

マイクロ波散乱計による海上風の遠隔測定実験 (Ⅱ)*

内 藤 玄 一**・ 渡 部 勲**・ 徳 田 正 幸***

国立防災科学技術センター平塚支所

Remote Sensing Experiments of Ocean Winds Using the Microwave Scatterometer (Ⅱ)

By

Gen'ichi Naito, Isao Watabe and Masayuki Tokuda

Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention

Nijigahama 9-2, Hiratsuka, Kanagawa 254, Japan

Abstract

Various measurements of radar backscatters at the ocean surface were made by using the microwave scatterometer system which was developed as a remote sensor of wind vectors. The observational site was Sagami Bay, and the data acquisition was carried out on the marine observation tower off Hiratsuka and on an airplane loading the system in the open sea.

On the tower measurements, a number of NRCS (Normalized Radar Cross Section) characteristics were shown such as the azimuth and incidence distributions for the windward angles within about 150 degrees, the wind dependence and the polarization effects. These results were derived from the time series data of a sea area illuminated by a pencil-beam.

On the airborne measurements, the various NRCS behaviours were found over the whole azimuth angles by circular flights. One of them is the typical pattern of the radar backscatters at the sea covered with wind waves. Furthermore, the homogeneity of NRCS in the open sea and in the coastal region was estimated by straight flights.

The analyzed feature of the NRCS in log space indicates that the observed azimuth distribution can be well expressed as a cosine series function up to the fourth term, and that the upwind direction can be determined by the profile of the second term and first term.

The results were compared with the SASS I model function, and the differences between the present model and the SASS I model were discussed.

* この研究は、海洋開発調査研究促進費「海洋遠隔探査技術の開発研究」と経常研究費によって行われた。

** 沿岸防災第2研究室, ***主任研究官

1. はじめに

リモートセンシング技術の開発研究の一環としてマイクロ波散乱計を試作し、その性能概要及び実験結果の一部を前報（内藤他，1980）で報告した．今回は海上風測定レーダとしての同装置を平塚沖観測塔と航空機に搭載して実測風との照合実験を行い、それらの結果について示す．

広い海洋上の風速分布を短時間に知る事が出来れば、風によって引き起こされる様々な災害を回避するのが容易になる．人工衛星からのリモートセンシングはこの目的を可能なものにした．しかしながら散乱計による海上風ベクトルの測定のために必要なアルゴリズムは、開発の先駆者である米国でも完全に確立された訳ではない．海面の物理的・化学的状態は複雑であり、更に定常性と一様性は最も良い状態でも近似的にしか成立しない．

電波が海面で散乱される際、そのメカニズムに寄与する要素は誘電率など海面側のものと用いた電波の波長及び偏波による．従って海上風を測定するために使用するレーダ波は、最も適した周波数等の測定器側での条件を自然現象へ適合させて選択しなければならない．風浪に覆われて粗になった水面と電波の干渉の研究は、米国で打ち上げられた海洋衛星 SEASAT-1 搭載のマイクロ波散乱計（SASS）によって初めて広域的海上で実を結んだといっている．我が国における海上風とレーダ波の海面における散乱との関係を調べた研究は少く、Masuko *et al.* (1981) ら数例をみるのみである．今回の実験の解析結果には、SASS に関して提案されたモデルとの比較検討をも加えられている．

2. 海面の規格化後方散乱断面積と粗度

海面近くの大気境界層における風の擾乱の運動量すなわちレイノルズ応力によって直接干渉を受ける波浪は小さな波長を持つ波浪群である．これらの波浪群へ寄与する卓越した強制力は表面張力と重力であるので、発生期の波浪は capillary-gravity waves と呼ばれる．

水面波の角周波数 w と波長 λ_w の間には次の関係がある．

$$w^2 = gk + \tau k^3 \quad (1)$$

$k = 2\pi/\lambda_w$; 波数, g ; 重力加速度, τ ; 単位密度当りの水の表面張力．

上式により波数 k が大きくなると（波長 λ_w が小さくなると）、波浪は表面張力が支配的になることがわかる．実際の海洋上では水面下に風による吹送流が存在するため、波浪の位相速度 w/k は(1)に完全には従わない．(1)より重力と表面張力が同じ程度に寄与する波長は、 $\lambda_w = 1.72 \text{ cm}$ であることが分り、この波長より小さな波浪は表面張力に支配される．波浪の高周波成分の特性は、風洞水槽における Mitsuyasu and Honda (1974) の実験、海洋上

における Kondo *et al.* (1973) の研究などがあり、周波数スペクトルについてもかなり広い帯域で調べられている。

我々が風ベクトルを決定するために探査しなければならない波浪群は capillary-gravity waves であろうことは充分理解できるが、レーダ波の最適周波数は砕波等の他の現象も考慮しなければならないので不確定な面を多少残す。しかし海洋波の波長 1.72 cm に対応するレーダ波の波長の近傍が適当であることは言うまでもない。

電磁波と海洋波の干渉について Valenzuela (1978) は海洋リモートセンシングの問題に即して良くまとめている。とくにレーダ波の海面への入射角に対する後方散乱のメカニズムを図示することにより、風ベクトルを決定するのに容易なレーダビームの条件を明らかにしている。入射角が約 10° よりも小さい場合、レーダビームは海面で鏡面反射に準ずる様な反射をする。また 80° を越えると、前方の波浪にレーダビームがさえぎられ後方の海面をすべて照射しない SHADOWING 現象が起きる。いわゆる Bragg 散乱と呼ばれ、散乱計の測風原理となっているのは中間の入射角に対するものである。

試作されたマイクロ波散乱計のレーダ周波数は 16.0GHz (波長 1.87 cm) であり、SEASAT-1 の散乱計周波数 14.6GHz (波長 2.1 cm) よりも少し高い。従ってレーダビームと海面の波浪との干渉は両者で多少異なると考えられる。

風浪による海面の粗度はレーダ波の規格化後方散乱断面積 (Normalized Radar Cross Section, 略して NRCS), あるいは単に後方散乱係数と呼ばれる変数で表現される。NRCS は目標とした海面からの受信電力を信号処理することによって求められ、次式のレーダ方程式から導く。

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma^\circ \cdot A}{(4\pi)^3 \cdot R_c^4 \cdot 10^{0.2\alpha \cdot R_c} \cdot L_w} \quad (2)$$

ここで、 P_T ; 送信尖頭出力, G ; アンテナ利得, λ ; レーダ波長, A ; レーダビームが照射する海面領域, R_c ; 目標海面までの距離, α ; 伝播損失定数, L_w ; 伝送線路系損失であり、これらの定数及び助変数は実験時の条件及び装置の性能によって与えられる。 σ° は NRCS で受信電力 P_R に比例する。 α は降雨や、強風時に発生する海水飛沫の層によって生じる電波の減衰の程度を表すものであり、通常晴天時における実験では海面までの距離が小さければ $\alpha = 0$ として良い。

レーダ波が照射する海面は風向に相対的な方位によって粗度が変わるため、NRCS σ° は $\cos$ 関数に近い方位角分布をもつ。波浪の向きはうねりの存在や海流のため必ずしも風向と一致しない。レーダ波が直接探査しているのは波浪であって風ベクトルではなく、また風ベクトルは直接波浪を生成している訳ではない。そのために NRCS σ° を風向風速の関数として表わすのは最も良い手段とは言えないが、実験データの解析をする際次の形がよく用いられる。

$$\sigma^{\circ} = G'(\theta, \phi) U^H(\theta, \phi) \quad (3)$$

あるいは $G' = 10^{G(\theta, \phi)}$ とおくと,

$$\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 10 [G(\theta, \phi) + H(\theta, \phi) \log_{10} U] \quad (4)$$

ここで θ は入射角, ϕ は風向に相対的な方位角であり, U は平均風速を指す. G, H は θ, ϕ の他に散乱計の送受信の偏波により大きく異なる.

大気が海面へ作用するレイノルズ応力によって風浪が発生するのであるから NRCS σ° を表現する変数としては, 大気の摩擦速度 u_{*} が平均風速 U よりも適当である. u_{*} と U の関係は海面近くの大気の安定度に依存するため一定ではない. しかし u_{*}/U のばらつき(海面での抵抗係数のばらつきに対応する)は, (4)で与えた関数関係によって σ° から風ベクトルを決定した時のばらつきに直接つながるものである. 抵抗係数 $C_D = (u_{*}/U)^2$ の海洋上の多くの測定値は, Kondo (1977a) によって比較検討されている. 一方平均風速の高度分布は海面に近い大気境界層では,

$$U = (u_{*}/0.40) \ln(z/z_0) \quad (5)$$

で表わすことが出来る. z は海面からの高さ, z_0 は海面の物理的状態を表わすパラメータで空気力学的粗度と言われる. 粗度 z_0 は中程度の風速時では, 0.1 mm のオーダーの値をとる, (5)より風速鉛直分布が測定出来れば間接的に u_{*} を決定できる.

下層大気の構造によって海面の粗度が変わるため特定の基準高度による平均風速を指定しなければ(4)の形の測風アルゴリズムが成立しない. SASS では初期の風速照合データの測定実験で用いた高度 19.5 m を基準としている.

3. 海洋上の測定実験

マイクロ波散乱計は海面の NRCS と風ベクトルの関係を調べる実験装置として製作された. レーダ周波数 16.0 GHz のコヒーレント・パルスレーダであり, 装置全体が小型軽量化した 7 個の部分から構成されていて可搬型となっている. 送信尖頭力は 50 mW で, 測定が可能な範囲は海面の状態にもよるが約 900 m 以内である. 従って海面からのアンテナ高度によってパルス幅を切り替えて測定する. 海上観測塔(高度約 20 m)で実験する場合はパルス幅 30 nS 又は 100 nS のレーダ波を, 航空機に装置を搭載して実験する場合は 1 μ S を用いる. 送受信の偏波は目的に応じて垂直偏波又は水平偏波を使用する. レーダビームの半値幅は 1.8° であり, 海面を照射する面積は小さい. 海洋上で実施した NRCS の測定実験の概要を以下に示す.

