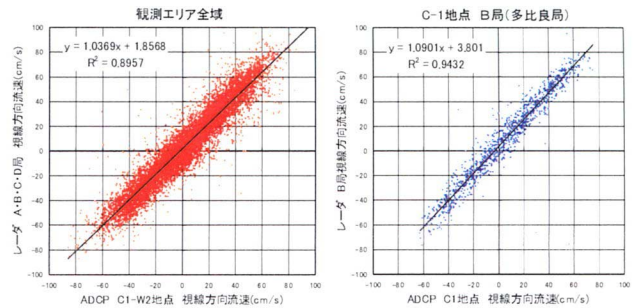


図-5 ADCPとレーダーの回帰分析

各地点で0.94～0.82と高い相関を示した。標準誤差では、観測機器の精度は、ADCPで精度1.56cm/s、HFレーダーでは分解能4.78cm/sであるが、ADCPとHFレーダーの視線方向観測誤差は標準誤差が海域全体で9.3cm/s、C1～W2観測点の視線方向別では5.5～12.4cm/sであった。

また、ADCPの特性からHFレーダーが観測する対象水深の-0.5mの表層流が捕捉できない観測点（表-2 C1, C3, C4）については、-2.0mの観測層の流況を基準層とし、各観測層の流況との散布図より相関を求め、各地点の水深と流速変化の線形相関をとり補正を試みた（図-6、表-4）。

表-4 レーダーとADCPの視線方向流速の相関、標準誤差

ADCP観測点(海域・局別)	全域	A局	B局	C局	D局
傾き	1.04	1.13	1.04	0.84	1.02
相関係数	0.90	0.91	0.91	0.84	0.91
標準誤差(cm/s)	9.3	8.4	9.1	9.1	9.8
ADCP観測点(地点別)	C-1	C-2	C-3	C-4	
視線番号	B-5 (22.5度)	A-2 (330度)	B-10 (345.0度)	C-1 (295.5度)	D-5 (348.1度)
傾き	1.09	1.07	1.08	0.84	1.04
相関係数	0.94	0.86	0.93	0.89	0.93
標準誤差(cm/s)	7.5	10.4	7.6	10.5	9.8
ADCP観測水深(m)	-2.00	-0.50	-1.00	-2.00	-2.00
水深補正係数(0.5m基準)	0.93	1.00	0.96	0.95	0.95
傾き(水深補正)	1.02	1.07	1.03	0.80	0.99

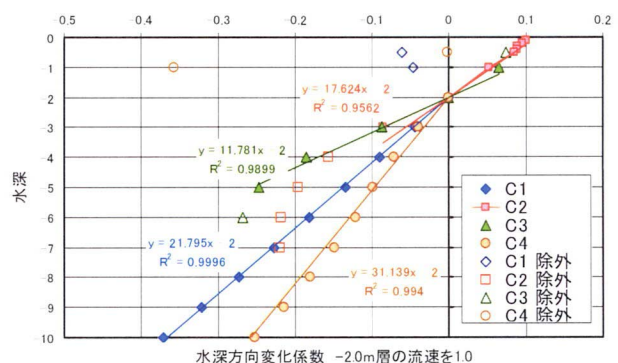


図-6 ADCP観測水深と流速変化

HFレーダーによる観測は視線方向観測点を1.5kmの格子状に空間補完している。視線方向の観測誤差から格子点に空間補完した推定誤差分布については、日向によって定式化されている⁷⁾。各観測海域別で比較的精度が良好なレーダー局A局とC局の視線方向の標準誤差（表-4）より求めた、各格子点の南北と東西方向の推定誤差は、最も小さい湾央地点で、NS6.9cm/s：EW5.4cm/s、最も大きい湾奥部地点で、NS20.2cm/s：EW24.1cm/s、となった（図-7）。



