

2周波散乱計による波浪計測実験*

II. 移動プラットフォーム(航空機)による方向 スペクトル計測

徳田正幸**・渡部 勲***・竹田 厚****

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 II. Experiments of Directional Ocean Wave Spectra from an Aircraft

By

M.Tokuda, I.Watabe and A.Takeda

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

Abstract

A technique for remotely sensing the large-scale gravity wave spectrum on the ocean surface using a two frequency (Δf) microwave scatterometer from stationary platform (a Marine observation tower) was developed by Tokuda et al. (1987, Part I). It was reported in Part I that a prominent resonance appears in the power spectral density (PSD) of the electromagnetic beat wave made by the two backscattered signals (echoes), and gravity wave dispersion relations can be obtained for the beat wave with the wave length less than the major axis dimension of the antenna footprint. However, there are problems in accurate determination of the directional ocean wave spectra because of the low frequency noises of the radar and the small antenna footprint.

In this report (Part II), the technique using the same scatterometer was demonstrated from moving platform (an aircraft). This measurement has the advantage of high frequency echoes which are considerably higher than the noises of the radar and the large antenna footprint which is larger than that in Part I. The following results were indicated.

*この研究は海洋開発促進費「海洋遠隔探査技術の開発——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, *沿岸防災第2研究室, ****平塚支所

- (1) Profiles of Doppler spectrum derived from echoes of a fixed frequency are very stable. The target's speed determined directly from the peak frequency of Doppler spectrum is almost equal to that of an aircraft.
- (2) Maximum values of the intensity of echo estimated by the total energy of Doppler spectrum appear when the radar beams are directed to the up-wind direction.
- (3) Typical examples of PSD of the beat waves with the frequency, 0.14 Hz demonstrate strong resonances whose frequencies agree with the theory. Directional modulation spectrum of the beat waves is compared to the ocean wave spectrum derived from sea surface truth measurements at a marine tower.

1. はじめに

島国である我が国において、沿岸波浪防災のために航空機及び衛星からの広域の波浪のリモートセンシング技術の確立が強く望まれている。波浪の主要な情報は波長(周期)、波高、波向の三つのものである。これらの波浪情報を比較的簡単かつ経済的に得られる技術として、2周波散乱計の計測原理が近年提案され、とくにヨーロッパにおいて実用化の研究進められている。

本研究の目的は、パルス方式の2周波散乱計を製作し、航空機による波浪のリモートセンシング技術の開発研究を行うことにある。第1段階として波浪情報のうち、波長と波向——方向スペクトルの計測技術の開発を行う。本論文のPart I(徳田ら, 1987)において、2周波散乱計の地上実験装置を製作し、固定プラットフォーム(平塚沖の観測塔)で実験を行い、それについて議論した。主要な成果は第一として、固定周波数のエコーから得られた振幅の変調のパワースペクトル分布において、そのスペクトルピーク周波数は波高計から得られた風浪のスペクトルピーク周波数と一致した。第二として、2周波のエコーの積のスペクトルから、フットプリントの大きさより小さい波長をもつ波浪に対してビート波と共鳴したエコーが認められ、そのスペクトルピーク周波数から求めた共鳴する波浪の分散関係は水の波の理論値とよく一致した。

問題点として、Alper & Hasselmann(1978)が予想したほどの、明白なビート波のスペクトルピークが得られなかったこと、そしてピーク値を合成して得られた方向スペクトル分布は照合観測の分布と比較しうるものでなかったことである。これらの原因はフットプリントの大きさが十分でないことと、散乱計の低周波のノイズにあると思われる。これらの問題は2周波散乱計を搭載する航空機実験(移動プラットフォームの実験)に対して改善できるものである。すなわち、後者の問題に対しては十分に大きな飛行速度を設定すれば非常に高周波のドップラー周波数が得られ、低周波のノイズとの分離がフィルターによって容易に可能となるためである。前者の問題に対しては飛行高度を十分に高く設定すれば、十分大きなフットプリントが得られることである。本論文は上記のことを実証するために航空機実験を行い、

その結果について議論することにある。

本論に入る前に、Part I で導出した関係式で本論文でも使用する重要なものをまとめることにする。Part I と異なる点はプラットホームが移動することと、実験海域が十分に深い海であることである。後者のことにより、計測される波浪は深海波となる。ドップラー周波数 f_D は航空機の水平飛行速度 v_0 とアンテナの入射角 θ に対して

$$f_D = \frac{2v_0 \sin \theta}{C} f_0 \quad (1)$$

ここで f_0 と C はそれぞれマイクロ波の固定周波数10.505GHzと光速 3×10^8 m/sである。 v_0 は正確に言えばアンテナに対しての散乱体(さざ波)の水平方向の移動速度で、プラットホーム(航空機)の移動速度とさざ波の位相速度の合成速度となる。しかし後者は前者に比べて非常に小さいので無視され、上式が近似的に成立する。ビート波のスペクトルピーク周波数 f_B は共鳴する波浪成分波の周波数 f_w と、差周波数 Δf に対して、

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

f_w はBragg共鳴条件から次式で与えられる。

$$f_w = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_w}} \quad , \quad \lambda_w = C / (2\Delta f \sin \theta) \quad (3)$$

ここで λ_w と g は、共鳴する波浪の成分波の波長と重力加速度を示す。ビート波のスペクトルピーク値 P_2 と方向スペクトル $F(k_w)$ の関係は

$$P_2/P_1 = 2\pi^2 m^2 F(k_w)/A \quad (4)$$

ここで P_1 はbackgroundスペクトルの値で、 m は変調輸送関数である。 A はアンテナのフットプリントの面積である。 $k_w = 2\pi/\lambda_w$ 。Part I で述べたように、海面での電磁波の散乱機構が複雑なために、変調輸送関数は理論的にまだ解明されていない。このために、実験から得られる $\chi = P_2/P_1$ の分布と、照合観測から予測される方向スペクトルから、この関数を調べる必要がある。

2. 2 周波数散乱計の改造

Part I で使用した2周波数散乱計を改造した。この改造は航空機から観測できるように、最大探知距離を100mから1,400mに拡大するために行った。具体的には電力の増幅器を付加す

ることによって尖頭電力を10mWから100mWにし、直径400φのアンテナを新造した。さらに、2周波の差周波 Δf の周波数の安定化を計るために周波数制御回路を付加した。以上のことにより、Part I と異なる散乱計の特性は主に総合性能、空中線部、送信部にあり、表1にまとめた。またこれらの装置の系統図は図1に示した。

表1 改造された2周波散乱計の主要性能
Table 1 Specifications of the improved two-frequency scatterometer.

