

平成31年3月31日

平成30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 研究目的および経緯	1
2 CW レーダーによる波浪情報計測	2
2.1 海洋の表層流	2
2.2 水粒子運動の水平速度と波高	2
2.3 有義波高・有義周期	2
3 洋上波浪計測の基礎的実験	6
3.1 実験概要	9
3.2 実験データの取り扱い	10
3.3 実験及び解析結果	13
4 まとめ	18

1. 研究目的および経緯

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ます。

そこで、平成30年度一般社団法人日本海事検定協会の公益目的事業で以下の海岸付近防波堤における CW レーダーによる波浪計測実験を実施いたしました。

- ・ 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
- ・ 提案手法による波高推定精度の検証

その結果、今年度開発しま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ー周波数偏移量の計測によって波高の推定が可能であることを示すことができました。

今後更なる装置の改良及び洋上における検証実験などが必要ですが、波浪情報を安価に自動的に収集するための装置を開発することで、安全な貨物輸送のための一助なれば幸いと考えております。

2. CW レーダーによる波浪情報計測

2.1 海洋の表層流

海洋における海面上の表層は様々な流速を有しており、一般的に次式で与えられます⁵⁾。

$$u_D = u_{Br} + u_{win} + u_{cur} + u_{orb} + u_{bre} + u_{inc} \quad (1)$$

ここで、 u_D は全表層流速で、 u_{Br} は Bragg 散乱波による、 u_{win} は wind shear 応力による、 u_{cur} は潮流による、 u_{orb} は水粒子運動による、 u_{bre} は砕波による、 u_{inc} は波の遮蔽による流速成分です。Bragg 散乱波及び遮蔽による流速成分は小さな流速です。また、砕波、window shear、潮流による流速成分も通常の気象状態では水粒子運動による流速と比べて小さな値となり、付近海域の潮流はある程度予測でき補正可能で、砕波と window shear による流速も風速・風向観測結果から補正可能となります。そこで、補正後に波浪がある程度生成されている状態では、(1)式で示される全表層流速 u_D は水粒子運動による流速が卓越したものとなります。

2.2 水粒子運動水平速度と波高

ここでは、海水面付近における波浪による水粒子運動だけを対象とすることから、水粒子運動の最大水平速度を u_{max} とし、波振幅 a 、角周波数 ω 、波数 k 、水深 d 、波長 L とすると、

$$u_{max} = a \omega \quad (d > L/2) \quad (2)$$

$$u_{max} = a \omega \coth(kd) \quad (d \leq L/2) \quad (3)$$

で与えられます¹⁾。前回実施した造波水槽における実験では、単一な角周波数の規則波を対象としていたことから規則波周期 T を計測することで $\omega = T/2\pi$ より ω が算出できます。次に、波の分散関係より角周波数 ω は、重力加速度 g とすると分散関係式より、

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (4)$$

が得られ、この式から波数 k が求まり、CW レーダーの出力であるドップラー周波数偏移量から水粒子運動の最大水平速度 u_{max} が得られ、(3)式から波高 $H (=2a)$ が求まります。

2.3 有義波高・有義周期

洋上における実験は単調な規則波ではなく複雑な周期及び波向きの複合波であり、さらに水槽実験のように波周期 T を観測することもできません。また、波浪情報は一般的にその統計値である有義波高、有義周期で表され、上述

した水槽での手法を用いることはできなくなります。

そこでまず始めに、CWレーダー出力値を周波数変換により相対パワースペクトル密度 $S(f)$ を求めます。次にドップラー周波数偏移 f と水粒子運動水平速度 u との変数変換によって水粒子運動水平速度相対パワースペクトル密度 $S(u)$ を得ます。さらに、 $S(u)$ を正規化することにより、CWレーダー出力信号における水粒子運動水平速度の生起確率密度関数 $p(u)$ は次式から得られます。

$$p(u) = \frac{S(u)}{\int_{-\infty}^{\infty} S(u) du} \quad (5)$$

次に、水粒子運動水平速度 u から有義波高を推定する方法について、Hwangらによる水粒子運動水平速度成分の実効値（RMS値）を用いる方法（実効値法）に加えて、水粒子運動水平速度絶対値の平均値を用いる方法（平均値法）、水粒子運動水平速度絶対値の最頻値（最頻値法）、GNSSブイによる方法の4種類の方法を概説し、加えて生起確率密度と統計値について一例を以下に示します。

(1) 実効値による

ここではHwangら⁶⁾によって提唱され、Carrascoら⁵⁾によって実験的に検証された、パルスドップラー方式マリンレーダーの実験で用いられる経験式によって有義波高・周期の計測を行います。 $H_{1/3}$ を1/3有義波高、 u_{RMS} を水粒子運動水平速度成分によるドップラー周波数偏移量の二乗平均平方根、 η_{RMS} を水粒子運動の上下動成分の二乗平均平方根、 ω_p を水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数、 X を方向分布関数と水深が含まれる経験的な定数とすると、

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 4 \times \eta_{RMS} \\ &= X \frac{u_{RMS}}{\omega_p} \end{aligned} \quad (6)$$

で与えられます。そこで、(6)式の右辺の変数である u_{RMS} と ω_p を得ることで有義波高が求まります。これは(2)式に依じて水粒子運動水平速度を水粒子運動上下動の角周波数で割ることで次元を波高であるメートルに一致させる方法です。