(1) 平塚沖観測塔における測定

マイクロ波散乱計を平塚沖1 kmの海上にある観測塔に設置して測定を行った。航空機搭載による実験などの場合を除いては、この塔におけるNRCSの測定が中心となる。観測塔自体がかなり大きい塔によって周辺の気流が乱され、特に風下側では遠方まで自然状態でない気流が続く。そのため海面へのレイノルズ応力が異常となり、それによって生じる小さな波浪群も不自然なものになる。小さな波浪群の不自然な性質は後に実施したところの追い風条件で収集したNRCSの方位角分布が不規則な形をしている事で確認されている。他方海岸線からの距離が1 kmしか離れていないため陸風による波浪の発生は、中程度以上の風速時には十分な吹送距離でないで一般的なNRCSのアルゴリズム確立の条件として不適当である。結局散乱計による測定結果の解析は、沖から吹く風に向う条件下のみ実測風と照合する事になった。観測塔に取り付けられたアンテナの状態及び塔全体からみたアンテナの配置図を写真1と図1に示す。アンテナの可能な移動範囲は、水平面で 150° 以内の方位角、鉛直面で 20° から 90° までの入射角であって、これ以外の方向を指すとレーダビームが塔の影響を強く受ける。測定上の制限が大きくてNRCSの分布は向い風の条件下でしか得られないが、固定したプラットフォーム上での測定であるため長時間安定したデータ収集を行うことができる。更に塔では伝統的な方法による風速測定や波浪などの測定がなされており、NRCS測定値との良い照合データが得られる。

(2) 相模湾内で行った散乱計航空機搭載実験

無限吹送距離をもつ風ベクトルとNRCSデータの照合実験は外洋上で実験するのが最も望ましい。航空機に散乱計を搭載して海洋上でNRCSデータを取得するならば、全方位にわたるレーダ波の後方散乱特性が求められる。しかしながら散乱計を航空機に搭載する場合、今

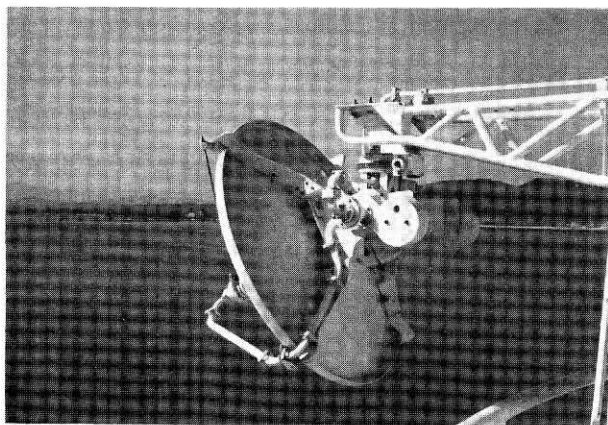


写真1. 観測塔屋上に据え付けられた散乱計アンテナ。

Photo 1 Antenna of the scatterometer on the observation tower.

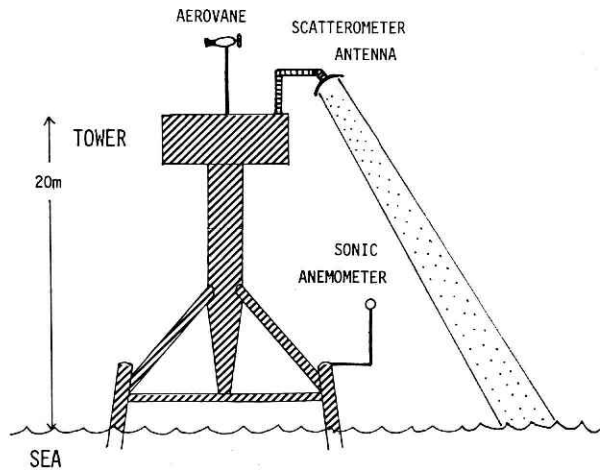


図1 観測塔における海面後方散乱の実験概念。

Fig. 1 Concept of the tower experiment.

回の装置では技術的にかなり困難があり、航空機の動揺に対するデータの信頼性も充分検討しなければならない。同時にNRCSと照合する実測風の収集方法が限られる。

良質のNRCS及び照合のための風ベクトルを測定するために綿密な計画の下に、1980年10月と1981年11月の2回にわたって航空機による実験を相模湾内で行った。散乱計搭載機の他に照合データである風ベクトル等を測定する航空機を随伴させた。図2に実験時のフライト形式を示す。直線飛行と円旋飛行を行い、小旋回では航空機のバンク角によって回転半径が決まる。図中の相模湾奥部に観測塔が存在するため、塔近辺での飛行実験では連続的に記録されている塔でのデータが照合データとなる。湾中央部には固定した観測点がなく、風ベクトル等を測定する目的で船を出動しなかったため海面近くの照合データは得られなかった。従って随伴した航空機による超音波風速計等の出力データとNRCSデータを照合した。外洋上での実験のうち、円旋回飛行によるデータ採集の状態を示す概念図を図3で示す。散乱計が低高度の実験用に設計されているため、飛行は200mから400mの低い層でのみ測定が行われた。

散乱計を搭載した状態の航空機（パイパー PA-34-200）を写真2に示す。写真で分るようにアンテナは後部カーゴドアを取り外して据え付けられているが、実験時以外の飛行中には機内に収納される。海面へのレーダビームの入射角はアンテナ角の調整（10°の変化）と航空機の傾斜（バンク角の変化）を合せることによって、25°から55°までとることが出来た。海面の小さな領域におけるレーダ波の後方散乱特性は円旋回によって調べた。図3で示されている様に散乱計アンテナは旋回の内側に取り付けられているため、レーダ波が照射する海面の回転半径は航空機の旋回半径より小さくなる。そのため目標海面は小さな円内で

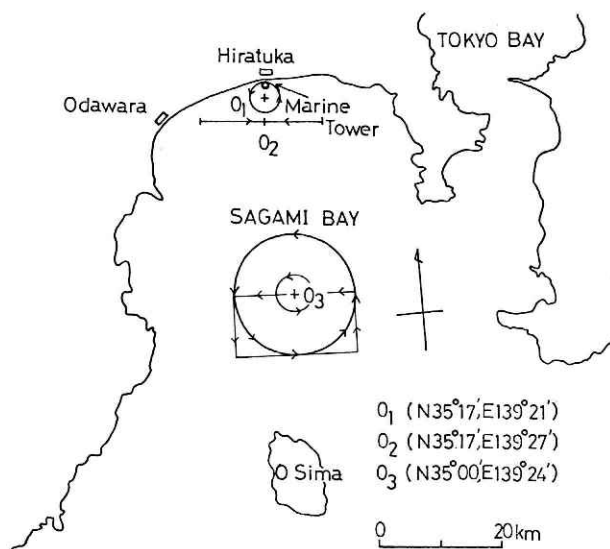


図2 相模湾における航空機実験のフライト形式。

Fig. 2 Flight pattern of the airborne experiment in Sagami Bay.

Concept of the flight experiment

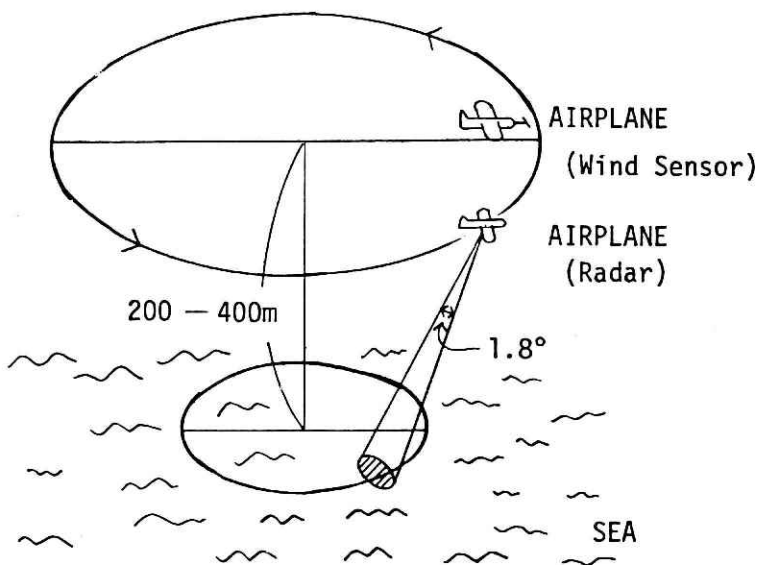


図3 円旋回飛行による実験の概念。

Fig. 3 Concept of the airborne experiment.

