

平成 30 年 3 月 31 日

## 平成 29 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計測	2
2.1 FM-CW レーダーとは	2
2.2 計測システムの構成	3
2.3 計測方法	4
2.4 数値計算による検証	6
2.4.1 受信信号強度	6
2.4.2 反射信号の計算	6
2.4.3 計算結果に対する考察	7
3 BFSK-CW レーダーによる波浪計測	10
3.1 レーダーと波浪情報	10
3.2 海洋波浪情報の計算法	12
3.3 数値計算による検証	13
3.3.1 受信信号の相対電力スペクトル	13
3.3.2 数値計算結果および考察	13
4 造波水槽による実験	17
4.1 実験概要	17
4.2 レーダーおよび波浪パラメーター	20
4.3 実験結果および考察	21
4.3.1 周期・波高別の結果	21
4.3.2 追い波・向い波別の結果	25
4.3.3 水粒子運動速度の推定	26
5 まとめ	29
参考文献	30



## 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 29 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開発・検証・実験を実施いたしました。

- ・ 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

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. FM-CW レーダーによる波浪計測

### 2.1 FM-CW レーダーとは

車載用 FM-CW レーダーの構成図を Fig.1 に示します。はじめに FM 信号発生器で作られた FM 信号は coupler で 2 つの同じ信号に分離され、片方は送信アンテナへ送られミリ波として輻射されます。もう一方のレプリカは受信アンテナによって得られた受信信号と mixer で積がとられます。そこで、ミキサーからの出力信号は送信信号と受信信号のビート信号となり、それぞれの周波数成分の和と差の周波数成分が出力されます。また、Fig.2(a)に FM-CW レーダーの信号構成図を示します。

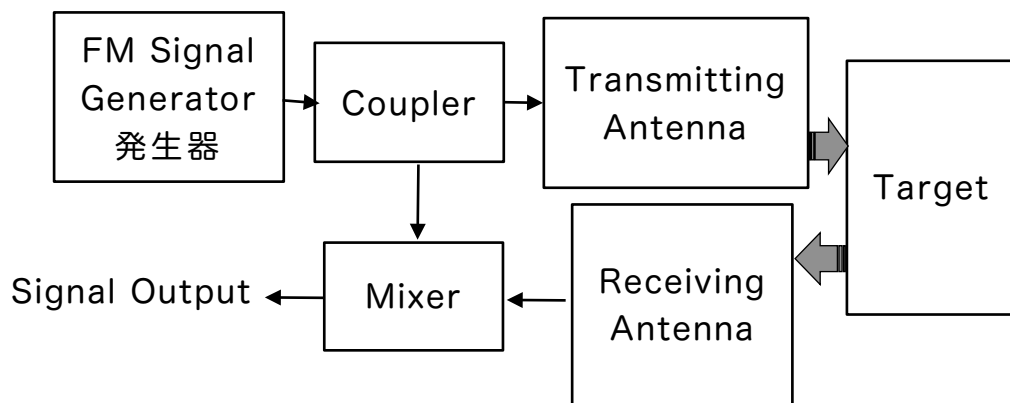


Fig.1 Flow Chart of FM-CW Radar.

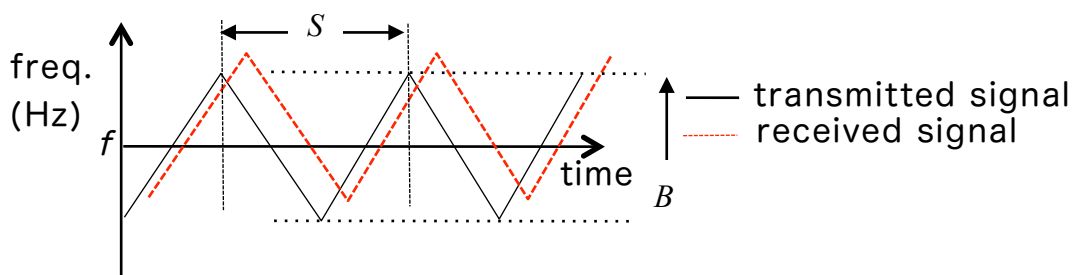


Fig.2 (a) Frequency transition of transmitted and received signals.

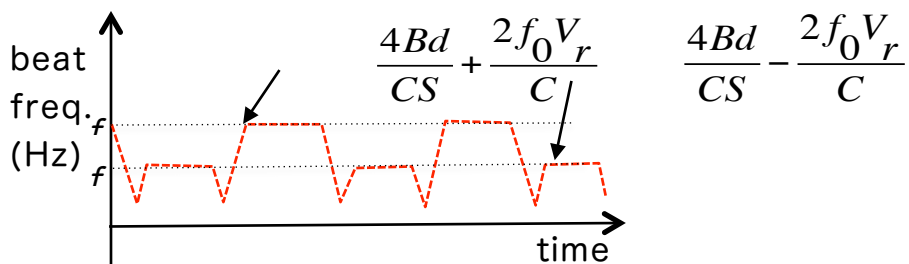


Fig.2 (b) Frequency transition of output beat signal from mixer.

FM-CW 信号において、送信周波数  $f_0$ 、掃引帯域幅  $B$ 、掃引時間  $S$ 、FM スロープ  $\mu=B/S$ 、またミリ波の伝搬速度  $C$  は既知です。また、アンテナターゲット間の距離  $d$ 、ターゲットの移動速度  $V_r$  を未知の変数とすると、和と差の各ビート信号周波数は、

$$f_1 = \frac{4Bd}{CS} - \frac{2f_0V_r}{C} \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{4Bd}{CS} + \frac{2f_0V_r}{C} \quad (2)$$

で与えられます。そこで、(1)式と(2)式の和 ( $f_2 + f_1$ ) より距離  $d$  が、差 ( $f_2 - f_1$ ) より移動速度  $V_r$  が求まります。Fig.2(b)に各ビート周波数の時間変化を示します。

## 2.2 計測システムの構成

本システムの船上での装置の配置図を Fig.3 に示します。波浪ベクトルの長さや方向で、その波向きと波長を示す。波浪ベクトルの上下破線は波浪の波頭位置を示します。次に、船上に 90 度の角度で設置した 2 つのアレーアンテナから取り扱いが容易な特定小電力で FMCW レーダーのミリ波送信し、船舶付近海面の各波頭から強く後方散乱される反射波を再度アレーアンテナにて受信します。海面からの反射波は、海面への入射角と反射角の関係から各波浪の波頭付近からの反射信号が最も強くなり、受信される信号においてそれぞれの波頭付近における反射信号が卓越することとなります。そこで、FM-CW レーダーは各波頭からの比較的強い反射を受信し、アンテナ高さとの幾何学的な関係より各波頭までの距離 (波長  $L$ ) および各波頭付近のアンテナ向きの水粒子最大速度が得られることとなります。

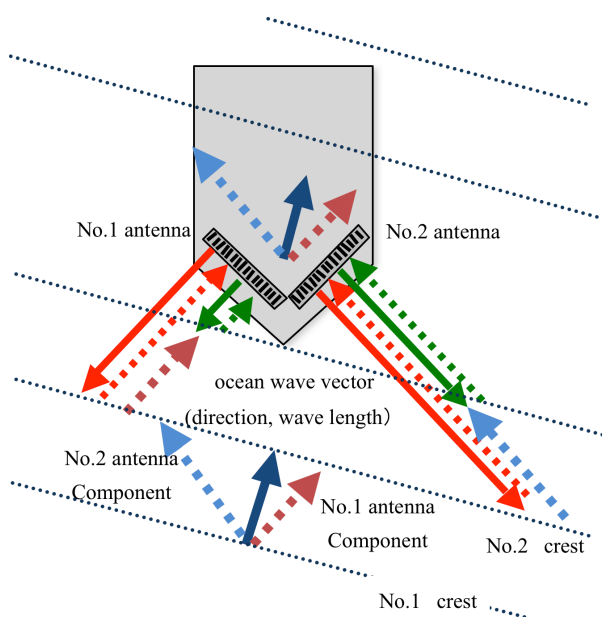


Fig.3 Illustration for estimating wave information.

また、90度で配置された2つのアレーアンテナに赤色矢印として波頭2からの反射信号、緑色矢印として波頭3からの反射信号を示します。各信号出力をベクトル合成することによって、波向と波長を推定できます。

### 2.3 計測方法

FM-CW レーダーによって波浪波頭付近の水粒子運動の速度計測することで波高を推定する方法の概念図を Fig.4 に示します。海水面付近における波浪による水粒子運動の水平速度  $u$  および垂直速度  $w$  は、波振幅  $a$ 、角周波数  $\omega$ 、波数  $k$ 、波周期  $T$ 、重力加速度  $g$  とすると、

$$u = a \omega \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$w = -a \omega \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi/T \quad (5)$$

$$T = \sqrt{2\pi L/g} \quad (6)$$

で与えられます。波長  $L$  は既に計測されていることから波周期  $T$  および波浪の角周波数  $\omega$  が求まり、アンテナと反射点間の幾何学的な関係により波浪波頭付近の水粒子運動の水平速度  $u$  が求まり、最終的に波浪の波振幅  $a$  (波高  $H = 2 \times a$ ) が得られることとなります。

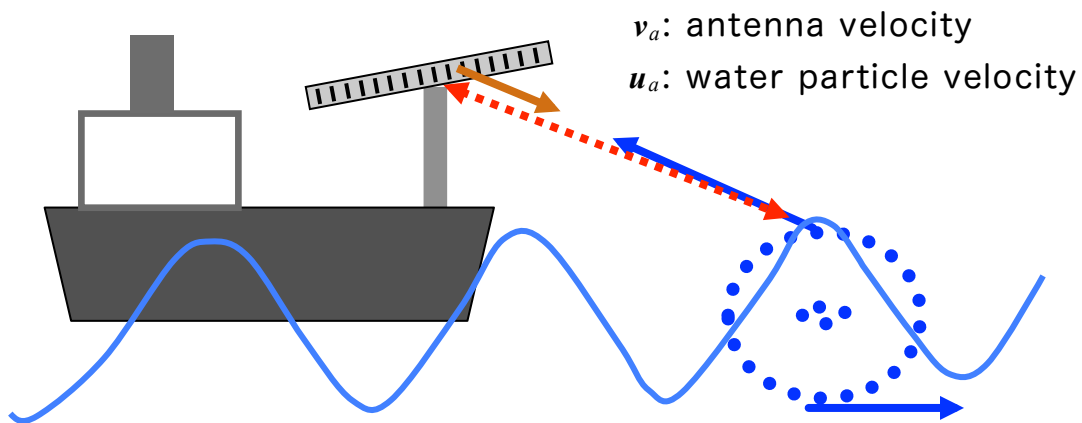


Fig.4 Velocity of water particle movement.