そこで水粒子運動の上下動成分の二乗平均平方根である u_{RMS} は、(5)式から与えられる $p(u)$ の二次中心モーメントの平方根であることから、水粒子運動水平速度成分によるドップラー周波数偏移量の二乗平均平方根 u_{RMS} は、

$$u_{RMS} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} u^2 p(u) du} \quad (7)$$

により得られます。

また、水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数 $\omega_{\eta p}$ は 1/3 有義周期 $T_{1/3}$ が得られることにより、

$$\omega_p = \frac{2\pi}{1.05 \times T_{1/3}} \quad (8)$$

から求められます¹⁾。

(2) 平均値による

水粒子運動水平速度絶対値の平均値を $\overline{|u|}$ とすると、水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数 ω_p で割ることにより次元を整合させ、 Y を方向分布関数と水深が含まれる経験的な定数とすると、

$$H_{1/3} = Y \frac{\overline{|u|}}{\omega_p} \quad (9)$$

により 1/3 有義波高を求めます。

(3) 最頻値による

水粒子運動水平速度絶対値の最頻値を u_{mode} とすると、水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数 ω_p で割ることで次元を一致させ、 Z を方向分布関数と水深が含まれる経験的な定数とすると、

$$H_{1/3} = Z \frac{u_{mode}}{\omega_p} \quad (10)$$

により 1/3 有義波高を求めます。

(4) GNSS ブイによる

本研究で用いる GNSS ブイはキネマティック方式を用い、サブセンチメートルの精度で上下動の計測が可能であり、波浪における水粒子運動の上下動が計測されていると考えます。そこで、ブイの上下動の計測値を $z(n)$ 、標準偏差を σ_z とすると 1/3 有義波高 $H_{1/3}$ は、

$$H_{1/3} = 4.0 \times \sigma_z \quad (11)$$

から得られます¹⁾。

また、 $z(n)$ のスペクトル密度 $S_z(\omega)$ を求め、その最大スペクトル値の角周波数は水粒子運動上下動最大スペクトル値 ω_p と同等であることから、1/3 有義周期 $T_{1/3}$ は(8)式を用い、

$$T_{1/3} = \frac{2\pi}{1.05 \times \omega_p} \quad (12)$$

となります。

(5) 生起確率密度関と各種統計値

ここでは(5)式から得られた CW レーダー出力信号における水粒子運動水平速度の生起確率密度関数 $p(u)$ の一例を図 1 に示し、図中に (1)から(3)で述べた各統計値 u_{RMS} , $\overline{|u|}$, u_{mode} を図中に示します。

