

2019年3月31日

## 2019年度報告書

簡易 FM-CW レーダーによる  
波浪情報の自動計測装置・研究開発

神戸大学

一般社団法人日本海事検定協会

検査第一サービスセンター



# 目 次

1 研究目的および今までの経緯	1
2 洋上波浪計測実験	3
2.1 実験概要	3
2.2 実験データの取り扱い	3
2.3 実験結果	4
2.4 考	
察	6
3 FM-CW レーダーによる海洋波の波速浪計測	8
3.1 速度計測原理	8
3.2 波速から波周期への変換	9
3.3 洋上計測実験	9
4 降雨信号の特徴と除去	12
4.1 降水強度の推定	12
4.2 実験による検証	12
4.2.1 実験・解析方法	12
4.3.2 実験結果及び考察	14
5 まとめ	18
参考文献	19
おわりに	20



# 1 研究目的および今までの経緯

貨物輸送を行う際に不特定多数の者が有意な資料として活用できるようにするための研究を行うことを主たる目的とし、簡易 FM-CW レーダーによる波浪情報の自動計測装置・研究開発を行い、計測値の整理・解析とともに当該研究成果を報告書としてまとめて以下に公表いたします。

大小様々な船舶において気象・海象情報を自動的に計測し、これらのビッグデータを安全かつ経済的な船舶航行に用いることが期待されつつあります。波浪情報はこれらの中で特に重要であるが、現在でも船用レーダーのビデオ信号による方法やドップラレーダー方式などがありますが、これらは比較的大きなシステムとなることから大小様々な船舶への普及は容易でないことが予測されます。

一方、安価な FM-CW 方式レーダーが車で移動目標物を検出するために用いられており、本研究ではこの車載レーダーを波浪計測に応用することで簡易かつ自動的に波浪情報を提供しうる手法を提案し、数値計算から波浪情報計測の可能性を検証し、その結果を明らかにすることによって実用化のための基礎的な資料とすることを本研究の目的として、3か年計画で共同研究を実施して参りました。

初年度（2017年度）では、

- ・波浪計測用の簡易 FM-CW レーダー開発
- ・レーダー受信信号の解析用装置購入
- ・数値計算による事前検証
- ・神戸大学海事科学研究科造波水槽において基礎的波浪計測実験

を実施し、その結果開発した簡易レーダーによって波浪の水粒子運動速度に伴うドップラ一周波数偏移量の計測が可能であることを示すことができました。

二年度目（2018年度）では、

- ・波浪計測用の簡易 FM-CW レーダー開発
- ・洋上波浪計測実験
- ・提案手法による波高推定精度の検証
- ・偏波面による波浪反射信号の解析
- ・二乗平均平方(RMS)、平均値、最頻値による波高推定手法の提案

を実施し、その結果から防波堤上に設置した CW レーダーから出力される信号から有義波高を推定できることを示しました。

三年度目（最終年度である 2019 年度）では、二年目に示しました今後検討すべき課題のなかで、単年度内で解決できる課題を選択し、

- ・ 洋上波浪実験による更なる検証
- ・ 水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数 $\omega_R$  推定方法
- ・ 降雨などから得られる反射信号の特徴抽出及び除去法の検討

の3点にマトを絞り研究を進めることといたしました。

## 2 洋上波浪計測実験

### 2.1 実験概要

実験場所は昨年同様に和歌山県周参見漁港の稲穂島南方の防波堤上とし、また洋上の適切な場所に GNSS ブイを係留しました。表 1 に昨年度及び本年度収集 (黄色い網掛け) した実験の概要を示します。

表 1 実験概要

番号	実施期間	平滑化時間 (分)	サンプル数	参照計測値
1	Jun, 4-6, 2018	50	2 (HH)	ブイ
2	July, 2-4, 2018	30	5 (HH)	目視
		50	4 (HH)	目視
3	Sept., 4-6, 2018	50	4 (VV)	目視
		50	7 (VV)	ブイ
4	Oct., 3-5, 2018	50	8 (HH)	ブイ
		25	2 (HH)	目視
5	Nov., 14-16,2018	25	8 (HH)	ブイ
6	July, 15-17,2019	30	5 (HH)	ブイ
7	Sept., 17-19,2019	30	9(HH)	ブイ

表中の HH は水平偏波送受信, VV は垂直偏波送受信を示しています

### 2.2 実験データの取り扱い

CW レーダーの出力である低域のアナログ信号であるドップラー周波数偏移信号は、量子化ビット数 24bits, サンプリング周波数 2.048KHz の A/D 変換器で変換し、各実験について連続して収録しました。

収録された出力値は 2048 個を一纏めとして、トレンド除去および hamming 窓関数によるサイドローブ抑圧処理を行なった後に、高速フーリエ変換により出力信号の周波数特性である相対パワースペクトル密度を求めました。そこで、1 秒毎に得られた相対パワースペクトル密度を平滑化のため 30 分間(平均化数 1800)又は 50 分間(平均化数 3000)の時間平均で実施しています。参考までに、ここでの周波数分解能は 1Hz, 水粒子速度分解能は約 0.06 m/s となります。

同時波浪計測には共振周波数約 1 Hz の小型スパーブイ上に GNSS 受信機を設置し、サンプリング周波数 5 Hz で GNSS 情報を収集した後に陸上のリファレンス局から無線伝送された GNSS 情報を用いてキネマティック処理を施し、ブイの精密な緯度、経度、高度の位置情報を陸上に再度送信し記録しました。ブイからの反射信号を CW レーダーで受信す

ることが無いようにするため、設置場所は CW レーダーの輻射範囲から少し離れた位置としています。

第 1 回目の実験で計測した結果からブイ設置位置における水深は約 12m, CW レーダー輻射域中心の水深は約 8m と異なりますが、以下の解析では水深の違いによる補正を行っています。また、防波堤上に設置した気象観測装置で気温・湿度・気圧・風向・風速・雨量をサンプリング周波数 1Hz で同時に計測及び記録も併せて行っています。