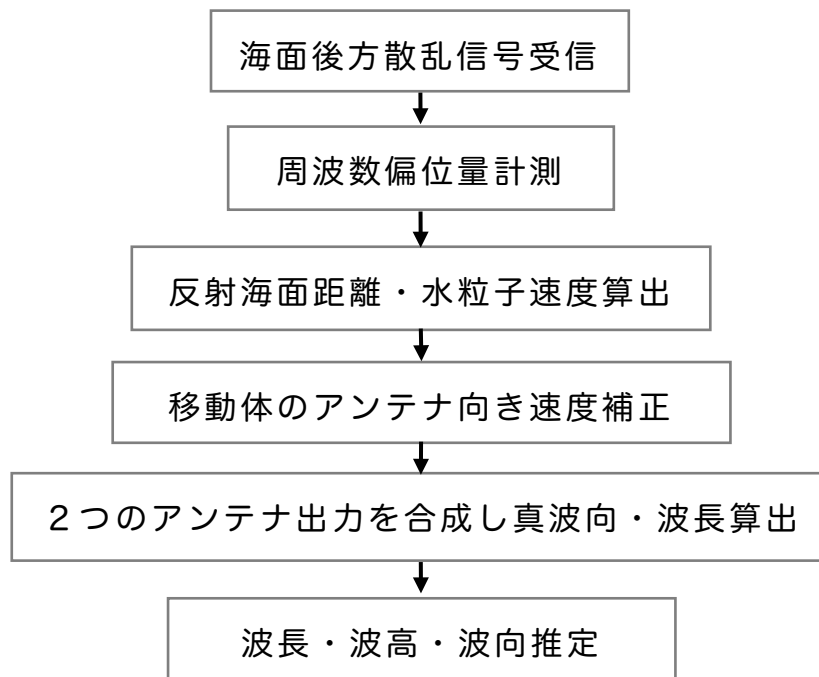


Fig.5 Calculation flow diagram.

波浪情報計測の過程順序を分かりやすく示すために、波浪情報の推定フローを Fig.5 に示します。付近海域の波浪から後方散乱した信号はアレーアンテナによって受信信号として受け取られます。その後、復調器によって各時刻における受信信号の周波数偏移量を計測します。この周波数偏移量は、卓越した反射信号であるそれぞれの波頭付近における水粒子のアンテナ方向に対する水粒子運動の速度成分によるドップラー効果の結果です。しかし、アンテナで計測された水粒子運動のアンテナ向きの速度には移動体の移動速度および波浪による動揺速度が含まれており、アンテナ直上に設置されたアンテナ移動速度  $v_a$  を計測する装置（GPS 精密速度装置、慣性航法装置などの速度センサー）によって各2つのアンテナ向きの移動速度を計測し、計測結果を用いて補正することによって正確な水粒子運動のアンテナ向き速度が求められます。

## 2.4 数値計算による検証

### 2.4.1 受信信号強度

受信信号電力  $P_r$  は、送信信号電力  $P_t$ 、アンテナゲイン  $G$ 、波長  $\lambda$ 、反射体のレーダー散乱面積  $\sigma$ 、アンテナターゲット間の距離を  $d$  とすると、以下のレーダー方程式から求まります。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 d^4}$$

(7)

海面のような広がりのある散乱体では、単位面積あたりのレーダー散乱面積である規格化後方散乱面積を用い反射点付近海面から反射波がゆらいでいることを表しますが、ここでは波浪を正弦波とした簡易計算を行うため、この付近海面のゆらぎに寄らず海面上の反射点におけるレーダー散乱面積  $\sigma$  を散乱係数で求めます。反射点における波面に対するミリ波の入射角と反射角を  $\theta_0$  と  $\theta_1$  とした場合、散乱係数  $\alpha$  は以下の式で得られます。

$$\alpha \propto (\cos\theta_0 \cos\theta_1)^2 \quad (8)$$

### 2.4.2 反射信号の計算

一般的な車載 FM-CW レーダー諸元を Table 1 に、深海波パラメータを Table 2 に示します。アンテナは平均海面上高さ 10m に固定し移動しないこととし、波浪はレーダーアンテナに対して正面から接近する状態とします。

Table 1 Parameters of FM-CW Radar.

Radar parameters	-
antenna height (m)	10.0
antenna beam width (horizontal) (deg.)	10.0
antenna beam width (vertical) (deg.)	40.0
transmitted frequency(GHz)	24.0
sweep band width (GHz)	1.0
sweep time (ms)	10
range (m)	27.5- 300.0

Table 2 Parameters of ocean wave.

wave parameters	-
form	sinusoidal wave
Height (m)	1.0
length (m)	100.0
period (s)	8.0
speed (m/s)	12.5
$u_{\max}$ (m/s)	0.4

反射信号を算出するため、まずアンテナから水平距離 10m 間隔で区切り、(3)-(6)式により海洋波の形状および水粒子速度を計算します。次に、(7)、(8)式により 10m 区切りの海洋波上の反射点とアンテナ間の距離  $d$  から各反射点における散乱係数  $A$  を求め、距離減衰とアンテナゲインを考慮して受信信号電力を算出します。最後に、反射海面におけるアンテナ向きの水粒子運動速度  $u_a$  を求めます。

#### 2.4.3 計算結果に対する考察

Fig.6 (a)-(c)にアンテナから海面反射点間の伝搬時間に対する波浪形状、反射点付近の相対反射信号強度、アンテナ向きに対する水粒子運動速度をそれぞれ示します。Fig.6(a)と(b)から、波浪の波頭 (crest) と最大散乱係数の位置を示す位置は約 1/4 波長ずれているがその時間間隔はほぼ波長に相当する電波伝搬時間 ( $L/C$ :  $C = 3 \times 10^8$  m/s) と一致しているために、最大散乱係数を有する信号がその周囲の受信信号と比較して最も卓越した信号強度を示すことが考えられ、最大散乱係数を示す受信信号間の時間差を計測することで波長  $L$  が求められます。

また、Fig.6(a)と(c)から、アンテナ向きに対する水粒子運動の最大速度はほぼ波頭位置と一致しており、反射信号の最大周波数偏移量を計測することで、アンテナと反射点間の幾何学的な関係から波頭付近における水粒子運動の水平速度が得られ、これより波高  $H$  も求められます。

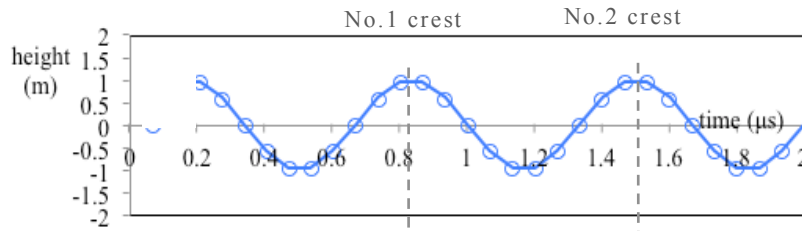


Fig.6(a) Instantaneous ocean waveform.

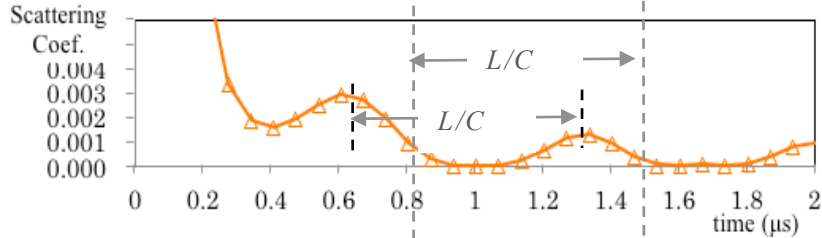


Fig.6(b) Instantaneous scattering coefficient.

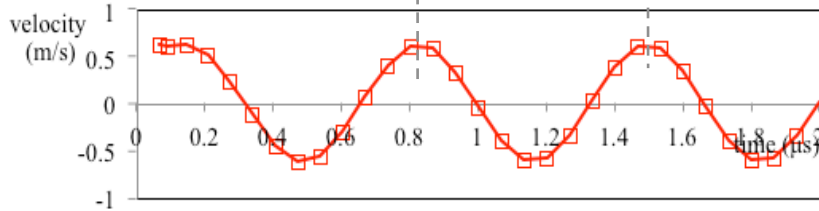


Fig.6(c) Instantaneous water particle velocity to antenna.

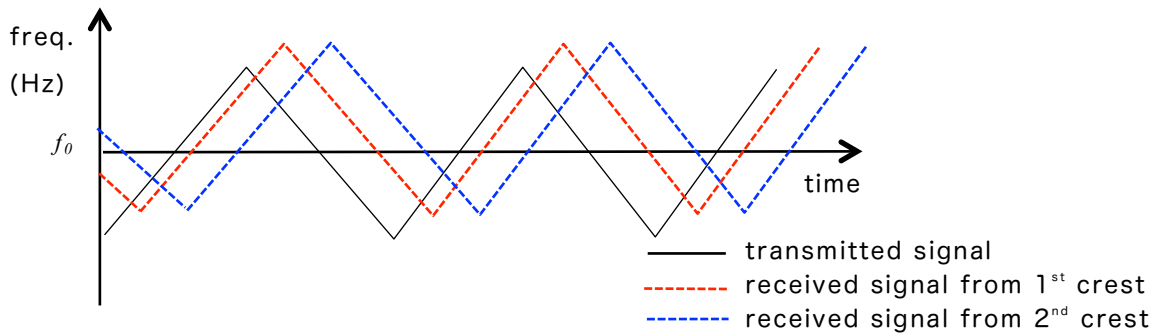


Fig.7(a) Reflected signals frequency of transmitted and received signals from two adjacent crests.

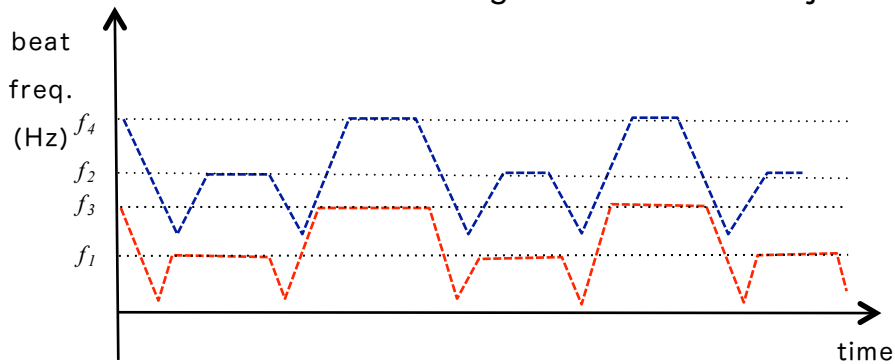


Fig.7(b) Reflected signals frequency of mixer output signals from two adjacent crests.