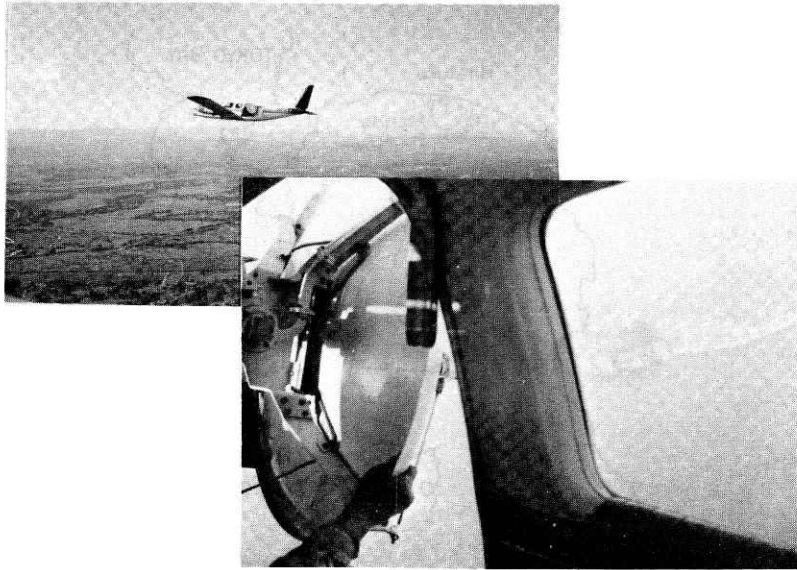


写真 2 散乱計を搭載した航空機。

Photo 2 Airplane loading the scatterometer system

あって、充分に一様性が保たれる領域での NRCS の全方位にわたる分布を得ることが出来た。

すべての実験飛行は降雨時を除いて行われ、飛行高度も低いため電波伝播の大気中での減衰は無視した。

照合データを取得するための随伴機（エアロコマンダー 685）はレーダ搭載機とほぼ同一飛行を行ったが、更に相模湾中央部での大気境界層の鉛直構造を調べるための特別観測も実施した。これはレーダ搭載機の高度における照合データが海面上の風ベクトルを決定するのにどの程度の信頼性があるかを評価するためにも必要であった。レーダ搭載機の気流の大きな乱れによる動揺は NRCS データに不規則なばらつきを与える。しかし今回は航空機内に散乱計を装備する上で、予めこの動揺を防止する手段を持ちえなかった。

4. 測定結果

4.1 観測塔で測定した NRCS

観測塔は海底に固定されたプラットフォームであるため、潮汐の変動によって海面上のアンテナ高度は多少上下する。しかしデータ採集時間が長時間に及ぶ場合は途中で信号処理を調整する必要があるけれども、大体の測定時には初期に設定した計測条件を変更する必要がない。平均海面からアンテナホーンのレベルまでは約 20 m であり、信号パルス幅は短い 30 nS を用いる。

散乱計のペンシルビームで照射される海面の領域は小さい．図4に高度 z の変化による目標海面の大きさ L ， L_3 を入射角 θ の差異をパラメーターとして示す． $z = 20\text{ m}$ では照射される領域は $L \div 3.5\text{ m}$ ， $L_3 \div 1.5\text{ m}$ の長円が最も大きい．従って波向にもよるけれども，風浪のうち，卓越したエネルギーをもつ波長帯は，レーダビームで覆われない．入射角が小さい場合，例えば $\theta = 25^\circ$ のとき， $L = 76\text{ cm}$ ， $L_3 = 69\text{ cm}$ の長円が照射される海面となる．この大きさはマイクロ波の後方散乱が生じる小さい重力波の波長帯を充分含むものと考えて良いだろう．大きな波浪による後方散乱への寄与は，同一方向のレーダビームの照射による時系列データとして取得される．

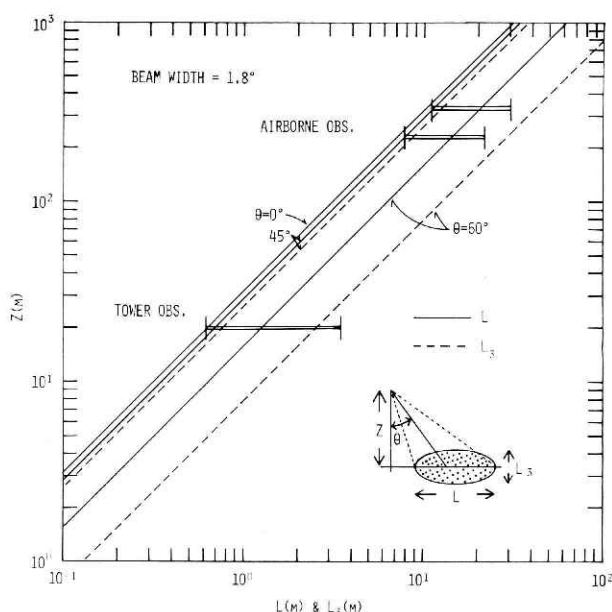


図4 入射角 θ をパラメータとしてレーダビーム照射海面のスケール L ， L_3 を高度 z に対して示したもの．

Fig. 4 Target scales L and L_3 of the sea surface as a parameter of incident angle θ versus antenna height z .

測定したNRCS σ° のうちレーダ方位角 AZ に対する分布が得られたものと，海面への入射角の変化に対する分布が得られたものを図5.1～図5.7までに示す．対応する実測風を表1に表わす．実測風は $z = 20\text{ m}$ の高さにある塔屋上のエーロペン又は $z \div 7\text{ m}$ にある超音波風速計によって測定されたものである． σ° の分布を求めるために，1方向のデータ採集時間を203 secとした．また風速の測定時間は1回30分である．表1で分るように σ° の方位角分布あるいは入射角分布を取得するためには全測定時間が1時間を越える．したがってこの時間に風ベクトルが極めて定常である場合は少なく，良質の分布を得ることが困難であった．

図 5.4 の σ° の方位角分布, 図 5.3 と図 5.6 の入射角分布は希に良い事例である.

大気境界層の乱流構造を調べるのに基準となっている 30 分間の測定間隔において NRCS σ° の変化の程度を図 6 に示す. 強風時の向い風 (UPWIND) に対するもので, 両偏波の場合とも 1 回 203 秒間の平均値をプロットしている. 各測定値に付している線分は σ° の変化の標準偏差を表わす. 風ベクトルの定常性は風向, 平均風速とも存在し得る観測例としてはかなり良い状態と言えるもので, 大気乱流としての変動以外に測定値のトレンドはない. 入射角 $\theta = 40^\circ$ でみる風浪に覆われた海面の NRCS は, 水平偏波, 垂直偏波のどちらのレーダ波においても, 平均値, 標準偏差ともほぼ一定と言える. 即ち定常な海面状態なら後方散乱を観測するのに, 200 秒程度の時間で充分であろう.

図 5.4 は向い風方向の典型的なレーダ方位角分布を示す. 強風時の測定で, 海面に白波, 砕波が多く目視できる状態におけるものである. 水平偏波の NRCS の方が垂直偏波のものより約 2dB 小さく, 各々の変動の標準偏差は 2.8dB, 2.0dB 程度である. この変動幅は, レーダ波が capillary-gravity waves を中心とした小さな波浪群によって散乱される場合以外の後方散乱現象に対応したものと考えてよいだろう. この要素の 1 つに砕波からの後方散乱が挙げられる. σ° の方位角分布のピークは緩かである. 従ってピークに対応する方位角より風向を決定するのは, 全方位にわたる σ° の分布がない場合は容易でない. 表に示したよ

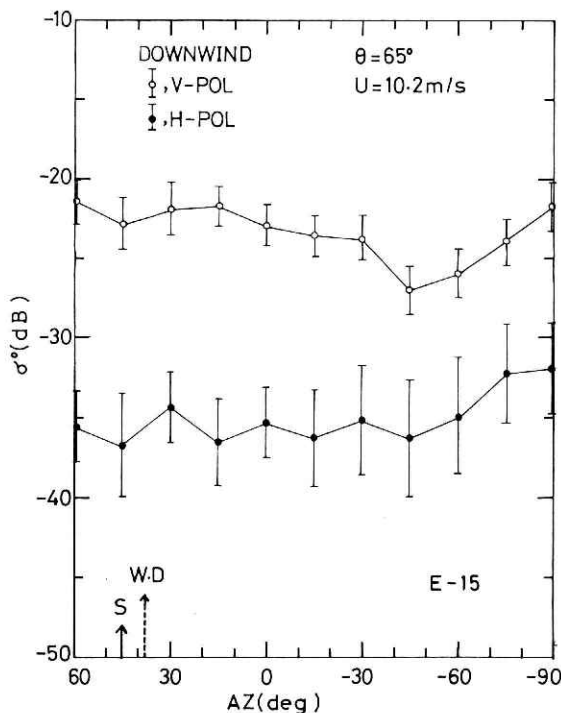


図 5.1

図 5 観測塔で測定した NRCS σ° (dB) の方位角 AZ に対する分布. 測定値に付した線分は標準偏差を指す.

Fig. 5 NRCS σ° (dB) distribution as a function of azimuth angle AZ or incident angle θ in the tower experiment. The bar attached to the measured value is the standard deviation.

