

## 2周波散乱計による波浪計測実験\*

### I. 固定プラットフォーム(観測塔) による方向スペクトル計測

徳田正幸\*\*・竹田 厚\*\*\*・渡部 勲\*\*\*\*

国立防災科学技術センター平塚支所

## Remote Sensing Experiments of Ocean Wind Waves Using an X-band Pulsed Two-Frequency Scatterometer I. Experiments of Directional Ocean Wave Spectra from a Marine Observation Tower

By

M. Tokuda, A. Takeda and I. Watabe

*Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention,  
9-2, Nijigahama, Hiratsuka, Kanagawa 254, Japan*

### Abstract

A two frequency microwave scatterometer was developed to study a technique for remotely sensing the large-scale directional ocean wind wave spectrum. The scatterometer is a coherent, pulsed two-frequency, X-band radar. The principle of this technique is based on the mechanism of Bragg type resonance between the electromagnetic beat waves whose frequency is the difference of the two transmitted signals and the ocean surface waves.

The scatterometer experiment was conducted from a marine observation tower in the sea. It is shown from typical examples that a prominent resonance appears in the cross product power spectral density of the two back-scattered signals, and gravity wave dispersion relations can be obtained by the system. Directional modulation spectra of the surface reflectivity are compared to the ocean wave spectrum derived from the capacitance-type wave gauge.

The accuracy of the experiment is the subject for a future study. So, it would be necessary to remove low frequency noises of the radar by the low cut filter, and to spread the antenna footprint by changing the height and incident angle of antenna.

---

\*この研究は、海洋開発促進費「海洋遠隔探査技術の開発研究—マイクロ波散乱計による波浪、海上強風の計測に関する研究」の一環として行われたものである。

\*\*沿岸防災第1研究室, \*\*\*平塚支所, \*\*\*\*沿岸防災第2研究室

## 1. はじめに

島国である我が国において、波浪による災害の防止はもっとも重要な課題の一つである。波浪情報は基本的には周期（波長）、波高、波向の三つの情報となる。これらの情報において、今までほとんどの場合周期と波高の観測データだけで波浪災害に関する調査がなされて来た。波向に関してどうしても必要な場合は風向のデータから推定するか、目視によるデータを用いていた。最近、港湾の防波堤の設計や漂砂の調査等において、より高い精度の波向情報が要求されるようになって来た。しかしながら、沿岸波浪観測網の現状は渡部・徳田（1984）が指摘したように、波長・波高の観測でさえ十分でなく、波向についてほとんど観測されていないことである。

このような状況から航空機及び衛星からの広域の波浪情報のニーズが高く、これに関するリモートセンシング技術の確立が強く望まれている。波浪のリモートセンシング技術は理論的には可能であることが示された。しかし測定精度やコスト的な意味すなわち実用的な意味において研究は始まったばかりであると言える。現在のところ、この技術に関して有力な全天候型（マイクロ波センサー）の方法は合成開口レーダと2周波散乱計によるものが考えられている。前者は非常に高い分解能により、波浪の伝播状況（波長と波向の情報）が画像として得られる長所があるが、短所として波高情報を得ることが容易でなく、非常に高いコストがかかることである。後者は前者に比べて低コストである長所をもつが、情報がすぐに画像として得られない短所をもつ。しかしこの短所はソフト的な工夫によってある程度解決できると思われる。このようなことから、波浪のリモートセンシング技術として2周波散乱計による方法を有力な方法と考え、その技術開発の研究を行うことにした。

本研究において、Part Iとして固定プラットフォーム（観測塔）による方向スペクトル（周期と波向の情報）の計測について議論する。これについての今までの開発研究を簡単にまとめると次のようになる。1970年代より理論的研究が始まり、計測の可能性がいろいろと議論された。最初の観測的研究はPlant（1977）によって固定プラットフォームから行われた。これは海岸の崖から連続波の方式（CW方式）のXバンドの散乱計によるものであった。Schuhler（1978）は同じ海岸でCW方式のレーダばかりでなく、Lバンドの2周波パルスレーダを用いて、波浪の方向スペクトルと表層流の観測を行った。移動プラットフォーム（航空機又は衛星）に関しては、理論的にはAlper & Hasselmann（1978）によって、実験的にはJohnsonら（1982）によって航空機を用いて行われた。これらの実験において照合観測も一応行われたが、まだ実用的なアルゴリズムが確立されていない。その大きな原因は、十分なデータの蓄積がないこと、高い精度の照合観測が常に行われていないこと、2周波散乱計の計測原理の根拠としている大きな波によるさざ波の変調機構（変調輸送関数）が理論的にも実験的にも十分に解明されていないことである。このようなことと、上述した社会的なニ-

ズに答えるために、当センターにおいては1982年にCW方式のXバンドの2周波散乱計を製作し、平塚沖波浪等観測塔で波浪計測の研究を開始した。これについてはTakedaら(1985)によって報告された。1984年にパルス(断続波)方式のXバンドの散乱計を製作し、同じ観測塔において実験を行った。本論文はこれについて議論する。本論文に入る前に、パルス方式を導入した理由をCW方式との比較により説明する。

本研究の目標は広域の波浪計測技術の開発にある。このために、最終的に航空機に搭載する必要がある。CW方式はアンテナを2系統に分離する必要があり、航空機搭載用として大型化するために極めて不都合となる。一方パルス方式はタイムゲイトにより送信波と受信波が分離でき、アンテナを送受兼用として簡素化される。この点にもっと大きな根拠がある。しかしながら、パルス方式はCW方式に比べて装置が複雑となりコスト的に高いものになる欠点を有するものである。すなわち、2周波散乱計による波浪計測はドップラー情報から得られる。この情報を得るためにはパルス方式の散乱計のシステムはコヒーレントシステムでなければならない。なぜなら、パルス方式は後述するように海面からの受信波と参照波(送信波)の比較により、ドップラー情報を抽出するためである。またパルス方式はより大きい電力の発振器と、より広い周波数帯の中間周波増幅器を必要とするためである。表1は両者の性能を比較したものである。

方 式	実 験 装 置	観測用装置
測 定 距 離	CW方式 30 m~100 m	パルス方式 30 m~100 m
空 中 線 部 形 状	角型ホーン	パラボラアンテナ
ビーム半値幅	5°, 7°, 15°	8°
送 受 信 部		
送 信 周 波 数	Xバンド	Xバンド
2周波数の差 Δf	0~50MHz	0~50MHz
送 信 電 力	0.1mW	10mW

表1 CW方式の実験装置とパルス方式の観測用装置の性能比較

Table 1 Comparison of system parameters between the CW radar and the pulsed radar.

## 2. 方向スペクトルの計測原理

波浪の方向スペクトルを計測する原理は、図1に示した測風の原理と類似するものである。これはよく知られているように、単周波のマイクロ波とさざ波のブラッグ共鳴散乱の機構によるものである。その共鳴条件はBraggの式と呼ばれ、下式になる。

$$2 \lambda_s \sin \theta = \lambda, \quad \lambda = C/f \quad (1)$$

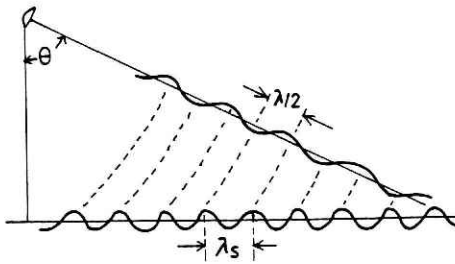


図1 マイクロ波とさざ波とのBragg共鳴機構

Fig. 1 Bragg type resonance between the small-scale water waves (wavelength,  $\lambda_s$ ) and the microwave (wavelength,  $\lambda$ ).

ここで、マイクロ波の波長と周波数をそれぞれ  $\lambda$  と  $f$  とする。  $C$  は光速で  $3 \times 10^8$  m/s.  $\lambda_s$  はさざ波の波長、  $\theta$  はアンテナの入射角である。添字  $s$  はさざ波の特性を表すものとする。上式から分るように、共鳴を起すためには両者の波長が同程度の大きさとなる必要がある。

本研究のねらいは波浪の方向スペクトルの計測技術の開発を行うことにある。波浪は普通波長  $1 \text{ m} \sim 200 \text{ m}$  (周波数  $0.05 \text{ Hz} \sim 1.0 \text{ Hz}$ ) で、さざ波に比べて非常に大きな波である。このような波を上述した共鳴機構で検出するためには、波浪の波長と同程度の波長の電磁波を必要とする。よってラジオ波 (VHF, HF) を海面に照射する必要がある、そのために設備等が大がかりなものとなる。そのうえ波浪の波長範囲をすべてカバーすることは不可能に近い。そこで考え出されたのが2周波散乱計の原理である。すなわち、さざ波は大きな波浪によって振幅変調される。この変調波は波浪の波長をもち、波浪の特性を有することになる。よって、この波と同程度の波長をもつ電磁波を、2つの近接する周波数のマイクロ波から作ったビート波で代用するという考えである。この原理を簡単な数式で説明する。2つの波の周波数をそれぞれ  $f_1 = f_0$  (固定周波数) と  $f_2 = f_0 + \Delta f$  ( $\Delta f \ll f_0$ ) とすると、ビート波は次のようになる。

$$y_1 = a \cos 2\pi ft, \quad y_2 = a \cos 2\pi (f + \Delta f) t \quad (2)$$

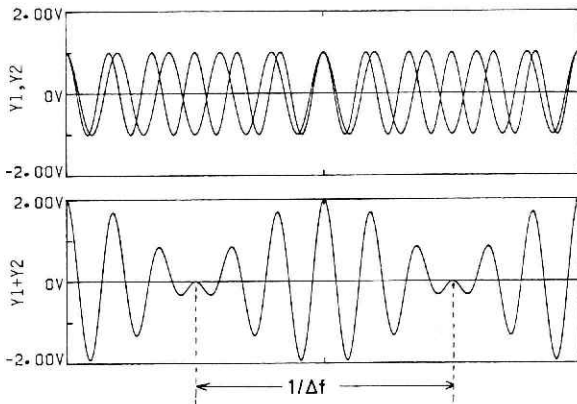


図2 2つの近接する周波数の波から作ったビート波

Fig. 2 Beat waves formed by two sinusoidal waves of slightly different frequency  $f_1$  and  $f_2$  ( $\Delta f = f_2 - f_1$ ).

$$y_1 + y_2 \approx 2a \cos\left(2\pi \frac{\Delta f}{2} t\right) \cos 2\pi f_0 t \quad (3)$$

ここで  $\Delta f = f_2 - f_1$  で差周波数と呼ぶ。図2は上式を表したものである。この図から分るように、ビート波の周波数  $\Delta f$  はマイクロ波の周波数  $f_0$  に比べて非常に小さくすることができ、

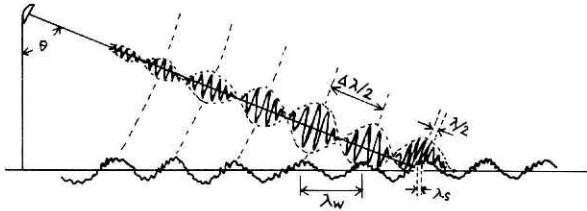


図3 ビート波と波浪との Bragg 共鳴機構

Fig. 3 Bragg type resonance between the large-scale ocean waves (wavelength  $\lambda_w$ ) and the electromagnetic beat waves (wavelength,  $\Delta\lambda$ ).