1. 総合性能	
(1) 入射角範囲	0°~60°
(2) 最大探知距離	1400m
(3) 総合雑音指数	5dB
(4) 最小受信感度	-120dBm
(5) 飛行速度	62m/s (120 knot) 以下
(6) 測定波浪波長	30m~120m
2. 空中線部	
(1) 方式	パラボラ形400φ
(2) ビーム半値幅	6.2°×5.5°
(3) サイドロープレベル	-20dB
(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 (2周波)	(10.525±0.025)GHz (1波固定10.5057,1波可変)
(3) 尖頭電力	100mW
(4) 送信パルス	5μs
(5) パルス繰返し	20kHz (±20%以内)

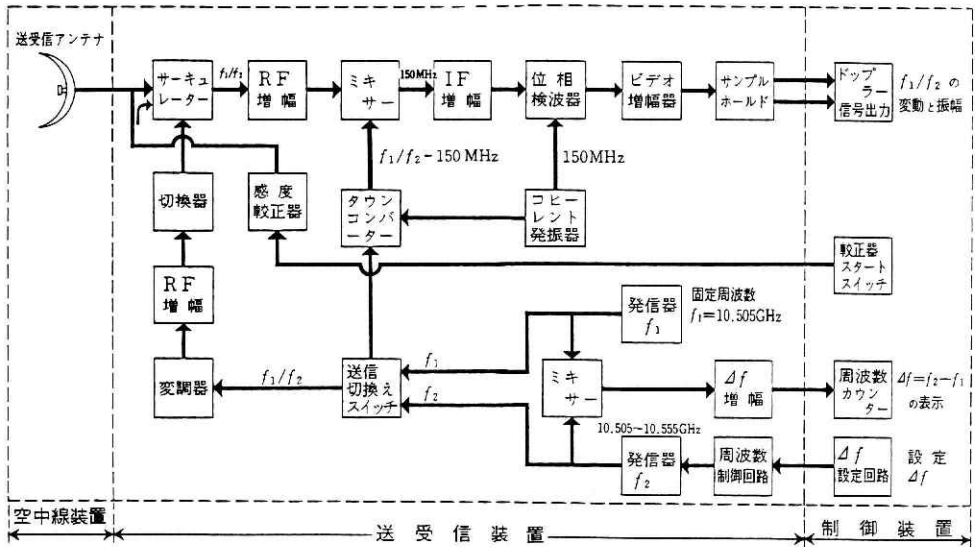


図1 改造された2周波散乱計の系統図
Fig. 1 Block diagram of the improved scatterometer.

3. 実験法

3.1 浪波の照合観測

実験海域はPart Iと異って平塚沖の観測塔付近でなく、相模湾の中央海域とした。よって波浪の照合観測として航空機実験と同じ海域で行うことができる小型船舶による観測を必要とする。また同時にどんな天候でも観測データを取得できる付近の沿岸にある観測所の観測も必要となる。後者については平塚沖の観測塔の観測(図2)を、前者については吊り下げ圧力式波浪計による漂流型ブイ(徳田(1981, 1983))によるものを採用した。しかし、本実験においては散乱計の不調が生じ、スケジュール的な理由により、小型船舶の観測は航空機と同期して行うことができなかつた。よって波浪の照合観測は観測塔の波高計によるものだけとなった。これについての計測法はPart Iで説明した。

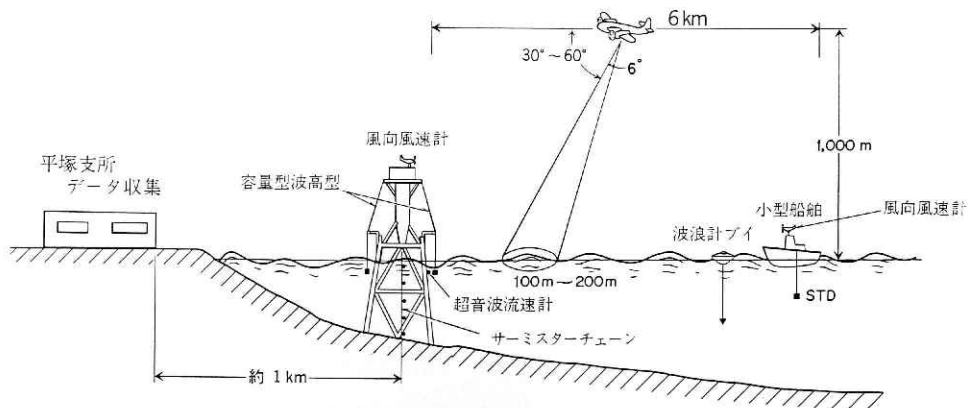


図2 航空機実験と照合観測の概要 観測塔では波浪(アレキ式容量型波高計)、海上風(風向風速計)、流れ(超音波流速計)、水温(サーミスタチェーン)が、小型船舶では波浪(波浪計ブイ)、海上風(風向風速計)、水温(STD計)が観測される。

Fig. 2 Concept of the airborne experiment and the sea truth experiment.

3.2 2周波散乱計による波浪計測実験

航空機実験は固定プラットフォーム(観測塔)に比べて、アンテナの高さ(飛行高度)が高く取れるために、広いフットプリントが得られることになる。このことは第1章で議論したように、より長い波長の波浪成分波の計測が可能となる。しかしその反面、次のようなことが問題となる。第一に散乱計の設置環境が機内であるために厳しいものとなる。もっとも重要なものとして、室温の変動と振動の問題である。室温の大きな変動はマイクロ波の発振器の周波数と出力の変動をもたらす。前者の変動は第2章で示したように周波数制御回路によって、ハード的に補正する方式で解決した。後者についてはPart Iで示した較正機能で調べ監視することにした。第二として、受信するエコーのドップラー周波数は航空機の飛行速度で決まるために、固定プラットフォームの場合に比べて非常に高くなることである。後述するよう

にその周波数は2kHzぐらいになるので、このような高周波変動を記録できるアナログレコーダと、それらのデータを効率よくA/D変換できるA/D変換装置を必要とした。サンプリング周波数は20kHzとした。使用したA/D変換装置の能力は1チャンネルに計算して最大20kHzであった。ここでは同時にA/D変換するチャンネル数は2チャンネル($S_1(f_1)$, $S_2(f_2)$, $\Delta f = f_2 - f_1$)である。よってレコーダの再生スピードを記録スピードの半分に落すことによって、上記のサンプリング周波数を確保した。

実験は写真1に示した航空機(セスナ402型)を使って、図3aの海域の上空で行った。搭載した計測器は図3bに示した。散乱計のアンテナは写真1、2と図3bから分るように、航空機の後部にある航空写真撮影用の穴に取り付けた。この穴をマイクロ波を通すレドームの板を用いてカバーをし、外気が機内に入り込まないようにした。これは室温の変化をできるだけ小さくするために必要なことである。よってアンテナから発射されるマイクロ波はこの穴のレドームを透過して海面に照射される。また海面からの後方散乱波はこのレドームを通じてア

写真1 使用した航空機セスナ402型(上の写真)とレドーム(下の写真)

Photo 1 The airplane, loading the scatterometer system (the upper part) and the radome (the lower part).