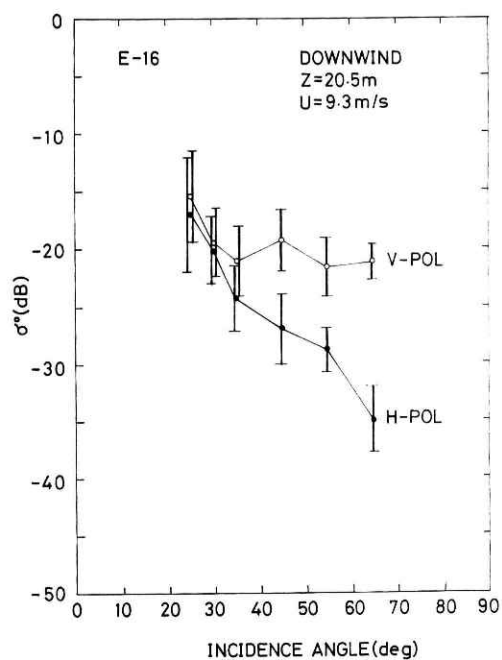


図 5.2

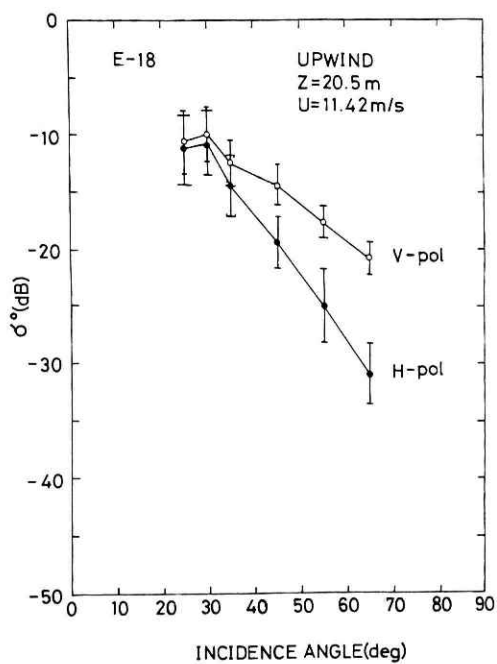


図 5.3

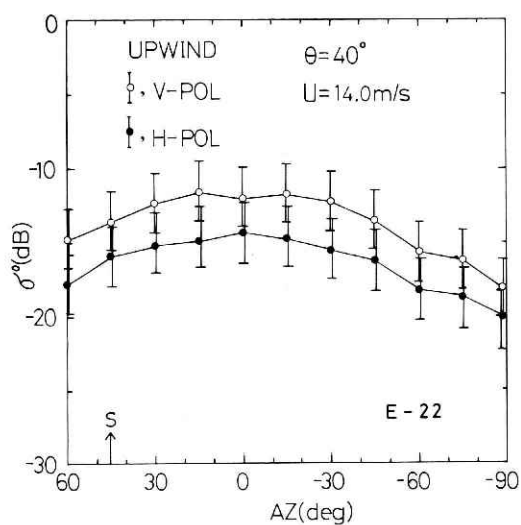


図 5.4

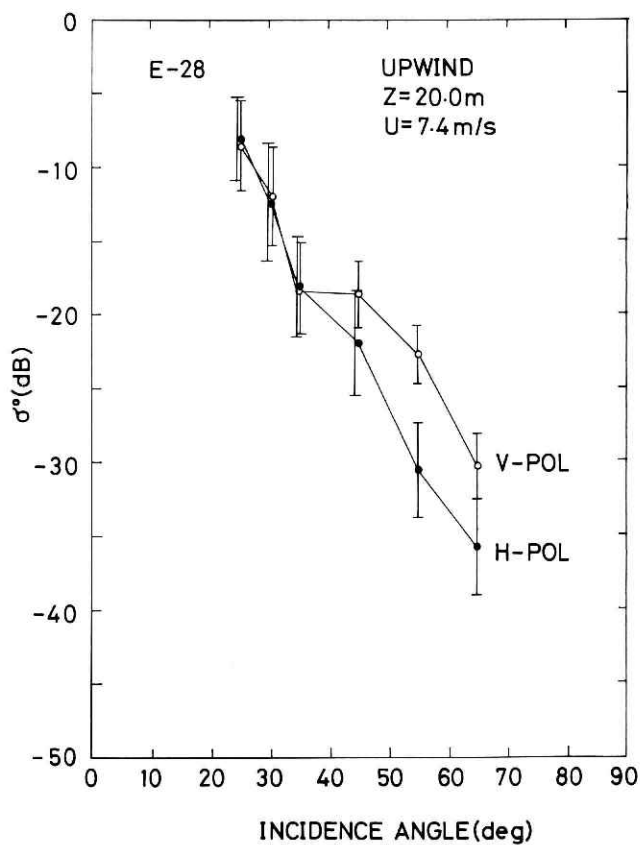


図 5.5

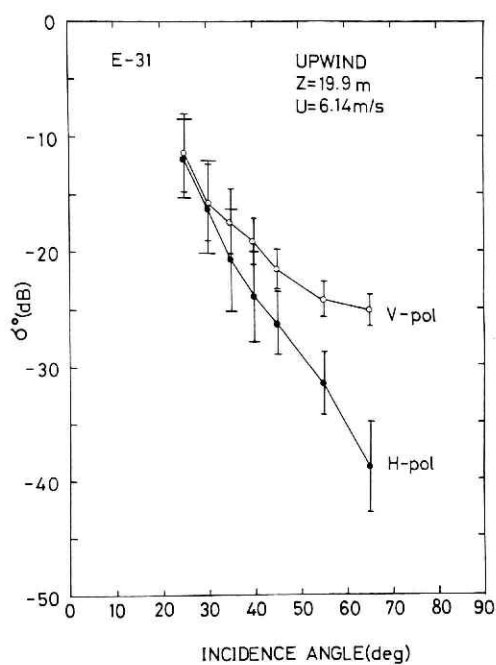


図 5.6

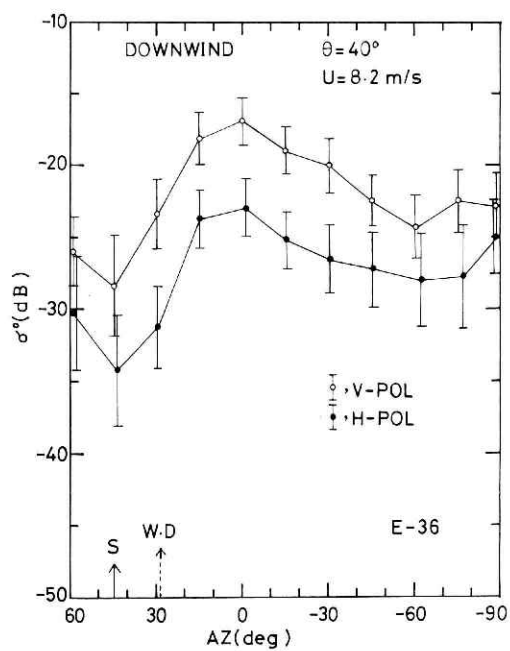


図 5.7

散乱実験 RUNNo.	入射角 (度)	実測風 RUNNo.	風 向 (度)	風 速 (m/s)
E-15	65	1501	7	9.7
		1502	7	10.2
		1503	7	10.7
		1504	7	10.3
E-16	25~65	1601	5	9.7
		1602	5	8.9
E-18	25~65	1801	189	11.6
		1802	188	11.2
E-22	40	2201	201	13.6
		2202	202	14.0
		2203	202	14.3
E-28	25~65	2801	222	7.8
		2802	216	7.0
E-31	25~65	3101	180	6.1
		3102	180	6.2
E-36	40	3601	14	8.3
		3602	13	8.4
		3603	19	7.8

表 1 観測塔における海面後方散乱測定時の風向風速.

Table 1 Directly measured values of wind direction and speed in the tower experiment of the sea backscatter.

うに実測した風向と分布のピークの位置は一致しなく、約 15° の位相差がある。観測塔は海岸線より 1 km 離れているとはいえ、比較的長い周期の波浪は地形の影響を受ける。また小さな波浪群の発生はうねりが存在する等の条件によっても、様々な状態を作りだすと思われる。この図で示された程度の位相のずれは、他の海域でもしばしば生じるだろう。

追い風 (DOWNWIND) 方向の NRCS の方位角分布は図 5.1 と図 5.7 で見られるように規

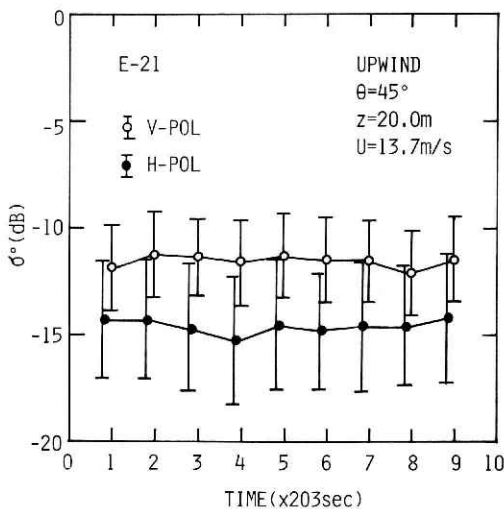


図 6 強風時における向い風方向 NRCS の定常性.

Fig. 6 Stationarity of the upwind NRCS under strong winds.

則的な形を示さない。両方の観測例とも弱風時でなく、風向も海岸線に対して 90° に近い。従って波向もほぼ海岸線に垂直に向いている。そのため測定される NRCS は波向方向にピーク値を示し、レーダ方位がその位相から離れるに従って左右対称なパターンが期待される。しかし図から分るように、観測塔からかなり離れた海面を目標とする入射角にもかかわらず追い風方向を特定するピークは明瞭に現われていない。

比較的強い風速時で、向い風方向の NRCS の入射角特性を示したのが図 5.3 であり、比較的弱い風速時の特性を示したのが図 5.6 である。図 5.3 の小さい入射角での多少の不規則性は、レーダ波が塔に影響されたものと思われる。両方の観測例とも、入射角が小さいとき送信の偏波が異なっても大きな差はないことが示されている。しかし入射角が大きくなるに従って NRCS の偏波による差が大きくなり、水平偏波の方が垂直偏波の方よりも減衰が激しい。いずれの条件下でも、NRCS σ° (dB) の入射角 θ に対する依存性は単調であり、ほぼ直線に近い。測定値を $\sigma^\circ \propto \theta^D$ で近似すると各々の RUN より、

$$\begin{aligned} U = 11.4 \text{ m/s のとき, } D &\div -0.30 \text{ (垂直偏波),} \\ &\div -0.57 \text{ (水平偏波),} \\ U = 6.1 \text{ m/s のとき, } D &\div -0.35 \text{ (垂直偏波),} \\ &\div -0.65 \text{ (水平偏波)} \end{aligned}$$

が求められる。

RUN E-31 では水面からの高度 660 cm に取り付けられた超音波風速計でもって風ベクトルの測定を同時に行った。NRCS の測定時間である 1 時間における大気乱流の統計量を 20 分間隔で求めて表 2 に示す。また海表面温度は 18.5°C 、高度 10 m での気温は 13.4°C で変化なく、海面に近い大気の状態はやや不安定な条件であった。更に 0.1 秒毎の採取間隔で容量型波高計によって測定した風浪の標準偏差は 14 cm であって、ほとんど Gauss 分布に近い。即ち海面の粗度は風浪のみによって構成され、うねり等の介在による複雑な要素をほとんど含んでいない海況と考えてよい。風速変動 3 成分 (u , v , w) の標準偏差 (σ_u , σ_v , σ_w) の値は、大気が中立の安定度をもつときに比べて大きい。とくに気流に垂直な水平成分 σ_v

表 2 海面後方散乱測定 RUN E-31 に対応する風ベクトルの乱流統計量。

Table 2 Turbulence properties of wind vector for RUN E-31 in the tower experiment of the sea backscatter.