上述の相対反射強度と周波数偏移が受信 FM-CW 信号およびミキサー出力のビート信号でどのように振る舞うか概念的に Fig.7(a), (b)に示す. Fig.7(a)は, 最大相対反射強度で最大周波数偏移を有する2つの波頭からの反射信号の時間変化を示します. Fig.7(b)はそれぞれの信号をミキサー出力したビート信号を示す. 同図(b)より  $(f_2 + f_1)$  と  $(f_4 + f_3)$  から波長 ( $L$ ) が,  $(f_2 - f_1)$  と  $(f_4 - f_3)$  から波高 ( $H$ ) を求めることができます.

ここでは, 安価で簡易な車載用 FM-CW レーダーを洋上移動体に設置することで, 移動体付近海面の波浪情報を計測するための一手法を提案し, 簡易な数値演算結果より反射信号の特徴を用いて受信信号から波浪情報が計測できることを示し, 当初の目的を果たしたと言えます. ただし, 本試みは簡易な数値演算結果であることから, 精度良い数値演算を用いて受信信号を模擬し更に精度良い成果を得ることによって計測精度の検証, その上で実験による検証を行う必要があります.

### 3. BFSK-CW レーダーによる波浪計測

#### 3.1 レーダーと波浪情報

BFSK (Binary Frequency Shift Keying) 方式 CW レーダーとは別名「二周波CWレーダー」と呼ばれ、二つの異なる周波数を交互に送信し、目標物で反射した受信信号と送信信号レプリカを混合 (mixer) したビート信号を生成し、このビート信号を解析することにより送信アンテナ-目標物間距離および目標物のアンテナ向きの移動速度を測定するレーダー方式で、Fig.8 にそのフローチャートを示します。また、Fig.9 に BFSK 方式 CW レーダーの送信信号波形を示します。

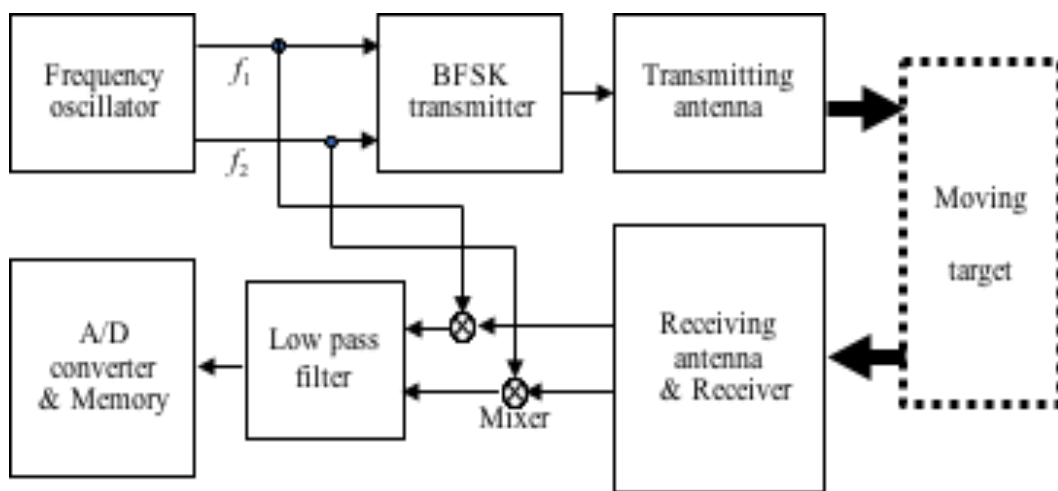


Fig.8 Flow chart of BFSK-CW Radar.

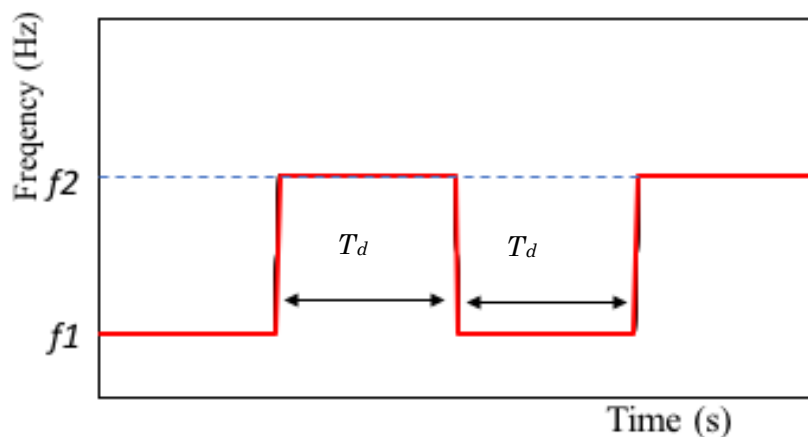


Fig.9 BFSK signal.

BFSK 方式 CW 信号では、2つの送信信号周波数を  $f_1$  及び  $f_2$ 、周波数差を  $\delta f = (f_2 - f_1)$ 、各周波数の継続時間を  $T_d$ 、また繰り返し時間間隔を  $2T_d$ 、電波伝搬速度を  $C$  とします。

次に、本方式を用いて目標物の距離および移動速度を求める手法を述べます。そこで送信信号  $s(t)$  は、

$$s_1(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad 0 < t \leq T_d \quad (9)$$

$$s_2(t) = A_1 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2), \quad T_d < t \leq 2T_d \quad (10)$$

となります。ここで、 $A$  を信号強度、 $\varphi_1, \varphi_2$  を 0、距離  $R$  ( $t=t_0$  における距離を  $R_0$ )、移動速度  $v$  で接近する目標物からの反射信号は往復の伝搬時間  $2R/C$  だけ時間遅れを生じ、さらに、それぞれの送信周波数に対して  $f_{d1} = 2vf_1/C$ 、 $f_{d2} = 2vf_2/C$  だけ周波数がドップラーシフトします。よって、受信信号  $r(t)$  は、

$$r_1(t) = A_2 \sin\left\{2\pi(f_1 + f_{d1})t - \frac{4\pi f_1 R_0}{C} - 2\pi f_{d1} t_0\right\}, \quad 0 < t \leq T_d \quad (11)$$

$$r_2(t) = A_2 \sin\left\{2\pi(f_2 + f_{d2})t - \frac{4\pi f_2 R_0}{C} - 2\pi f_{d2} t_0\right\}, \quad T_d < t \leq 2T_d \quad (12)$$

となり、 $\delta f \ll f_1$ 、 $\delta f \ll f_2$  であることから  $f_{d1} \cong f_{d2} = f_d$  とみなし、さらにカットオフ周波数を  $f_c \ll f_1$ 、 $f_c \ll f_2$  とする低域通過フィルター (Low Pass Filter: L.P.F.) によって高周波成分である  $2f_1$ 、 $2f_2$  周波数成分はその後の L.P.F. で除去されます。次に、周波数  $f_1$  との mixer 出力信号は、

$$m_{f11}(t) = A_3 \sin\left\{2\pi(f_d)t - \frac{4\pi f_1 R_0}{C} - 2\pi f_d t_0\right\}, \quad 0 < t \leq T_d \quad (13)$$

$$m_{f12}(t) = A_3 \sin\left\{2\pi(\delta f + f_d)t - \frac{4\pi f_2 R_0}{C} - 2\pi f_d t_0\right\}, \quad T_d < t \leq 2T_d \quad (14)$$

で与えられ、周波数  $f_2$  との mixer 出力信号は、

$$m_{f21}(t) = D \sin\left\{2\pi(-\delta f + f_d)t - \frac{4\pi f_1 R_0}{C} - 2\pi f_d t_0\right\}, \quad 0 < t \leq T_d \quad (15)$$

$$m_{f22}(t) = D \sin\left\{2\pi(f_d)t - \frac{4\pi f_2 R_0}{C} - 2\pi f_d t_0\right\}, \quad T_d < t \leq 2T_d \quad (16)$$

となります。さらに、ここでも式(13), (14)と同様に  $f_d < f_c \ll \delta f$  であるから L.P.F.によって高周波成分からなる  $m_{f_{12}}(t)$  および  $m_{f_{21}}(t)$  は除去され、周波数  $f_1$  と  $f_2$  の mixer 出力信号はそれぞれ、

$$m_{f_1}(t) = D \sin\left\{2\pi(f_d)t - \frac{4\pi f_1 R_0}{c} - 2\pi f_d t_0\right\}, \quad (17)$$

$$m_{f_2}(t) = D \sin\left\{2\pi(f_d)t - \frac{4\pi f_2 R_0}{c} - 2\pi f_d t_0\right\}, \quad (18)$$

で与えられます。

各 mixer 出力に A/D 変換を施した後にデータ収録し、周波数解析を行うことによってドップラー周波数  $f_d$  が得られ、アンテナと反射目標物の幾何学的な関係から目標物の移動速度  $v$  が求まることとなります。そこで、2つの mixer 出力  $m_{f_1}(t)$ ,  $m_{f_2}(t)$  の位相差  $\Delta\phi$  は、

$$\Delta\phi = \frac{4\pi(f_2 - f_1)R_0}{c} \quad (19)$$

となり、

$$R_0 = \frac{c\Delta\phi}{4\pi\Delta f} \quad (20)$$

から、得られたドップラー周波数  $f_d$  における2つの mixer 出力の位相差  $\Delta\phi$  を求めることにより、距離  $R_0$  が得られます。

### 3.2 海洋波浪情報の計算法

海水面付近における波浪による水粒子運動の水平速度  $u$  および垂直速度  $w$  は、(3)~(6)式で与えられ、波長  $L$  は既に計測されていることから波周期  $T$  および波浪の角周波数  $\omega$  が求まり、アンテナと反射点間の幾何学的な関係により波浪波頭付近の水粒子運動の水平速度  $u$  が求まり、最終的に波浪の波振幅  $a$  が得られます。

付近海域の波浪から後方散乱した信号はアレーアンテナによって受信信号として受け取られます。その後、復調器によって各時刻における受信信号の周波数偏移量を計測します。この周波数偏移量は、卓越した反射信号であるそれぞれの波頭付近における水粒子のアンテナ方向に対する水粒子運動の速度成分によるドップラー効果の結果です。しかし、アンテナで計測された水粒子運動のアンテナ向きの速度には移動体の移動速度および波浪による動揺速度が含まれており、アンテナ直上に設置されたアンテナ移動速度を計測する装置（慣性装置などから得られる加速度を時間積分する。）によって各2つのアンテナ向きの移動速度を計測し、計測結果を用いて補正することによって正確な水粒子運動のアンテナ向き速度が求まります。