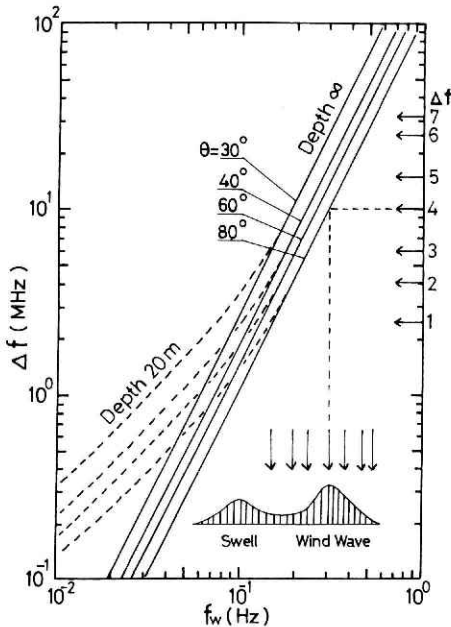


図4 ビート波の周波数  $\Delta f$  と共鳴する波浪の周波数  $f_w$  の関係。  $\theta$  はアンテナの入射角である。観測塔の水深は20mである。

Fig. 4 Relation of frequency between the beat waves,  $\Delta f$  and the resonated ocean waves,  $f_w$ . The symbol,  $\theta$  indicates the incident angle of the antenna. The tower is at a depth of 20 meters.

波浪の波長と同程度のビート波を  $\Delta f$  の値を適当に少し変えるだけで容易に作る事ができる。波浪の波長範囲に対応する  $\Delta f$  は1~50 MHzの範囲で十分であり、ハード的に比較的簡単に作る事ができる。ビート波と波浪の共鳴メカニズムは図1に類似させて、図3で示される。共鳴条件は次式となり、両者の周波数の関係を図4に示した。

$$\begin{aligned} \lambda_w &= \Delta\lambda / (2 \sin \theta) \\ &= C / (2 \Delta f \sin \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_w} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda_w}\right)} \quad (5)$$

添字 w は波浪の特性を示す。式(5)は水の波(重力波)の分散関係で、h は水深、g は重力加速度である。式(4)から入射角  $\theta$  と差周波数  $\Delta f$  が与えられると、共鳴する波浪の波長  $\lambda_w$  が分り、式(5)より共鳴する波浪の周期  $T_w (= 2\pi / f_w)$  が得られる。以上のモデルからは共鳴する波浪の波長(又は周期)の情報が得られるが、波向の情報を抽

出するには海面散乱の方向分布を調べなければならない。よってビート波を形成するマイクロ波の散乱特性を解明する必要がある。次に海面の散乱エコー、すなわちドップラーエコーについて議論する。

## 2.1 ドップラーエコーの特性

アンテナから発信されるマイクロ波  $S_T$  は次式で与えられる。ここで添字 1 と 2 は周波数  $f_1$  と  $f_2$  に対応する信号とする。

$$S_{T1} = A_1 e^{i2\pi f_0 t}, \quad S_{T2} = A_2 e^{i2\pi(f_0 + \Delta f)t} \quad (6)$$

受信信号  $S_R$  は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} S_{R1} &= \alpha_1(r) A_1 e^{i(2\pi f_0 t - 2\pi f_0 \tau)} \\ S_{R2} &= \alpha_2(r) A_2 e^{i(2\pi f_0 t - 2\pi f_0 \tau - 2\pi \Delta f \tau)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで  $r$  と  $\tau$  はそれぞれマイクロ波の伝播距離と所要時間で  $\tau = 2r/c$  となる。 $\alpha_1(r)$  と  $\alpha_2(r)$  は海面散乱の減衰率を表す。ドップラー信号  $S_D$  は受信信号から発信信号を取り除いたものになる。よって上式より  $S_D$  は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} S_{D1} &= \alpha_1(r) A_1 e^{i\phi_1}, & \phi_1 &= -\theta - 2\pi f_0 \tau \\ S_{D2} &= \alpha_2(r) A_2 e^{i\phi_2}, & \phi_2 &= -\theta - 2\pi f_0 \tau - 2\pi \Delta f \tau \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ドップラー周波数  $f_D$  は  $dr/dt = v_r$  に注意すると、

$$\left. \begin{aligned} f_{D1} &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_1 = \frac{2v_r}{c} f_0 \\ f_{D2} &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_2 = \frac{2v_r}{c} f_0 \left( 1 + \frac{\Delta f}{f_0} \right) \approx f_{D1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

よって  $f_D = f_{D1}$  とすると、

$$f_D = \frac{2v_0 \sin \theta}{c} f_0, \quad v_r = v_0 \sin \theta \quad (10)$$

ここで  $v_r$  と  $v_0$  はそれぞれさざ波のビーム方向（アンテナ方向）と水平方向の移動速度である。 $v_0$  がどのような海面の散乱体の移動速度であるか重要な問題となる。可能なものとして、さざ波の位相速度  $c_s$  とそれを運ぶ大きな波浪の往復運動等がある。どの速度が妥当であるかは計測されたドップラースペクトルのピーク周波数によってある程度推定できる。これは第 5.2 節で議論する。 $c_s$  は次式で与えられる。

$$v_0 = c_s = \left( \frac{g}{2\pi} \lambda_s + \frac{2\pi}{\rho \lambda_s} T \right)^{1/2}, \quad f_s = \frac{c_s}{\lambda_s} \quad (11)$$

ここで  $\rho$  と  $T$  はそれぞれ海水の密度と表面張力で、値として  $1 \text{ g/cm}^3$  と  $74 \text{ dyne/cm}$  とした。仮に  $v_0$  をさざ波の位相速度  $c_s$  とした時のドップラー周波数  $f_D$  を求めることにする。

$v_0 = \lambda_s f_s$  に注意して式(11)を用いると、

$$f_D = \left( \frac{\lambda f_0}{c} \right) f_s = f_s \quad (12)$$

上式より、Bragg 共鳴する波の波形が位相速度で移動すると仮定すると、得られるドップラー周波数  $f_D$  はその波の周波数に一致することである。これは Bragg 共鳴する波にすべて成立することである。

次に、さざ波の位相速度 (式(11), 図5) から、マイクロ波の最適周波数について考察する。

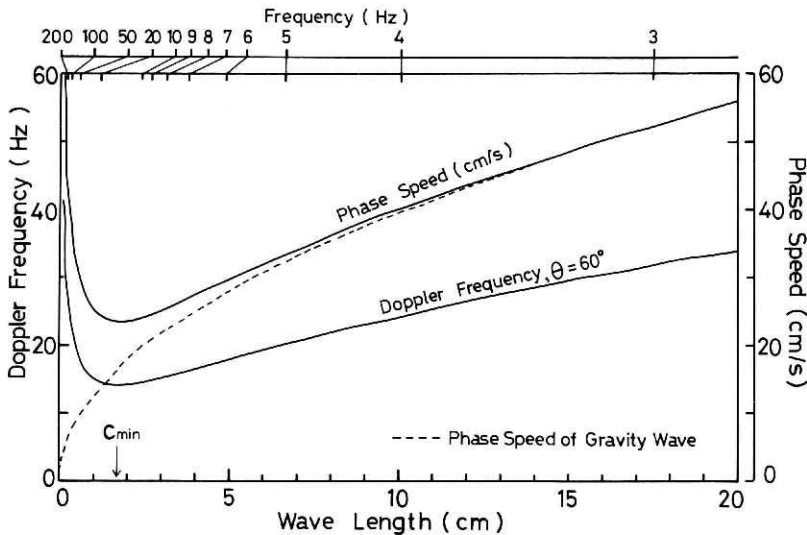


図5 さざ波の位相速度とドップラー周波数の特性

Fig. 5 Characteristics of phase speed and doppler frequency of the small-scale water waves. This doppler frequency was estimated by the condition that the scattering body is the small-scale water waves.

計測したいさざ波は風によく応答し、かつ大きな波浪によって変調されやすい波が望ましい。これは図5から分るように、最小位相速度、 $C_{min}$  の波から少し大きな波となる。すなわち波長  $1.7 \text{ cm} \sim 3 \text{ cm}$  の波となる。このようなさざ波に共鳴するマイクロ波の周波数は  $10 \text{ GHz}$  前後でよいことになる。採用した周波数は  $10.506 \text{ GHz}$  で、表2に示すようにほぼ上記のさざ波と共鳴するものである。以上のことにより、固定周波数  $f_1$  の受信波からさざ波の波長、 $\lambda_s$  と位相速度、 $c_s$  が得られることになる。

No.	入射角	$\lambda_s$	$f_s$	$c_s$
1	30°	2.86	8.6	24.7
2	45°	2.02	11.6	23.6
3	60°	1.65	14.1	23.2

表2 Bragg 共鳴するさざ波の特性  
 Table 2 Characteristics of small-scale (decimeter) water waves resonated with the transmitted microwave.