RUN	U (cm/s)	σ_u (cm/s)	σ_v (cm/s)	σ_w (cm/s)	u_{rms} (cm/s)
1	523	71	132	31	27
2	548	83	108	34	20
3	509	72	83	32	16

は弱風時で不安定な大気の特徴を示している。表より気流方向の乱流強度 σ_u/U は 0.13 の値をとり、観測塔での中立安定時の多くの測定によって与えられている $\sigma_u/U \div 0.09$ よりかなり大きい。RUN E-31 は海面近くの気流の擾乱が激しい時の観測である。大気の摩擦速度 u_* は測定時間の経過とともに減少しているが、大気が不安定時の u_* は測定値のバラツキが大きい事が従来の測定より認められている (Naito, 1978)。表 2 の u_* より導出した海面での抵抗係数の平均値は $C_D = 1.59 \times 10^{-3}$ 、空気学的粗度の平均値は $z_0 = 0.029$ cm が導かれる。風ベクトルの擾乱は海面上でかなり大きいものにもかかわらず、図 5.6 で見られるように NRCS の測定値はよい定常性を示していることが分る。

追い風方向における NRCS の入射角依存性は図 5.2 に示されている。レーダ方位角に対する分布で示したように、入射角に対する分布も追い風条件下では自然な相関を示していないと考えられる。とくに垂直偏波の場合は不規則である。水平偏波の場合は、入射角の増大とともに NRCS が減少する性質を示してはいるけれども、定量的な相関特性を求めるためには誤差の補正が必要と思われる。

NRCS は風速に対して (4) の形の関数関係が期待される。向い風の条件下で求めた NRCS の方位分布のピーク値及び風向方向で求めた NRCS の測定値を平均風速 U と対比させた。図 7 は入射角 θ をパラメータとして $\sigma^\circ(\text{dB})$ を U に対して示したもので、水平偏波の場合である。図中の直線は各入射角別の測定値を近似したものである。図 8 は図 7 と同じであるが、垂直偏波の場合を示す。両図に用いられているデータは表 1 で示されている観測の外に、定常な気象条件下で測定した NRCS のすべてのデータを含む。

図の近似線はかなり良く測定値を代表している。平均風速が 15m/s を越える強風時の観測がないため、図で示される $\sigma^\circ(\text{dB})$ の風速依存性は限定されよう。NRCS の入射角特性で既に明らかになった事であるが、水平偏波の方が垂直偏波の場合よりも入射角の差に対して大きく変わる。この事は海面におけるレーダ波の後方散乱現象と粗度の関係を調べるためには水平偏波の方が測器として用い易い事を示している。近似線は (4) の形をとっているから、入射角 $\theta = 35^\circ$ と 55° に対する係数を求める。方位角 $\phi = \chi$ は向い風の条件である事を指す。

水平偏波に対して

$$\begin{bmatrix} G(35^\circ, \chi) \\ G(55^\circ, \chi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.07 \\ -5.10 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} H(35^\circ, \chi) \\ H(55^\circ, \chi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.50 \\ 2.50 \end{bmatrix} \quad (6)$$

垂直偏波に対して、

$$\begin{bmatrix} G(35^\circ, \chi) \\ G(55^\circ, \chi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.86 \\ -4.63 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} H(35^\circ, \chi) \\ H(55^\circ, \chi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.50 \\ 2.81 \end{bmatrix} \quad (7)$$

NRCS の測定値は多少ばらついているが、勾配に対応する $H(\theta, \phi)$ は入射角の増大とともに大きくなる傾向をもつ。

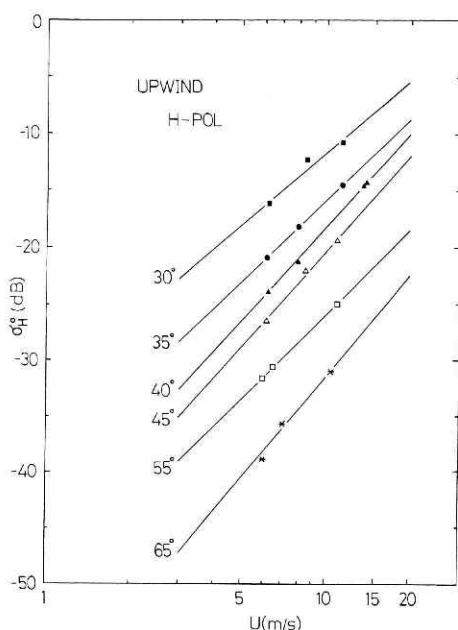


図7 観測塔で測定した向い風方向NRCS σ^0 (dB)の風速依存性。送受信の偏波が水平偏波の場合。

Fig. 7 Wind dependency of the upwind NRCS σ^0 (dB) in the tower experiment. Transmitted and received radar waves are in horizontal polarization.

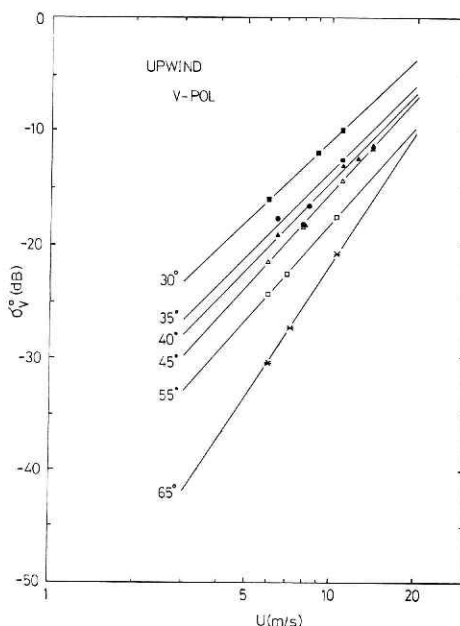


図8 観測塔で観測した向い風方向NRCS σ^0 (dB)の風速依存性。但し垂直偏波の場合。

Fig. 8 Same as Fig. 7. But for vertical polarization.

4.2 航空機による実験結果

散乱計を航空機に搭載して行った海面の後方散乱実験では、円旋回と20kmの垂直飛行を中心としてデータ採取した。相模湾は南方に向かって開いており、海岸に近い領域を除けば外洋の性質を満たしている。湾の大きさは図2で示されるように約50kmであるから、中程度より強い風の場合は湾内の風系はほとんど一様である。飛行高度は230mと330mであって、海面に近い。従って図4で分るように、レーダビームに照射される海面は帯状のリンク又は直線となる。例として高度330m、入射角 $\theta = 35^\circ$ のとき、帯状の海面の幅は15mである。

連続的な円旋回飛行によるNRCS σ^0 (dB)の観測例を図9に示す。10°毎のデータの平均値とその変化の標準偏差を3旋回にわたって示してある。図から分るように1旋回に2つのピークを持つパターンであり、中程度の風速(例では $U = 7.9$ m/s)時のNRCSの代表的な分布形である。NRCSのレーダ方位角特性を表現するためには周期関数で測定値を近似するのが合理的である。 σ^0 の入射角 θ 、方位角 ϕ 及び平均風速 U に対する関数関係を表現するためにいろいろなモデルが提案されてきた。その中でカンサス大モデル(UKモデル)は σ^0 を

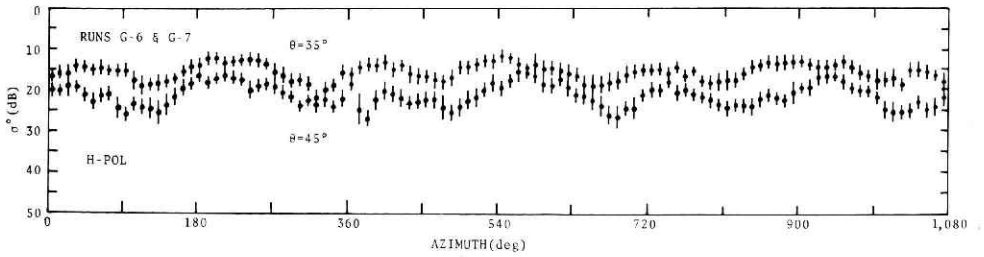


図9 円旋回飛行を行って測定したNRCS σ^0 (dB) の方位角分布の例. 10° 毎にデータ処理を行った.

Fig. 9 An example of azimuth distribution of NRCS σ^0 (dB) measured in the circular flight. The data proceed every 10 degrees.

cos 級数で表わし, 第2項まで使っている (Dome *et al.* 1977). 他に UK モデルよりも更に高い項まで考慮した試みがあるが, 今回測定値の変動を表現するのに第4項までとることが適当と考えて解析した. NRCSはdB表示の値で展開する. 即ち

$$\sigma^0(\text{dB}) = \sum_{n=0}^4 a_n(U, \theta) \cos[n(\phi - \chi)] \quad (8)$$

ここで振幅 a_n は U , θ の他にレーダ波の送受信の偏波などに依存する. a_0 は NRCS の全方位にわたる平均値である. χ は向い風方向の位相で, 実測される風向に対応すると考えられる. NRCSの測定値から(8)の各項は次式で表わされるように, 一連のデータのうち特定の位相差をもつものの和と差を組合せて求める. σ^0 の位相の遅れを添字で表わすと級数の各項は,

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{\phi=0}^{2\pi} \sigma_{\phi}^0,$$

$$a_1 \cos(\phi - \chi) = \frac{1}{2\sqrt{3}} (\sigma_{\phi+\pi/6}^0 - \sigma_{\phi+5\pi/6}^0 - \sigma_{\phi+7\pi/6}^0 + \sigma_{\phi+11\pi/6}^0),$$

$$a_2 \cos 2(\phi - \chi) = \frac{1}{4} (\sigma_{\phi}^0 - \sigma_{\phi+\pi/2}^0 + \sigma_{\phi+\pi}^0 - \sigma_{\phi+3\pi/2}^0),$$

$$a_3 \cos 3(\phi - \chi) = \frac{1}{2} (\sigma_{\phi}^0 - \sigma_{\phi+\pi}^0) - \frac{1}{2\sqrt{3}} (\sigma_{\phi+\pi/6}^0 - \sigma_{\phi+5\pi/6}^0 - \sigma_{\phi+7\pi/6}^0 + \sigma_{\phi+11\pi/6}^0),$$

$$a_4 \cos 4(\phi - \chi) = \frac{1}{4} (\sigma_{\phi}^0 + \sigma_{\phi+\pi/2}^0 + \sigma_{\phi+\pi}^0 + \sigma_{\phi+3\pi/2}^0) - a_0$$