図-7 東西・南北流速成分の推定誤差分布

(2) 沿岸浅海域への流況観測拡大

流況観測では、波長6mの波の波速で流速を観測しているが、沿岸浅海域では深海波理論（概ね3m以深）が適用できないことから、観測エリアを5m以深として公表している。平均水深20m平均潮位差5.4m、水域約1,700km²のうち約1割程度が干潟である沿岸浅海域を有する海域では沿岸浅海域は無視できない。このため、この海域における観測精度の検証を行い観測エリア拡大の検討を行った（図-8）。

沿岸浅海域へのHFレーダーの適用性の検討のため、水深が5mより浅くなるC2、C3の2地点について、水深5m以深と水深が5m以浅の観測結果について、ADCPとHFレーダーの相関および標準誤差を調べた。

計算した相関係数および標準誤差を表-5に示す。解析の結果、水深が5m以深の場合と5～3mで、ADCPとHFレーダーで観測した流れの相関および標準誤差に大きな違いは見られないことが確認でき、HFレーダーは水深が5m以浅から3mまでの浅海域においても、精度的に十分であることが確認された。

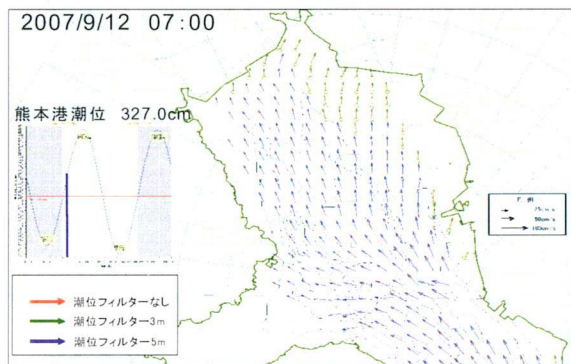


図-8 流況観測の浅海域の拡大

表-5 ADCPとレーダーの深度別標準誤差相関係数

地点名	深度(海面下)	サンプル 個数	相関係数		標準誤差(cm/s)	
			東西成分	南北成分	東西成分	南北成分
C2	5.0m以深	593	0.37	0.96	13.1	10.4
	3.0～5.0m	150	0.16	0.92	13.1	9.9
C3	5.0m以深	722	0.65	0.95	13.1	9.8
	3.0～5.0m	394	0.51	0.92	15.8	11.5

5. 波浪観測の高度化検討

現在運用している波浪観測は、バリック法による解析を行い波高50cm単位・周期1s単位で公開している。バリック法は、非線形積分解析を線形に近似する手法で、計算速度が速く平均波高と平均周期が解析できる利点がある。一方、波向解析ではベイズ法を代表とする数値解析が必要となるが、非線形解析で収束計算が必要であり、計算時間と安定性に課題があった。1時間間隔の観測で得られるすべての観測点を計算するには計算速度を向上させる必要がある。また、計算の安定のためには、ノイズの軽減対策が大きな課題である。

このため、本調査では波浪情報解析のさらなる高度化検討として、機器のノイズ発生要因の調査と対策、ベイズ法等の解析手法の検討を行い、波高、周期の精度検証と波向観測の検討を行った。

(1) ノイズ発生要因の調査と対策

閉海域である有明海では、地形・護岸の電波への影響で、ベイズ法等による波浪解析では、ノイズの影響による精度低下が想定されたことから、システム内部ノイズ、外部ノイズ、他局からの混信ノイズについて、それらの発生要因の検討と対策を実施した。内部ノイズについては、+0.09Hzにハードウェアに起因するノイズがあり、対策として解析上は問題ない0Hzへの移動による対策とした。外部ノイズについては、ドップラースペクトルの0Hzに発生するノイズ（ゼロドップラー）レベルが他の外海の観測事例と比較しても高いレベルにあること、及び原因が特定できない不定期の外部ノイズ発生が確認され、閉海域におけるDBF方式の特性による可能性が指摘されたが、特性を把握しノイズレベルに閾値を