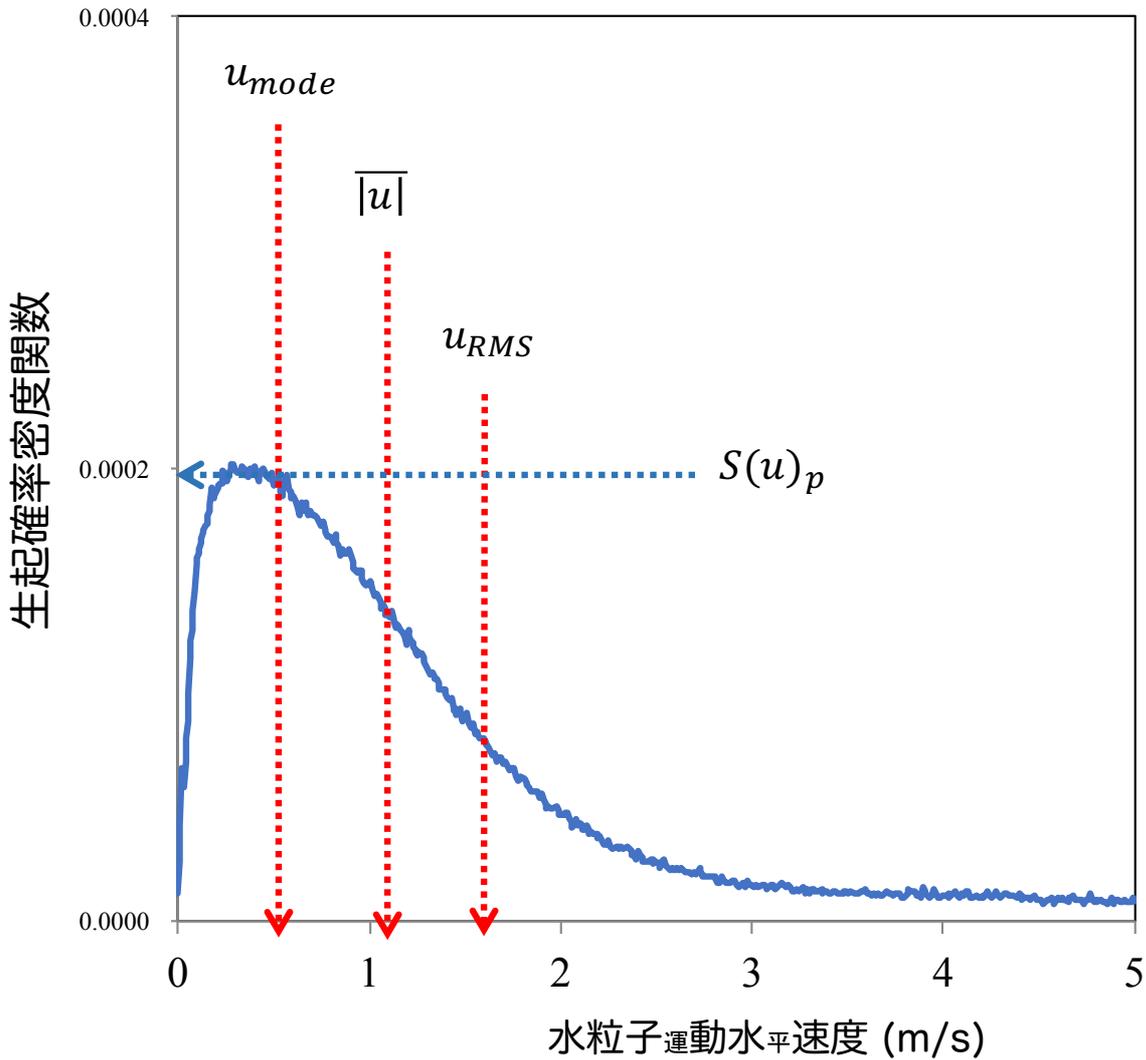


図 1 正規確率と統計量。

3. 洋上波浪計測の基礎的実験

3.1 実験概要

実験場所は和歌山県周参見漁港の稲穂島南方の防波堤上に、CW レーダー・気象観測装置・GNSS 陸上固定局及び無線装置を設置しました。

図 2 (a)に設置位置，図 2 (b)に輻射範囲と GNSS ブイ位置，図 2 (c)に設置した装置及び付近の風景を示します。また，Table 1 に実験データの概要，Table 2 に設置した CW-レーダーのパラメーターを示す。実験番号 2，4 の実験では波が高くブイ設置が行えませんでした。

CW レーダーのアンテナは海面上の高さ 12.0m に、俯角 20 度で波浪の到来方向に向けて垂直偏波送受信アンテナと水平偏波用送受信アンテナの 2 組のアンテナを上下に設置しました。電磁波の輻射範囲として、アンテナから輻射される電磁波の海面上の中心位置はアンテナ直下より洋上に約 33m、その地点における横方向の輻射幅は垂直偏波アンテナで 18m、水平偏波アンテナで 12m となります。また、奥行き方向ではアンテナ直下より垂直偏波アンテナで 21~68m、水平偏波アンテナで 17~137m となります。参考として Fig.2 (b)の図中に、オレンジ色網掛けで反射海面上における垂直偏波アンテナの輻射範囲、赤丸で GNSS ブイの設置位置をそれぞれ示します。



図 2 (a) 実験装置の設置場所。



図 2 (b) 輻射範囲と GNSS ブイ設置位置.