となる. 向い風方向の位相 χ は第2項である $a_2 \cos 2(\phi - \chi)$ の分布で現われる2つのピー

クのうち、第1項の値が正である位相を選ぶ。このようにして決定した χ の値を他の項でも用いる。

図10は上記の方法を示す解析例である。図中の各項での $\cos$ 曲線は、NRCS データを最小自乗法を用いて近似したものである。図から分るように第2項は近似曲線で良く表現できている。しかし他の項では必ずしも充分な近似ではない。この理由は位相 χ を第2項で選定し固定しているためであり、海面の状況が波向方向に対して完全に対称な性質をもっていない事を示している。この解析例に示された傾向はほとんどすべての観測例で見出される。第1項における近似曲線の相関が悪いとき、あるいはデータが小さいときは、第2項に現われた $\phi = \chi$ の2つのピークのうち、向い風方向に対するものを選択するのが困難となる。このような問題は海洋上にうねりが存在するうに弱風である場合、入射角が鉛直に近い場合などに生じる。実測風の風向と比べて合理的な χ の解を選択するために、上述した風向評価法と異なる決定をせざるを得ない例もあった。

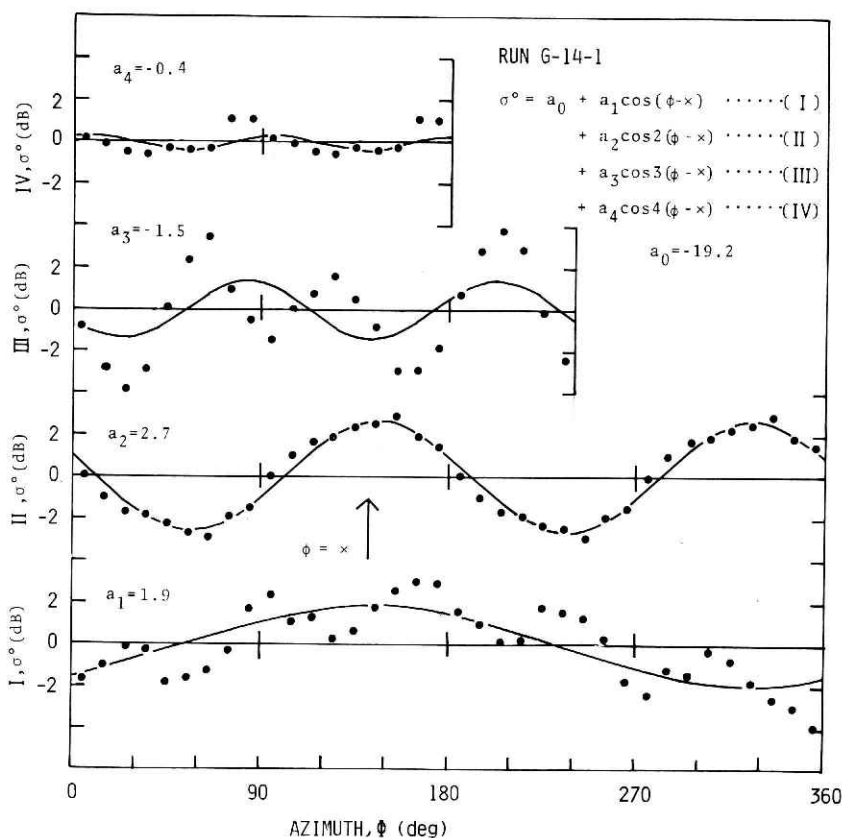


図10 円旋回飛行による NRCS σ^0 (dB) の解析方法。

Fig. 10 Analytical method of NRCS σ^0 (dB) in the circular flight experiment.

円旋回飛行で求めた全方位にわたる NRCS 分布を(8)の形で解析を行い、導出した振幅 a_n と位相 χ を観測条件及び実測風とともに表 3 に示す。同表のうち F シリーズの RUN は 1980 年 10 月 22 日から 24 日にかけて観測したものであり、G シリーズは 1981 年 11 月 17 日から 21 日にかけて観測したものである。平均風速 U は観測塔又は照合データ収集のための航空機によって測定したもので、高度 $z = 20\text{m}$ の値に換算されている。航空機の飛行高度で測定した風ベクトルだけがあるとき、海面上の風は地衡風を考慮した推定法によって導出した (Kondo, 1977b)。NRCS の分布より求めた向い風方向の位相 χ は実測風の風向 ($W.D$) と必ずしも良い一致をみない。これは後方散乱を測定する実験時に、旋回の基点とする方位

表 3 円旋回飛行によって測定された NRCS 方位角分布の $\cos$ 級数表示、及び実測風。
(8) の表現形式による。

Table 3 Analyzed coefficients of cosine series function for the NRCS azimuth distribution measured by the circular flight and the truth wind vector. Coefficients obey the representation of (8).

RUN	z (m)	θ (deg)	POL	a_0 (dB)	a_1 (dB)	a_2 (dB)	a_3 (dB)	a_4 (dB)	χ (deg)	$W.D$ (deg)	U (m/s)
F-1-1	330	25	H	-10.0	0.0	0.4	-0.4	0.0	106	50	4.0
F-1-2	330	25	H	-10.4	-0.2	0.8	0.0	0.1	78	50	4.0
F-1-3	330	25	H	-9.8	0.2	0.9	0.0	-0.3	92	50	4.0
F-5-1	330	35	H	-20.8	0.7	1.1	0.5	-0.8	52	30	6.0
F-5-2	330	35	H	-21.1	1.5	1.3	0.5	-0.5	48	30	6.0
F-6-1	330	45	V	-24.4	1.5	2.7	0.0	0.0	64	58	4.8
F-6-2	330	45	V	-23.7	0.7	2.7	-1.2	-0.1	60	58	4.8
F-6-3	330	45	V	-25.0	0.2	2.6	-0.5	-0.2	58	58	4.8
F-7-1	330	25	V	-14.2	0.7	1.3	-0.7	-0.5	61	50	4.9
F-7-2	330	25	V	-14.8	1.2	0.9	0.6	-0.2	64	50	4.9
F-7-3	330	25	V	-14.2	2.2	0.1	0.1	1.0	50	50	4.9
F-10-1	230	45	H	-29.9	2.6	1.9	-0.5	-0.4	103	90	4.9
F-10-2	230	45	H	-30.3	1.7	2.3	-0.7	0.4	118	90	4.9
F-10-3	230	45	H	-31.3	1.4	1.0	-0.6	0.2	113	90	4.9
F-11-1	230	35	H	-25.4	1.6	1.7	0.1	0.0	77	85	4.2
F-11-2	230	35	H	-25.7	1.4	1.7	-0.8	0.0	73	85	4.2
F-12-1	230	25	H	-16.0	-0.2	2.2	0.4	-0.7	90	90	3.7
F-12-2	230	25	H	-16.0	0.8	1.2	0.5	-0.5	92	90	3.7
F-12-3	230	25	H	-16.9	0.5	2.1	0.0	-0.3	93	90	3.7
F-13-1	330	53	V	-17.3	1.1	3.1	-0.5	-0.4	131	155	8.8
F-13-2	330	53	V	-17.5	0.8	2.8	0.1	-0.3	132	155	8.8
F-14-1	330	53	H	-23.7	1.6	3.3	0.1	-0.4	168	155	8.8
F-14-2	330	53	H	-23.0	2.4	2.3	-0.1	-0.6	170	155	8.8
G-2-1	330	45	V	-41.7	1.5	4.3	0.0	1.2	85	120	0.7
G-2-2	330	45	V	-39.4	1.8	3.4	0.4	-1.1	92	120	0.7
G-2-3	330	45	V	-39.8	1.4	2.8	0.9	0.2	90	120	0.7
G-3-1	330	35	V	-30.2	0.3	3.3	0.7	0.1	110	81	1.7
G-3-2	330	35	V	-29.9	2.4	3.8	0.0	-2.2	128	81	1.7
G-3-3	330	35	V	-29.8	1.3	5.3	-0.7	-0.8	110	81	1.7