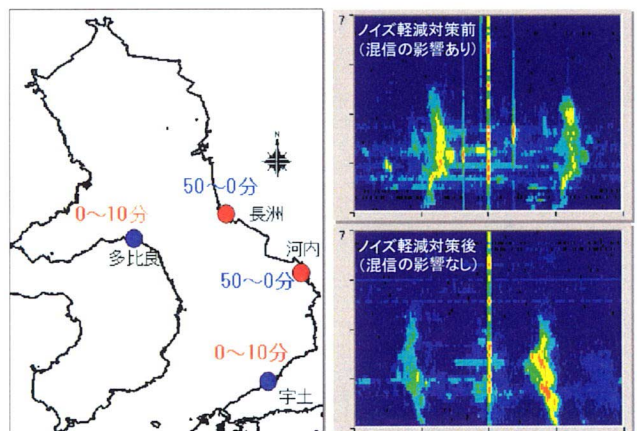


図-9 レーダー局間時間ずらし観測時間と宇土局(D-7)のドップラースペクトル

設けることでデータ品質管理が可能であるとした。また、他局からの混信ノイズについては対岸のHFレーダー局からの混信が確認されたため、HFレーダー局ソフトウェア設定を変更し時間ずらし観測を行うことで混信の解消が確認された（図-9）。

(2) 波高・周期観測精度の検証

波浪観測では、海底設置型波高計で平成19年9月～10月に約30昼夜観測した波浪とHFレーダーによる観測結果を用いて精度検証を実施した。観測期間中は目立つ気象擾乱の発生がなく有義波高で1mを超えるような波浪は観測できなかった。波高と周期の精度検証では、波高計現地観測データとHFレーダーの相関及び標準誤差を調べた。また、海洋短波レーダーによる波浪測定精度はノイズレベルによってその精度が大きく変化し、ノイズレベルが高い場合にはその精度が著しく低下することが知られている。

本検討では、ノイズレベルを評価する指標として以下で定義されるNI（ノイズインデックス）を導入した。NIが大きいほどドップラースペクトルに対するノイズレベルが小さくなる。

$NI（ノイズインデックス）= 10 \times \log_{10}（1次散乱エネルギーピーク/2次散乱領域の平均エネルギー）$

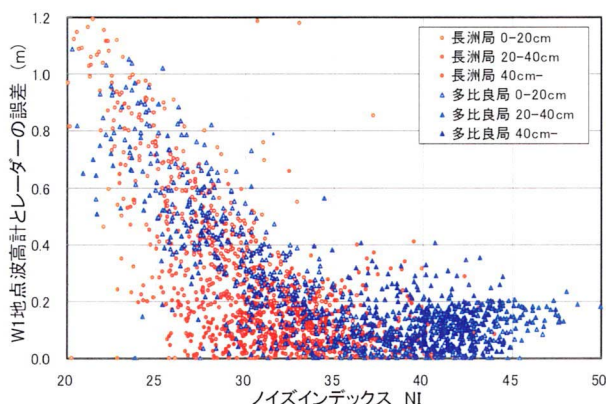


図-10 ノイズインデックス NI と誤差分布

図-10はW1地点のNIと誤算分布の関係であるが、NIが30、波高計の値が40cmを下回ると急激に誤差が拡大しておりノイズの影響と精度低下が確認できる。解析では、（閾値無し）、NI=30以上の場合、NI=40以上の場合について波高・周期の比較を行った。表-6にW1、W2地点の閾値なし、NI=30以上（長洲局、河内局）、NI=40以上（多比良局、宇土局）について相関係数および標準誤差の算定結果を示す。また、W1地点の有義波高・周期NI=30以上のケースの解析例を図-11に示す。多比良・宇土でデータの測得率が高く、かつ波高ではNIを設けることで相関係数0.72～0.81であったが、他のケースでは高い値が得られなかった。これは観測期間中の波高が最高で70cm程度、周期は3秒前後の出現が多く、幅広いレンジのデータが得られなかったことによると考察される。