## 2.3 実験結果

本実験では、CW レーダー出力に FFT を施しパワースペクトルを求めドップラーシフト周波数偏移を得て、これを水粒子運動水平速度に変換し正規化することで、水粒子運動水平速度の生起確率密度関数を求めています。そこで、その正規確率密度関数から実効値、平均値及び最頻値と計測有義波高の関係を示します。その際に用いる計測した有義波高  $H_{1/3m}$  および有義周期  $T_{1/3m}$  は、GNSS ブイ及び目視による有義波高・有義周期としました。

また、各解析結果の図中の縦軸は GNSS ブイまたは視覚により計測された有義波高  $H_{1/3m}$  で、GNSS ブイによる有義波高との結果を丸印で、目視による有義波高との結果を三角印と区別しています。また、回帰直線を黒の破線で示します。

### ・実効値による結果

CW レーダーによって得られたスペクトルの実効値を横軸にとブイ及び目視から得られた有義波高  $H_{1/3m}$  を縦軸に取り、両者の関係を図 1 に示します。

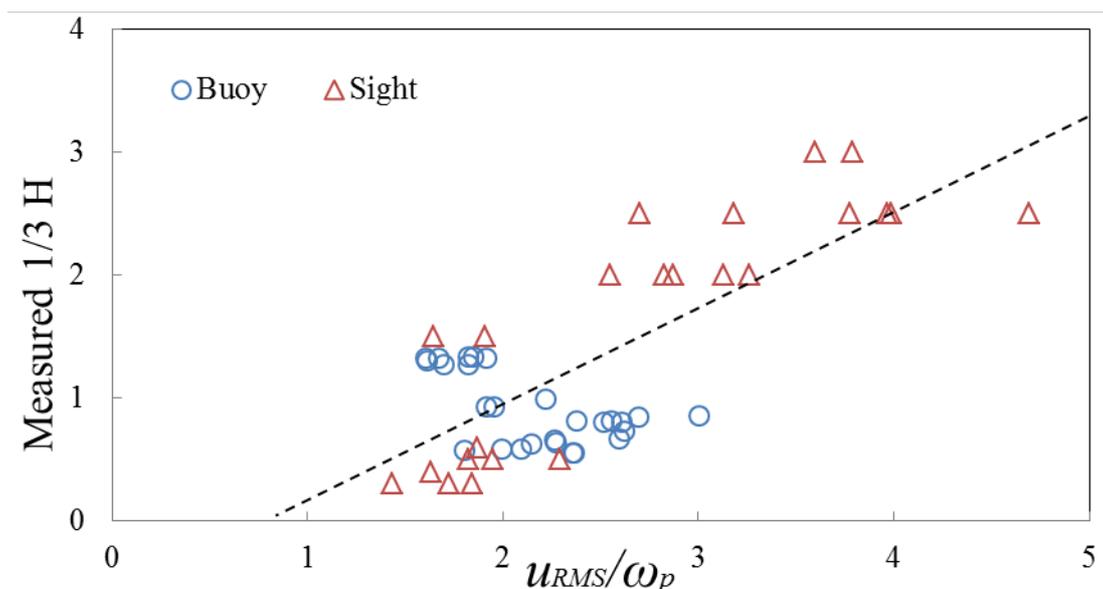


図 1 CW レーダーによる実効値とブイ（目視を含む）による有義波高の関係

・ 平均値による結果

CW レーダーによって得られたスペクトルの平均値を横軸にとブイ及び目視から得られた有義波高  $H_{1/3m}$  を縦軸に取り、両者の関係を図 2 に示します。

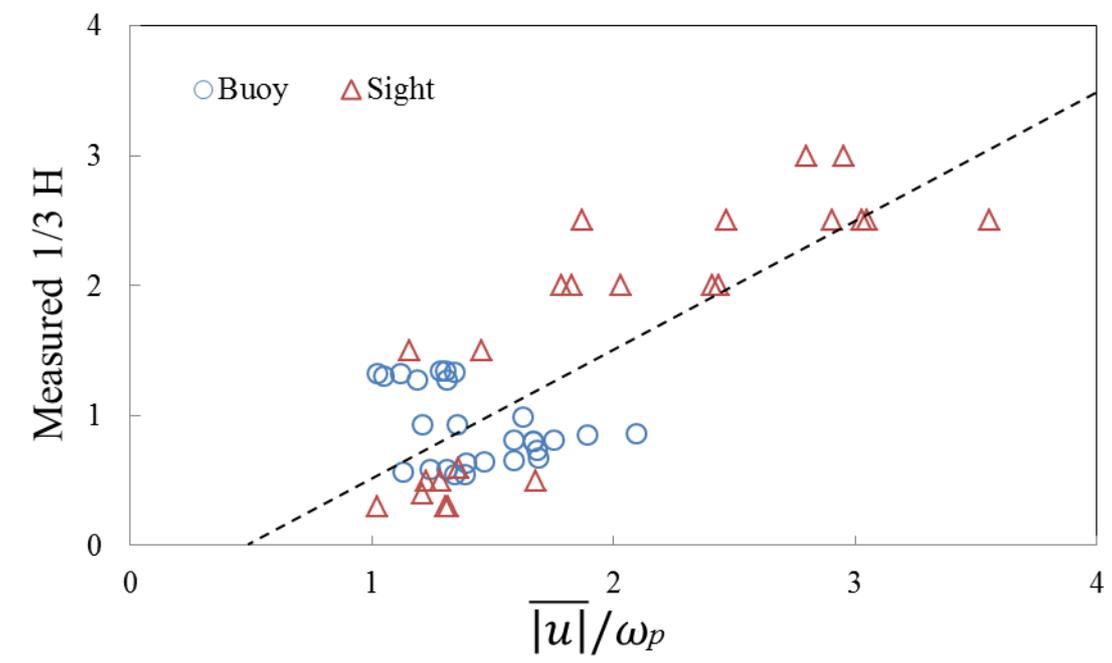


図 2 CW レーダーによる平均値とブイ（目視を含む）による有義波高の関係

・ 最頻値による結果

CW レーダーによって得られたスペクトルの最頻値を横軸にとブイ及び目視から得られた有義波高  $H_{1/3m}$  を縦軸に取り、両者の関係を図 3 に示します。