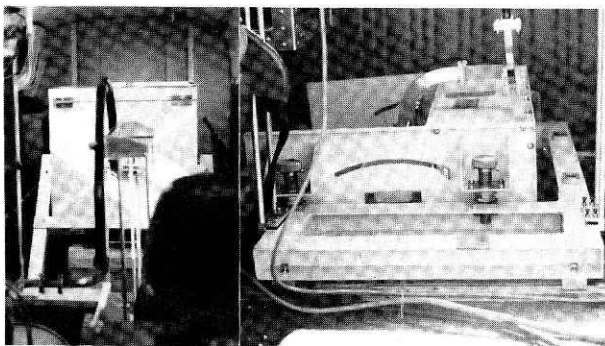


写真2 2周波散乱計の本体(左の写真)とアンテナ(右の写真)

Photo 2 X-band pulsed two-frequency scatterometer system.

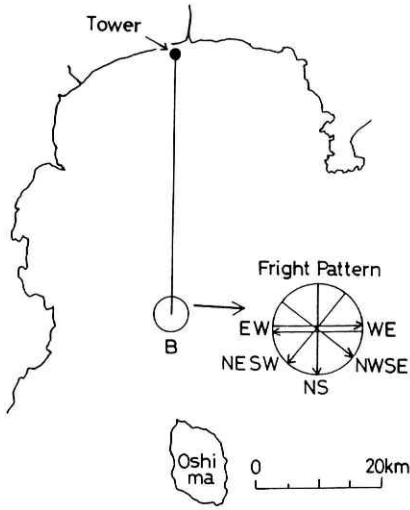


図3a 実験海域とフライトコース
Fig. 3a Flight course and experimental site.

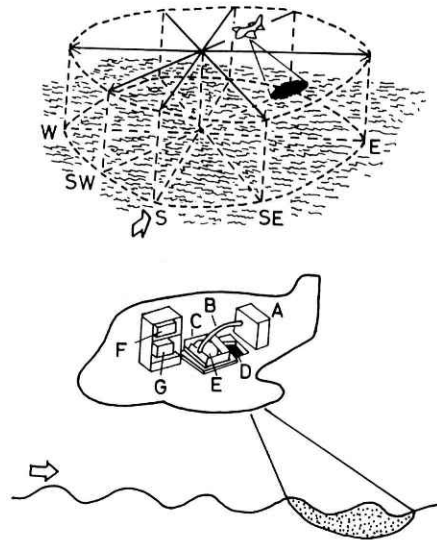


図3b 航空機のフライトパターンと搭載した計測器
A：散乱計本体 B：フレキシブル導波管 C：アンテナ架台
D：カメラ用の穴 E：パラボラアンテナ F：散乱計の制御部
G：ロランCと慣性航法装置

Fig. 3b Concept of the airborne experiment and the measurement system.

ンテナで集められることになる。ここで注意すべきことはアンテナの方位は飛行方位と正反対のものとなることである。すなわち図3bから分るように、航空機が風に向って飛行する時(Upwind)、アンテナは風を背面で受けることになり、アンテナのビーム方位は追風の方向(downwind)となることである。2周波散乱計の実験の他に、航空機の飛行特性を調べる実験を同時に行うように試みたが、計測器の不調により両者の同時計測ができなかった。このために、同一のフライト条件で両者の実験を別々に実行した。飛行特性の実験において、使用した計測器はロランC、慣性航法装置(INS)、高度計である。飛行特性は高度、速度、ピッチ角、ロール角となる。これらから、移動プラットフォームの運動性能が明らかとなる。

本論文でデータ解析した実験は図3bに示したフライトパターンで行った。直線水平飛行を五つの方位で行った。それらはWE(西から東)、NWSE(北西から南東)、NS(北から南)、NESW(北東から東西)、EW(東から西)である。アンテナの設定条件に関して、設定値と計測時の値は表4に示した。この表から、入射角 θ について両者の差が5度となった。これは直線水平飛行時の機体の鉛直面の傾斜が5度であったことによる。ここで $\theta=0$ は機体に直角にアンテナを設定した入射角を示す。これらの詳しい議論は第4.2節で行う。

上記の実験条件に対して、海面に形成されるアンテナ照射面の幾何学的特性は図4に示した。この図から分るように、照射面はアンテナのビーム幅($\Delta\theta$)によって決定され、近似的に

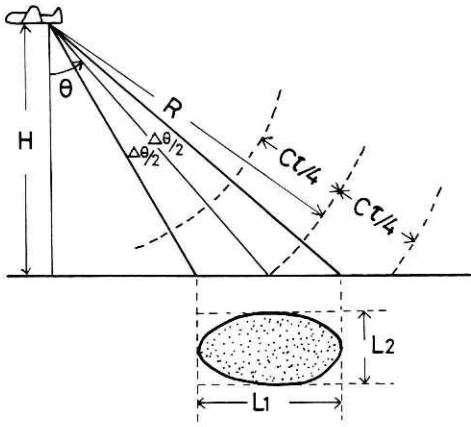


図4 アンテナ照射面の幾何学的特性 下図の楕円の部分が照射面となる。

Fig. 4 Airborne experiment geometry.

楕円形となる。その長軸長径 L_1 と短軸長径 L_2 は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= H \{ \tan(\theta + \Delta\theta/2) - \tan(\theta - \Delta\theta/2) \} \\ L_2 &= H\Delta\theta / \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで H はアンテナ設置高度である。 $H=1,040\text{m}$ 、 $\theta=25$ 度、 $\Delta\theta=6$ 度、パルス幅 $\tau=5\mu\text{s}$ とする、 $C\tau/4=375\text{m}$ 、 $R=1,148\text{m}$ 、 $L_1=133\text{m}$ 、 $L_2=120\text{m}$ となる。

上述した飛行フライトで、実際にどのような波浪の方向スペクトル計測を行ったかを説明する。移動プラットフォームでの計測は固定プラットフォーム(Part I)と同様に、アンテナ方位、ビート波のピーク値、ピーク周波数によって決定するものである。移動プラットフォームでの実験の手順は初めに計測したい波浪の成分波の周波数 f_w を決定し、式(3)より差周波数 Δf を求め、制御部でこの値を入力する。次に図3に示したように五つの方位にわたって直線水平飛行し、照射実験を行うものである。波浪のスペクトルはいろいろの成分波によって形成されるために、それに対応した Δf の値を設定し、上記の飛行を繰り返し行うことになる。 Δf の値の設定はPart Iの図4を使用し、波浪スペクトルを効果的にカバーできるように行う必要がある。現在の測定システムであると、1組の Δf に対して約20分間の飛行時間を要する。波浪スペクトルを6個の成分波(6個の Δf)でカバーすると考えると、一組の方向スペクトルを得るためには約2時間の飛行時間を必要とすることになる。