観測誤差については、波高では標準誤差0.06～

表-6 波高計とレーダーとの相関、標準誤差

地点名	局名	W1地点		W2地点	
		長洲	多比良	河内	宇土
閾値なし	NI全平均	30.4	35.8	23.4	40.1
	データ個数	1,127	1,127	1,016	1,014
	データ比率	96%	96%	86%	86%
有義波高	相関係数	-0.27	-0.08	-0.44	0.06
	標準誤差(m)	0.33	0.28	0.56	0.10
有義波周期	相関係数	0.07	0.11	0.05	0.24
	標準誤差(秒)	0.22	0.26	0.18	0.35
NIによる閾値設定	閾値(設定NI)	30	40	30	40
	データ個数	629	393	57	572
	データ比率	53%	33%	5%	49%
有義波高	相関係数	-0.04	0.81	0.13	0.72
	標準誤差(m)	0.10	0.08	0.11	0.06
有義波周期	相関係数	0.05	0.11	0.18	0.21
	標準誤差(秒)	0.24	0.27	0.14	0.33

0.11m、周期については、標準誤差0.14～0.33sの結果となり妥当な精度が得られ、標準誤差では、NIを設けることで波高および周期の標準誤差が向上した。これらの結果より、HFレーダー局のノイズの影響により、多比良局・宇土局で精度およびデータ取得率が高く、河内局では低いことが確認された。また、対策としてNIによる管理が有効であり、精度向上が確認されたが、一方では今回の検討データ取得率が低く今後の課題となった。

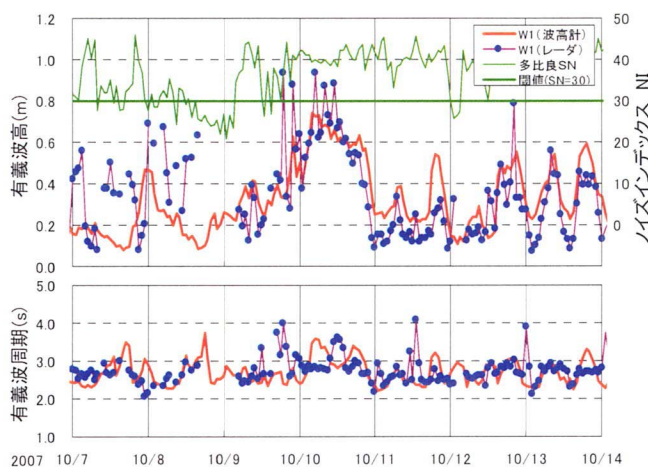


図-11 W1地点の有義波高・周期 NI=30以上のケース

(3) 波浪解析手法の検討と波向解析の検証

HFレーダーによる観測結果の波向きの解析方法では、ベイズ法とワイヤット法が知られている。

ベイズ法については、三重県七里御浜海岸の外洋域で三重県が観測しているHFレーダーのデータから波高・周期・波向について検証を行い、標準偏差では0.19m、0.83s、15.4度と高い精度が得られることを確認している。今回はベイズ法の改良について検討し、バリック法による波浪を初期条件とすることで収束計算を短縮することを可能とした。

また、有明海は内湾であることから風波が卓越しており、一次散乱ピーク比（以下：一次散乱比による）による平均波向き（風向）解析の検討も行った。

波高計による波向観測結果については、電磁流速計による観測を行ったが、観測期間中に卓越していた周期3秒（波長約6m）の波に対する応答が弱く

方向スペクトルの解析を行ったが、計算が収束せず方向スペクトルが得られなかった。

波向きによる検証は、WAMによる波浪推算結果と改良ベイズ法及び一次散乱比による方法にてHFレーダーの観測結果を解析し相関と観測誤差を算出した。図-12に一次散乱比及び改良ベイズ法によるレーダー解析結果と波浪推算結果を示す。