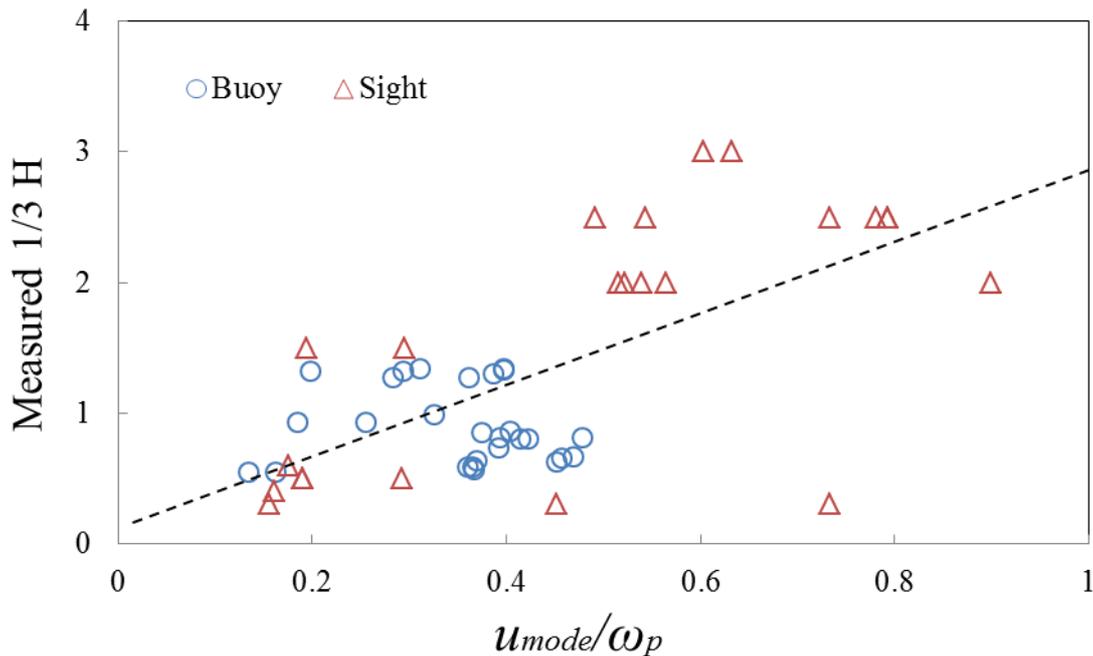


図 3 CW レーダーによる最頻値とブイ（目視を含む）による有義波高の関係

## 2.4 考察

図1, 2, 3における結果から, 実効値・平均値・最頻値を用いた各指標とブイ及び目視から得られた有義波高の間には正の相関が見られ, これら指標から得られる回帰直線を用いることによって CW レーダー出力から有義波高の推定が可能であることがわかります。

次に, 実効値, 平均値, 最頻値から得られる回帰直線を用いて有義波高を推定した場合における計測誤差を求め, GNSS ブイ, 目視及び GNSS ブイ+目視 (総計) 別に, C W レーダー出力を用いた場合の各計測誤差における平均値, 標準偏差及び相関係数を表 2 に示します。

表 2 CW レーダーによる有義波高推定誤差

計測方法	真の有義波高	平均値(m)	標準偏差 (m)	相関係数
実効値による	ブイのみ	0.14	0.51	-
	目視のみ	-0.16	0.50	-
	ブイ及び目視	0.00	0.53	0.73
平均値による	ブイのみ	0.08	0.45	-
	目視のみ	-0.09	0.51	-
	ブイ及び目視	0.00	0.48	0.78
最頻値による	ブイのみ	0.16	0.40	-
	目視のみ	-0.19	0.70	-
	ブイ及び目視	0.00	0.58	0.65

以上の解析結果より, 今年度実施しました 2 回の実験結果を加えた計 7 回にわたる実験で収集した海洋波浪情報において, 有義波高の推定に関して実効値, 平均値, 最頻値のどの手法においても比較的高い相関係数を示していることから, その手法を用いても有義波高の推定が可能であることがわかりました。

ただし, 有義波高の中で 2m 以上の有義波高では GNSS ブイの設置が困難であったことから目視による測定結果しか無く, 計測精度から見ると高い波高でバラツキが多くなっています。また, 最頻値による有義波高推定誤差の標準偏差が最も小さな値を示していますが, その要因については今後の検討を行いたいと考えています。

また, 現在は有義波高推定に必要な水粒子運動上下動最大スペクトル値 $\omega_0$ を, GNSS ブイまたは目視による有義周期から推定していますが, 後述のように「FM-CW 方式による実験結果」から FM-CW レーダーを用いて海洋波浪情報 (波速) を同時計測することによ

ってブイや目視に頼らず有義波高を推定できる可能性があります。

更に、本論文の実験では天候が雨の場合の結果を使用していませんが、本年度実施しました「CW レーダーによる降雨計測の研究」の結果から、雨雪の影響を除去することができる可能性も併せて後ほど示します。

### 3 FM-CW レーダーによる海洋波の波速計測

#### 3.1 速度計測原理

FM-CW レーダー (Frequency Modulated Continuous Wave radar) とは周波数変調連続波レーダーで、周波数変調された連続波を使用して移動目標物までの距離を測定します。その詳細な距離計測原理を図 4 に示します。