移動プラットフォームでは式(2)から分るように、ビート波のピーク周波数は波浪の成分波の周波数と一致しないことである。これは固定プラットフォームの場合と異なることで、プラットフォームの移動速度によるドップラー周波数の付加によるものである。このようにして得られたビート波のピーク波の特性と方向スペクトルの関係は図5に模式的に示した。

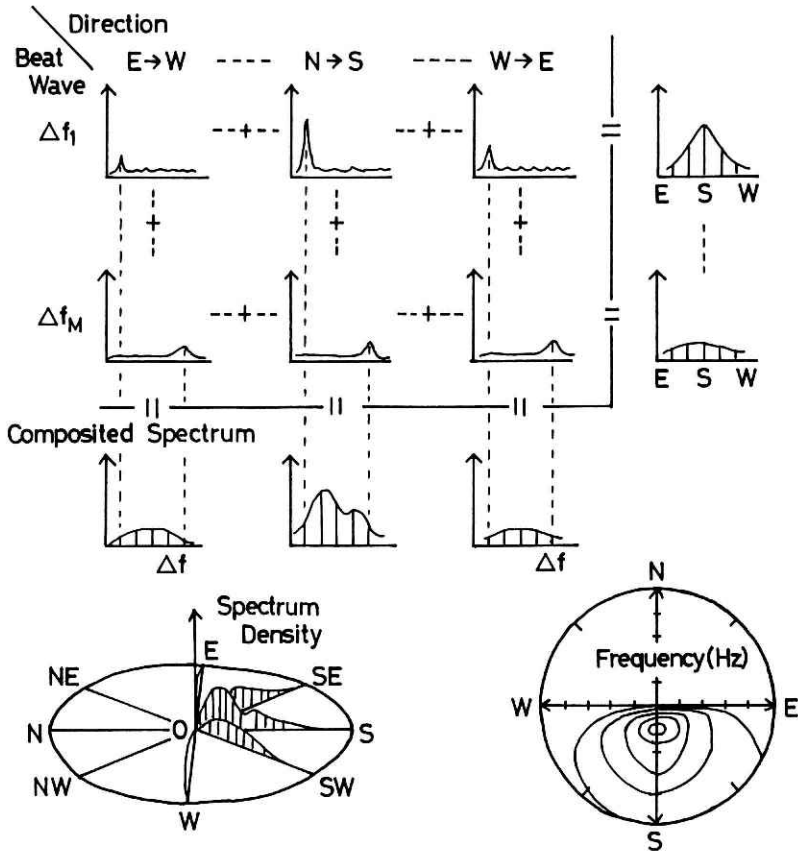


図5 ビート波のスペクトルピーク波と方向スペクトルの関係 方向スペクトルは周波数をパラメータにして方位別に表す場合と、方位と周波数を同時にパラメータにして表す場合がある。

Fig. 5 Relations between PSD of the electromagnetic beat waves and the directional ocean wave spectrum.

4. 実験結果

航空機実験は第3.2節で示した方法に従って行ったが、受信エコーにノイズがしばしば生じた。これは機体の振動と電氣的ノイズによるものであった。正常なデータが得られたのは2月26日のフライトの実験であった。このフライトは午前10時から12時まで行われたもので、これについて議論する。

4.1 実測された波浪の特性

2周波散乱計の照合観測は第3.1節で示したように、海上風と波浪の方向特性となる。航空機実験は観測塔から南へ約40kmの海域(図3a)で行った。第3.1節で述べたように同期した小型船舶による照合観測ができなかったため、実験海域の波浪の方向特性は観測塔の観測データから推測することにした。波浪の方向特性は三本センサーの容量型波高計で、海上風は風向風速計で観測し、図6の結果を得た。この図から次のことが言える。

実験中の平均風速(表2)は5.5m/sで32度の方位(NNEとNEの間)で微風状態であった。波浪場は有義波高19cmと小さく、うねりの波浪(0.1~0.2Hz)と局所的な風で生じた高周波の風浪から構成された。これらの伝播方向は前者に対してはやや東寄りの南方向で、後者は風向と一致する北北東から北東の方向となる。これらの観測結果から、航空機実験海域の波浪特性を予測すると、次のようになる。風の場合は大島のデータを参考にすると、風速は湾全体でほぼ一様で、風向は大島に近づくにつれてより東寄りとなり、北東となる。波浪場は観測塔のものに比べて、うねりに関して波高が高くなる以外ほとんど変わらない。風浪に関して北北東から北東の風のために発達するが、あまり強い風速でないために、大きな風波とならない。よって現場での卓越する波は、南南東~南の方位から伝播して来る、周波数0.1~0.2Hzの、低い波高のうねりとなる。

表2 解析した実験のフライト内容と観測塔での海況

Table 2 Wind and ocean waves obtained from sea surface truth measurements.

NO.	観測塔から南40km		平塚沖観測塔					
	測定時刻	コース	時刻	風速	風向	時刻	周期	波高
1	10:57~10:58	N→S	10:57	6.3m/s	NE (37°)	10:00	5.7秒	18.6cm
2	10:02~11:04	E→W						
3	11:05~11:07	NW→SE	10:07	5.0	NNE(29°)	11:00	5.2	20.6
4	11:10~11:12	NE→SW						
5	11:14~11:15	W→E	11:17	5.3	NNE(31°)	12:00	5.7	20.0

4.2 航空機の飛行特性

実験中の飛行特性を慣性航法装置(INS)とロランCで調べた。INSは位置、速度、ピッチ角、ロール角を、ロランCは位置を計測した。このロランCの位置情報から容易に平均速度を求めることができる。高度は高度計(気圧計)で計測した。飛行特性の観測は六つのRUNで行った。1RUN当りの飛行内容は波向計測実験と同じもので、約20分間の飛行時間とした。表3にRUNごとに得られた飛行特性の平均値とその標準偏差を示した。また表4は表3から求めたアンテナの平均的な設定条件を示した。飛行速度に関してINSとロランCの比較は図7に示