海洋における波浪状況が変化する時間はレーダーによる計測時間や洋上移動体の動揺に対して相当ゆっくりとしています。例えば、洋上において波浪観測の時間間隔は短くて10分に1回、長くて4時間に1回程度で十分です。それと比較してBFSK方式CWレーダーによる波浪計測に要する時間は長くて1秒程度であり、洋上移動体の動揺周期も1~20秒程度です。そこで、波浪観測の時間間隔は、レーダーによる波浪計測に要する時間や洋上移動体動揺周期と比べて数百倍以上長い時間であることから、レーダーによる波浪計測や洋上移動体の動揺計測結果に時間的な平滑化処理を施すことができることとなります。そこで、洋上移動体の動揺成分は平滑化により小さくなり、平滑化処理によって動揺分が取り除かれた平均速度だけが残ることとなり、これは速度計測装置を設置することで洋上移動体の平均速度成分の除去は可能となります。さらに、平滑化処理によりレーダーで計測・収集された波浪情報の雑音成分を抑制する効果も期待できるでしょう。

### 3.3 数値計算による検証

#### 3.3.1 受信信号の相対的電力スペクトル

(受信信号電力は2.3.1を参照下さい)

相対的な受信信号電力を算出するため、アンテナから水平距離を送信される24GHzの1/10波長毎(1.25mm)間隔で区切り、(3)-(6)式により海洋波の形状および水粒子速度を計算します。次に、(7)、(8)式により区切り毎の海洋波上の反射点である微小波面の傾斜角とミリ波の入射・反射角から散乱係数を求めます。さらに、(7)式の送信信号電力 $P_t=1$ と置いて微小波面中心位置とアンテナ間の往復距離 $2R$ による距離減衰を求め、アンテナ指向特性によるゲインを考慮し受信信号電力を算出します。そこで、これら各波面位置の距離伝搬減衰及び波面による散乱減衰による信号強度、水粒子運動による周波数変移、および伝搬に伴う位相変移量から、区切られた各微小波面から反射された瞬時受信信号が得られることとなります。

次に、これらの瞬時受信信号における電力密度スペクトルを得るため、各微小波面位置からの全ての反射信号を求めた後に、単位周波数当たりの総受信信号電力値を求め、それを連続波受信信号の各周波数に対する瞬時の相対的電力密度スペクトルとして以下の数値計算で用います。

#### 3.3.2 数値計算結果および考察

数値計算に用いられる造波波浪パラメーターをTable 3に示す。数値計算は送信信号をBFSKとして2.3で記載した手法に基づいて実施しました。Fig.10に一例として実験No.2(短周期・高波高)における数値計算によって求めた相対電力密度スペクトルの結果を示す。図中には、アンテナ直下の波の相位が0, 1/4, 1/2, 3/4波長となる4種類の結果、およびこれらの平均値(赤色線・三角印)の計5種類を示します。

Table 3 Parameters of artificial waves.

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
$H$ : height (m)	0.07	0.12	0.04	0.07	0.00
$L$ : Length (m)	6.51	6.51	15.49	15.49	-
$T$ : Period (s)	2.08	2.08	4.95	4.95	-
speed (m/s)	2.8	2.8	3.04	3.04	-
$u_{max}$ (m/s)	0.11	0.19	0.06	0.11	-
$f_{dmax}$ (Hz)	17.5	30.5	10.0	17.5	-

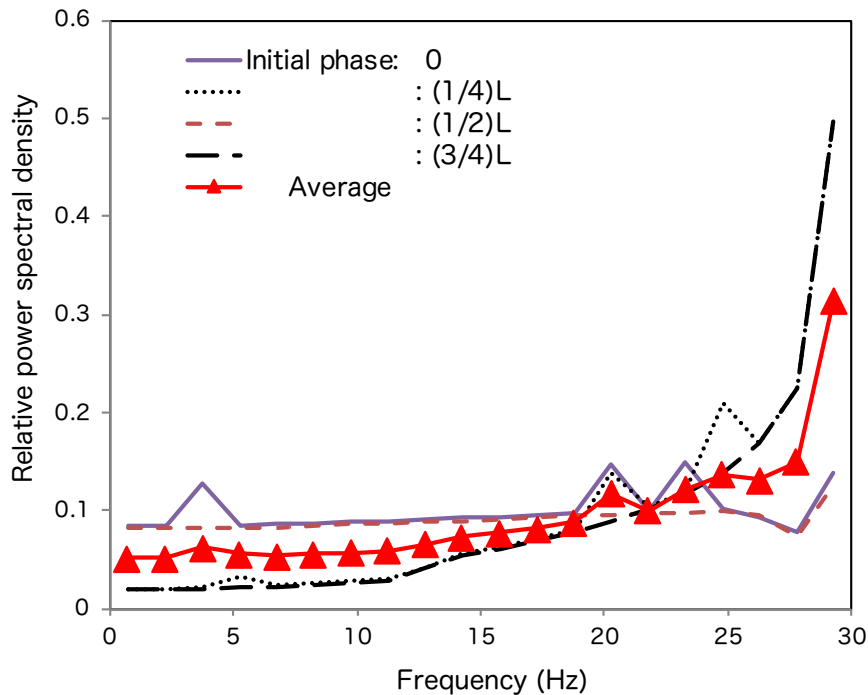


Fig.10 Numerical relative power spectrum density by No.2 wave parameter.

Fig.10 から、0 と 1/2 波長 ( $L$ )、1/4 と 3/4 $L$  のそれぞれ 2 つの波位置での相対受信電力密度の結果が重なっており、これは位相が 1/2 $L$  ずれているため同じ微小波面位置の水粒子運動の速度が正負で異なるが同じ絶対値を有するためと考えられます。また、相対受信電力密度スペクトル値は計測可能な最大周波数付近で最大値を示しています。これらの 2 つの傾向は No.1 から No.4 の波浪パラメータを用いた全ての計算結果で同じ傾向を示しました。

上記のことから、波浪の進行に伴う相対受信電力密度の変位を調べるために、波位置が 0 から  $1/2 L$  の間をより詳細に求める必要があります。そこで、0 から  $1/2 L$  の間を  $1/16 L$  毎に 8 分割することで、より詳細な相対受信電力密度の変位を求めます。Fig.11 に一例として、実験 No.3（長周期・低波高）における 0 から  $7/16$  波長までを  $1/16$  波長で分割した 7 つの波位置における数値計算により求めた相対受信電力密度スペクトル、それに加えて平均値（水色線・菱形）も示します。

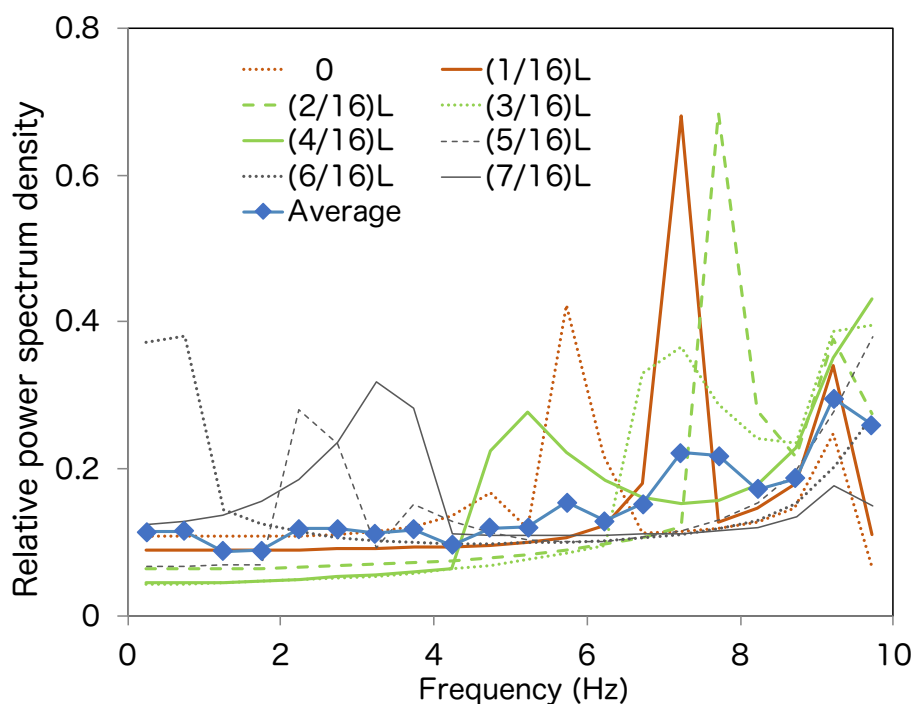


Fig.11 Numerical relative power spectrum density by No.3 wave parameter.

実験 No.3 における水粒子の最大速度は  $0.06\text{m/s}$  で、最大トッパー周波数偏移量は  $10.0\text{Hz}$  であり、Fig.11 における相対受信電力密度スペクトルの最大値が  $10\text{Hz}$  付近であることから、本 BFSK 方式 C-W レーダーの受信信号スペクトルの最大値を計測することによって水粒子運動の水平速度がわかり、波周期  $T$  が計測できれば(3)~(6)式により波高  $H$  が得られることとなります。

次に、他の波浪パラメーターで計算される結果について同様の傾向が見られるか調べるために、Fig.11 で示された相対受信電力密度スペクトルの平均値の変動について実験 No.1~No.4 まで比較した結果を Fig.12 に示します。

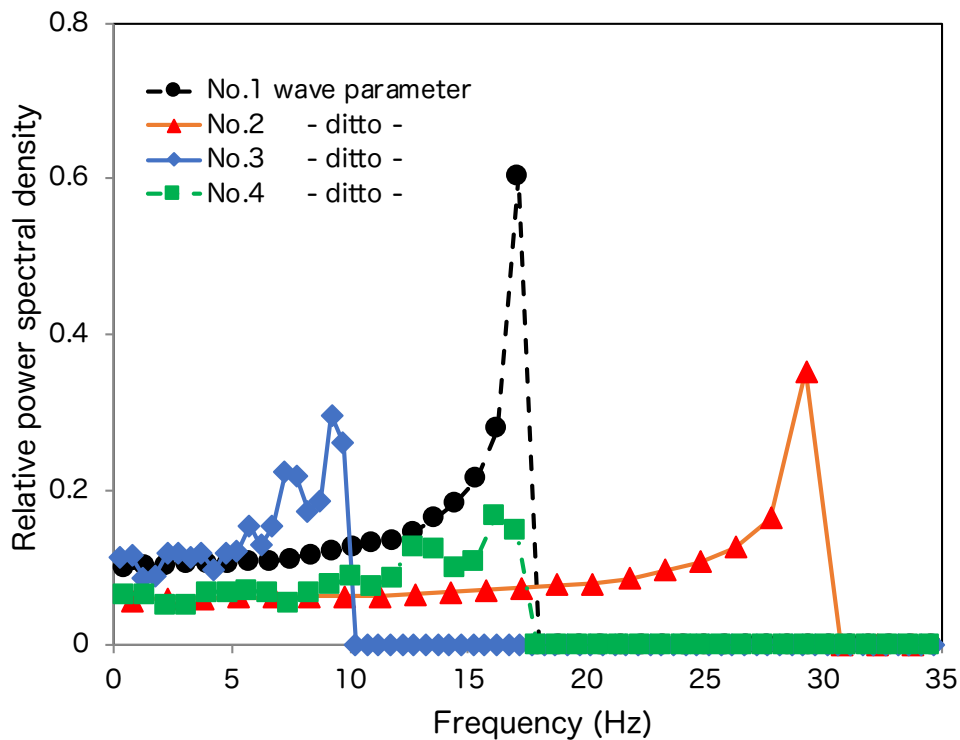


Fig.12 Numerical results of average frequency characteristics on received signal strength.