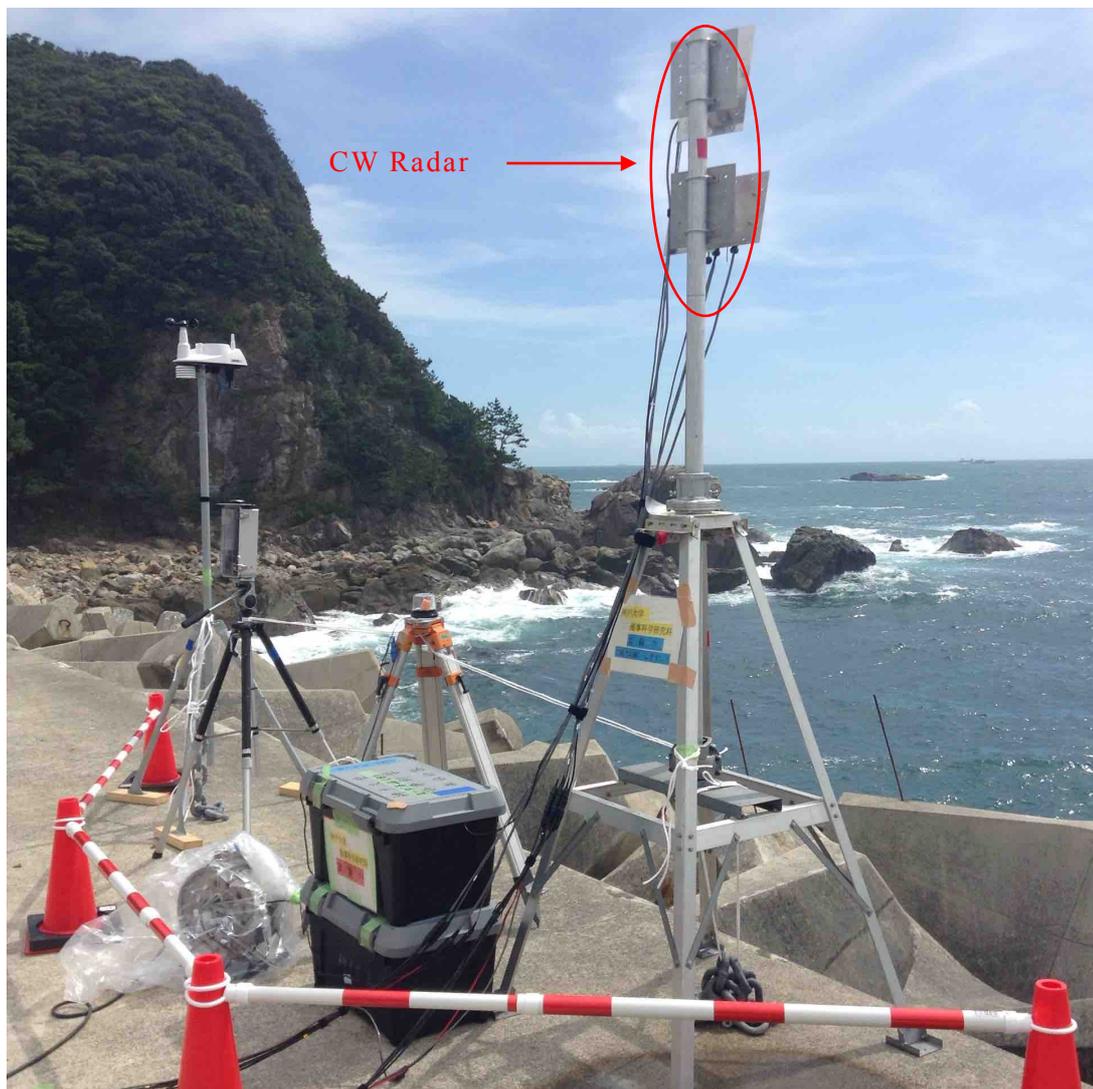


図 2 (c) 設置した装置及び付近の風景

表 1 実験概要

番号	期間	間隔 (min.)	サンプル番号	GNSSバイ
1	Jun, 4-6	50	2 (HH)	○
2	July, 2-4	30	5 (HH)	×
		50	4 (HH)	
		50	4 (VV)	
3	Sept., 4-6	50	6 (VV)	○
		50	7 (HH)	
4	Oct., 3-5	25	2 (HH)	×
5	Nov., 14-16	25	8 (HH)	○

表 2 CW-radar のパラメーター

Radar パラメーター	
送信周波数 (GHz)	24.0
出力電力 (dBm)	8-25
アンテナ水平ビーム幅 垂直偏波: VV (deg.)	30.0
アンテナ垂直ビーム幅 垂直偏波: VV (deg.)	20.0
アンテナ水平ビーム幅 水平偏波: HH (deg.)	20.0
アンテナ垂直ビーム幅 垂直偏波: HH (deg.)	30.0

ここで, “VV”は垂直偏波送受信アンテナ, “HH”は水平送受信アンテナを示しています.

3.2 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 2.048 KHz 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す。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) の時間平均を行う。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⁴⁾。