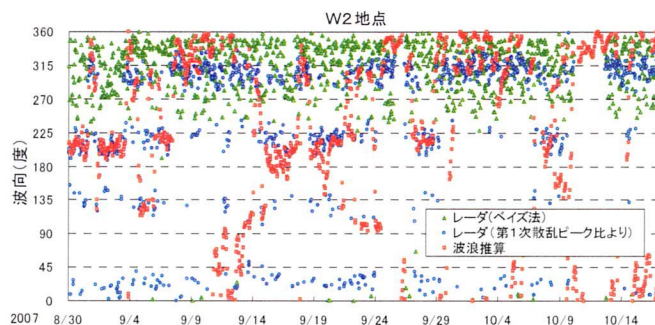


図-12 レーダーと波浪推算結果の波向

6. 検討結果

平成18年度から平成19年度の2カ年にわたる検討成果として、以下の結果が得られた。

- a) 流況・波浪観測精度については、海象計とHFレーダーの標準誤差等精度が検証された。結果についてはホームページ上で測定精度を公表する。
- b) 流況観測の浅海域への拡大については、表示範囲を3m以深に拡大する。
- c) 波浪観測の高度化については、ノイズ軽減等対策を行い、波高分布図の表示単位を50cm毎から25cm毎に変更し精度を向上する。

7. 今後の課題

有明海で海洋短波レーダーの運用を開始して約2年が経過した。今回海象観測結果による精度検証とノイズ発生要因の検討と対策を実施したが、下記の技術課題が残されている。

a) 流況観測の3m以浅の域観測

水深が3mより浅くなる場合の精度は検証できていないが、ブラッグ散乱波の位相速度をそのときの水深値から求めることにより算出可能である。

b) 周辺の陸地が観測データに与える影響

海洋短波レーダーでは、観測エリア前面の陸地等の影響により送信から受信までの電波の伝搬経路が増えることが考えられる。特に、DBF方式レーダーは広範囲に電波を送信するため、閉鎖湾内で観測を行うと多重反射の影響を受ける可能性があり、今後のシステムの改良の方向性が示唆された。

c) 高波浪時の波高及び波向の精度評価

今回の検討では、現地観測期間中、高波浪が観測されず、波高及び波向きの十分な評価が行える現地観測データが取得できなかった。今後、有明海において高波浪が観測された際に再度HFレーダーとの比較を行うなどして精度評価を行う必要がある。

5. おわりに

本研究で開発した技術を用い、潮流などの基本的なデータを広域的・連続的に観測し公開することにより、九州地方整備局の業務である環境整備船「海輝」によるゴミ回収をはじめ、各機関で取り組まれている有明海の再生・保全のために必要な潮流等の現象解明や対策技術の向上に資することができるものと期待される。この他にも、有明海の台風時などの面的波浪情報の提供により、海域や沿岸域での安全性の向上に寄与できるものと考えられる。

謝辞：本研究開発では、海洋短波レーダー活用高度化技術検討委員会⁸⁾の委員を始め、調査、解析、現地調査を担当された財団法人沿岸技術研究センター、国際航業株式会社、長野日本無線株式会社など多くの関係者による御指導・御助言及び協働作業により成果が得られたものです。また、本業務を担当した下関港湾空港技術調査事務所の末次広晃係長と榎元真一係長、熊本港湾・空港整備事務所の関係職員には調査の実施に尽力していただいた。ここに関係委員及び関係各位に改めてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉田秀樹，中島謙二郎，江口秀之，中村義文，日向博文：海洋短波レーダーによる有明海広域表層海象観測の実用化について，平成19年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2007。
- 2) 吉田秀樹，中島謙二郎，川野泰広，江口秀之，中村義文，日向博文：海洋短波レーダーを活用した有明海浮遊ゴミ移動予測システムの開発，海洋開発論文集，VOL. 23，PP. 709-714，2007。
- 3) Barrick, D.E. : , Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra, Radio Sci., VOL. 12, PP. 415-424, 1977.
- 4) 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，第45回海岸工学講演論文集，PP. 1271-1275, 1998.
- 5) 児島正一郎，橋本典明，佐藤祐二，吉松みゆき：海洋短波レーダーによる面的波浪観測法に関する研究，港湾空港技術研究所報告，第41巻第1号，PP. 3-50, 2002.
- 6) 国土技術政策総合研究所：有明海HFレーダー観測データ解析業務報告書，2006.
- 7) 日向博文：HFレーダーによる東京湾のM₂潮流観測，国土技術政策総合研究所資料，No. 212, 2005.
- 8) 下関港湾空港技術調査事務所：海洋短波レーダー活用高度化技術検討調査報告書，2007，2008.