次にさざ波によるエコーの強度の特性について、Alpers & Hasslmann (1978) の複合散乱モデルをもとに議論する。アンテナで集められる海面からのドップラーエコー  $S_D$  は、小さい散乱面  $j$  からのエコーの集まりとする。この散乱面は facet と呼ばれ、さざ波が乗っている大きな波浪の小さな接平面となる。よって式(8)は次のように書き直すことができる。

$$S_D = \sum_j A_j e^{i\varphi_j}, \quad \varphi_j = 2 \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{k}_j \quad (13)$$

エコーの振幅  $A_j$  の 2 乗平均を求めると、

$$|A_j|^2 = G(\mathbf{x}_j) \sigma_j \quad (14)$$

$$\sigma_j = \bar{\sigma} (1 + \Delta_j), \quad \Delta_j = \int R \eta_k dk, \quad \eta = \int \eta_k dk \quad (15)$$

ここで  $\mathbf{x}_j$  はアンテナを基準点とした散乱面の位置ベクトルで、 $\bar{\sigma}$  はフットプリント上の平均散乱係数で、 $G(\mathbf{x}_j)$  はフットプリントに関する係数でレーダ方程式から与えられる。 $\Delta_j$  は大きな波浪によるさざ波の変調の効果によるものである。大きな波浪  $\eta$  は多くの成分波  $\eta_k$  の集まりで、 $R$  は変調効果を表す関数である。さざ波の波高は海上風に強い相関があるために、多くの研究者、例えば内藤ら (1980)、竹田 (1981) が示したように、上式から海上風の特性が計測できる。すなわち、エコーの強さ — 散乱係数は風速に比例し、その方向分布は upwind と downwind でピークをもつものとなる。方向特性を与える要素は上式の変調効果  $\Delta_j$  である。この効果は主に次の変動によるものと考えられている。大きな波浪の波形による facet の傾き、ビーム方向の伝播距離の変動、大きな波の往復運動場によるさざ波の振幅と位相速度である。これらの変動は非線形性の強い現象で、実験的にも理論的にも十分に解明されていない。よって上式の  $\Delta_j$  を力学的なモデルから厳密に与えることはできない。

### 2.3 ビート波の Bragg 共鳴散乱

式(13)に示したように、各チャンネルの周波数のマイクロ波の受信エコーはさざ波と Bragg 共鳴した散乱波であるが、その強さは大きな波長の波浪成分によって変調されることである。受信エコーの変動の中にさざ波ばかりでなく波浪の情報も含まれることである。波浪は多くの成分波から構成されるために式(14)の  $\Delta_j$  項の中に、すべての波浪成分の情報を含んでいることになる。よって一つのマイクロ波の周波数のエコーだけでは、波浪情報を直接に



抽出することができない。これを可能にした方法が2周波散乱計による方法である。この方法は2つの相近接する周波数のマイクロ波からビート波を作り、そのビート波と共鳴する波浪成分の情報を選択的に抽出する方法である。Alpers & Hasselmann (1978)によれば次のように定式化される。2つのマイクロ波のエコーはそれぞれ式(13)で与えられる。両者を掛け合わせて作ったビート波の時系列  $y(t)$  についてスペクトル解析を行う。ここで、 $S_1 = S_{D1}$ 、 $S_2 = S_{D2}$ 、添字\*は共役複素数とすると、

$$y(t) = S_1 \cdot S_2^* = \sum_{j_1, j_2} A_{j_1} A_{j_2}^* e^{i(\varphi_{j_1} - \varphi_{j_2})} \quad (16)$$

$$P_y(f) = P_1(f) + P_2(f) \quad (17)$$

ここで  $P_1(f)$  は background スペクトルで、 $P_2(f)$  は波浪成分と Bragg 共鳴したビート波のスペクトルピーク成分で、最終的に下式となる。これらは模式的には図6のようになる。

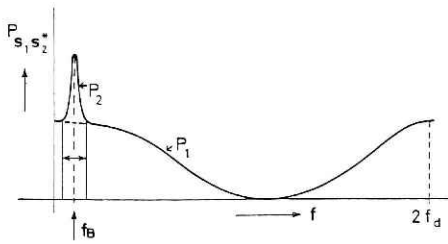


図6 ビート波のスペクトルの模式図  
(Alpers & Hasselmann, 1978)

Fig. 6 Schematic graph of spectrum of the beat waves (Alpers & Hasselmann, 1978).  $P_1$  and  $P_2$  indicate a broad background spectrum and a sharp beat wave spectrum, respectively.

$$P_2(f) \sim \delta\left(-f + \frac{1}{\pi} \Delta k \cdot v_0 - f_w\right) |m_-|^2 F(-k_w) + \delta\left(-f + \frac{1}{\pi} \Delta k \cdot v_0 + f_w\right) |m_+|^2 F(k_w) \quad (18)$$

$\Delta k$  はビート波の波数ベクトルで、 $v_0$  はプラットホームの速度である。m は変調関数 R を含む関数のフーリエ変換した変調輸送関数となる。よって、前節で述べたようにこの関数は定式化できないものと言える。 $P_2/P_1 = \chi$  において式の整理を行うと、

$$\chi = 2\pi^2 |m|^2 \coth^2(k_w h) F(k_w) / A \quad (19)$$

$$f_B = \pm f_w + \frac{2v_0 \sin \theta}{c} \Delta f \quad (20)$$

ここで A はアンテナのフットプリントの面積である。

$P_2$ の分布が式(18)で示したデルタ関数の分布になるためには、計測したい波浪成分の波長に比べて十分に広いフットプリントが必要である。すなわちアンテナのフットプリント内に少くとも1波以上の変調波を含むことが必要である。この条件は2周波散乱計の波浪計測の実用化において厳しいものとなる。式(20)において、固定プラットホームとすると $v_0=0$ となり、 $f_B = \pm f_w$ 。これは式(12)で述べたことと一致する。式(19)において、実験から規格化されたピーク値 $\chi$ が計測されるが、方向スペクトル $F(k_w)$ が直接的に得られないことである。なぜなら変調輸送関数 $m$ が分からないからである。この関数は理論的に与えられないので、実験的に調べる以外にない。しかし、第1章で述べた実験的研究からこの関数の特性は十分に解明されていない。その原因は、第一に式(19)に示された $\chi$ 分布を得るためには計測した波浪の波長に比べてどのくらい大きなフットプリントが必要か明らかにされていないこと、第二に精度の高い方向スペクトルの照合観測が同時に行われていないことである。

以上のことにより、変調輸送関数を適当に仮定することによって波向の情報が得られることになる。すなわち実験値から $\chi$ とピーク周波数 $f_B$ を求め、式(19)と(20)より共鳴する波浪成分の周波数と方向スペクトルを求めることができる。次にビート波について、もう少しその特性を明らかにするために簡単な思考実験を行う。

### 2.3 ビート波の思考実験

初めに海面において、大きな波浪によって変調されたさざ波があるとする。このような変調波に共鳴したエコーは式(3)で表される。このエコーは受信機の中で、式(2)に示されるように各周波数のチャンネルに分離される。これらの2つの信号からビート波 $\Delta f$ の成分を抽出するために、両者を掛け合せてスペクトル解析を行えばよい。実際に式(3)を使って計算すると、

$$y_1 * y_2 = \frac{1}{2} \cos 2\pi \Delta f t + \frac{1}{2} \cos 2\pi (2f_0 + \Delta f) t \quad (21)$$

ここで具体的に $f_0 = 1.0 \text{ Hz}$ 、 $\Delta f = 0.2 \text{ Hz}$ とおくと図7のグラフとなる。パワースペクトルは図8の結果となる。この結果から、式(21)の右辺の第1項が式(18)に対応することが分る。

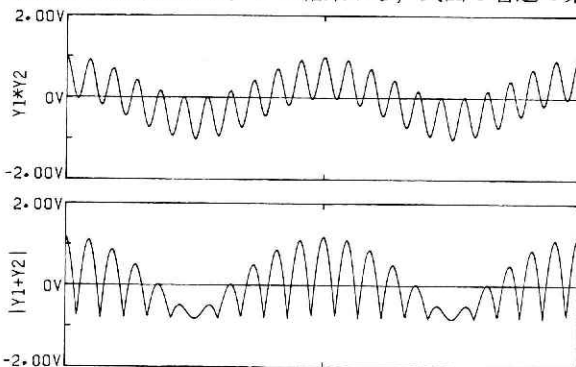


図7 2つのドップラー信号の積と和の時系列。ドップラー信号 $Y_1, Y_2$ の周波数の差 $\Delta f$ は0.2Hzとした。

Fig. 7 Time series of the product ( $Y_1 * Y_2$ ) and the sum ( $|Y_1 + Y_2|$ ) of the two sinusoidal waves.

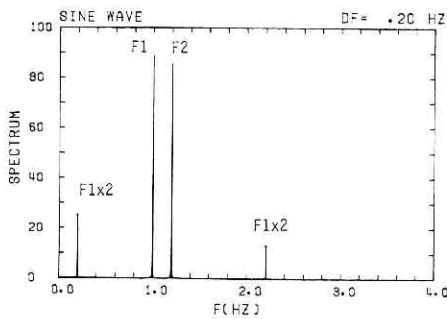


図8 2つのドップラー信号の積のスペクトル

Fig. 8 Power spectrum of the product of the two sinusoidal waves.

一方、上述した2つのドップラーの信号、式(8)を使うと、

$$S_1 \cdot S_2^* = (\alpha_1 \alpha_2^* A_1 A_2^*) e^{i\phi_{12}}, \quad \phi_{12} = 2\pi \Delta f t \quad (22)$$

ビート波のドップラー周波数  $f_{12}$  は、

$$f_{12} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_{12} = \frac{2\Delta f}{c} v_r \quad (23)$$

ここで  $v_r$  は式(10)で示したように、ビーム方向の散乱体の移動速度である。この速度は大きな波浪の位相速度  $c_w$  とプラットホームの移動速度  $v_p$  の和となる。よって式(23)は、

$$f_{12} = 2 \frac{c_w}{c} \Delta f \sin \theta + 2 \frac{v_p \Delta f}{c} \sin \theta \quad (24)$$

上式の第1項はビート波のBragg共鳴条件式(4)を使うと、共鳴する波浪の周波数  $f_w$  と一致する。すなわち、

$$f_{12} = f_w + \frac{2v_p \sin \theta}{c} \Delta f \quad (25)$$

式(25)は Alpers & Hasselmann が導出した式(20)と一致した。このことから、ビート波のドップラーエコー、すなわちさざ波の変調波は大きな波浪の位相速度で移動することと解釈される。

上述したように、2つのエコーの積によりビート波の情報を抽出した。この抽出にはこの他にもう一つ考えられる。すなわち、式(3)から分るように2つのエコーの和の絶対値からも可能である。波浪の情報はビート波の包絡線の変化にある。これを取り出すためには、時系列の平均値からの変位の絶対値を取り、スペクトル解析を行えばよい。図7の下図は絶対値をとった包絡線の時系列である。スペクトル解析より積の場合と同様にビート波を抽出することができるが、和と絶対値の2つのデータ処理を必要とすることで、あまり価値がない。しかしながら、各周波数のエコーがそれぞれ大きな波浪によって変調されるので、この方法を一つのエコーに適用することは意味のあることと思われる。この方法から波浪の情報の抽出を保証するには、さざ波のエコーの振幅変調がすべての波浪成分波のエネルギーに比例す