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す。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ました。

第 1 回目の実験初日の計測結果からブイ位置での水深は 12m、CW レーダー輻射域中心での水深は 8m と異なるが、以下の解析では水深の違いによる補正⁷⁾を行いました。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を行いました。

3.3 実験及び解析結果

(1) 偏波面による違い

各実験から得られた CW レーダーの時系列出力及び相対パワースペクトル密度の一例を示します。図 3 及び図 4 は比較的近い波浪状態における HH と VV の相対パワースペクトル密度及びレーダー出力信号です。

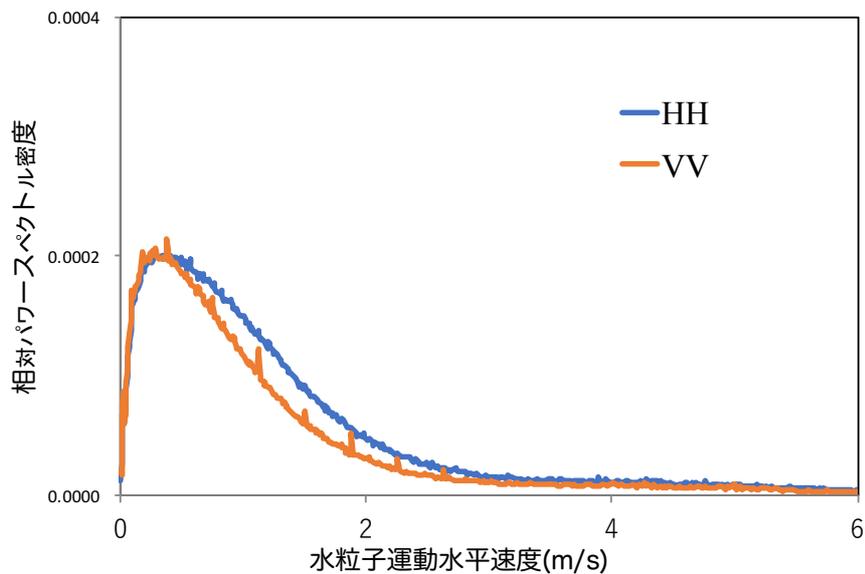


図 3 HH and VV CW Radar で得られた相対パワースペクトル密度

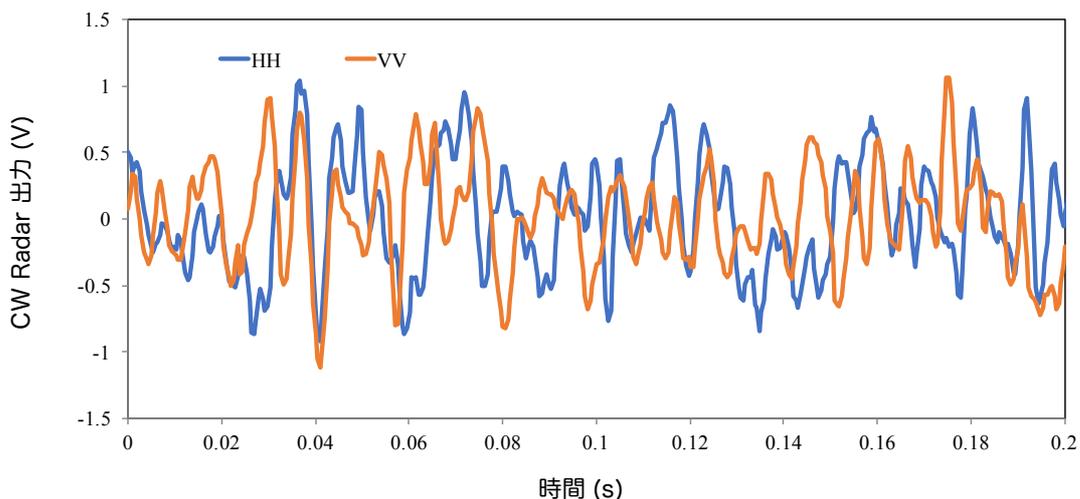


図 4 HH and VV CW Radar からの時系列出力信号。

上記の両図の計測結果から、俯角 20 度（入射角 70 度）における近距離伝搬において、20GHz ミリ波の波浪海面からの後方散乱係数には船用レーダーで示されている偏波面による後方散乱係数の大きな差は見られませんでした。