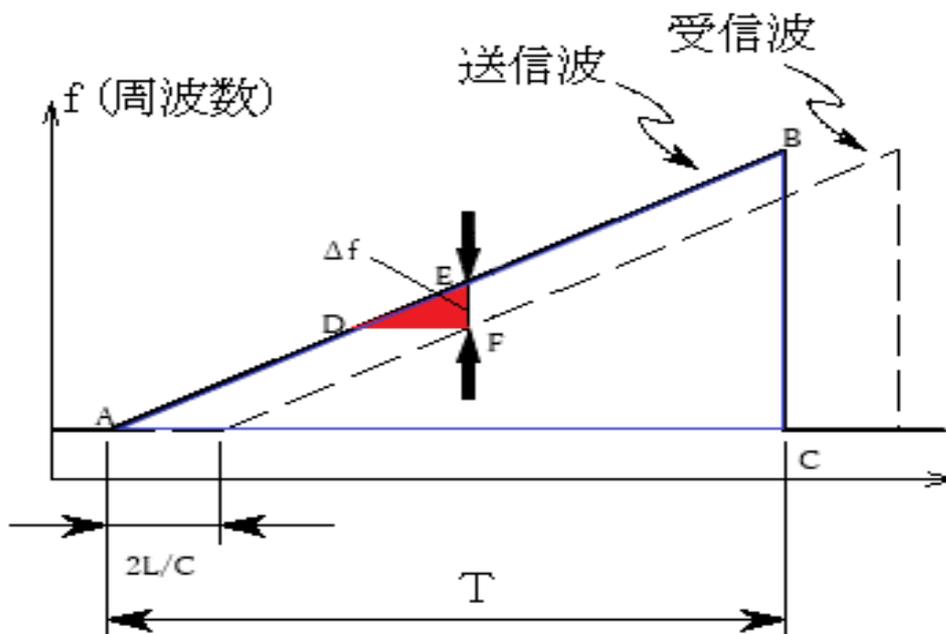


図 4 FM-CW レーダーによる距離測定原理

ミリ波帯送信周波数  $f_0$ 、周期  $T$  の、周波数変調幅  $\Delta F$  とすると、図 4 に示されるこぎり波変調された送信波を輻射します。次に、送信波は距離  $L$ 、相対速度  $V_r$ 、で移動する目標物で反射し、その反射信号を受信波として受け取ります。この時、反射波である受信波は目標物までの距離伝搬する時間だけ遅れが生じます。ここで、光速を  $C$  とすると、反射信号の時間遅れを  $\Delta t$  は、

$$\Delta t = \frac{2L}{C}$$

となります。

次に図 4 にある三角形 DFE (赤色) と三角形 ACE が相似関係であることから、ある時刻の周波数差  $\Delta f$  を計測することで反射信号の時間遅れを  $\Delta t$  が求まり、これからレーダーと目標物間の距離  $L$  が得られます。

実験に用いる FM-CW レーダーは、この目標物までの距離を 0.2 秒間隔 (5 Hz) で出力可能であることから、この距離変位を用いて速度に変換して用います。

### 3.2 波速から波周期への換算

波の位相速度である波速  $C$  と波周期  $T$  の関係は、海洋波の分散関係から、

$$C = \frac{g T}{2\pi} \tanh kd$$

で与えられます。ここで、 $g$  は重力加速度、 $k$  は波数 ( $k = 2\pi/L$ )、 $d$  は水深としています。波速  $C$  は波周期  $T$  及び水深  $d$  によって決まることがわかりますが、右辺の  $\tanh$  の中にも波長  $L$  を含んでいるので逐次近似によって波速  $C$  から波周期  $T$  が求まります。

また、GNSS ブイで得られる波速  $C_b$  は、ブイの上下動の時系列に周波数変換を施した結果において最大スペクトル値を有する周期  $T_p$  が得られます。次に、計測対象海域における水深  $d$  と  $T_p$  から上の分散関係式により  $C_b$  が求まります。

### 3.3 洋上計測実験

洋上計測実験は 2. の洋上波浪計測実験と同時期に和歌山県周参見漁港の稲穂島南方の防波堤で、2019 年 7 月 16 日 09 時～15 時、9 月 17 日 15 時～17 時、9 月 18 日 11 時～16 時の間実施しました。実験時の装置設置の様子を図 5 に示します。

表 3 に FM-CW レーダーから得られた波速  $C_r$  と同時に洋上に設置した GNSS ブイで計測した波速  $C_b$  の 1 時間について 5 分毎に計算し比較した結果を示します。



図 5 FM-CW レーダー実験における防波堤状の装置

表3 レーダーとブイにより計測された波速

月日	時刻	波速 (レーダー) m/s			波速 (ブイ) m/s	誤差 m/s	
		個数	平均値	標準偏差	平均値	平均誤差	%誤差
7月16日	9	32	7.80	1.31	7.63	0.17	2
	10	32	8.39	1.31	8.43	-0.04	0
	11	29	8.28	1.18	8.54	-0.26	-3
	12	30	9.53	1.41	9.68	-0.15	-2
	15	30	9.61	0.94	9.90	-0.29	-3
9月17日	15	29	8.83	1.61	9.93	-1.10	-11
	16	31	9.07	1.40	9.78	-0.71	-7
	17	28	8.80	1.33	9.88	-1.08	-11
9月18日	11	29	8.95	1.65	9.81	-0.86	-9
	12	30	8.46	0.95	9.76	-1.30	-13
	13	29	8.22	1.64	9.81	-1.59	-16
	14	29	9.37	1.32	10.10	-0.73	-7
	15	30	9.20	1.42	10.14	-0.94	-9
	16	31	9.31	1.49	9.99	-0.68	-7

実験値波速の有効性を示すため GNSS ブイで得られた波速と FM-CW レーダーによって得られた波速の相関関係を図6に示します。同図より、計測結果が8~10m/sに集中していることからそれ以外の波速の関係は明確ではありませんが、FM-CW レーダーにより計測された波速が若干少なく計測しているように見受けられます。また、少なくとも計測した範囲内における波速について FM-CW レーダーと GNSS ブイによる波速には相関が見られることから FM-CW レーダーによって波速が計測され、波速から角周波数に変換することで、当初考えていた「水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数 $\omega_R$ 推定」が達成されたものと考えます。