Fig.12 では4つの波パラメーターにより生成された波浪からの受信信号を数値計算から求めた結果であり、各実験番号の計算結果が異なる最大周波数（右端）で終わっているのは、受信信号のミキサー出力を低域通過フィルター処理した結果にそれ以上の周波数成分が含まれないことを意味しています。Fig.12 から、全ての実験 No.の波から得られた平均相対受信電力密度スペクトルは最大周波数成分が最大値を示しており、平均相対受信電力密度スペクトルが最大を示す周波数から水粒子運動の水平速度がわかり、水粒子運動の水平速度および波周期から波高が計測できる可能性を示しています。

ここでは、安価で簡易な車載用 FM-CW レーダーを洋上移動体による波浪計測に応用することを目的とし、BFSK 方式 FM-CW レーダーの波浪計測法を示し、数値計算ではあるが受信信号の電力密度スペクトル最大値によって水粒子運動の水平速度に近い値を示していることを述べてきました。

今回の実験で用いた BFSK レーダーは、残念ながら陸上の車速度を計測対象としたプロトタイプレーダーであることから、計算結果の検証を行うには十分な周波数分解能が実現できていません。そこで、洋上移動体における簡易な自動波浪情報計測の実現を目指し、次は低周波数に対応した BFSK レーダーを開発し、十分な周波数分解能を有する実験装置で数値計算結果の検証を試みることを考えています。

## 4. 造波水槽による実験

### 4.1 実験概要

実験は2017年11月22日及び24日の2日間にわたり、神戸大学海事科学部総合水槽の波浪浅水槽にてプロトタイプ BFSK-CW 方式レーダーを用いて行いました。波浪水槽は長さ50m、幅5mで設置した造波装置によって波を発生し、波向きはレーダー側へ進む方向（向い波）及びレーダーから遠ざかる方向（追い波）としました。

実験の概要として、Fig.13 に水槽及びレーダーの配置を示します。アンテナの垂直ビーム幅：30度、アンテナ俯角：20度およびアンテナ高：5mから得られる垂直方向のビーム照射範囲はアンテナ直下より7~57mの範囲で、送信電磁波の中央は14mの距離となります。水平方向のビーム照射範囲はアンテナから14mお距離で水槽の幅となります。次に、Fig. 14 に実験水槽及び実験装置の取り付け位置、Fig.15 に造波装置前面に設置した電波吸収材を示し、加えて参考までに、装置により造られた波の波高及び周期を計測するための観測窓での計測の様子を Fig.16 に示します。

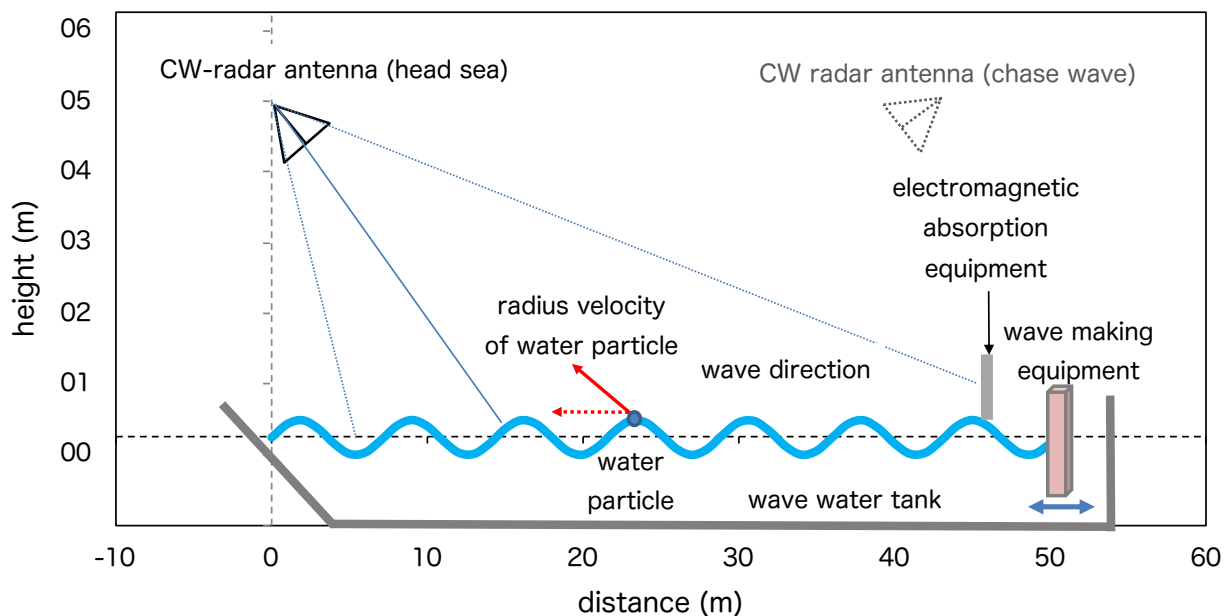


Fig.13 Overview of experimental equipment.



Fig.14 Experimental landscape of ship model basin and BFSK-CW Radar.



Fig.15 Electromagnetic wave absorption material in front of wave-making equipment.

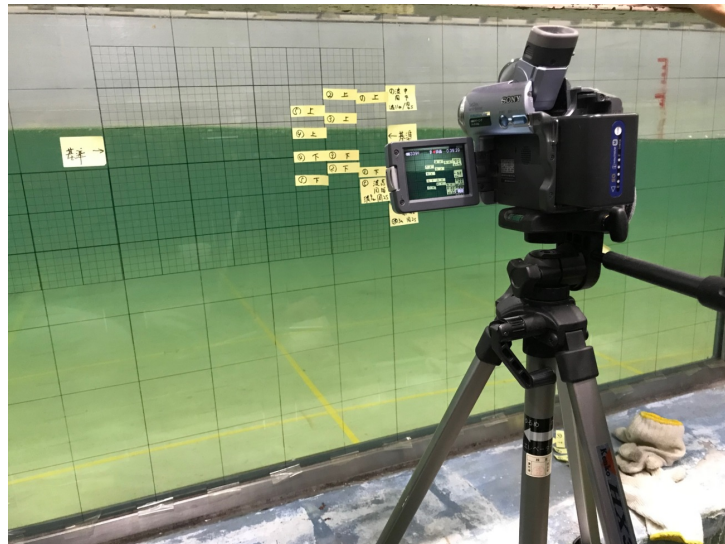


Fig.16 Observation window to measure wave height and period.

#### 4.2 レーダーおよび波浪パラメーター

Table 4 に本実験に用いた BFSK レーダーのパラメーター，また Table 5 に実施した各実験における波浪のパラメーターをそれぞれ示します．計測はほぼ同じ波浪パラメーターに対して，向い波と追い波について実施しました．

Table 4 Parameters of BFSK-CW Radar.

Radar parameters	
$h$ : antenna height (m)	4.55
antenna horizontal beam width (deg.)	20.0
antenna vertical beam width (deg.)	30.0
$f_o$ : transmitted frequency (GHz)	24.0
$\delta f$ : sweep band width (KHz)	100.0
$2T_d$ : duration time ( $\mu$ s)	31.25
$R$ : measuring range (m)	27.5 - 300.0

Table 5 Parameters of artificial waves.

Experimental number	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
$H$ : height (m)	0.0	0.10	0.05	0.10	0.03	0.11
$T$ : Period (s)	0.0	5.0	5.0	2.0	2.0	4.0
$u_{max}$ (m/s)	-	0.15	0.08	0.18	0.05	0.17
$f_{dmax}$ (Hz)	-	24	12	29	9	27

上記 6 回の実験は周期および波高別に見ると，それぞれは

実験番号      波状態  
 No.1:      波浪無い状態，  
 No.2:      長周期・高波高，  
 No.3:      長周期・低波高，  
 No.4:      短周期・高波高，  
 No.5:      短周期・低波高，  
 No.6:      中周期，高波高，

と見ることができる．

レーダーから出力される低域信号は量子化ビット：16，サンプリング周波数：2048Hz の A/D 変換器を用いて 1 秒毎にデータ収録を行い，各実験とも 30 分間に渡って収録いたしました．



## 4.3 実験結果および考察

### 4.3.1 周期・波高別の結果

1秒毎に得られた2048個のCWレーダーからの出力値を高速フーリエ変換し、毎秒の出力データの周波数特性である相対パワースペクトル密度を求め、30分間平均を行った結果で各実験結果を比較することといたしました。そこで、本解析における周波数分解能は1Hz、水粒子速度分解能は0.06m/sとなります。以下に各実験における周期・波高別の30分間の平均相対パワースペクトル密度を追い波と向い波を同じ図で示します。

図番号	実験番号	波の状態
Fig.17	No.1	波浪無い状態,
Fig.18	No.2	長周期・高波高,
Fig.19	No.3	長周期・低波高,
Fig.20	No.4	短周期・高波高,
Fig.21	No.5	短周期・低波高,
Fig.22	No.6	中周期, 高波高,