るという仮定が必要となる。現在のところ、この仮定が成立するという裏付けが実験的にも理論的にもない。

### 3. 2周波散乱計の特性

本装置は2つの発振器をもつパルス方式の2周波散乱計である。これらは固定周波数用と可変周波数用のものである。装置の構成は空中線装置、送受信装置、制御部である。それらの寸法と重さは表3に、系統図は図9に示した。

#### (1) 空中線装置

アンテナは反射鏡開口径が300mmφの送受共用のフィードパラボラ方式であり、偏波は水平偏波に固定される。図10のアンテナパターンより、ビームの半値幅は約8°×8°で、サイドローブレベルは-20dB以下となった。角度設定範囲は入射角θは45°~90°で、方位角φは0°~180°の範囲とした。

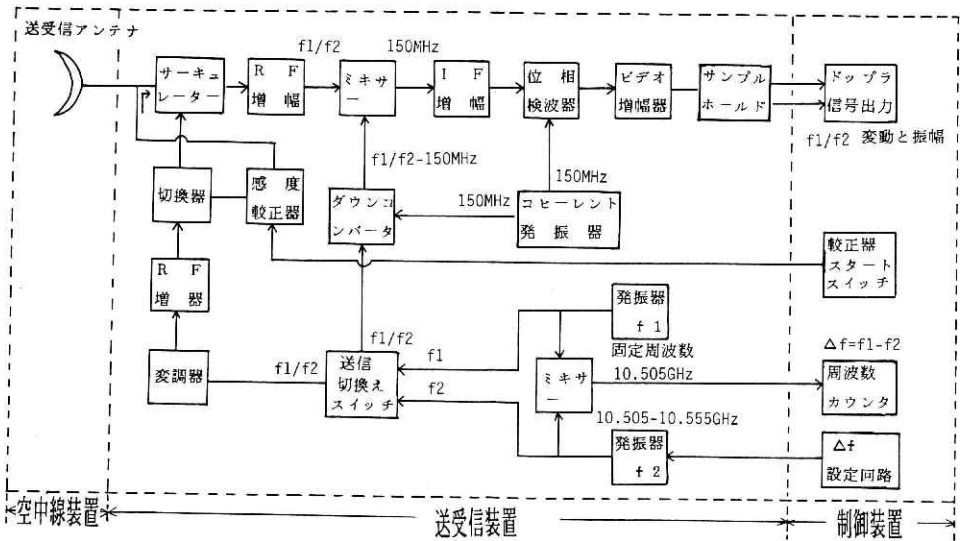


図9 2周波散乱計系統図

Fig. 9 Block diagram of the X-band pulsed two-frequency scatterometer.

装置名	寸法 (mm)			重量 (kg)
	幅	高さ	奥行	
本体(送受装置)	550	550	351	55.0 kg
制御部	425	178	339	17.1 kg
空中線	809	369	652	13.8 kg

表3 2周波散乱計の外形寸法・重量

Table 3 Weight and dimension of the two-frequency scatterometer.

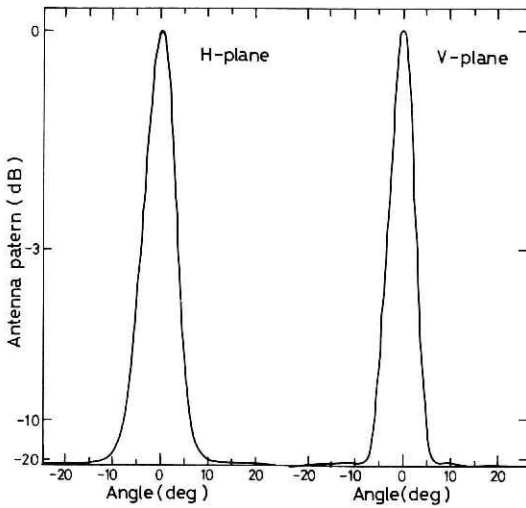


図10 アンテナパターン H：水平面，  
V：鉛直面  
Fig. 10 Antenna patterns  
H：horizontal plane, V：vertical  
plane

(2) 送信装置

マイクロ波の送信は2周波パルス交互発振方式で行う。発振器と送信切換えスイッチによって  $f_1$  と  $f_2$  を交互発振して、RF増幅器で約10倍に増幅してサーキュレータを介してアンテナから海面に照射する。海面からのエコーをアンテナで集め、その微弱な受信信号をサーキュレータを介して再びRF増幅器で約30倍に増幅した後、ダウンコンバータの信号と混合して中間周波数 150 MHz に変換し、IF増幅器で約10万倍に増幅して受信装置へ送られる。送信電力は10mWで、送信パルス幅は30 nsで、パルス繰返し周波数  $f_r$  は20KHzとした。

(3) 受信装置

これは上述した中間周波数 150 MHzを基準としたフルコヒーレントシステムで、海面のドップラーエコーを検出することができる。ダイナミックレンジは40 dB以上で、総合雑音指数は5 dB以下となった。計測したい海面エコーは送受信の時間差によって決まるレンジゲイトで検出する。この分解能は33 nsである。受信帯域幅は1 MHzで、ドップラー周波数帯域は1~10 KHzの範囲とした。上記のダイナミックレンジの特性を調べるために、リターンロス校正機能を設けた。これは擬似的なドップラー波(周波数約10 Hzの正弦波、図11)を用い、その振幅を10 dBかんかくの6ステップに変化させることによって行うものである。これによって各チャンネルの入出力特性が分り、受信装置の感度が分ることになる。図12は固定周波数のチャンネルで得られた入出力特性で、図11の波の振幅(ボルト)から求められたものである。

以上述べた散乱計の特性は表4にまとめた。次に散乱計の信号処理について議論する。これは図13に概略的にまとめた。すなわち、2つの発振器から周波数  $f_1$  と  $f_2$  の連続波が作られる(①の段階)。これらの連続波は②の矩形によってパルス化される。パルス化された

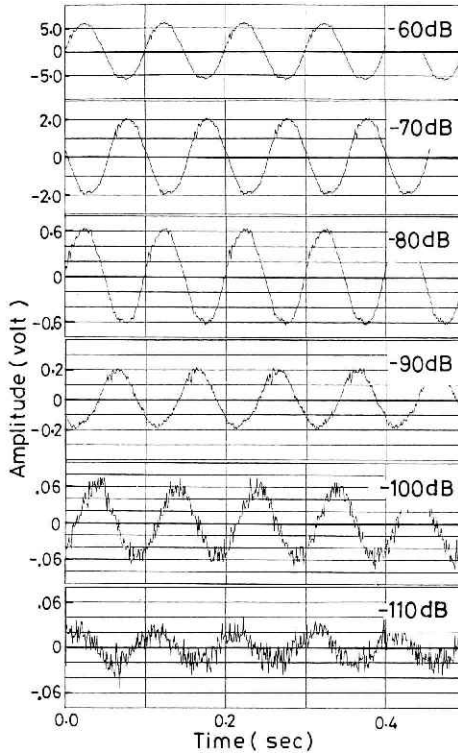


図11 較正モードの時系列  
Fig. 11 Time series of the calibration mode.

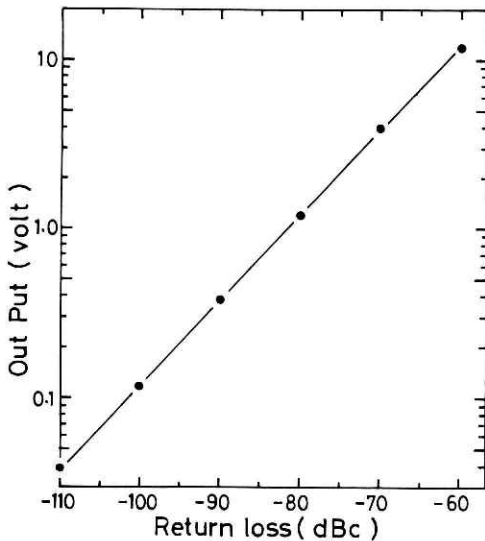


図12 受信器の感度特性  
Fig. 12 Characteristic of the dynamic range for the scatterometer.

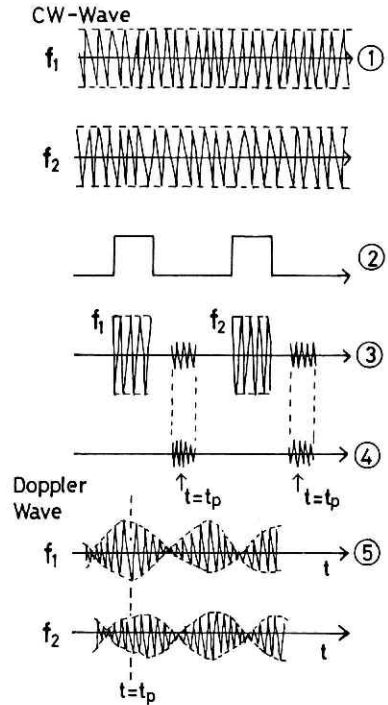


図13 2周波散乱計の記号処理  
Fig. 13 Signal processing for the two-frequency scatterometer.

2周波は送信切換えスイッチで交互にアンテナを通じて海面に照射される。一方、海面で Bragg 散乱された 2 周波のエコーはアンテナを通じて受信され (③の段階)、再び送信切換えスイッチでお互に分離され、参照波 (①の波形) と比較して位相変化が検討される。これを振幅に変換してビデオ信号とする (④の段階)。ビデオ信号にレンジゲートをかけて注目するエコーをサンプルホールドして出力する (⑤の段階)。⑤段階において、包絡線 (ビデオ信号) の振幅と周波数がドップラーエコーの強さと周波数となる。これらから、散乱体の散乱強度と移動速度の情報それぞれ得られることになる。そして 2 つの周波数のエコーの積の時系列から波浪情報を抽出す

表4 2周波散乱計の主要性能  
Table 4 Specifications of the two-frequency scatterometer.