最後に、本実験でわかったことを以下に示します。

- ・計測により得られた波速は標準偏差が0.94~1.64であるためばらつきが小さく、波を捉えているデータとして有用
- ・FM-CW レーダーを用いて導き出された波速は、GNSS 波速との相関が良いことから、波速計測が可能
- ・実験で用いた FM-CW レーダーの計測可能距離が最大 50m であり、最短距離を 20m に設定していたため 30m の範囲でしか計測できていないことから、海洋波

の波長を直接計測することは困難

- ・波速から周期への換算は水深が浅い場合、ある波速帯において周期が急激な変化を持つため難しい。一方で、水深が深い場合周期は水深による影響が少ないため、換算が可能

本実験を実施して感じたことは、波高の違いによって実験結果を解析する困難さが異なる利ました。特に、波高が0.6m以上の時はレーダーからの反射が良く解析しやすかったのですが、0.4m以下ではしばしば解析することが困難でありかなり時間がかかりました。またFM-CWレーダーによる波速の計測結果から、標準偏差が0.94~1.64で、計測平均誤差が-1.59~-0.04という精度で計測できたため、海洋波浪情報の変化が捉えられていたものと考えられます。波長の視点から計測を試みたがレーダーの性能上、計測距離の範囲が狭く波長を捉えることはできませんでした。

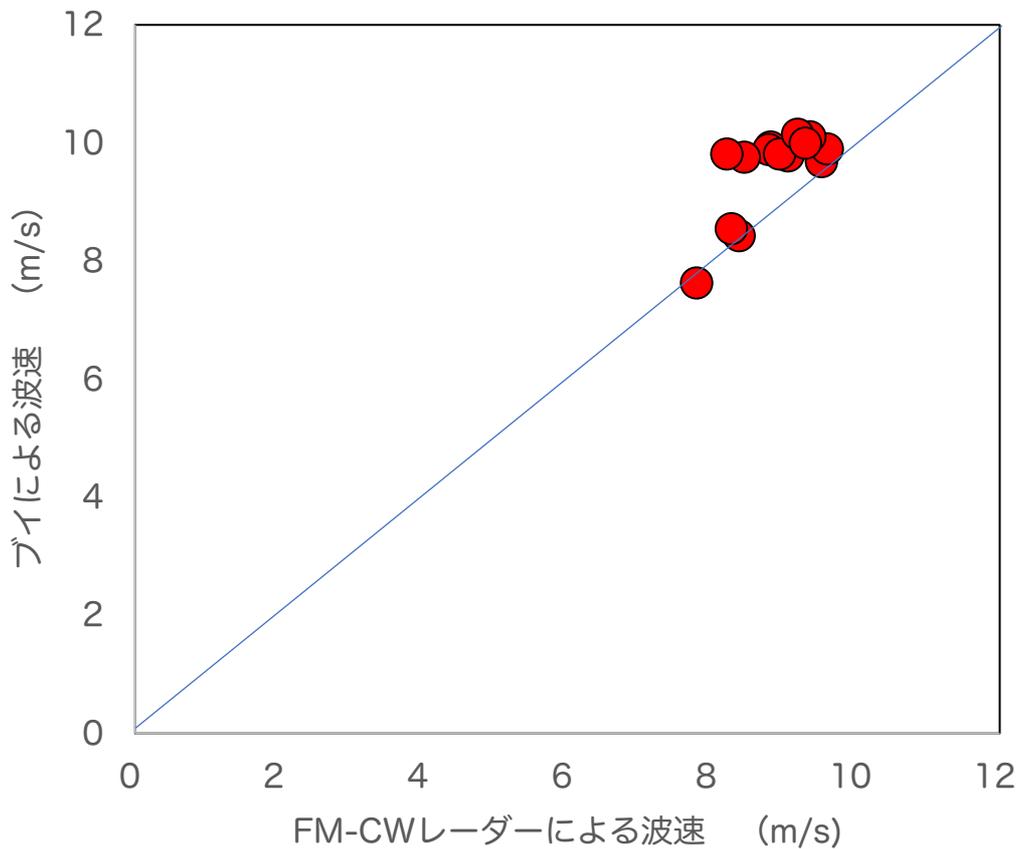


図6 FM-CWレーダーとGNSSブイによる波速の関係

## 4 降雨信号の特徴

レーダーは航海の分野において目標物との方位距離計測に使用されており、また雨雪の反射を不要な反射信号として捉えることでFTCやアンチクラッターを使った除去に用いられてきました。近頃ではアメダスや雨雲の動きの予測等の気象観測並びに気象予報にも用いられています。

本研究では海洋波浪から得られる反射信号を処理して波高を求める方法を採用していますが、雨が降っているときは降雨から得られる反射信号が海洋波浪から得られる反射信号と干渉することで、海洋波浪情報の計測が困難となることが考えられます。そこでここでは、降雨影響の除去を目的として降雨量とCWレーダー反射信号間の関係を調べることにします。

### 4.1 降水強度の推定

CWレーダーから発射された電波は目標物である雨粒に反射した後、その反射信号が受信されます。そこで、降雨がCWレーダーに与える影響は降雨のレーダー向きの速度と関係することが考えられます。

雨滴では異なる降水強度では統計的にその雨滴を構成する雨粒の直径の分布が異なります。また、異なる直径の雨滴は鉛直方向の速度も異なります。そこで、ここでは雨滴の鉛直方向の速度をCWレーダーによって計測することで雨滴の降水強度の推定が可能なことを以下の手順で実験的に示します。

- (1) CWレーダー出力から相対的な最大パワースペクトル密度を計測
- (2) 降水強度センサーによって降水強度を計測。
- (3) 計測された降水強度と相対的な最大パワースペクトル密度の関係の提示

### 4.2 実験による検証

#### 4.2.1 実験・解析方法

実験は2019年10月24日から25日にかけて神戸大学深江キャンパス海事科学研究科2号館屋上にてFSK方式CWレーダー及び気象観測装置（ヴァイサラウェザートランスミッターWXT536）を設置して実施しました。屋上から校庭へ向けてレーダー（水平ビーム幅：30°、垂直ビーム幅：20°）を向けて実験を行いました。また、同時に気象観測装置を用いて降水強度・風向・風速の観測を行いました。図7に屋上における設置したCWレーダーに示します。