(2) GNSS ブイの時系列・周波数特性

次に、第2回目実験におけるGNSSブイの時系列上下動とその周波数解析結果の一例 ($H_{1/3} : 0.5\text{m}$, $T_{1/3} : 7.3$ 秒) を図5及び図6に示します。

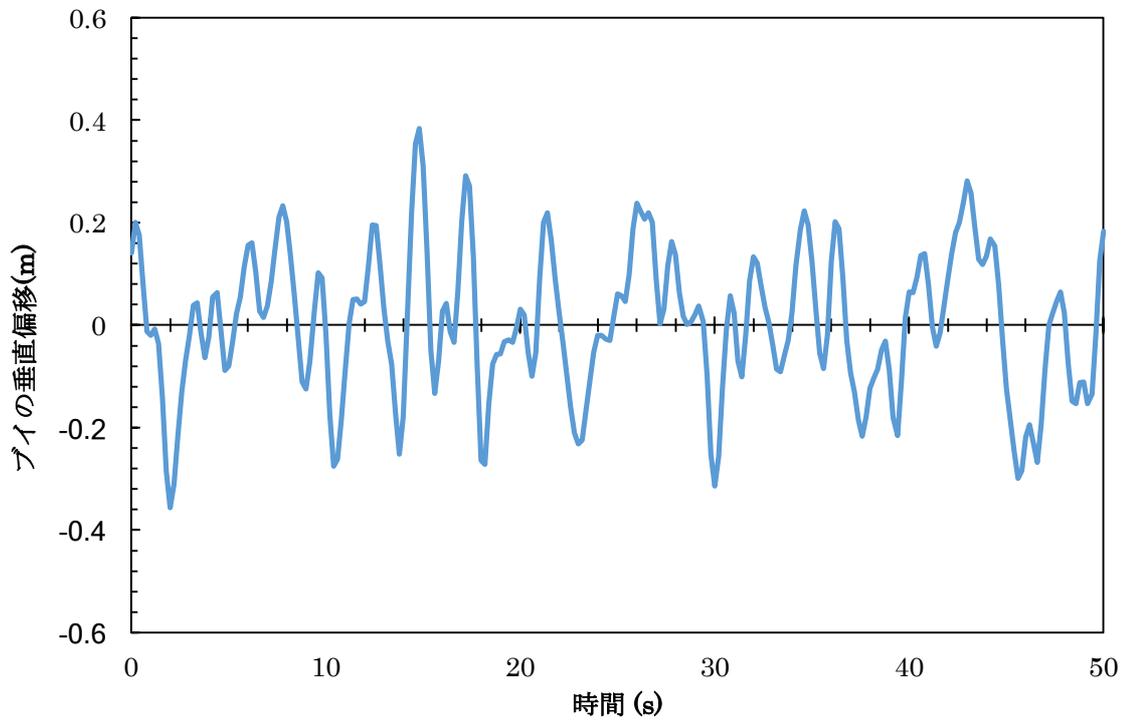


図5 GNSS ブイ垂直方向位置偏移の時系列データ。

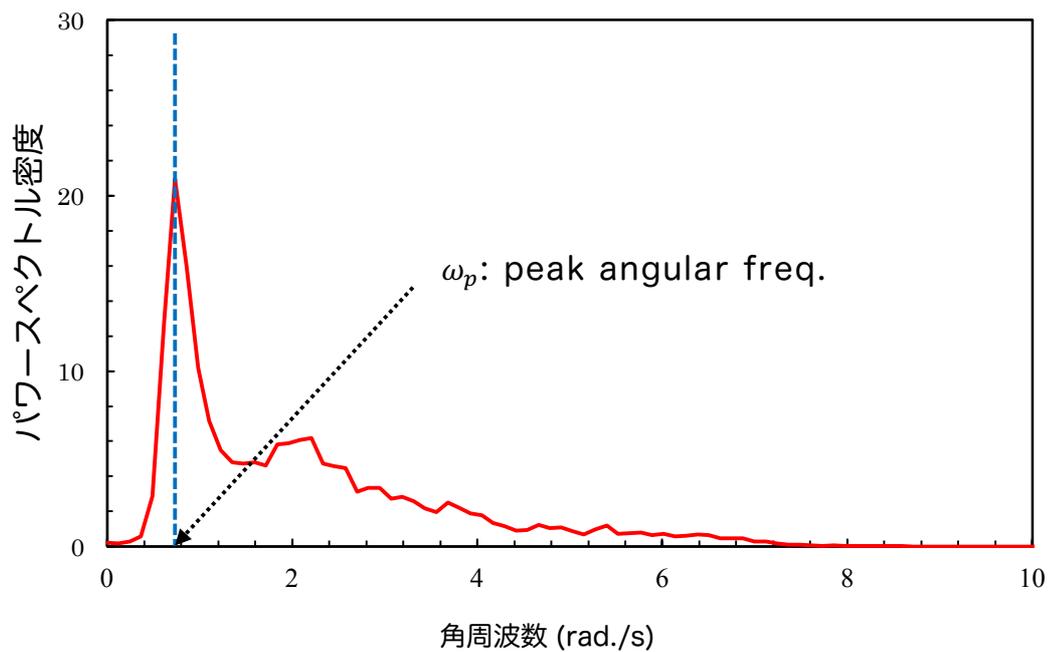


図6 GNSS ブイ垂直位置偏移の周波数特性。

(3) 有義波高の推定

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ました。そこで、その正規確率密度関数から 2.3(1)から(3)で概説した実効値、平均値及び最頻値と計測有義波高の関係を推定した結果を示します。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 ブイによる計測可能な場合には(11)、(12)式を用いて求め、波浪によって GNSS ブイ設置ができなかった場合には目視による有義波高・有義周期としました。解析対象実験数は GNSS ブイ HH が 8、VV が 5 で小計 13、目視 HH が 20、VV が 5 で小計 25、総計 38 でした。

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 1/3 有義波高 $H_{1/3,m}$ で、水平偏波 (HH) と垂直偏 (VV) を白抜きと塗りつぶしの丸印で区別しています。また、回帰直線を赤の破線で示します。