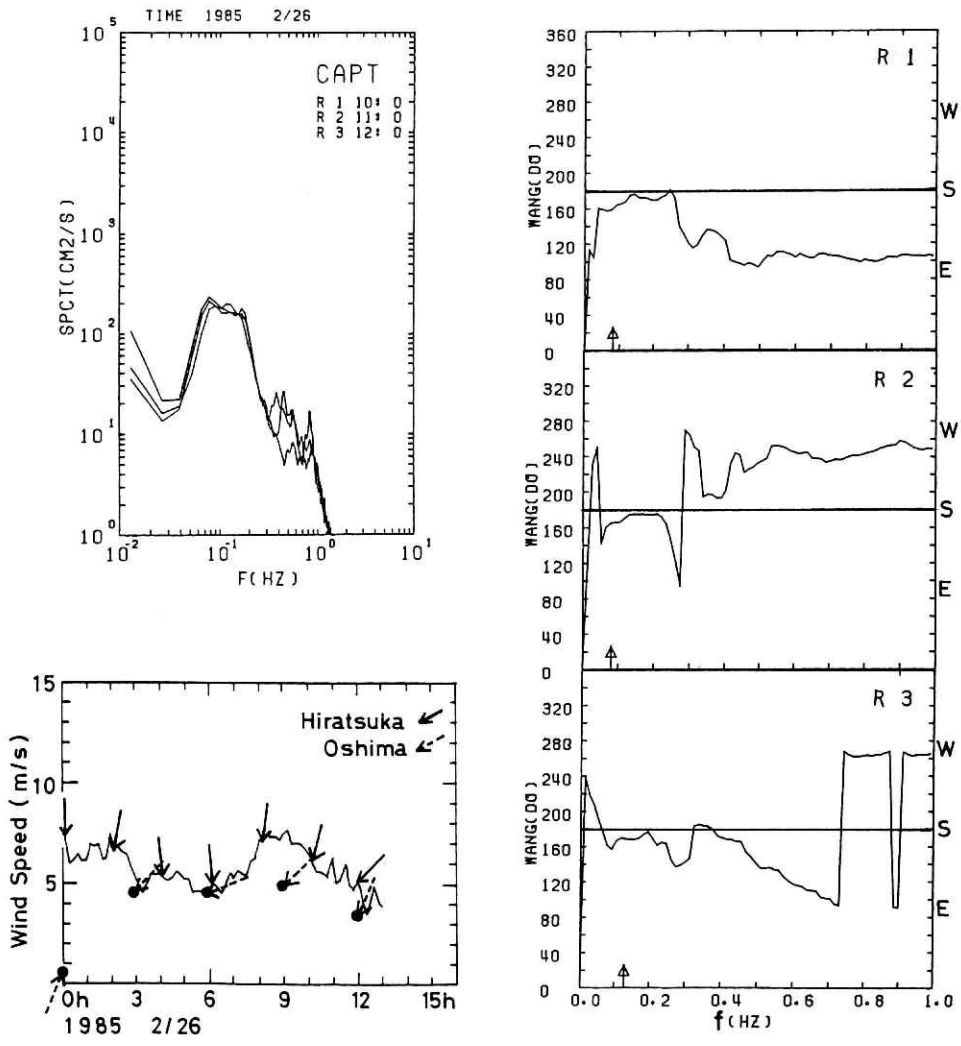


図6 実験時の観測塔での波浪と海上風の特徴
 左上の図：パワースペクトル，左下の図：平塚(観測塔)と大島の海上風，右図：波浪の成分波の主方向

Fig. 6 Characteristics of the sea surface truth measurement obtained from the wave gauge and wind meter at a marine tower.

表3 飛行特性 1RUNの当り5方位直続飛行となる。表の値は5方位の平均値である。
Table 3 Conditions of the airborne experiment.

RUN NO.	慣性航法装置 (INS)								ロランC 平均速度 (m/s)
	高度 (m)		速度 (m/s)		ピッチ角 (度)		ロール角 (度)		
	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差	
1	1045	7	68.1	1.1	-4.9	1.1	0.6	5.3	67.8
2	1038	6	66.1	1.1	-4.8	1.0	-0.3	5.0	66.4
3	1042	10	67.1	1.9	-4.5	0.9	2.3	5.9	66.4
4	1040	11	65.3	1.7	-4.4	0.9	1.7	5.2	64.4
5	1063	10	66.1	1.1	-5.0	0.9	0.0	4.5	64.7
6	1039	9	67.8	0.8	-4.7	0.8	0.5	6.0	68.6
平均	1040	9	66.8	1.3	-4.7	0.9	0.8	5.3	66.4

〈注〉 1 RUN当り 5 方位の直線飛行となる。表の値は 5 方位の平均値である。

表4 アンテナの設定条件
Table 4 conditions of the experiment for the antenna.

	設定値	計測値
高度 (m)	1000	1040
入射角 (度)	30	25
移動速度 (m/s)	60	66.8

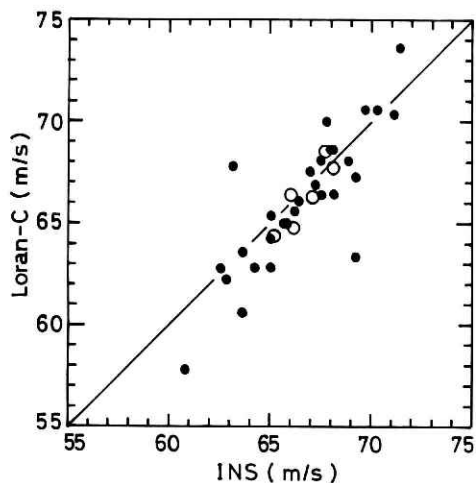


図7 飛行速度についてINSとロランCの比較

●は1方位(6km)当りの直線飛行の平均値で、○は1RUN(6方位)当りの平均値(表3)を示す。

Fig. 7 Comparison between the airborne's speed by the inertial navigation system (INS) and by the Loran-C.

した。これは1方位当り(6kmの直線飛)の平均値をプロットしたものである。この図から、INSの方が少し低めの値となるが、両者はほとんど一致したと言える。

散乱計の実験において必要な航空機の運動性能は平均飛行速度と平均ピッチ角である。表3より、平均飛行速度は約67m/s、平均ピッチ角は約 -5 度となり、これらの標準偏差は小さいことが分る。しかしロール角について、その平均値は約1度であるが、その標準偏差は大きい。これは大きな電氣的なノイズが時々混入するため、機体の動揺からでないことが分った。このノイズを除去すると、その偏差は約1度となり、実験許容値となった。

以上のことから次のことが結論される。INSは高度以外のすべての航空機の運動性能を計測できるが、装置が大きく重い。そして取り扱いが容易でない。一方ロランCは小型・軽量でかつ取り扱いが容易であり、飛行速度に関して信頼のある計測が可能である。よって今後の航空機実験において、飛行速度の計測はロランCで、ピッチ角とロール角は簡易的な傾斜計を導入することによって、航空機の運動性能の計測は十分に行うことができることである。