CWレーダー出力アナログ信号をA/D変換器（サンプリング周波数：2048Hz、ビット数：24ビット）によってデジタル変換しその後、出力信号を1秒毎に2048データ長データを周波数解析しスペクトルを求め、更に15分間（900データ）の平均処理を施すことで15分間の相対的な平均パワースペクトル密度を求めました。



図7 屋上に設置したCWレーダー

#### 4.2.2 実験結果及び考察

気象観測装置では1秒毎に降水強度、風向、風速がデジタル量として計測・記録されますが、ここでは、CWレーダーの平均化処理に必要な時間である15分間における平均処理を実施しました。気象観測装置で得られた結果を表4に示します。

表4 気象装置から得られた15分間の平均気象情報

日付	時刻	降水強度[mm/h]	風向[°]	風速[m/s]
10月24日	1530-1545	0.83	35	1.3
	1600-1615	1.09	22	1.2
	1645-1700	2.36	48	1.3
	1710-1725	1.28	57	1.3
	1740-1755	1.58	54	1.2
	1820-1835	2.28	48	1.2
	1840-1855	2.89	53	1.4
	1900-1915	1.17	59	1.4
	2100-2115	4.28	50	1.5
	2115-2130	3.45	16	1.4
	2130-2145	2.31	25	1.4
	2145-2200	2.64	13	1.5
	2200-2215	3.73	56	1.6
	2215-2230	4.47	26	1.6
	2230-2245	4.21	50	1.5
	2245-2300	3.40	49	1.4
	2310-2325	6.58	14	1.5
2330-2345	9.92	30	1.4	
2345-2400	8.65	28	1.5	
10月25日	0000-0015	4.25	76	1.3
	0015-0030	2.53	11	1.2
	0030-0045	3.29	34	1.1
	0055-0110	3.37	48	1.2
	0110-0125	2.50	19	1.0
	0125-0140	2.80	13	1.1
	0210-0225	1.60	84	1.2
	0225-0240	1.95	51	1.3
	0325-0340	0.00	51	1.3
	0340-0355	0.00	58	1.7
	0415-0430	0.00	27	1.4

また、C W レーダーから出力された相対的なスペクトル密度の 15 分間平均処理結果の一例を図 8 に示します。

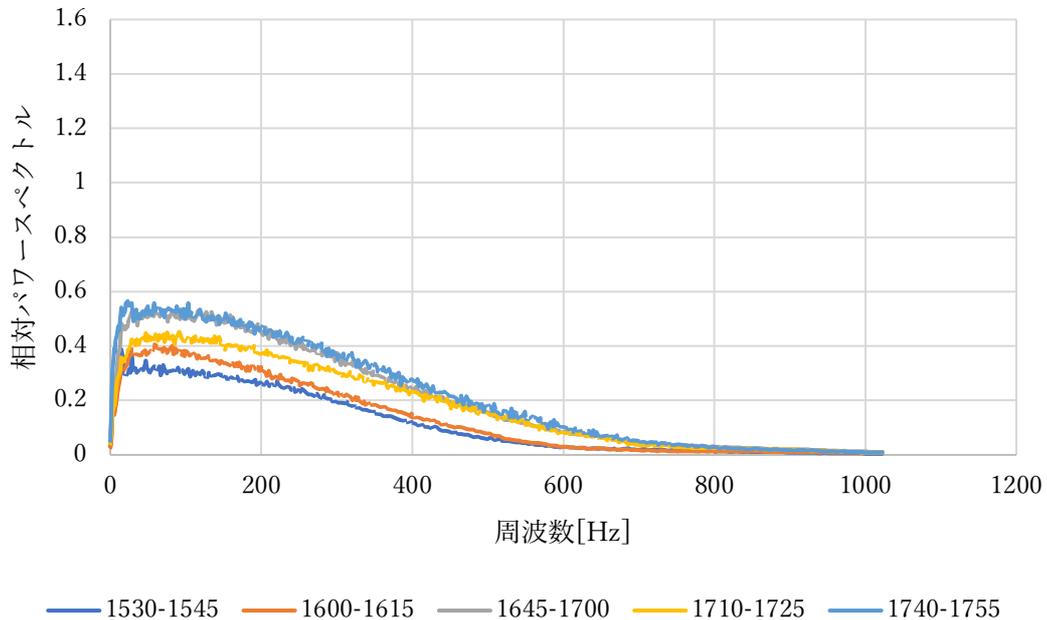


図 8 C W レーダー出力から得られた相対的なスペクトル密度 (10 月 24 日分)

次に、図 9 に横軸に相対的な最大スペクトル密度  $f_p$ 、縦軸に降雨計で計測された降雨量  $R$  とした場合の関係を示します。同図より、最大スペクトル密度  $f_p$  と降雨量  $R$  の間には強い相関関係 (相関係数 0.99) が見られたことから、降雨の風による最大スペクトル密度への影響はほとんど見られず、CW レーダーから得られる最大スペクトル密度  $f_p$  から降雨量の推定が可能であることがわかります。