・実効値による結果

実験から得られた(6)式の u_{RMS}/ω_p と計測された1/3有義波高 $H_{1/3,m}$ の関係を図7に示します。

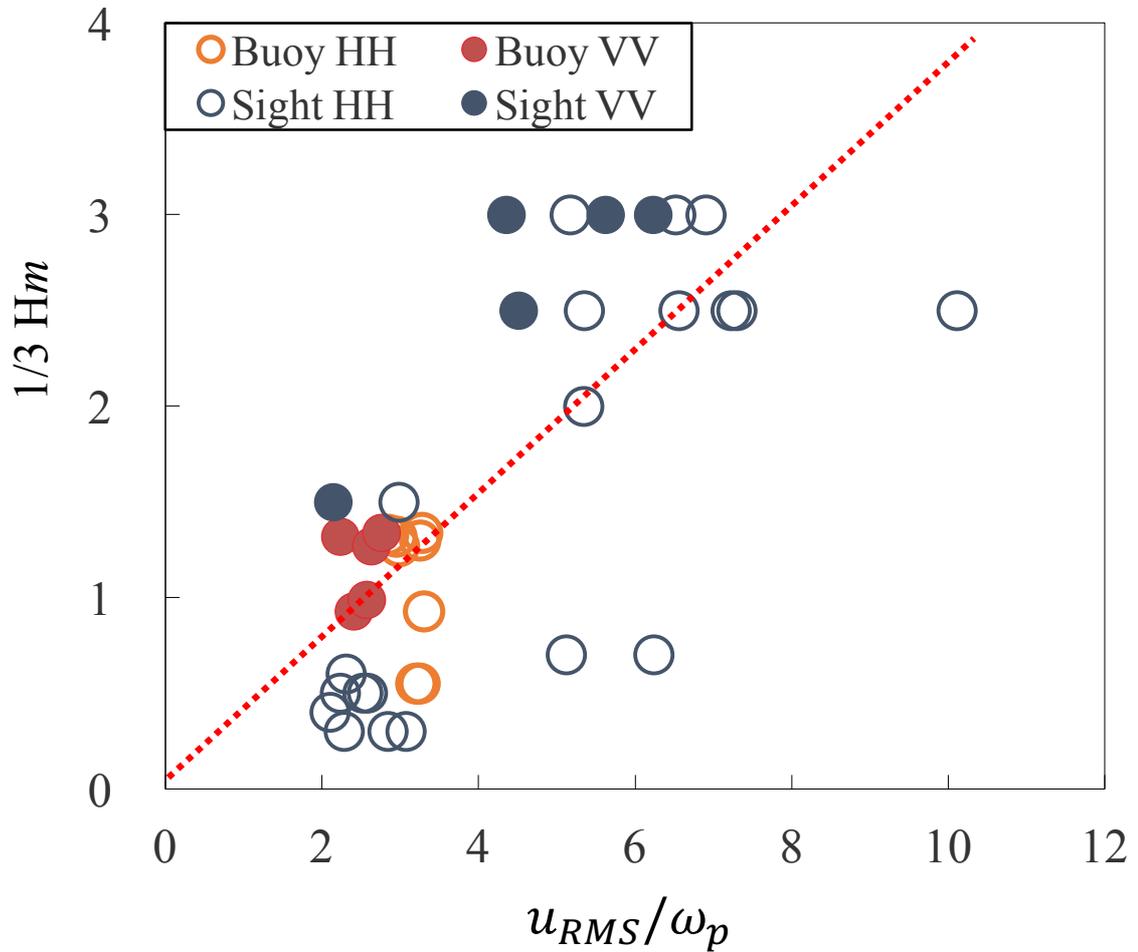


図7 (6)式の u_{RMS}/ω_p と計測された1/3有義波高 $H_{1/3,m}$ の関係。

・最頻値による結果

実験から得られた(10)式の u_{mode}/ω_p と計測された 1/3 有義波高 $H_{1/3,m}$ の関係を図 9 に示します。

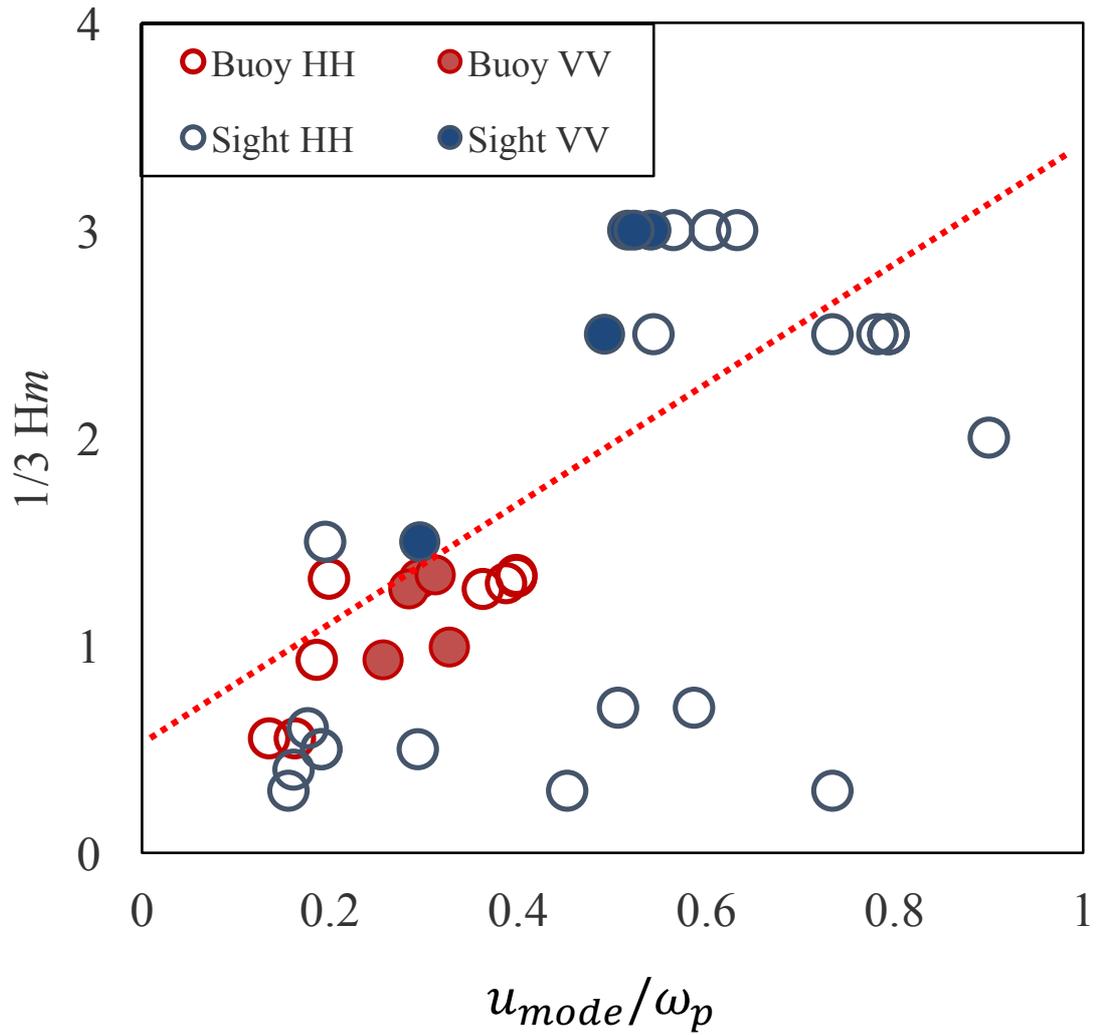


図 9 (10)式の u_{mode}/ω_p と計測された 1/3 有義波高 $H_{1/3,m}$ の関係

・計測誤差と考察

図7, 8, 9の結果から, 実効値・平均値・最頻値から得られた各指標と計測された1/3有義波高の間には正の相関が見られることから, これら指標をから得られる回帰直線を用いて1/3有義波高の推定が可能です. そこで, これら実効値, 平均値, 最頻値の回帰式から推定した1/3有義波高 $H_{1/3e}$ を求め, 横軸に推定した1/3有義波高 $H_{1/3e}$, 縦軸に計測された1/3有義波高 $H_{1/3,m}$ で表した結果を図10に示します.