4.3 2周波散乱計によって計測された波浪特性

4.3.1 解析法

散乱計から出力される、海面からの後方散乱波を航空機内のアナログ記録計で収録した。実験後、実験室でこれらのデータのA/D変換を行った。解析すべき基本的な変動は第1章で議論したようにさざ波によるドップラーエコーの変動である。この変動の周波数は式(1)から示されるように航空機の飛行速度で決まり、約2kHzとなる。第3.2節で議論したように、サンプリング周波数は20kHzとした。よって1方位当り、1チャンネルに対して約126万個(63秒)のデータとなる。データの解析はFFT法によるスペクトル解析で行った。処理の流れ図は図8に示した。この図から分るように、データ処理は平均的なドップラースペクトルとビート波(積)のスペクトルを求めるものである。前者に対して、固定周波数チャンネルの受信波

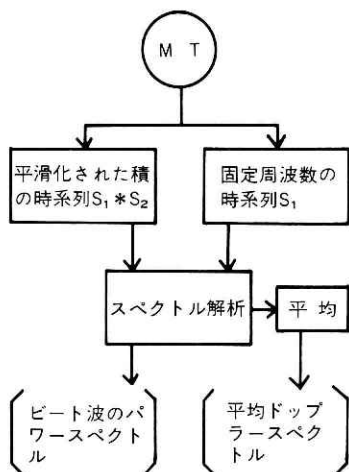


図8 データ処理の流れ図

Fig. 8 Crossing diagram of measurement system.

のデータだけの処理となる。279個のドップラースペクトルの平均分布を求めた。1個のドップラースペクトルはデータ個数4,096個から求めた一次スペクトル(2049個の成分波)である。後者に対して、低周波変動(波浪変動)を抽出するために、周波数 Δf だけ異なる二つのチャンネルのデータを用いて、両者を掛け合せ、300個ずつの平均を行い、4,096個の平均値からなる時系列を作り、この時系列に対してスペクトル解析を行った。

4.3.2 解析結果

実験は差周波数 $\Delta f=1.0\text{MHz}$, 2.5MHz , 4.5MHz の3ケースに対して、それぞれ5方位の直線飛行を行った。解析結果により、ビート波によるエコーが有意に計測されたのは $\Delta f=4.5\text{MHz}$ の場合だけであった。これは第1章で議論したように、アンテナのフットプリントの大きさが計測したい波浪成分の波長より十分に大きいことが必要であることによる。すなわち、式(3)より上記の三つの Δf に対して、共鳴する波浪の波長はそれぞれ355m, 142m, 79mである。これに対してフットプリントの大きさは図4より133mである。よって計測可能な Δf は4.5MHzのみとなり、上記のことを支持するものである。以上のことにより、これ以後の議論は $\Delta f=4.5\text{MHz}$ の場合についてのみ行うことにする。第4.1で示された実験時の海況をもとに、散乱計の結果を議論する。

(1) ドップラースペクトル

図9はドップラーエコーの時系列を示したものである。時系列 S_1 には約2kHzの波が卓越していることが分る。この波はさざ波とBragg散乱した波で、その周波数はほぼ航空機の飛行速度によって決まるドップラー周波数となる。これらの振幅は大きな波浪によって変調される。図10は1方位当りの飛行中(6km)のドップラースペクトルの変化を示したものである。この図から、スペクトル分布の形は非常によく安定していることが分る。よって実験に用いた航空機は安定した移動プラットフォームであったと言える。このことは第4.2節で述べた航空機の運動性能の結果と一致している。図11のドップラースペクトルは図10のスペクトルを平均し

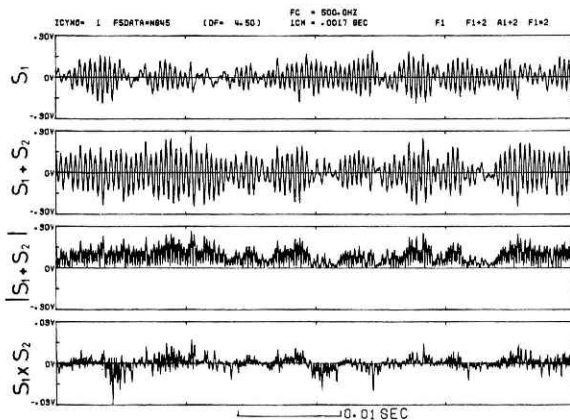


図9 ドップラーエコーの時系列 S_1 は固定周波数 f_1 , S_2 は周波数 $f_2=f_1+\Delta f$ の時系列を示す。

Fig. 9 Time series of the echo S_1 (f_1) and S_2 (f_2) where $f_2=f_1+\Delta f$. $S_1 \times S_2$ is the product of S_1 and S_2 .

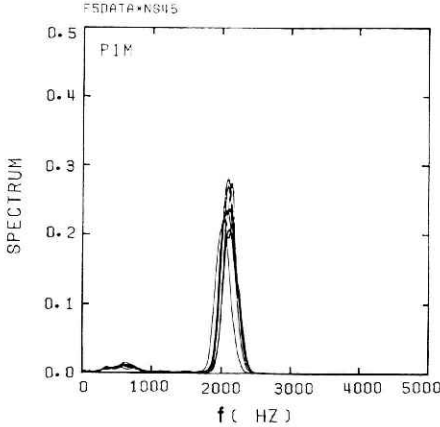


図10 固定周波数 f_1 のドップラースペクトル 9 個のスペクトルを図示した。これらは同じ方位で得られる一次スペクトルを31 個ずつ平均して得られたものである。
 Fig. 10 Doppler spectra for the echo of a fixed frequency f_1 .

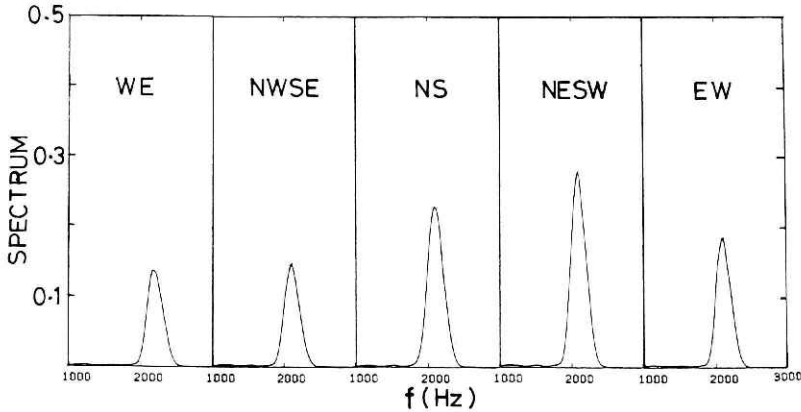


図11 方位別のドップラースペクトル これらは方位別に図10で示された9個のスペクトルを平均したものである。
 Fig. 11 Dependence of the Doppler spectrum on the azimuth directions.