1. 総合性能	
(1) 入射角範囲	45°～90°
(2) 最大探知距離	100 m
(3) 総合雑音損数	5 dB
(4) 最小受信感度	-110 dBC
2. 空中線部	
(1) 方式	パラボラ形 300 φ
(2) ビーム半値幅	8°×8°
(3) サイドロープレベル	-20 dB
(4) 偏波	水平
3. 送信部	
(1) 方式	2周波パルス交互発振
(2) 送信周波数	(10.525 ± 0.025) GHz 1波固定 10.5057 GHz, 1波可変
(3) 尖頭電力	10m W
(4) 送信パルス	110 nS
(5) パルス繰返し	20 KHz (±20%以内)
4. 受信部	
(1) ダイナミックレンジ	40 dB
(2) 中間周波帯幅	1 MHz (±10%以内)
(3) 受信帯域帯	最終段階出力 1～10 KHz
(4) レンジゲート分解能	33 nS ±10%以内
(5) 位相偏差	±3度
5. 制御部	
(1) 出力	フルスケール±5 V
(2) 2周波数差 Δf	1～50 MHz
(3) 付属機能	レンジゲイト手動設定 リターンロス校正機能

ることになる。

#### 4. 実験法及び解析法

実験は2周波散乱計による照射実験とアレイ式波高計による波浪の照合観測となる。実験場所は平塚沖の観測塔(写真1)である。

#### 4.1 波浪の照合観測

波浪は塔の三本の支柱にそれぞれ設置された三本のセンサーをもつアレイ式波高計で計測し、パワースペクトルと方向スペクトルを求めた。1RUN当りの観測時間及びデータの長さは次のように決めた。観測時間は10.24分間とし、データ読み取りかんかく  $\Delta t$  は0.3で、データ個数は2,048個とした。解析法に関して、パワースペクトル計算はFFT法で、方向スペクトル計算はbarber法で処理した。これらの測定法及び解析法は徳田ら(1984)の論文に示した。波浪のほか海上風も観測した。海上風は塔の屋上にある、設置高度約21mの風向風速計で計測し、10分間の平均値で表した。

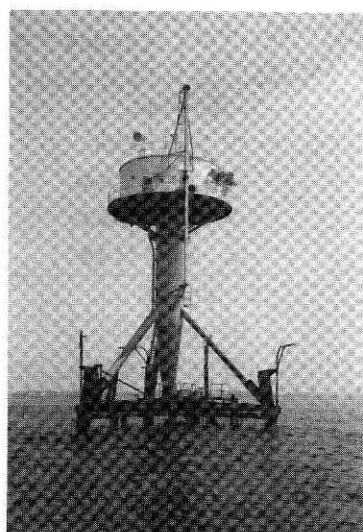


写真 1 平塚沖波浪等観測塔  
Photo. 1 Marine observation tower off Hiratsuka in the Sagami Bay.

#### 4.2 2周波散乱計による波浪計測実験

本装置は本体と制御部の2つの筐体から構成される。本体は写真2に示されるように、空中線装置(アンテナ)と送受信装置が一体化したもので、その間の導波管はきわめて短い。これを観測塔の南側の回廊に設置して照射実験を行う。よってアンテナから発振されるビームは図14のように、海面に照射されることになる。制御部は観測塔の観測室の中に置く。本体で処理された信号は信号ケーブルを通じて制御部に送られ、ドップラー信号として出力される。制御部には電源のON・OFF、差周波数  $\Delta f$  の設定用のダイヤル、較正モード計測用スタートボタン、ドップラー信号の出力端子がある。よって実験操作はアンテナ操作(入射角と方位角の設定)以外はすべて室内にある制御部で行うことができる。観測手順は第一にアンテナの入射角と方位角の設定、第二に差周波数  $\Delta f$  の設定、第三に較正モードの計測、第四に海面照射実験となる。本論文の実験においては、アンテナ

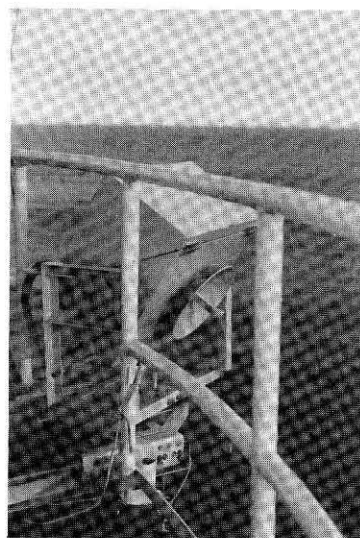


写真 2 2周波散乱計の本体の設置状況  
Photo. 2 The two-frequency scatterometer installed in the tower.



の入射角を60度とし、方位角を波浪の波向きと一致させた。

次に  $\Delta f$  の設定について議論する。これは波浪エネルギーが集中する主要周波数領域をカバーできるように、 $\Delta f$  の選択を行うことである。しかし第 2.2 節で議論したように、散乱計の計測可能な範囲はアンテナのフットプリントの大きさによって決まる。すなわち、信頼のある方向スペクトルを計測するためには計測したい波の波長より大きいフットプリントが必要となる。今回の実験(図14)によればその大きさは約10mとなる。よって計測できる波は波長が10m以下(周波数 0.4 Hz 以上)の波となる。図 4 より、 $\Delta f > 20\text{MHz}$  となる。よって波長が長いうねり(周波数 0.1 Hz 前後)の計測は困難となる。このようなことから、風浪成分(0.2 Hz ~ 0.5 Hz)を重点的に調べることにした。設定した7組の  $\Delta f$  値と、共鳴する風浪の周波数  $f_w$  は図 4 と表 5 に示した。

最後にデータ解析について述べる。2周波散乱計で出力されるデータは、周波数  $f_1$  と  $f_2$  の2チャンネルのドップラーエコーの時系列である。これらから、ドップラースペクトルそしてビート波(2チャンネルの積)のスペクトルを求めるものである。ここで問題となることは計測時間とサンプリングタイムの設定である。初めに計測時間について考える。これはビート波のスペクトルを求めるのに必要な計測時間で決定される。これについて今までの研究は明確に答えていない。本論文では次のようにした。前節の照合観測で示したように、波浪観測

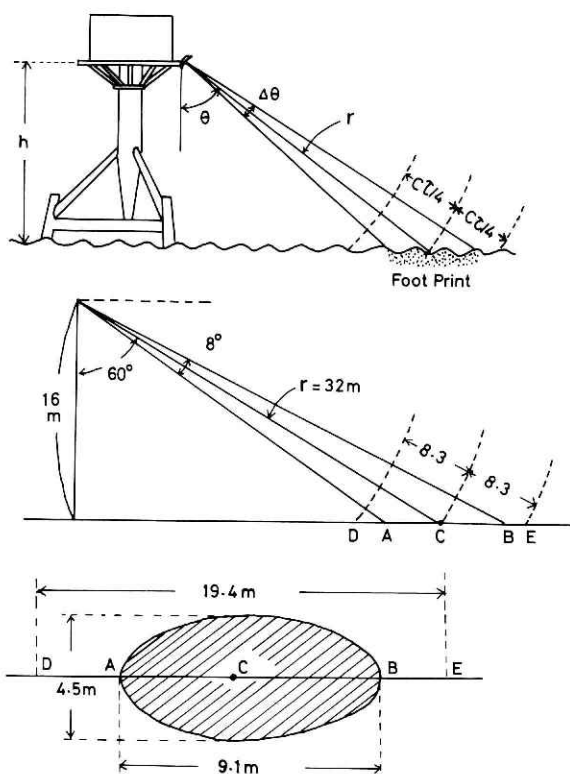


図14 フットプリントの幾何学的特性

Fig. 14 Fan beam measurement geometry.

The symbols,  $h$ ,  $\theta$  and  $\Delta\theta$  are the height, the incident angle and the azimuthal beamwidth of antenna, respectively.  $C$  is the speed of light and  $r$  is the pulsewidth.

**表 5** ビート波のスペクトルピーク 周波数  $f_B$   
**Table 5** Characteristic of the electromagnetic beat waves observed for the ocean waves (frequency,  $f_w$ ; wave length,  $L_w$ ). The symbol  $\Delta f$  indicates the difference of the two transmitted signals.

No	$\Delta f$ (MHz)	$L_w$ (m)	$f_w$ (Hz)	$f_B$ (Hz)		
				CASE B	CASE C	CASE D
1	2.51	69.0	0.147	0.352	0.254	0.293
2	4.10	42.3	0.192	0.352	0.254	0.254
3	6.10	28.4	0.234	0.332	0.313	0.313
4	10.1	17.2	0.302	0.391	0.293	0.332
5	15.1	11.5	0.369	0.391	0.410	0.352
6	25.1	6.9	0.475	0.469	0.508	0.469
7	31.1	5.6	0.529	0.508	0.606	0.508

は普通10分から20分間である。よって、照射実験もこれとほぼ同程度の計測時間が妥当である。しかしながら、両者の計測の方法が本質的に異なるために、必ずしも同一の計測時間をとることはできない。すなわち、前者はあらゆる方位からの、あらゆる成分波の波浪を一度に計測するのに対して、後者はアンテナの方位のみで、かつ  $\Delta f$  で決まる一つの波浪成分波だけとなるためである。自然界は長時間にわたって、いつも定常性を維持してくれない。よって一方位当り20分間前後の計測時間で終了するようにした。  $\Delta f$  の組を7組とし、1RUN (一組の  $\Delta f$ ) 当り 3.5 分間とした。これによって、一方位当りの計測時間は7つの RUN で構成され、24.5分間になった。

次にサンプリングタイム  $\Delta t$  の設定について考える。照射実験は第1章で議論したように、すべてさざ波からの散乱波の計測にもとづいている。よって、  $\Delta t$  はさざ波からのドップラーエコーの周波数特性によって決まる。計測されたスペクトル分布より、  $\Delta t = 1 \text{ ms}$  (ナイキスト周波数 500Hz) で十分である。以上のことにより、1RUN 当りのデータ個数は21万個となった。

これをもとに、ドップラーспекトルとビート波のспекトルの計算を行った。ドップラーспекトルは次のように求めた。初めに、データ個数 4,096 個から FFT 法で一次спекトル (2,049 個のライン数) を計算する。一次спекトルを51組算出し平均することによって、ドップラーспекトルを求めた。ビート波のспекトルは次のように求めた。初めに、2チャンネルのデータから積を作り25個づつの平均を行って、2,048 個のビート波の時系列を4組作る。この時系列の  $\Delta t$  は上記の平均操作により  $0.001 \text{ 秒} \times 25 = 0.025 \text{ 秒}$  となる。この時系列に上記と同じспекトル解析を行って、ビート波のспекトルを求めた。ただし、この場合は一次спекトルのライン数は1,025 個で、спекトルの平均個数は4 個になった。