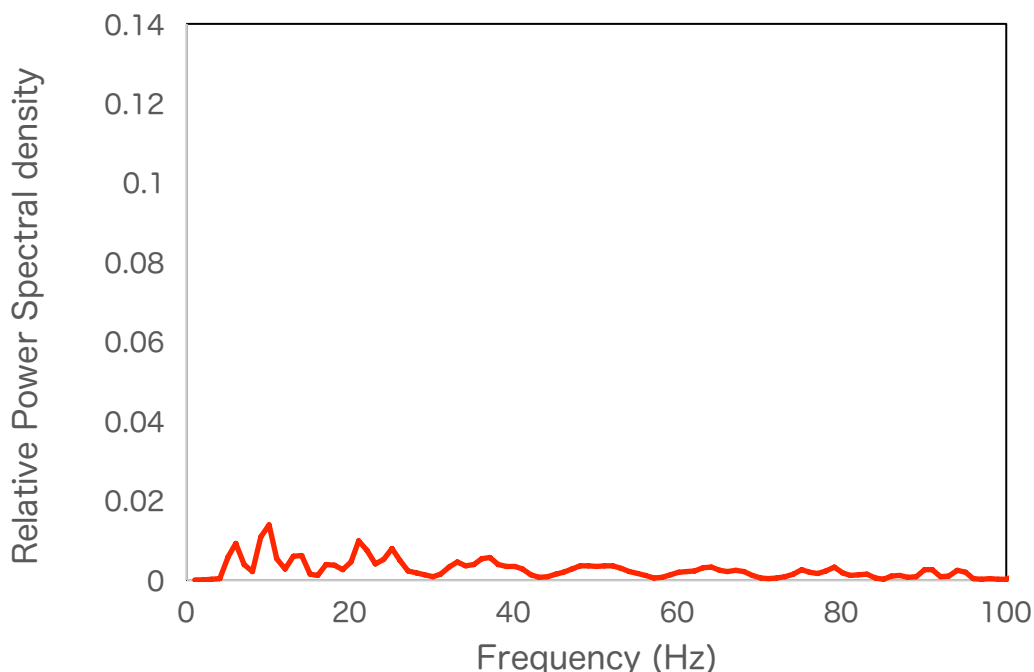


Fig.17 Relative power spectral density under no wave condition.  
(Experimental No.1 results)

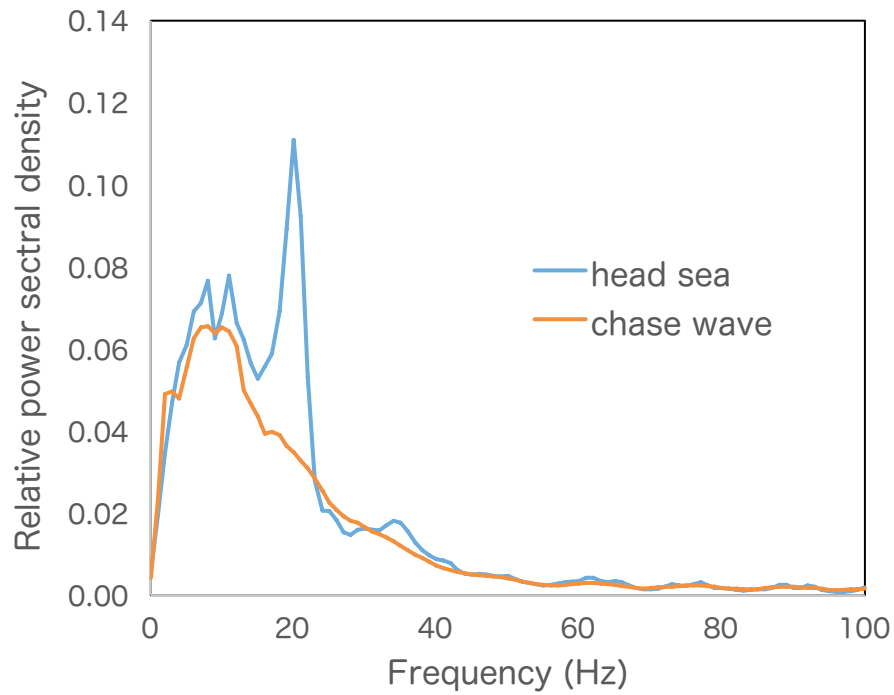


Fig.18 Relative power spectral density under high wave height and long period conditions.  
(Experimental No.2 results, height:0.1 m, period:5.0s)

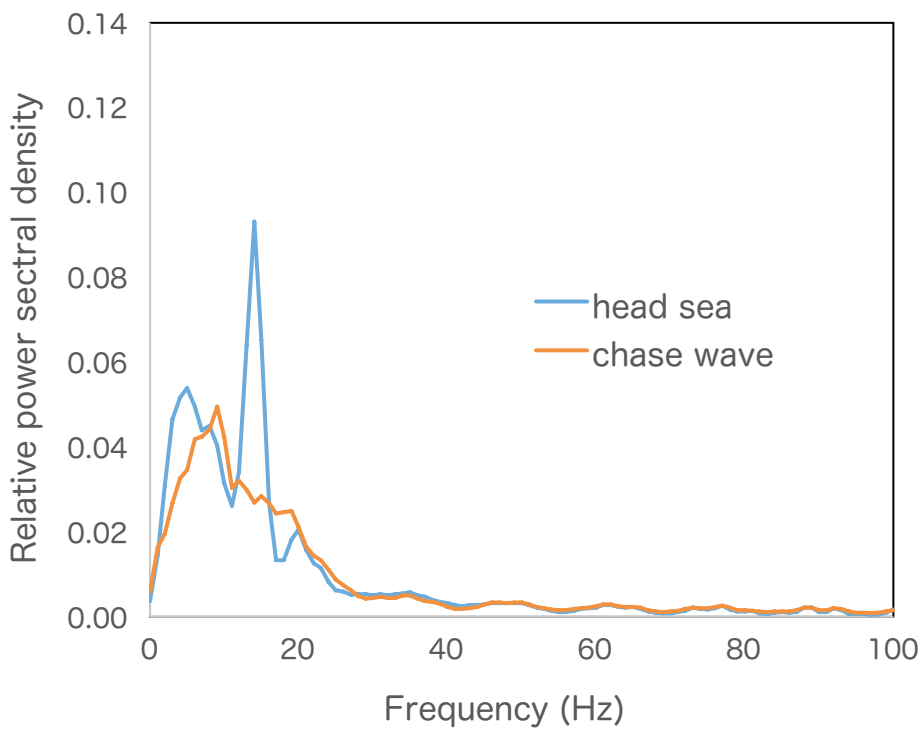


Fig.19 Relative power spectral density under low wave height and long period conditions.  
(Experimental No.3 results, height:0.05m, period:5.0s)

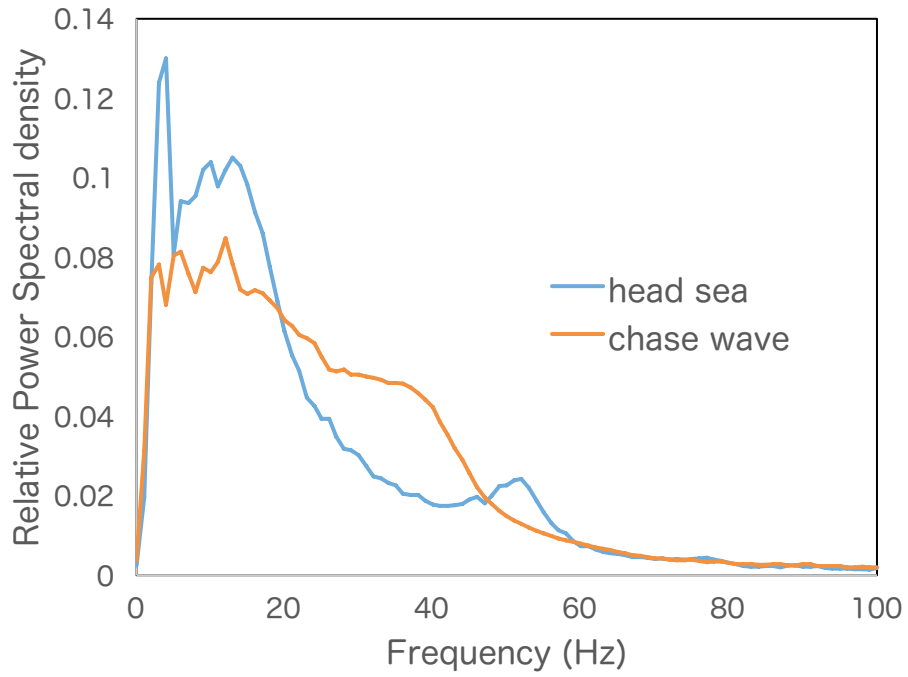


Fig.20 Relative power spectral density under high wave height and short period conditions.  
 (Experimental No.4 results, height:0.1m, period:2.0s)

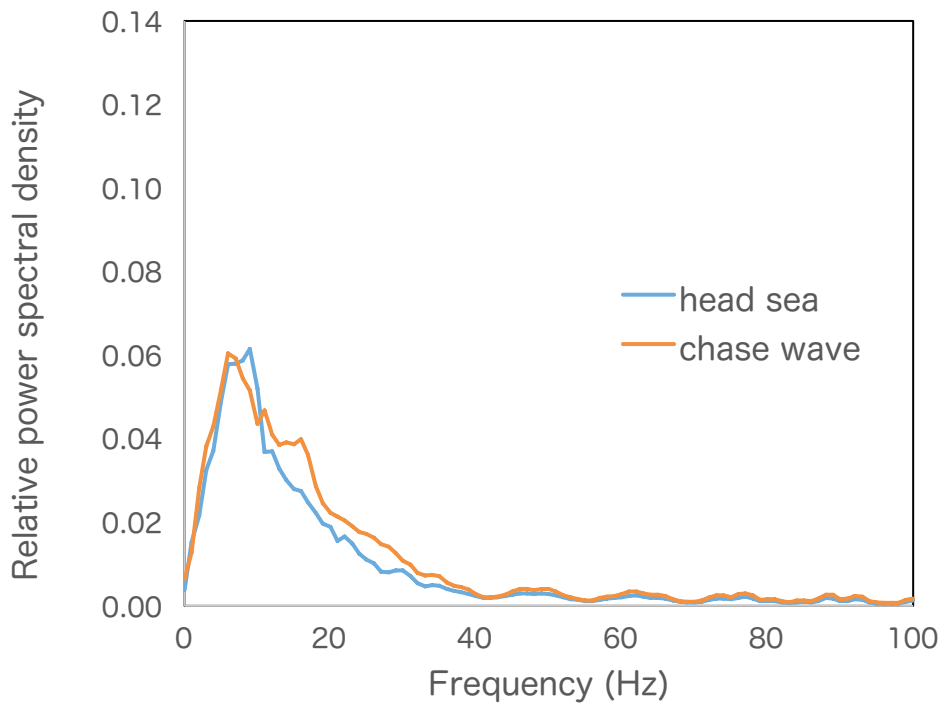


Fig.21 Relative power spectral density under low wave height and short period condition.  
 (Experimental No.5 results, height:0.03m, period:2.0s)