で得られたもので、方位別に図示したものである。この図より、スペクトルピーク周波数は5方位の平均として2.1kHzとなり、式(1)より71.4m/sの速度に対応する。残念ながら、このフライトではINSとロランCの計測がともに欠測していたので、飛行速度に対しての照合データは得られなかった。別のフライトの平均値(表3, 68m/s)と比較すると、ドップラー周波数から求めた値の方が少し高めとなった。図11でもう一つ重要なことが分る。すなわち、5方位の中で北東から南西へのフライトの方位(NESW)のものがもっとも大きいエネルギーを有することである。この方位は第4.1節で予測した風向(NNE~NE)と一致するものである。アンテナ方位は第3.2節で示したように飛行方位と逆になるので、風に対してupwindとなる。もっとも小さいエネルギーの方位は西から北西となり、これはcrosswindの方位と一致し

た。

(2) ビート波のスペクトル

これは前節の解析法で説明したように、積の時系列(サンプリング周波数67Hz, データ個数4,096個)から計算した。結果は二つのラグ数に対して図12に示した。この図から、ビート波と共鳴する波浪成分波のエコーが存在し、その周波数(スペクトルピーク周波数)は式(2)の

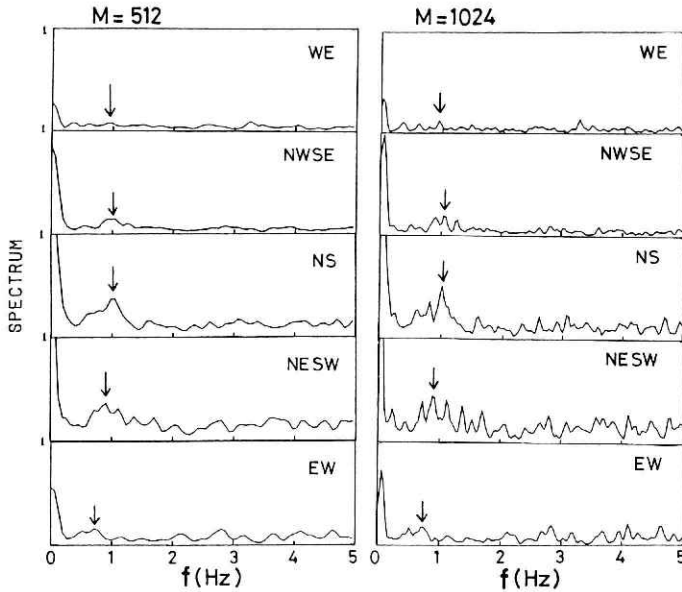


図12 差周波数 $\Delta f=4.5\text{MHz}$ に対するビート波のスペクトル 左図はスペクトルのラグ数 $M=1024$ 個(15.36秒),右図は $M=512$ 個(7.68秒)である。矢印は共鳴するビート波のスペクトルピークとみなした周波数の位置を示す。

Fig. 12 Dependence of the beat wave spectrum peak on the azimuth direction.

理論値とほぼ一致する。具体的に示すと次のようになる。式(2)は式(1)を用いると、

$$f_B = \pm f_w + 0.428 \times 10^{-2} f_D \quad (6)$$

ここで $\Delta f=4.5\text{MHz}$, f_w は式(3)より0.14Hzとなる。よって式(6)より表5の結果が得られる。この表において、実測値としての f_{DP} , δf_D , f_B はそれぞれドップラースペクトルピーク周波数, そのスペクトルの半値幅, ビート波のスペクトルピーク周波数(図12の矢印)を表す。また理論値としてビート波のスペクトルピーク周波数 f_B は式(6)に上記の実測値 f_{DP} を代入することによって得られる値である。 δf_B は上式において実測値 δf_D に対応するビート波のスペクトルの半値幅を表す。ここで波浪の周波数 f_w について正と負の両方が考えられる。なぜなら、ここで得られたビート波の共鳴エコーは、アンテナのビーム方位に動く周波数0.14Hzの

表 5 ビート波のスペクトルピーク周波数の特性
 Table 5 Characteristics of the electromagnetic beat waves matched to the ocean waves with the frequency, 0.14 Hz.

方位		E	NE	N	NW	W
項目		(EW)	(NESW)	(NS)	(NWSE)	(WE)
実測値	f_{Bp}	2109Hz	2090Hz	2090Hz	2109Hz	2168Hz
	δf_B	245	244	273	254	374
	f_B	0.72	0.88	1.04	1.04	0.98
理論値	$f_B(+f_w)$	1.04	1.04	1.04	1.04	1.07
	$f_B(-f_w)$	0.76	0.75	0.75	0.76	0.79
	δf_B	0.16	0.11	0.11	0.10	0.10

波浪の成分波となるからである。よって、この成分波はアンテナビーム方位に対して前進波か後退波の区別はあらかじめできないのである。言い換えると、ビート波のBragg共鳴機構は、共鳴する波が前進波であろうとも、後退波であろうとも式(3)を満たせば共鳴が成立するものである。よって、成分波が前進波か後退波かを決定するためには、計測された f_B の値が式(6)の f_w のどの符号の場合に一致するかを調べる必要がある。 $+f_w$ の場合であればアンテナと波浪成分波の進行方向が正反対であり、 $-f_w$ の場合であれば両者は同じ方向と解釈される。その理由は両者の相対速度が大きいほどビート波のドップラー周波数が高いことによる。表5の結果を図示すると、図13の中図を得る。この図から分るように、実測された周波数 f_B は理論式(6)が予測した範囲にあることである。これについての議論は後述する α 分布のところ、 α 分布の方向特性の議論と合わせて行うことにする。

ビーム波のスペクトルピークの形について検討する。計測されたスペクトルは2～3個のピークをもち、理論が予測する一つのデルタ関数的な形(Part Iの図6, Johnsonら(1982)の結果)でないこと、そして低周波領域にビーム波と無関係な大きなピークが存在することである。前者については本実験においても計測する波浪成分波の波長に比べて十分に大きいフットプリントが確保されなかったことによる。すなわち、沖の波浪において高いエネルギーをもつ波は沿岸の波に比べて大きい波長を有するため、今回のフットプリントでも不十分で、もっと大きいものが必要となることである。もう一つ考えられることは、図11と表5から単周波のドップラー分散分布が比較的幅広い分布をもつことによる。よって式(6)からビート波のスペクトルピークの形も幅広くなることである。一方、後者についてはPart Iで問題となった低周波のノイズとは異なるものである。Part Iのノイズは単調波のドップラー分散分布から分るようにほぼ完全に除去された。よってビート波のスペクトルのノイズはPart Iのノイズより高周波のものによるもので、次のことが考えられる。たとえ受信波のエコーをレンジゲイトで、注目する海面だけのエコーをサンプルホールドしても、図4に