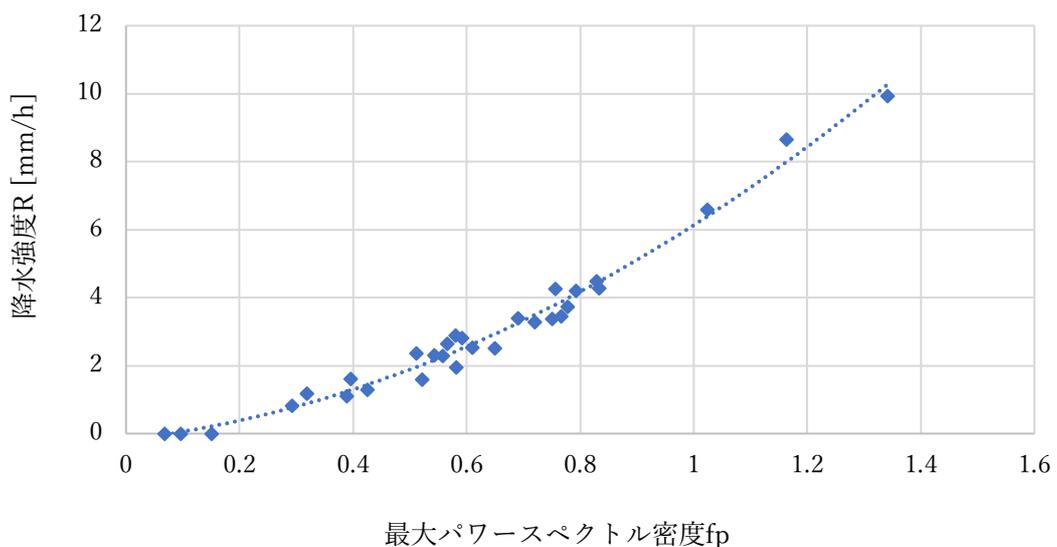


図 9 相対的な最大スペクトル密度  $f_p$  と降雨量  $R$  の関係

以上の結果及び考察から、降水強度と最大パワースペクトル密度の関係は正の相関で表され、2次関数で近似できることが明らかとなりました。

#### 4.2.3 降雨に対する処理方法

図 10 に以前降雨時に実施した実験で得られた CW レーダーによる海面からの反射信号と降雨反射の一例を示します。

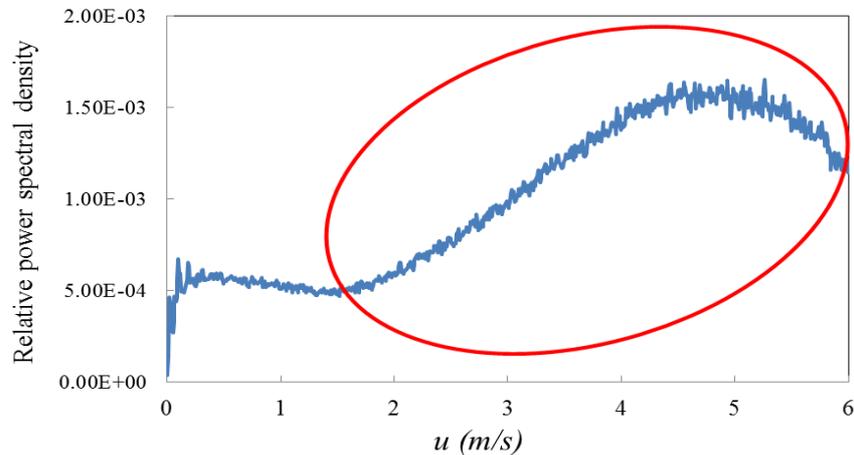


図 10 降雨時の CW レーダー出力スペクトル密度の一例

図 10 は横軸に移動速度、縦軸に相対的なパワースペクトル密度を示しており、横軸の速度が 0~2m/s 付近の小さなピークが海洋波浪の水粒子運動による海面からの反射信号を表し、2~6m/s 付近にあるピークが降雨の影響であると考えられます。

前述したように、降雨の風による最大スペクトル密度への影響はほとんど見られないことから、降雨による分布形状がモデル化できれば、降雨計を用いて降雨による相対的なパワースペクトル密度は予測可能となり、その影響を除去できる可能性があり、その除去法の概念図を図 11 に示します。

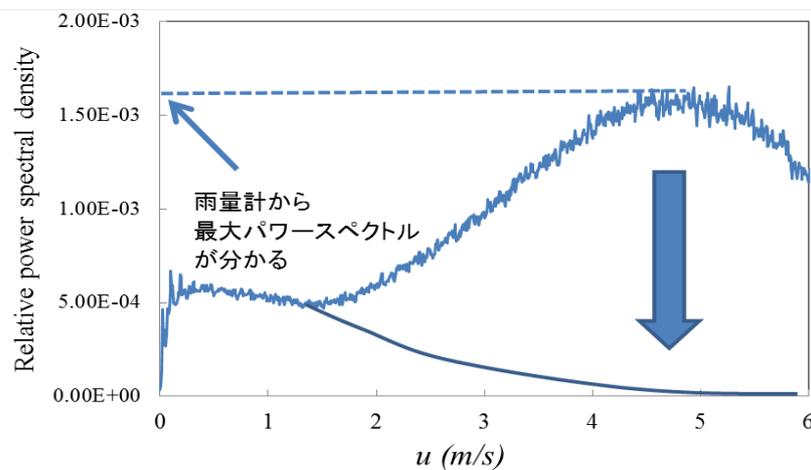


図 11 降水強度から雨滴の影響を除去する方法の概念図

さらに、今回の基礎実験では比較的風速が小さな実験だけであったことから、降水方向の影響を明確にできませんでしたが、考えられる可能性を以下に示します。

今回実験に用いた CW レーダーは、移動物体のレーダーアンテナ向きを計測しているため、風によりレーダーアンテナ向きの雨滴の降水方向や降水速度が変われば、相対パワースペクトルの分布も変化します。図 12 に風による影響を示します。今回の基礎実験では比較的風速が小さかったため雨滴はほぼ垂直に落下していたと考えられますが、レーダーアンテナ向きに強い風が吹くと、雨滴もその影響を受けアンテナ向きの速度が大きくなります。その結果、パワースペクトル密度の最大値は降水強度だけに影響され風による影響をほとんど受けないことが考えられ、その結果として図 14 に示しているようにスペクトルは同一形状を保ちながら高い周波数に周波数シフトします。

そこで、風向・風速計の出力からアンテナ向きの風速を計測することで周波数シフト量を推定し、また降雨計で降雨量を計測することでパワースペクトル密度の最大値も推定が可能となります。その結果、降雨によるスペクトル形状が分かれば降雨の影響を除去できる可能性があります。