5. 実験結果

解析した実験は平塚沖観測塔で、1984年7月2日8時から20時まで12時間にわたって行ったものである。

5.1. 実測された波浪特性

照合観測として波浪と海上風の観測を同時に行った。これらのデータは第4.1節で議論した方法で解析した。波浪データの解析は観測された海上風の特徴から代表的な4つのケースについて調べた。波浪の結果を議論する前に、海上風について述べる。図15は海上風の観測結果である。これによると、昼間は風速が弱く風向が南東から南南西に変わり、夕方17時より風速が7 m/s前後と強くなり風向が少し西寄りの南風となった。この状態は23時まで比較的安定して続いた。このような風の場合に対して、弱い風の場合(CASE A, B)と比較的強い風の場合(CASE C, D)からそれぞれ2つのケースを選び、合計4ケースについて波浪特性を調べた。これらの概略的な特性は表6に示した。

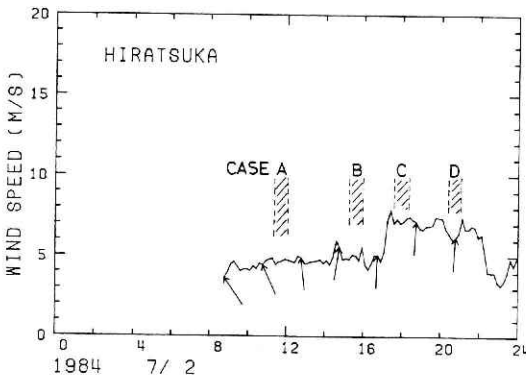


図15 実験時の海上風の特徴。実験は4回(CASE A, B, C, D)行い、斜線で示した。

Fig. 15 Wind direction and speed during the experiment. The experiment was conducted by dividing into four runs (CASE A, B, C, D)

4ケースに対して、波浪のパワースペクトルと波向きはそれぞれ図16と図17の結果となった。これらの結果から、波浪場は次のような特徴をもつと言える。周期10秒のうねりがたえずSSE方向(大島の東側通過)から伝播しており、そのエネルギーはほとんど一定であった。このようなうねりの上に局所的な風が吹き、風浪がうねりの上に発達した波浪場となった。このことは風浪の波向がほぼ風向と一致して変化した

表6 海上風と波浪の特性  
Table 6 Wind and ocean waves obtained from surface truth measurements

ケース名	海上風		有義波	
	風速	風向	波高	周期
A	m/s 4.7	SSE	cm 17.4	秒 5.4
B	5.0	S	27.8	3.4
C	7.3	S	48.9	3.7
D	6.3	S	47.5	3.6

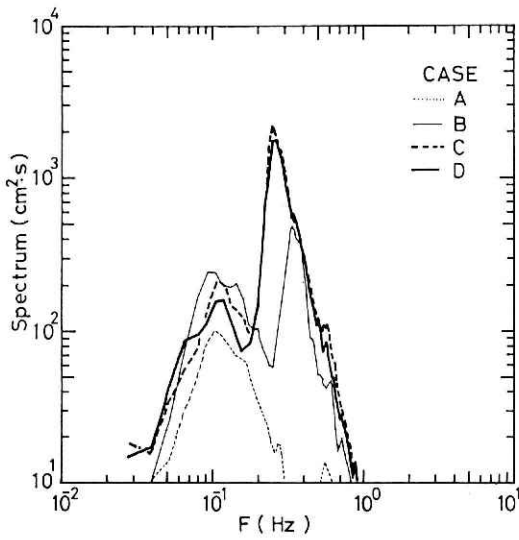


図16 実験時の波浪のパワースペクトルの特性

Fig. 16 Ocean wave energy spectrum obtained from the wave gauge.

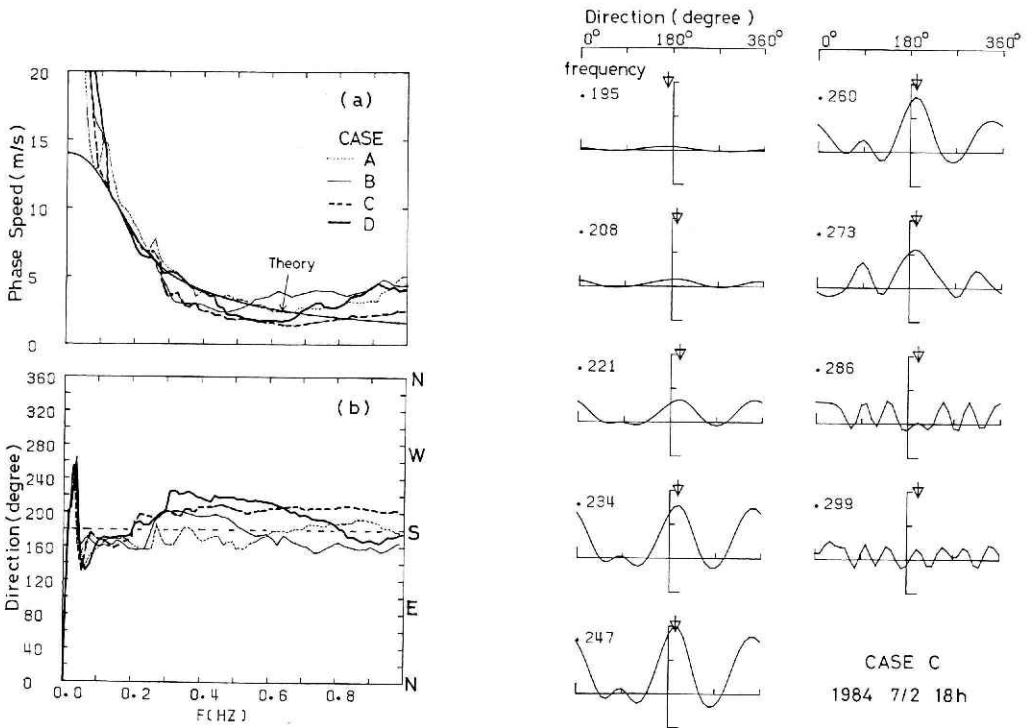


図17 実験時の波浪の波向と位相速度の特性

Fig. 17 Characteristics of direction and phase speed of ocean waves obtained from the wave gauge for CASE C. The symbol, S indicates south (180 degrees).

ことから裏付けられる。ここで、波向の照合観測において、計測可能な周波数範囲に注意する必要がある。徳田ら(1984)によれば、その周波数範囲は 0.09 Hz ~ 0.25 Hz である。図 17の結果において、この周波数範囲で測定された分散関係は水の波の理論値とよく一致したことである。よって式(5)が成立する。

### 5.2 2周波散乱計によって計測された波浪特性

第 4.2 節の方法にもとづいて、照射実験及びデータ解析を行った。解析するデータは前節で示した波浪の照合観測と同時刻に計測されたもので、図 16の 4 ケースとなる。各ケースの実験で得られたデータから、1組のドップラースペクトルと 7組の  $\Delta f$  に対するビート波のスペクトルが計算された。

#### (1) ドップラースペクトル

初めにエコーの時系列を調べる。これは図 18の左図に示した。これらはデータ読み取り間隔  $\Delta t = 0.001$  秒のデジタルデータをプロットしたものである。ここでのビート波 ( $S_1 * S_2$ ) の時系列は  $\Delta t$  25個平均されていないものである。これらから次のことが言える。各チャンネルのエコー ( $S_1, S_2$ ) はほぼ類似な変動で、明らかに大きな波浪によって振幅変調され

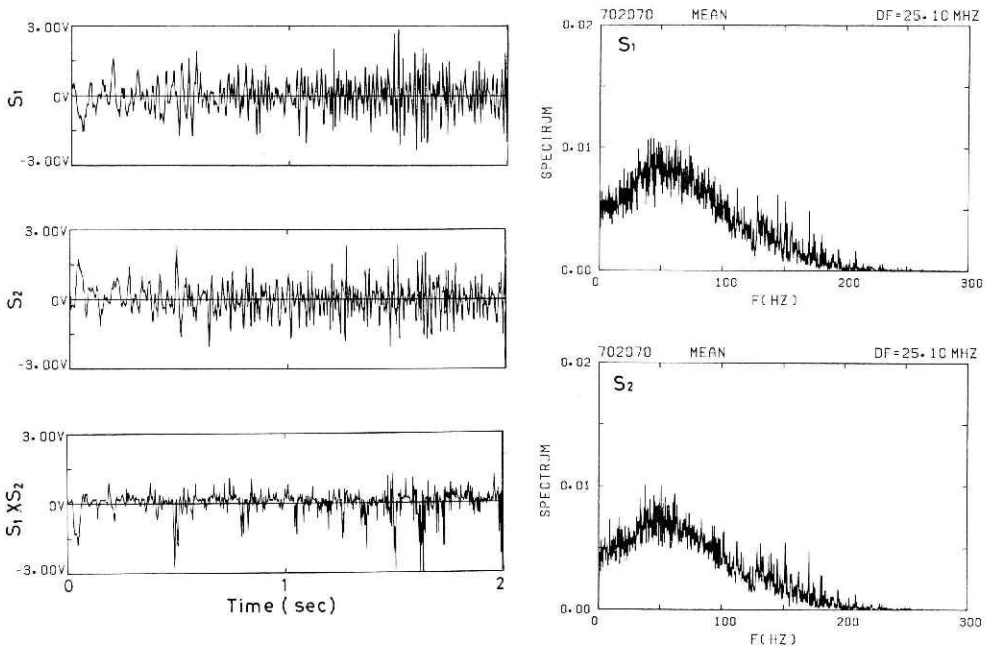


図 18 CASE C に対するエコー  $S_1, S_2$  の時系列とパワースペクトルの例。  $S_1 * S_2$  の時系列は  $S_1$  と  $S_2$  の積のものである。値は 10 倍に増幅されている。

Fig. 18 Time series and power spectra of the echo  $S_1$  and  $S_2$  for CASE C.  $S_1 * S_2$  is the product of  $S_1$  and  $S_2$ . These values were amplified by ten times.