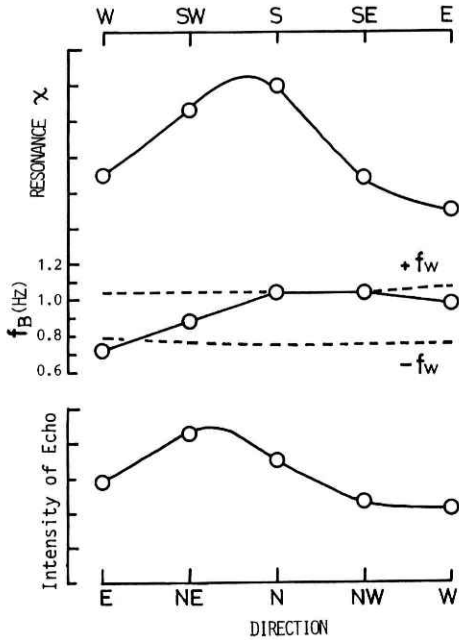


図13 2周波散乱計から得られた波浪の方向特性
 上図：図12のスペクトルピーク値から得られた x 分布
 中図：図12のスペクトルピーク周波数。点線は式(2)を示す
 下図：図11から得られた散乱強度の分布

Fig. 13 Directional characteristics of the beat wave obtained from the two backscattered echoes.

示したパルス幅が大きいためアンテナの真下に近い海面からの散乱波(小さいドップラー周波数をもつ)の一部を取り込んだものによることであろう。

散乱計から得られる方向特性について議論する。図13は x 分布、ピーク周波数、散乱強度について方向特性を図示したものである。初めに x 分布とピーク周波数について述べる。図12により、注目する波浪成分波は周波数が0.14Hzの波である。この波は観測塔の結果(図6)により、ほぼ南の方向から伝播して来るうねり的な波浪である。よってこの波は移動プラットフォームの進行方向と逆になり、式(6)の f_w の頃は正の値となる。このことから、 x 分布の方向特性は図13の上図のような横軸で表すことができ、0.14Hzの波浪の伝播方向は南～南南西の方向となり、第4.1節で示した波向の予測値より少し西寄りのものとなるが、ほぼ一致することである。

最後に散乱強度について述べる。図13の下図は図11のスペクトルを積分して得られたもので、相対値として示したものである。この分布の横軸は第3.2節で議論したことから、北向きの方向のものとなり、 x 分布と正反対の方位の軸となる。この図より、散乱強度がもっとも高い方位は北北東～北東の方向範囲となり、第4.1節の風向の予測値とほぼ一致した。上述したように、本研究では散乱強度をドップラーエコーから決定する方法を採用している点に特徴がある。この方法は、欠点としてドップラーエコーにもとづくために散乱計がフルコヒーレントシステムでなければならないこと、そしてスペクトル解析等の手数のかかる解析を必要とする点がある。しかし長所として、この方法は散乱計のノイズと信号の区別が周波数空間で合理的に行うことが可能であるために、良い精度が期待されることである。

5. ま と め

本論文(Part II)において、航空機から広域の波浪の周期と波向の計測のリモートセンシング技術について議論した。具体的にはPart Iで製作した2周波散乱計の改造及び相模湾上空で行った航空機実験についてである。Part Iにおいては、改造前の2周波散乱計を用いて固定プラットフォーム(観測塔)での実験について述べた。すなわち、得られた結果はPlant (1977)の海岸の崖からの実験と比較し検討した。問題点として散乱計の低周波ノイズと小さいアンテナのフットプリントのことが指摘された。航空機実験(移動プラットフォーム)においては、前者の問題は障害とならないことである。なぜなら、移動プラットフォームが航空機であるために、受信されるエコーが非常に高い周波数を有し、低周波のノイズとの分離が容易となり、ノイズはフィルターで除去できるからである。後者についてはアンテナ高度が十分に大きくでき、大きなフットプリントが得られるから解決されることになる。

上記の考えにもとづき、セスナ402型の航空機を用いて照射実験を行った。2周波散乱計の実験の他に、慣性航法システム(INS)とロランCによる航空機の運動性能を調べる実験も行った。実験はアンテナ入射角を25度とし、三つの差周波 Δf に対して5方位の直線飛行で行った。データ解析は主にFFT法によるスペクトル解析である。照合観測は平塚沖の観測塔で、三本のセンサーからなる容量型波高計で行った。次の成果を得た。

- (1) 固定周波数 f_1 から得られたドップラースペクトルの分布は非常に安定したものであった。スペクトルピーク周波数は5方位の平均値として約2.1kHzで、71m/sの速度に対応し、INSの測定値67m/sに比べると少し高めの値となった。
- (2) 上記のドップラースペクトルの全エネルギーから求めた散乱強度分布はほぼ風向と一致する方位にピークを有した。
- (3) 差周波数 $\Delta f = f_2 - f_1 = 4.5\text{MHz}$ のビート波に対して、共鳴する波浪成分波のエコーが計測された。ビート波のスペクトルピーク周波数は理論値とよく一致した。そのエネルギー分布は南から南南西のところにピークをもつものとなった。これらの結果は観測塔の照合観測から推定した波浪の波向とほぼ一致した。
- (4) 大きなフットプリントが確保されたにもかかわらず、ビート波のスペクトルピークの形はそれほど鋭い形にならなかった。これは高いエネルギーを有する沖の波浪は沿岸に比べて比較的大きな波長をもつことから、相対的に大きなフットプリントの確保とならなかったためである。
- (5) 航空機実験に必要な航空機の運動性能の計測は飛行速度に関してロランCで、ピッチ角とロール角については簡易型の傾斜計で精度的に十分である。

今後の課題として次のことが言える。今回の実験は散乱計の不調及び良好な実験条件にめぐまれず、また照合観測も不十分であった。よって今後多くの実験を行うとともに、計測能

率の向上を計る方法を研究する必要がある。

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) 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.
- 4) 徳田正幸・内藤玄一・都司嘉宣・渡部 勲(1981): 圧力式波浪計による相模湾での波浪観測 I. 国立防災科学技術センター研究報告, No26, 133-154.
- 5) 徳田正幸・渡部 勲(1983): 相模湾の波浪特性II. 国立防災科学技術センター研究報告, No31, 219-239.
- 6) 徳田正幸・竹田 厚・渡部 勲(1987): 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, 国立防災科学技術センター研究報告, No40, 311-338

(1987年11月24日 原稿受理)