RUN	z (m)	θ (deg)	POL	a_0 (dB)	a_1 (dB)	a_2 (dB)	a_3 (dB)	a_4 (dB)	χ (deg)	$W.D$ (deg)	U (m/s)
G-3-4	330	35	V	-29.8	1.7	5.3	-0.1	-0.9	103	81	1.7
G-3-5	330	35	V	-30.3	-2.2	4.1	0.7	0.7	80	81	1.7
G-3-6	330	35	V	-29.3	2.1	4.1	0.3	-0.3	95	81	1.7
G-4-1	330	25	V	-15.1	0.8	3.2	0.1	-0.4	110	84	2.7
G-4-2	330	25	V	-15.7	0.5	3.7	-0.4	-0.5	103	84	2.7
G-4-3	330	25	V	-16.0	0.5	3.2	0.0	-1.2	108	84	2.7
G-4-4	330	25	V	-15.2	-0.6	3.3	0.4	-1.3	105	84	2.7
G-4-5	330	25	V	-15.2	-0.1	2.6	-0.2	-1.4	80	84	2.7
G-4-6	330	25	V	-15.5	0.0	3.9	-1.1	-0.3	93	84	2.7
G-6-1	330	45	H	-21.4	1.3	2.8	0.1	-0.3	32	18	8.1
G-6-2	330	45	H	-21.6	2.4	2.2	-0.1	-0.7	40	18	8.1
G-6-3	330	45	H	-21.0	1.8	2.7	-0.5	-0.1	34	18	8.1
G-7-1	330	35	H	-15.3	1.4	1.5	-0.4	-0.7	5	45	7.7
G-7-2	330	35	H	-15.5	0.8	2.0	-0.4	-0.6	22	45	7.7
G-7-3	330	35	H	-15.7	1.1	2.8	-0.4	0.6	44	45	7.7
G-7-4	330	35	H	-15.2	1.5	2.6	-0.7	0.3	43	45	7.7
G-7-5	330	35	H	-15.2	1.0	2.2	0.0	0.3	67	45	7.7
G-7-6	330	35	H	-15.7	1.9	2.4	-0.3	0.4	46	45	7.7
G-8-1	330	25	H	-9.2	-0.5	1.4	0.0	-0.4	25	45	7.2
G-8-2	330	25	H	-8.7	-0.4	1.1	0.0	-0.4	32	45	7.2
G-8-3	330	25	H	-8.8	-0.4	1.1	0.1	-0.5	28	45	7.2
G-8-4	330	25	H	-8.1	-0.3	0.6	0.2	-0.1	18	45	7.2
G-8-5	330	25	H	-8.4	0.0	1.0	0.1	-0.2	18	45	7.2
G-8-6	330	25	H	-8.4	-0.1	0.9	0.0	0.1	20	45	7.2
G-9-1	330	55	V	-37.3	3.3	2.7	-1.2	1.3	56	85	2.6
G-9-2	330	55	V	-37.2	1.9	4.2	-0.2	-0.4	80	85	2.6
G-9-3	330	55	V	-36.5	2.3	2.7	0.4	-2.3	106	85	2.6
G-10-1	330	52	H	-34.4	3.5	2.4	-1.6	-0.8	47	108	2.8
G-10-2	330	52	H	-34.6	2.8	0.1	-1.5	-0.5	50	108	2.8
G-11-1	330	52	V	-30.2	1.6	0.9	0.7	0.3	30	94	3.1
G-11-2	330	52	V	-31.0	3.0	1.3	-0.6	0.4	8	94	3.1
G-12-1	330	45	V	-15.6	0.6	2.6	-0.8	-0.8	25	35	10.1
G-12-2	330	45	V	-15.7	0.9	3.2	-1.1	-1.3	16	35	10.1
G-12-3	330	45	V	-14.9	0.9	2.9	-0.6	-1.3	356	35	10.1
G-13-1	330	35	V	-11.1	0.0	2.2	0.0	-0.6	30	35	10.1
G-13-2	330	35	V	-11.3	0.5	2.2	-0.1	-0.3	22	35	10.1
G-13-3	330	35	V	-11.3	0.3	2.6	-0.2	-0.6	23	35	10.1
G-13-4	330	35	V	-10.9	0.4	2.1	-0.2	-0.4	25	35	10.1
G-13-5	330	35	V	-11.1	0.3	1.9	-0.1	-0.2	20	35	10.1
G-13-6	330	35	V	-11.3	0.5	1.8	-0.3	-0.3	18	35	10.1
G-14-1	330	45	H	-19.2	1.9	2.7	-1.5	-0.4	37	35	10.1
G-14-2	330	45	H	-18.4	1.1	2.0	0.0	-0.4	33	35	10.1
G-14-3	330	45	H	-18.8	1.5	2.7	-1.0	-0.6	36	35	10.1
G-15-1	330	35	H	-13.5	0.6	2.4	-0.4	-0.3	36	35	10.1
G-15-2	330	35	H	-13.5	0.8	2.3	-0.3	-0.2	28	35	10.1
G-15-3	330	35	H	-13.3	0.8	2.1	-0.2	-0.4	34	35	10.1
G-15-4	330	35	H	-13.0	0.5	2.0	-0.3	-0.1	31	35	10.1
G-15-5	330	35	H	-13.4	0.8	2.3	-0.2	-0.3	30	35	10.1

を厳密に決定できなかった事による。表3の σ° の係数において、 $a_0 < -30$ dBの範囲にあるRUNは散乱計の受信感度を越えた下限のデータを一部に含む。従ってこの範囲では振幅 a_n を用いた近似曲線はNRCSの特性を良く表わすものではない。

表3で示された実験のうち、同一観測条件におけるRUNのNRCS分布の代表例を図11.1から図11.11に示す。図中の測定値に付した線分は変動の標準偏差を示すもので、稀に他の測定値と比べて非常に大きいものがある。この原因は航空機の動揺のため散乱計のビームが目標海面を大きく離れたためによる。また横座標のレーダ方位角は時計回りの方向をもつ相対的な方位である。図11.1はやや弱い風速時の σ° (dB)の分布を入射角 $\theta = 25^\circ$ と $\theta = 35^\circ$ に対して示したものである。海面が主として風浪によって粗になっている場合、弱風時でも風向風速を決定するのに好ましい方位角分布を持つことが分る。風速が非常に小さくても入射角が鉛直に近いなら、やはりNRCSは風ベクトルと対応させられることが図11.5からも知れる。一方比較的強い風速時の σ° (dB)の分布は図11.10と図11.11に示される。各々垂直偏波と水平偏波に対するものであり、RUN G-14-1は解析方法を示した図10から与えられた。両図で示される測定で分るように、NRCSの方位角分布は、 $a_1, a_2 > 0$ を条件とす

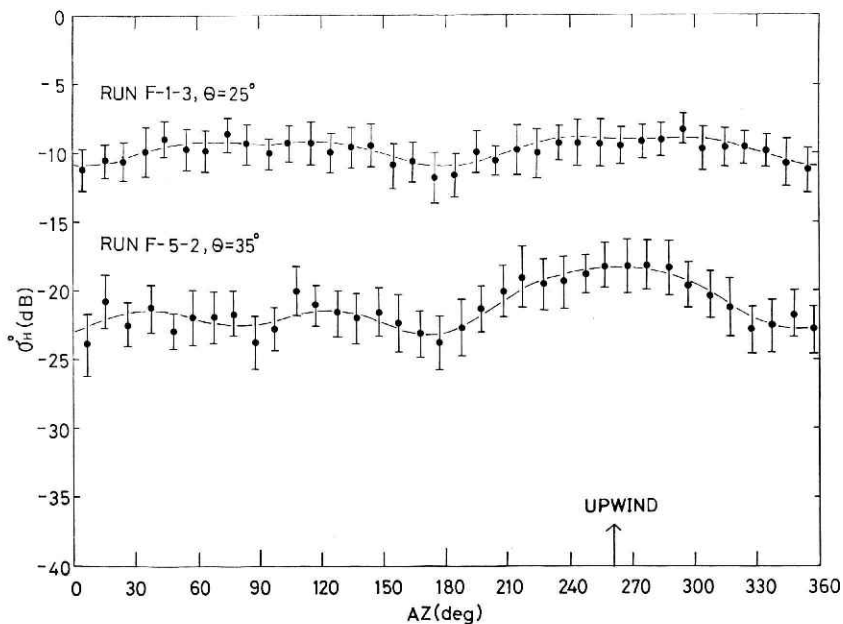


図11.1

図11 NRCS σ° (dB)の方位角AZ分布。各RUNの近似曲線は図10の手法に従って求めたもので表3に示す。

Fig. 11 Azimuth AZ distribution of NRCS σ° (dB). Approximate line for each RUN is obtained by the method shown in Fig. 10, and corresponds to coefficients of Table 3.