ていること、ビート波は各チャンネルのエコーの変動が大きい時に大きく変動するが、一般的に変動周期は大きくなる傾向である。次に一次スペクトルについて調べる。これは図18の右図にあり、4,096秒間のデータから求められたものである。時系列からも分るように、各チャンネルのエコーのスペクトルはほぼ同一のものである。このことは各チャンネルの周波数差の比  $\Delta f/f_0$  が非常に小さいことにより、エコーは振幅情報に関してほとんど同一になることを意味しており、式(9)で近似したように同一のドップラー周波数特性となる。

平均スペクトルについて、4つのケースに対して求めた。これは上記のことにより固定周波数  $S_1$  に対してのみ行い、51個の一次スペクトルを平均したものである。結果は図19に示され、次のことが言える。

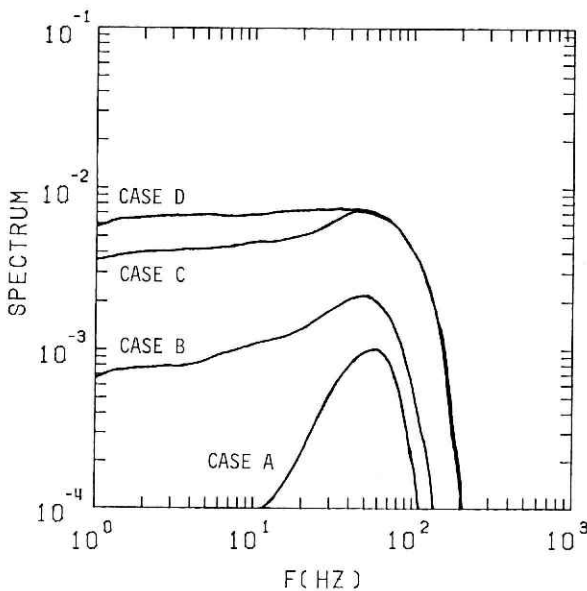


図19 固定周波数  $f_1$  に対するドップラー  
スペクトル

Fig. 19 Doppler spectra for the echo of  
fixed frequency  $f_1 = f_0$ .

1. ピーク周波数は4ケースとも約50Hz 近傍のものとなった。この値はさざ波の位相速度の値{式(12)}よりはるかに大きい値である。さらに検討するために、式(10)を用いてドップラー周波数を流れに変換する。この値は約70cm/sの流れとなる。この流れはあまり風速と風浪に依存しないものである。このような流れは観測塔付近では、潮流(約20cm/s)とうねりの往復運動(50cm/s~100cm/s)となる。また波形の移動速度として、さざ波(10cm/s~20cm/s, 図5)とうねり(約12m/s)によるものがある。これらの値から判断すると、うねりの往復運動がもっと妥当な流れとなる。もしこのことが正しいとすると、マイクロ波と共鳴するさざ波は主にうねりの往復運動によって移動すると解釈される。

2. 第2.1節で議論したように、エコーの全エネルギーは風速とともに増加する傾向である。しかし次のことが問題となる。第一はCASE DだけはCASE Cに比べて風速が弱いに

もかかわらず全エネルギーは逆に大きくなったことである。第二はエコーの低周波成分が全エネルギーに比例して大きくなったことである。このことは時々低周波成分を含む大きなエコーが受信されることによる。このようなエコーは、散乱計の低周波の周波数特性に問題があると推測される。

(2) ビート波のスペクトル

方向スペクトルは方位別に得られたパワースペクトルエネルギーを合成したものである。よってこれらの計測は方位別のパワースペクトル計測が基本となる。散乱計による計測では、このパワースペクトルは第4.2節で議論したように、ビート波のスペクトルピーク値の合成によって求められる。今回は波浪の伝播方向(真南方向)にアンテナの方位を固定して風速が異なる4ケースについて実験を行った。すなわち、波浪の伝播方向のエネルギー分布の計測を試みた。この実験から明らかにしたいことは、第一にビート波のスペクトルピークの分布が理論(図6)で予測したように卓越するかどうか。第二はビート波のスペクトルピーク値の分散関係が波浪のものと一致するかどうか。第三はビート波のスペクトルピーク値を合成した分布がどれくらい波浪の方向スペクトル分布と一致するかである。実験ではアンテナの方位を波浪の伝播方向と一致させたので、波浪の伝播方向の方向スペクトルは近似的にパワースペクトルと考えてよい。以上の3つの問題について、計測したビート波のスペクトルから調べた。

第一について、図20から調べた。この図はCASE Cの実験から求めたものである。ここ

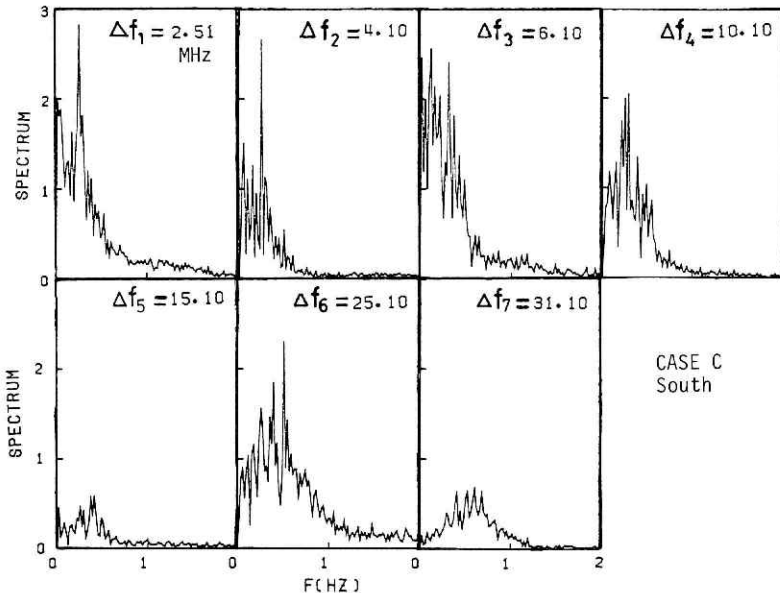


図20 CASE Cに対するビート波のスペクトル

Fig. 20 Spectra of the beat wave for CASE C. The symbol,  $\Delta f$  indicates the difference of the two transmitted signals. The azimuth angle,  $\phi$  and the incident angle  $\theta$  were south and 60 degrees, respectively.

で注意すべきことは  $\Delta f_3$  と  $\Delta f_6$  については平均個数が4個でなく3個としたことである。その理由は4個のスペクトルのうち、1個のスペクトルが他のものに比べて異常な分布となったためである。この図から分るように、計測された分布は多くのピークをもち、必ずしも理論が予測するデルタ関数的なものではなかった。これに比べて、Plantの実験結果はもう少し理論に近い分布を与えた。図21は第1章で述べたCW方式の装置のデータに同様な解析を行って得た分布である。両図の比較により、両者の海象条件は異なるが、CW方式の結果の方がより理論に近い分布であることが分る。この原因はドップラスペクトルのところで指摘した低周波の変動によるものと考えられる。以上の結果の他に次の2つの注目すべきことがある。これは次の第二の問題に関連することである。すなわち、 $\Delta f < 10 \text{ MHz}$  に対して、スペクトルピーク周波数はほとんど一定値になることである。この理由は第5.1節で述べたように、アンテナのフットプリントが計測したい波浪成分の波長に比べて小さいことによる。もう一つのことはビート波のスペクトルピークがCASE Aに対して顕著に存在しなかったことである。この原因は表6と図16から分るように、風速が5m/s以下で、かつ波浪のエネルギーが非常に小さかったためである。

第二の問題について図22から調べた。この図は上述したビート波のスペクトルピーク周波

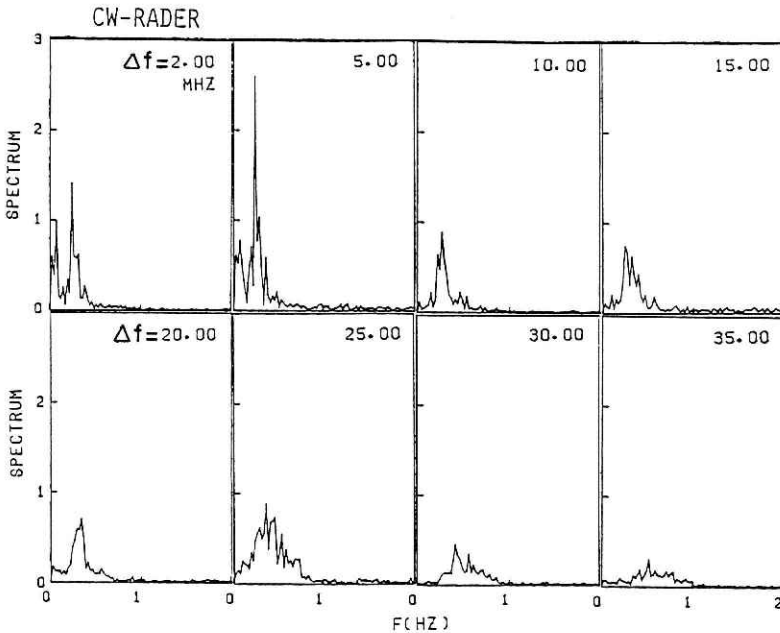


図21 CW方式のレーダで得られたビート波のスペクトル。アンテナの方位角と入射角はそれぞれ南方向と45度とした。風は南西17m/sであった。

Fig. 21 Spectra of the beat wave derived from the CW scatterometer.  $\phi = 180$  degrees (south) and  $\theta = 45$  degrees. The wind speed and direction are 17 m/s and the south-west, respectively.



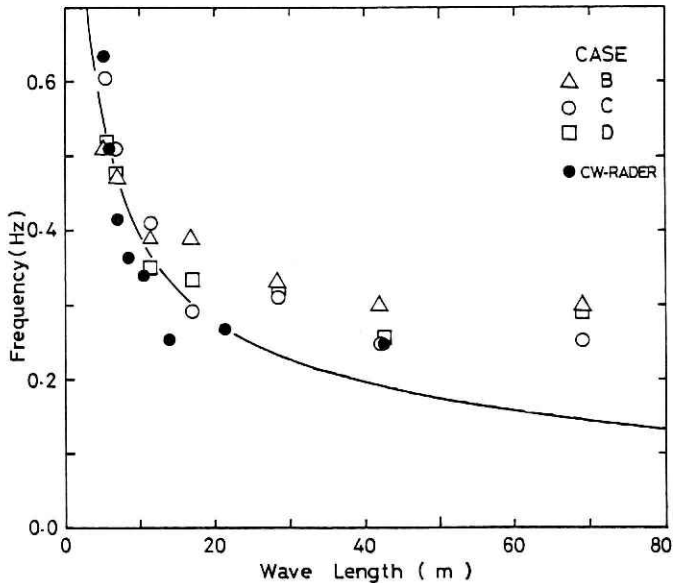


図22 2周波散乱計で得られた波浪の分散関係。実線は水の波の理論を表す。

Fig. 22 The ocean wave dispersion relation. Data points were obtained from measurements using the two frequency radar. The solid curves are plotted from theoretical relation from shallow water (depth 20 m).