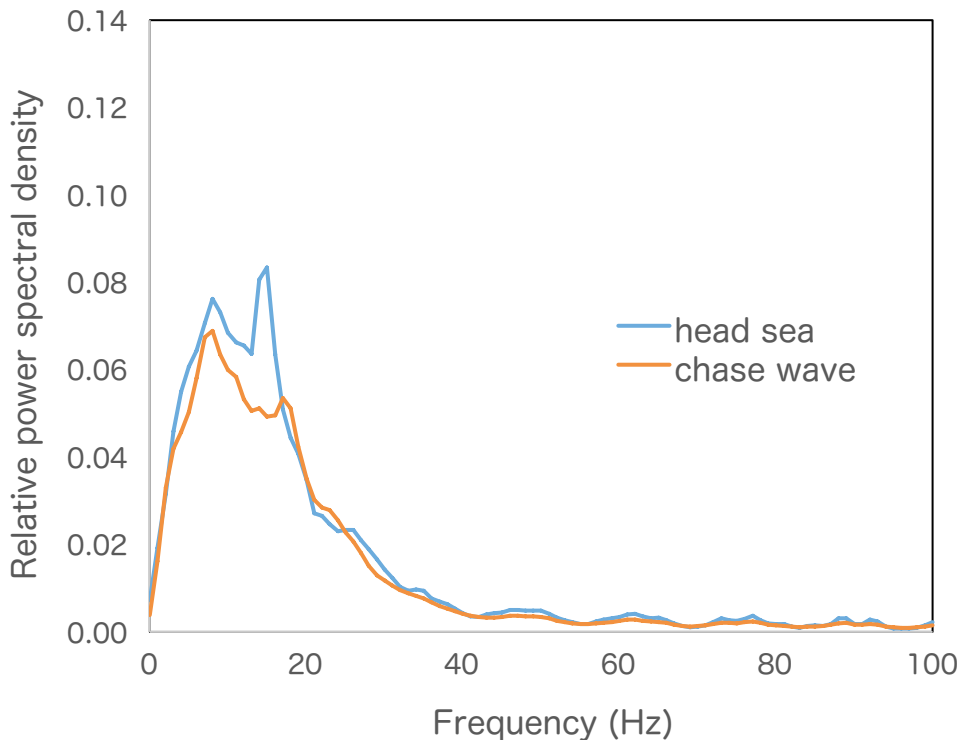


Fig.22 Relative power spectral under high wave height and middle period conditions.  
(Experimental No.6 results, height:0.11m, period:4.0s)

Fig.17の波のない状況では，CW-レーダー出力の相対パワースペクトル密度は非常に小さな値を有しており，水粒子運動が無いことを示しています。Fig.18～22の結果からは，向い波（head sea）の相対パワースペクトル密度にインパルス的な値が見られるが，追い波（chase wave）にそれらが見られないことから，向い波の場合にはレーダーが向いている方向に造波装置の移動造波板が存在しおり，造波版の前面に電波吸収材を設置していたにも関わらず移動造波板の影響が現れたことも考えられます。実験場所が屋内であったことから，電磁波が複雑に反射することが考えられることから，そのインパルス的な振舞いの要因を特定することは困難です。

しかしながら波浪形状とその水粒子運動から考え，電磁波の反射物理的な特性を考えると，相対パワースペクトル密度の周波数特性は滑らかに変動することにより，インパルス的な振舞いは造波水槽特有のものと考えられ，Fig.18～22の結果における相対パワースペクトル密度の周波数特性を考える際に，インパルス的な振舞いを無視することは差し支えないものと考えます。

### 4.3.2 追い波・向い波別の結果

次に追い波と向い別に全ての実験による結果を同じ図に示します。

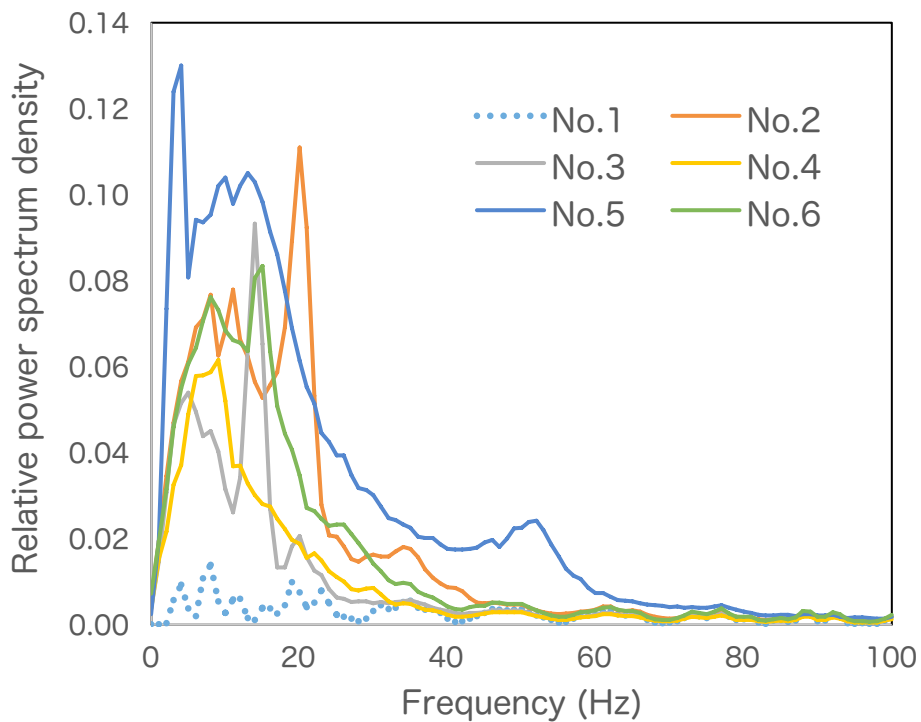


Fig.23 Relative power spectral density under head sea condition.

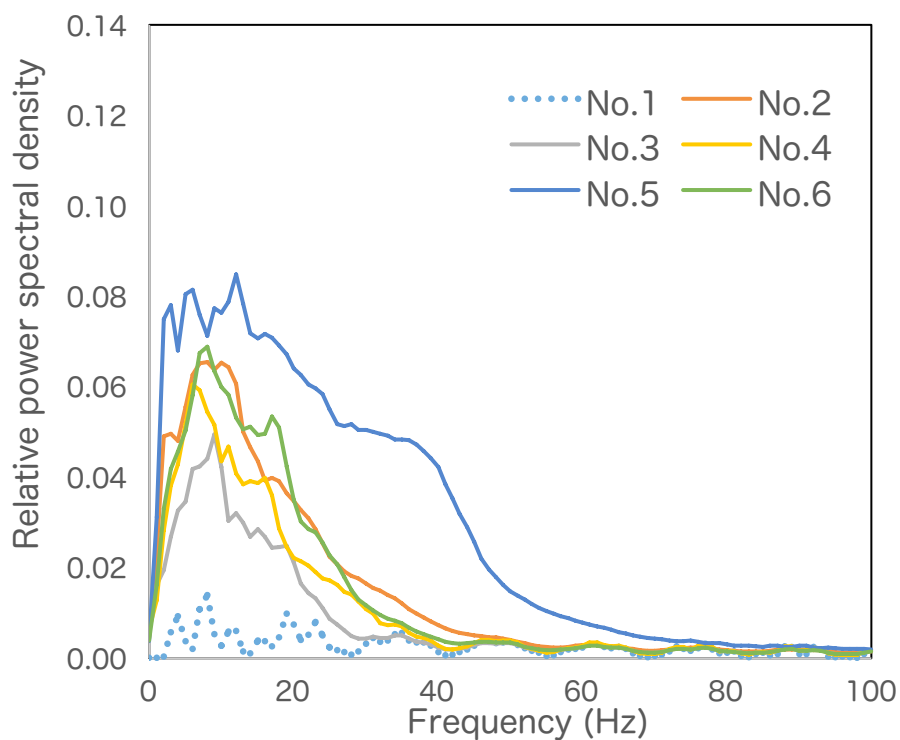


Fig.24 Relative power spectral density under chase wave condition.

追い波と向い波別に示した Fig.23 および 24 において、インパルス的な振舞いを無視すると、相対パワースペクトル密度の最大値を示す周波数（最大スペクトル密度周波数： $f_{dmax}$ ）は各波浪条件によって異なっていることがわかり、最大スペクトル密度周波数を計測することで、海洋波浪の水粒子運動速度を推定できる可能性が見受けられます。

#### 4.3.3 水粒子運動速度の推定

上記の結果から、各波浪条件における実験結果から最大スペクトル密度周波数（ $f_{dmax}$ ）を求め、波浪の計測結果から得られる水粒子運動のアンテナ向きの最大移動速度に対応する周波数偏移量（ $\Delta f$ ）を追い波と向い波別に Table6 に示します。

Table6 Relationship between  $f_{dmax}$  and  $\Delta f$ .

Experimental number	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
H: height (m)	0.0	0.10	0.05	0.10	0.03	0.11
T: Period (s)	0.0	5.0	5.0	2.0	2.0	4.0
head sea : $\Delta f$ (Hz)	-	8	5	13	9	8
chase wave : $\Delta f$ (Hz)	-	8	9	12	6	8
$f_{dmax}$ (Hz)	-	29	14	32	10	32

次に、向い波と追い波別に最大スペクトル密度周波数（ $f_{dmax}$ ）と最大移動速度に対応する周波数偏移量（ $\Delta f$ ）の関係を Fig.25, 26 に、また向い波と追い波合わせたものを Fig.27 に示します。

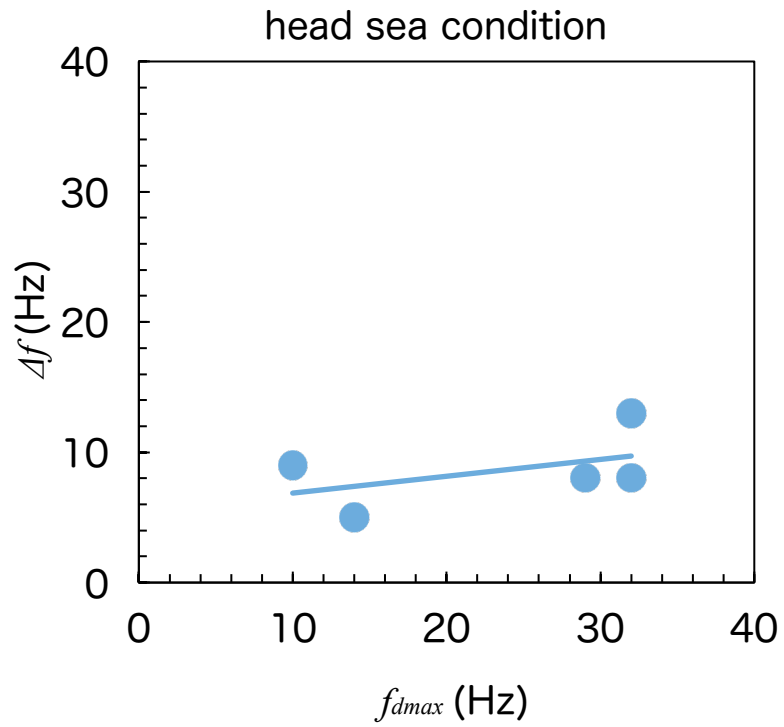


Fig.25 Relationship between  $f_{dmax}$  and  $\Delta f$  and regression under head sea condition.