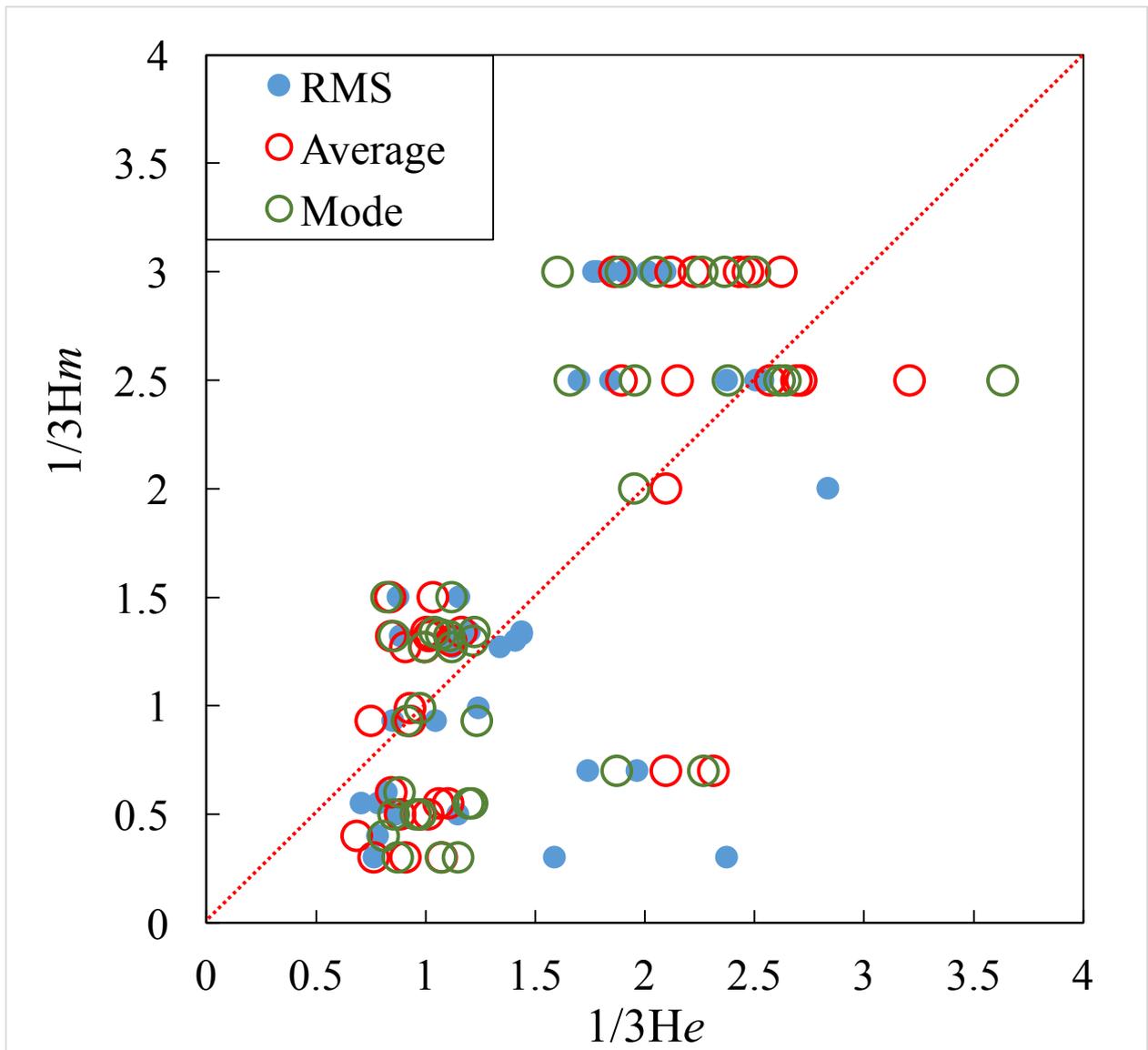


図10 推定した1/3有義波高 $H_{1/3e}$, と計測した1/3有義波高 $H_{1/3,m}$ の関係.

また、RMS、平均値、最頻値により推定した 1/3 有義波高の誤差を $H_{1/3e} - H_{1/3m}$ とし、GNSS ブイ、目視及び GNSS ブイ+目視（総計）別に、誤差の平均と標準偏差を表 3 に併せて示します。

表 3 RMS、平均値、最頻値により推定した 1/3 有義波高の誤差

推定手法	計測手段	平均値 (m)	標準偏差 (m)	相関係数
RMS	ブイ	-0.02	0.34	-
	視覚	0.01	0.76	-
	小計	0.00	0.65	0.72
平均値	ブイ	-0.13	0.30	-
	視覚	0.07	0.68	-
	小計	0.00	0.59	0.78
最頻値	ブイ	0.01	0.19	-
	視覚	-0.01	0.88	-
	小計	0.00	0.72	0.64

以上の解析結果より、5 回にわたる実験計測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 RMS、平均値、最頻値のどの手法も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 1/3 有義波高の推定が可能です。その中では平均値法により推定した 1/3 有義波高の推定が最も小さな値を示してい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るが、その要因については今後の課題とさせていただきます。

4 まとめ

本論文は、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 $1/3$ 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 $1/3$ 有義波高の推定できることを示しました。最後に、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を以下にまとめます。

- ・ 水粒子運動上下動最大スペクトル値の角周波数 ω_p を計測する手法
- ・ 長期間にわたる洋上における波浪計測実験を行い、不規則波における有義波高の推定手法
- ・ 雨雪などから得られる反射信号の特徴を抽出することにより分離識別法
- ・ 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
- ・ (1)式で示した波浪以外の風潮流などで生ずる水粒子の移動

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によって船舶の安全運航への寄与がなされることを大いに期待しています。

参 考 文 献

- 1) 光易恒：海洋波の物理，岩波書店，pp.129-144，1955.
- 2) 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.
- 3) 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法と水槽実験結果，日本船舶海洋工学会講演論文集，Vol.24，pp.617-620，2017.
- 4) 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.
- 5) Ruben Carrasco, Jochen Horstmann, and Jorg Seemann, Significant wave height measured by coherent X-Band radar, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 55, No.9, pp.5355-5365, 2017.
- 6) Paul A. Hwang, Mark A. Slettern, and Jakov V. Toporkov: A note on Doppler processing of coherent radar backscatter from the water surface: With application to Ocean surface wave measurements, Journal of Geophysical Research, Vol.115, pp.1-8, 2010.
- 7) 坂本信雄，井島武士，佐藤昭二，青野尚：浅海における風波の図式計算法，第7回海岸工学講演集，pp.137-147，1960.

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、神戸大学大学院海事科学研究科大学院生の古山諒君の研究論文から多くを引用させていただきました。また、実験には神戸大学大学院海事科学研究科海洋計測・航海計器学研究室の諸氏にご協力いただきましたことに対しここに厚く御礼申し上げます。