数  $f_B$  と差周波数  $\Delta f$  から求めた分散関係を示す。この図のたて軸の周波数  $f_w$  は次のように求めた。式(20)で観測プラットフォームが観測塔 ( $v_0 = 0$ ) とすると、 $f_w = f_B$  となり、ピーク周波数  $f_B$  の値となる。一方、よこ軸の波長  $\lambda_w$  は式(4)に設定された  $\Delta f$  の値を代入することによって得た値である。この図から  $f_w < 0.3$  に対して、散乱計から得られた分散関係は理論(式(5))と一致しない。この原因は上述したことによる。波浪計測の適用範囲は分散関係に限れば、第4.2節で予測した範囲よりも広いものとなった。すなわち、フットプリントの大きさより少くとも1.5倍の波長をもつ波に対して可能となる。上記の関係において、パルス方式とCW方式の間に差異はほとんどないと言える。

第三の問題について図23から調べた。この図はCASE Cに対して、散乱計によって計測された方向スペクトル(PSD)と、波高計で得られたパワースペクトルの比較を示した。後者のスペクトルは図16の分布から求めたものである。すなわち、よこ軸である周波数を理論の分散関係を用いて波長に変換したものである。前者の分布において、スペクトルの絶対値は得られないため、相対値で表した。これはさざ波からのエコーを通じて大きな波浪を斜めに探査することによる。スペクトルの大きさ(海面の凹凸、波高情報)を得るためにはアンテナを海面に対して真下に向け、鏡点散乱の機構によって計測する必要がある。図23より、散乱計から得られたスペクトルは信頼のあるものとは言えない。とくに  $\Delta f_0$  すなわち波長7 m付近に大きなエネルギーが存在する点である。

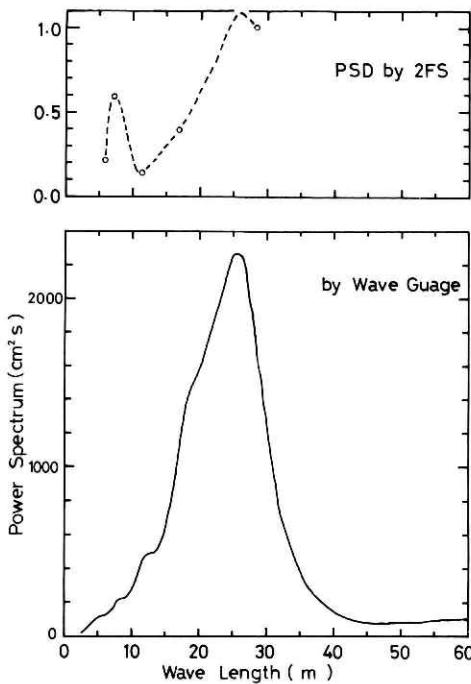


図23 CASE Cに対するスペクトルの比較。上図は2周波散乱計で、下図は波高計で得られた分布である。

Fig. 23 Comparison of radar modulation spectrum (upper figure) with the ocean wave spectrum (lower figure). The latter derived from the wave gauge.

以上ビート波のスペクトルについて議論した。まとめると次のようになる。2周波散乱計による方法はフットプリントの1.5倍の大きさより小さい波長をもつ波浪に対して、分散関係に関して比較的精度よく計測されるが、方向スペクトルについては信頼のある結果と言えない。そのもっとも大きな原因は、散乱計の低周波の周波数特性と、フットプリントが十分に大きくないことによるものと推定される。

最後に第2.3節で議論した和の絶対値法、すなわち一つの周波数のエコーの絶対値をとった時系列にスペクトル解析して方向スペクトルを抽出する方法の結果を議論する。具体的な解析は次のようにした。初めに全データの平均値を求め、その平均値を各データから引いて絶対値をとった後に、100個ずつの平均値を求めて、最終的に2,048個の時系列を作る。読み取り間隔  $\Delta t$  は平均操作より0.001秒から0.1秒となる。この時系列についてスペクトル解析を行うものである。図24は和の絶対値法で得られた結果である。この図から、風浪成分のスペ

クトルピーク周波数に関して、この方法は照合観測の結果(図16)と非常によく一致する。しかし、風浪のスペクトルピーク値に関して、この方法はCASE Dの値がCASE Cの値より大きい分布を示すが、照合観測では逆の分布となり、両者は一致しないことである。うねりに関してはこの方法においても解析できない。この方法について今後さらに研究する必要がある。

## 6. まとめ

波浪の方向スペクトルの情報は沿岸防災において近年ますます重要なものになって来た。この情報を広い海域にわたって面的にリモートセンシングできる計測技術はまだ確立されていない。このような技術の有力なものとして、2周波散乱計の技術を考え、その開発研究を

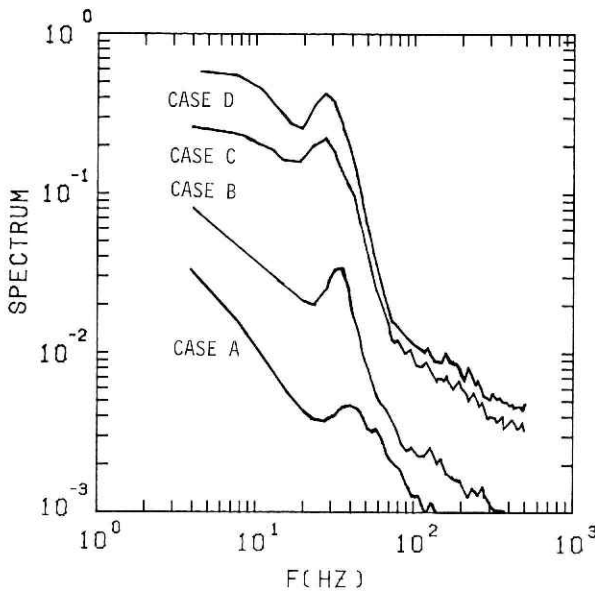


図24 エコーの振幅変調のスペクトル  
Fig. 24 Spectra of the amplitude modulation,  $|S_1|$ .

行うことにした。

2周波散乱計の方向スペクトル計測原理は非常に巧妙な機構にもとづいている。すなわち、2つの近接する周波数のマイクロ波から、波浪成分と同程度の波長をもつビート波を作り、海面に照射して波浪成分と共鳴させ、その共鳴エコー（ビート波の後方散乱波）を受信することによって波浪の方向スペクトルの計測を行うものである。計測条件として、アンテナのフットプリントを計測したい波浪の波長より十分に大きくしなければならないことである。この原理にもとづく計測、データ解析及び理論解析は複雑となり、まだ実用的なアルゴリズムが確立されていない。このようなことから、散乱計の設計・製作から実験・データ解析そしてアルゴリズムの開発まで、一貫して研究を行った。そしていくつかの成果と問題点が明らかにされた。

初めに2周波散乱計の製作を行った。この散乱計の特徴はXバンドの固定周波数用と可変周波数用の2つの発振器をもつ、2周波パルス交互発振方式であること、小さな尖頭電力で低ノイズの幅広いダイナミックレンジをもつフルコヒーレントシステムであること、受信器の較正や差周波数  $\Delta f$  の設定等の操作が容易にできること、装置が小型で軽量的であることである。

製作した散乱計を平塚沖の観測塔に設置して波浪の方向スペクトルの計測実験を行った。これと同時にアレイ式波高計による照合観測を行った。これらの実験より次のことが明らかにされた。方向スペクトルの計測原理の基幹である、ビート波と共鳴するエコーがスペクトルピーク波から確認されたこと、計測されたビート波のスペクトルのピーク波の分散関係は波

浪の理論とよく一致したことである。問題点として、方向スペクトルについて十分に信頼のある結果が得ることができなかつたことである。この原因はフットプリントが計測したい波浪成分の波長に比べて小さいことと、散乱計の低周波の周波数特性に問題があると推測される。前者の問題は観測塔で行う限り、アンテナの入射角を大きくすること以外に改善策はない。これは航空機に散乱計を搭載することによって解決できる。後者はさらに調査する必要があるが、対策としてフィルター装置を導入して不必要な低周波の変動をカットすることが考えられる。これについては今後さらに検討する。Part II として航空機実験について報告する。

## 謝 辞

2周波散乱計の設計と製作に関して、新日本無線 堀江 涼氏をはじめ多くの方々に御協力をいただきました。また前支所長である東京商船大学教授の岩田憲幸博士として電子技術総合研究所の増子治信博士には散乱計に関する多くの資料と助言をいただきました。ここに合わせて深く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Alper, W. & K. Hasselman (1978): The two-frequency microwave technique for measuring ocean-wave spectra from an airplane or satellite. *Boundary-Layer Meteorology*, **13**, 215-230.
- 2) Johnson, J. W., D. E. Weissman, and W. L. Jones (1982): Measurements of ocean surface spectrum from an aircraft using the two-frequency microwave resonance technique. *J. Remote Sensing*, vol. **3**, No. **4**, 383-407.
- 3) 内藤玄一・徳田正幸・渡部 勲 (1984): マイクロ波散乱計による海上風の遠隔測定実験. 国立防災科学技術センター研究報告, 第**23**号, 193-213.
- 4) Plant, W. J. (1977): Studies of backscattered sea return with a CW, dual-frequency, X-band radar. *IEEE Trans, Antennas Propagate.*, AP-25, 28-36.
- 5) Schuler, D. L. (1978): Remote sensing of directional gravity wave spectra and surface currents using a microwave dual-frequency radar. *Radio Science*, vol **13**, No. **2**, 321-331.
- 6) 竹田 厚 (1981): SEASAT衛星の散乱計データによる海上風向・風速場の解析. 国立防災科学技術センター研究報告, 第**25**号, 143-154.
- 7) Takeda, A, M. Tokuda and I. Watabe (1985): Measurement of directional sea wave spectra using a two-frequency microwave scatterometer. *The ocean surface* (Y. Toba & H. Mitsuyasu), 269-274.
- 8) 徳田正幸・渡部 勲・堀江賢次・佐藤 浩 (1984): 沿岸波浪観測システムに関する研究. II. 方向スペクトルの定時観測. 国立防災科学技術センター研究速報, 第**67**号, 1-33.
- 9) 渡部 勲・徳田正幸 (1984): 沿岸波浪観測システムに関する研究. I. 波高の定時観測. 国立防災科学技術センター研究速報, 第**61**号, 1-24.

(1987年6月8日 原稿受理)