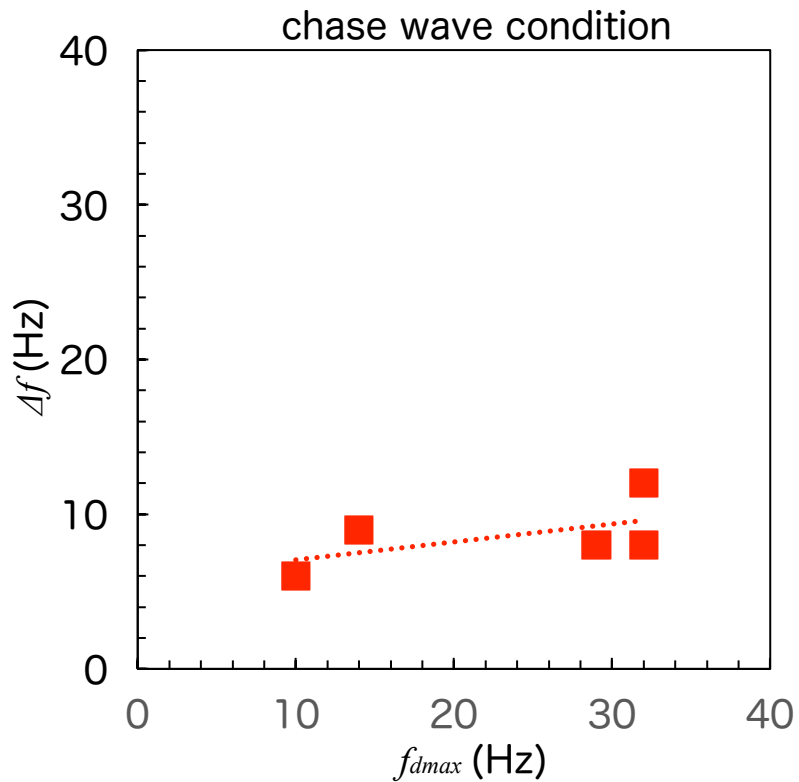


Fig.26 Relationship between  $f_{dmax}$  and  $\Delta f$  and regression under chase wave condition.

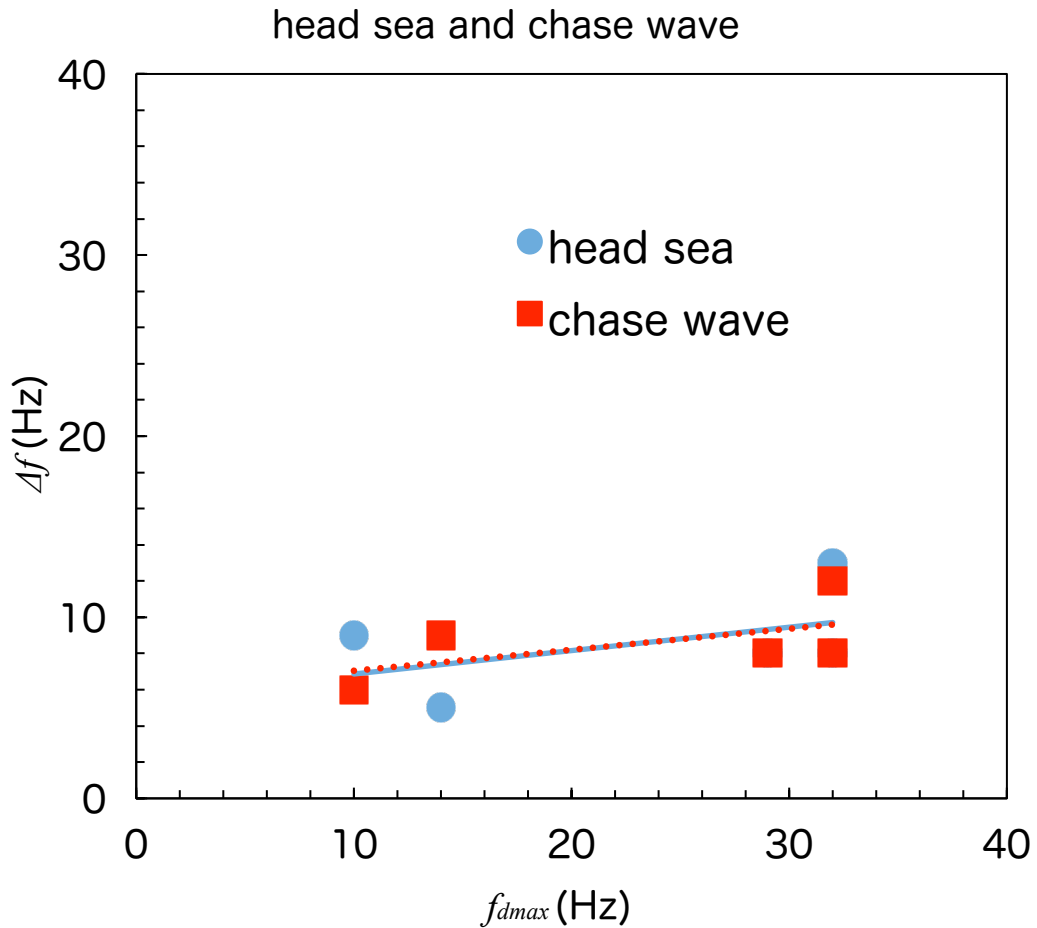


Fig.27 Relationship between  $f_{dmax}$  and  $\Delta f$  and regression under head sea and chase wave conditions.

これらの結果によって、向い波と追い波共に最大スペクトル周波数 ( $f_{dmax}$ ) と最大移動速度に対応する周波数偏移量 ( $\Delta f$ ) には大きな相関が見られ、さらに回帰直線もほぼ同様の傾きと切片を有していることから、CWレーダー出力から周波数解析により周波数偏移量 ( $\Delta f$ ) を求めることで、波浪の水粒子運動におけるアンテナ向きの移動速度に対応する最大スペクトル周波数 ( $f_{dmax}$ ) を精度良く推定することができることがわかりました。



## 5 まとめ

本研究は 2017 年から始められた「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」についてその研究についてまとめたものです。本年度予定していましたが、「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」および「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」につきまして、そのほとんど全てに関してほぼ順調にその成果を得ることができ、実験結果から波浪計測用に開発しました CW-レーダーによって海洋波浪の水粒子運動速度を計測する可能性が十分あることも併せて示すことができました。

最後に、今後のために本研究を進めることでより有意な成果が得られるために、次年度以降に実施が必要なことがらを以下にまとめます。

### (1) 海岸付近における実験・検証

本研究室で保有しております GPS ブイを用いて、海岸付近において CW レーダーによる波浪計測実験を行い、その結果を検証する必要があります。

### (2) 雨雪反射信号の処理

CW レーダーによる水粒子運動の移動速度計測におきまして、計測海域内に雨雪などがある場合には、その反射信号を受信することで波浪からの反射信号にとっては妨害波となることが予想されます。そこで、陸上におきまして雨雪反射信号の特徴を抽出することにより分離識別を試みる必要があります。

### (3) 移動体の動特性の解析

CW レーダーは洋上移動体に設置し、付近海域の波浪情報を自動計測することを最終目的としていることから、洋上移動体の動特性を計測することで、除去処理の可能性を探る必要があります。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 井上篤次郎，加藤雅司：船用レーダを利用した波浪解析の一方法，日本航海学会論文集，第 67 号，pp.127-135，1982.
- 6) 馬場満徳ほか 5 名：レーダー波浪観測装置，日本無線技法，No.48，pp.58-61，2005.
- 7) 池田雅也，鈴木啓介，永井千春：レーダー式波浪計の概要について，測候時報，第 81 巻，pp.S93-S100：特別号，2014.
- 8) 石田廣史，河口信義，林美鶴，上田博：ドップラーレーダーによる波浪観測 - I - 石狩湾と若狭湾での観測 -，日本航海学会論文集，第 105 号，pp.97-102，2001.
- 9) 林 昌奎：マイクロ波ドップラーレーダによる実験水槽波浪観測，日本船舶海洋工学会論文集，第 6 号，pp.65-73，2007.
- 10) 四分一浩二，江馬浩一，榎敏夫：拡大するミリ波技術の応用，島田理化技報，No.21，pp.37-48，2011.
- 11) 稲葉敬之，平井俊之：FMICW レーダーにおける移動目標物検出法，電子情報通信学会論文誌 B，Vol.J88-B，No.4，pp.795-803，2005.
- 12) 光易恒：海洋波の物理，岩波書店，pp.180-185，1995.
- 13) J.V. DiFranco and W.L. Rubin：Radar Detection，Prentice-hall，pp.446-456，1968.
- 14) 大内和夫：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎，東京電機大学出版局，pp.446-449，2004.
- 15) H. Kuze, Y. Likuza, S.T. Akeuchi and H. Yoshimori：Physical Principles of Remote Sensing, Second Edition, Cambridge University Press, pp.46-48, 2005.
- 16) Merrill I. Skolnik: Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Book Company Inc., pp.106-111, 1960.
- 17) J. V. DiFranco and W.L. Rubin: Radar Detection, Prentice-hall, pp.446-456, 1968.

## 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、参考文献 1) 及び 2) に掲載しました神戸大学海事科学部海事技術マネジメント学科（航海分野）四年の古山諒君の学部卒業論文及び中本雅也君の修士論文から多くを引用させていただきましたことを記し、在学中の両学生の努力と頑張りに対しここに厚く御礼申し上げます。