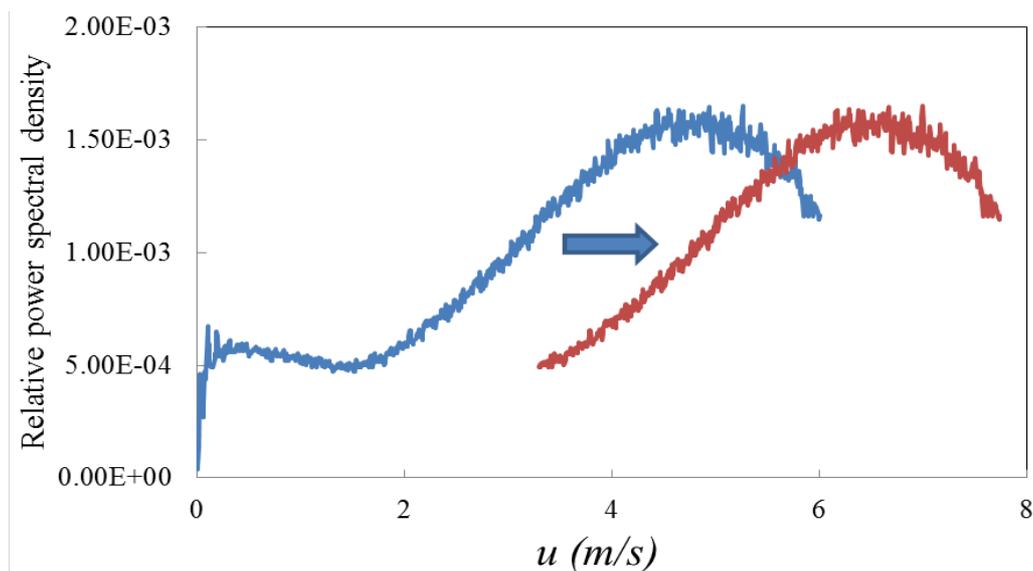


図 12 風による雨滴の周波数特性の変化

## 5 まとめ

本研究は、安価で簡易な CW レーダーを波浪計測に応用することを目的とし、CW レーダーの出力信号から有義波高の推定する手法を提案し、次いで防波堤上に設置した CW-レーダーの出力信号から有義波高を推定できることを示しました。また、FM-CW レーダーによって波速を計測することで水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数を推定できることも示し、最後にアンテナ向きの風速から周波数シフト量を推定し、また降雨計で降雨量を計測することでパワースペクトル密度の最大値も推定可能であることから、影響を除去できる可能性も併せて示しました。

安価で簡易な波浪計測装置実現のために今後検討すべき課題として、洋上移動体において計測を実施し、移動体の動特性の影響を研究することがあげられます。

最後に、現在船舶に搭載されているマリンレーダーは主にインコヒーレント方式が用いられており、この出力信号から精度良い波高情報の収集は現時点では困難です。ただし、次世代のマリンレーダーである固体化レーダーが開発を終え徐々に搭載されつつあります。この固体化レーダーはコヒーレント処理が容易に行えることから、今後はパルスドップラー方式のマリンレーダーとして精度良い波浪情報の収集ができることを大いに期待しています。

## 参考文献

- 1) 古山 諒：CWレーダーによる海洋波浪情報計測に関する研究 -海岸付近における実験 -, 2019 年度神戸大学大学院海事科学研究科修士論文, 2020.3.
- 2) 香村 隆彰：FM-CW レーダーを用いた海洋波計測について, 2019 年度神戸大学海事科学部卒業論文, 2019.12.
- 3) 濱田 菜月：CW レーダーによる降雨計測に関する研究, 2019 年度神戸大学海事科学部卒業論文, 2019.12.
- 4) 中本 雅也：FM-CW レーダーによる海洋波浪情報の収集に関する研究, 2016 年度神戸大学大学院海事科学研究科修士論文, 2017.3.
- 5) 古山 諒：CW レーダーによる海洋波浪計測に関する研究 - 造波水槽における実験 -, 2017 年度神戸大学海事科学部卒業論文, 2018.3.
- 6) 中本 雅也, 河口 信義：車載用 FM-CW レーダーを用いて海洋波浪を計測する試み, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.22, pp.111-114, 2016.
- 7) 河口 信義, 中本 雅也, 井川 晶裕：BFSK 方式 CW レーダーによる波浪計測方と水槽実験結果, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.24, pp.617-620, 2017.
- 8) 河口 信義, 古山 諒, 井川 晶裕, 久保田 崇：CW レーダーによる海洋波浪計測の収集 -造波水槽における実験-, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.26, pp.427-431, 2018.
- 9) 古山 諒, 河口 信義, 井川 晶裕, 久保田 崇：CW レーダーによる海洋波浪計測の収集 -造波水槽における実験-, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol.28, pp.625-630, 2019.
- 10) 光易 恒：海洋波の物理, 岩波書店, pp.180-185, 1995.

## おわりに

3年間の共同研究で目標にしていた内容のほぼ9割を達成することができました。これもひとえに本共同研究を進めるにあたりまして、多大なるご協力下さいました日本海事検定協会の斎藤威志会長はじめ寺田様、栗原様、吉松様、水崎様、角様、竹安様及び多くの関係者の皆様、実験実施及び解析に協力下さいました神戸大学海事科学研究科・海事科学部の海洋計測・航海計器学研究室の多くの学生諸氏、洋上実験場所の提供及びブイ設置・回収にご協力下さいました和歌山南漁業協同組合すさみ支所の皆様、実験装置の製作及び実験実施に多大なご協力下さいました神戸大学海事科学研究科の井川晶裕様、またその他ご協力下さいました全ての皆様方にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

また最後になりましたが、本共同研究報告書は参考文献 1), 2), 3), 4)に掲載しました神戸大学大学院及び海事科学部在学中に当研究室に所属しておりました大学院生中本雅也君、古山諒君、学部生香村隆彰君と濱田菜月さんの修士論文及び卒業論文から多くを引用させていただきましたことを記し、在学中の学生諸氏の努力と頑張りに対し感謝いたします。