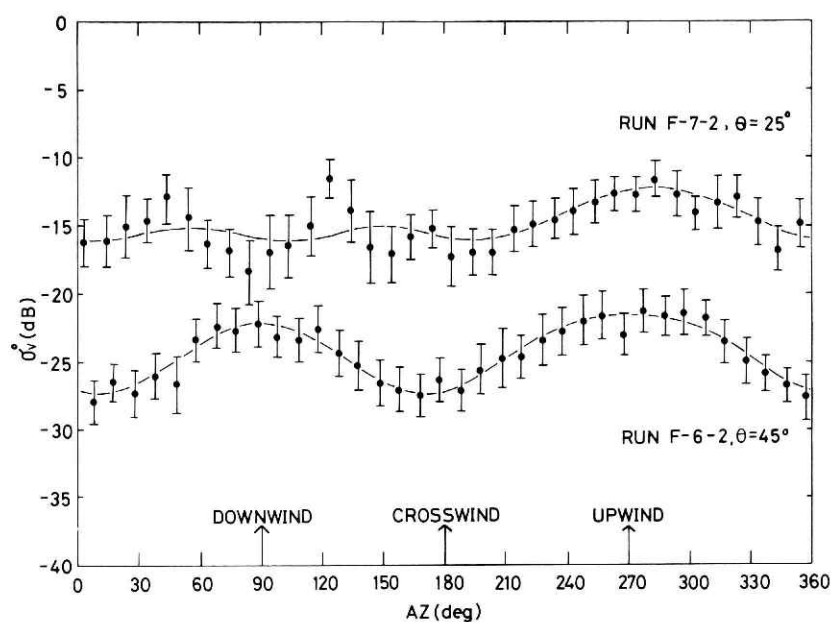


図11.2

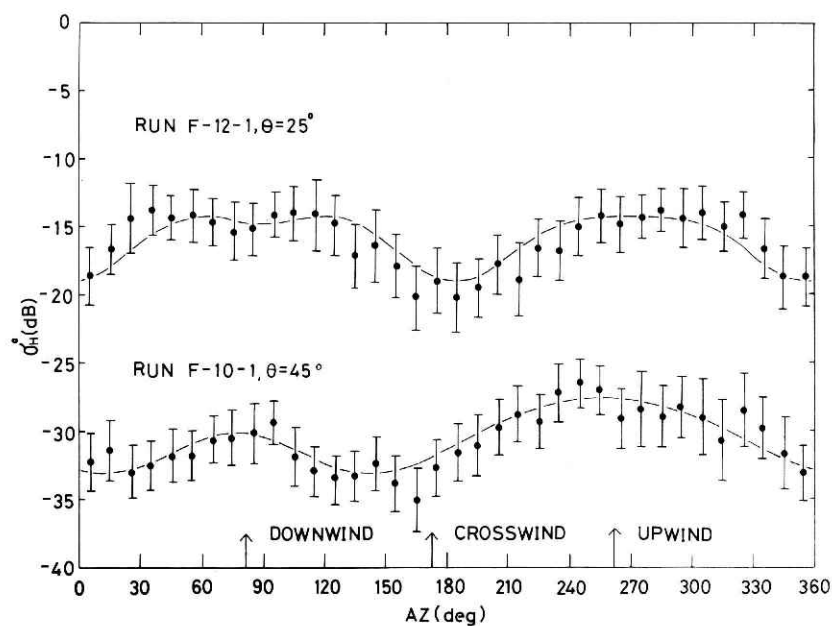


図11.3

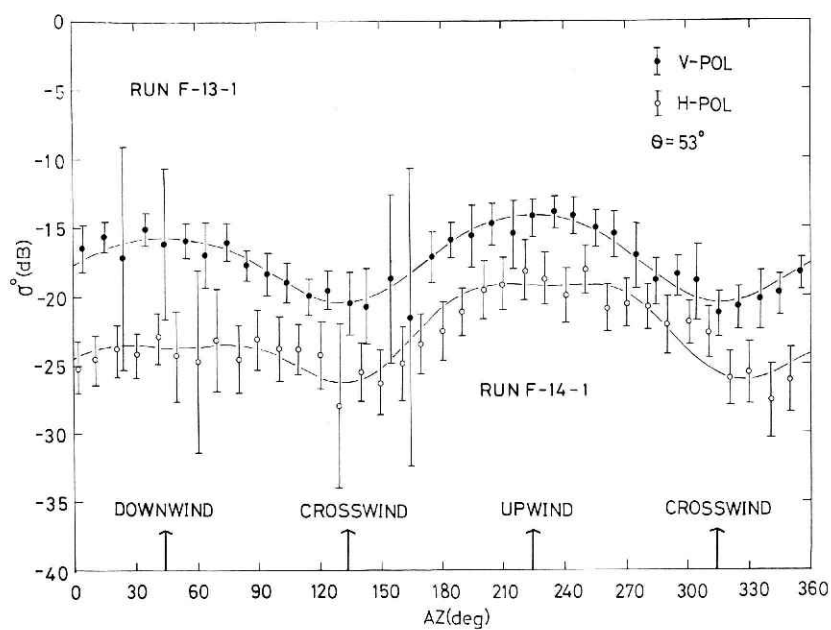


図11.4

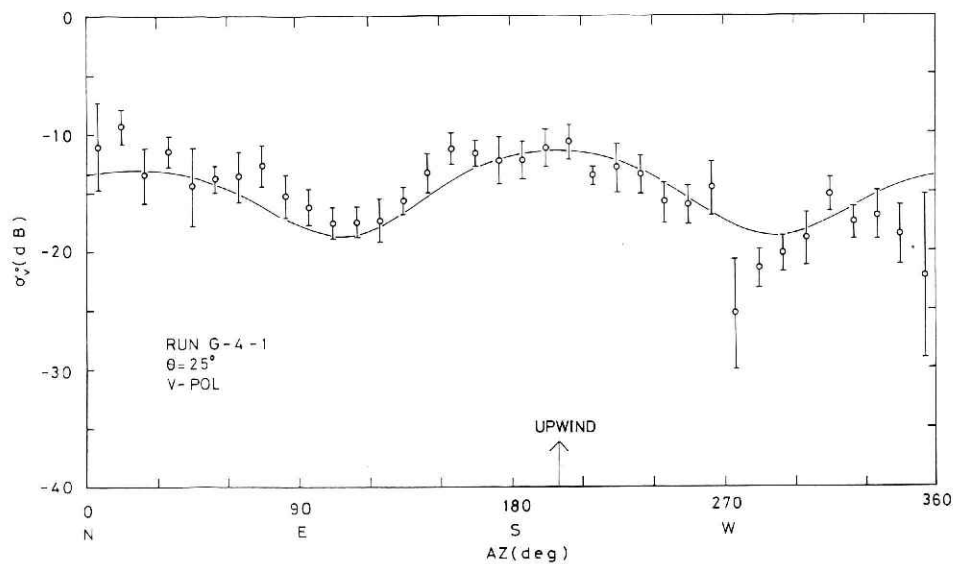


図11.5

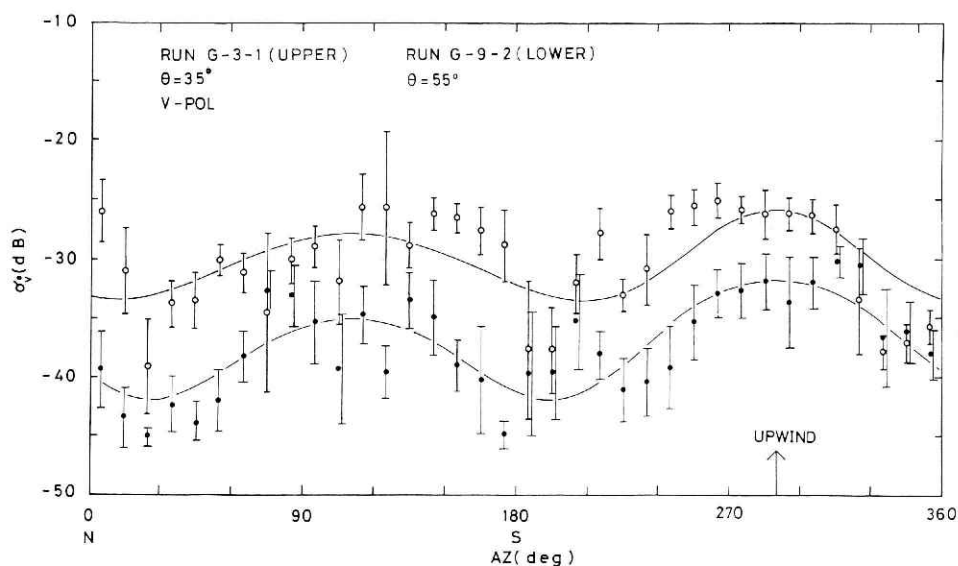


図11.6

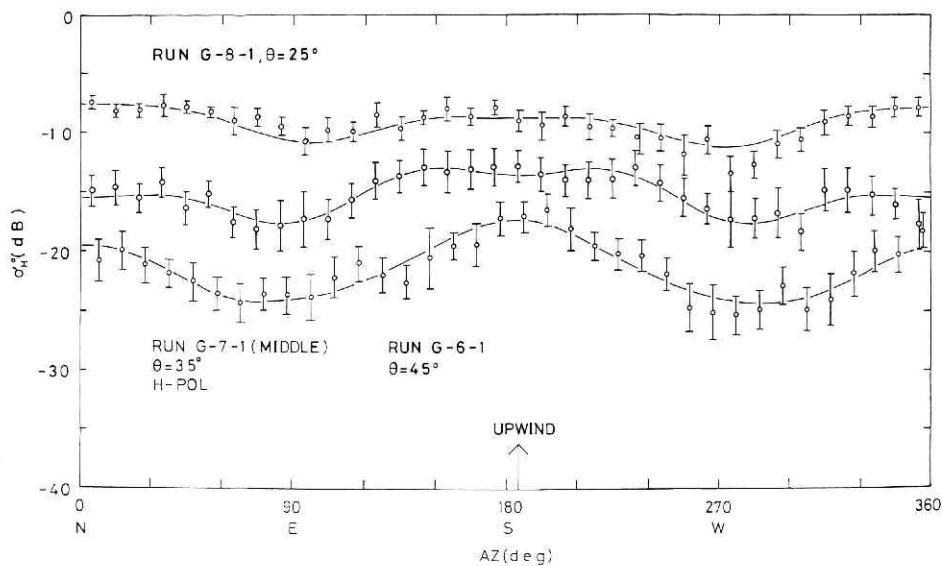


図11.7

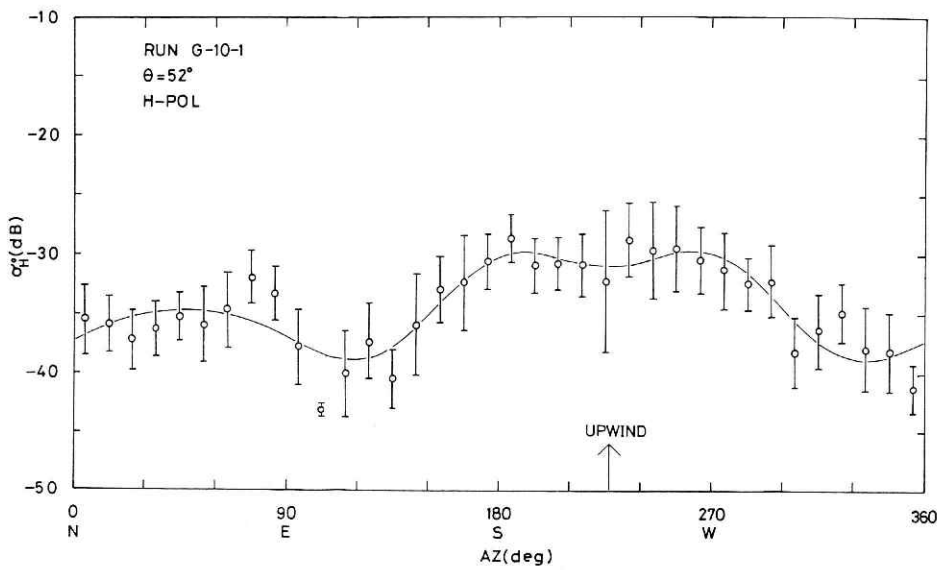


図11.8

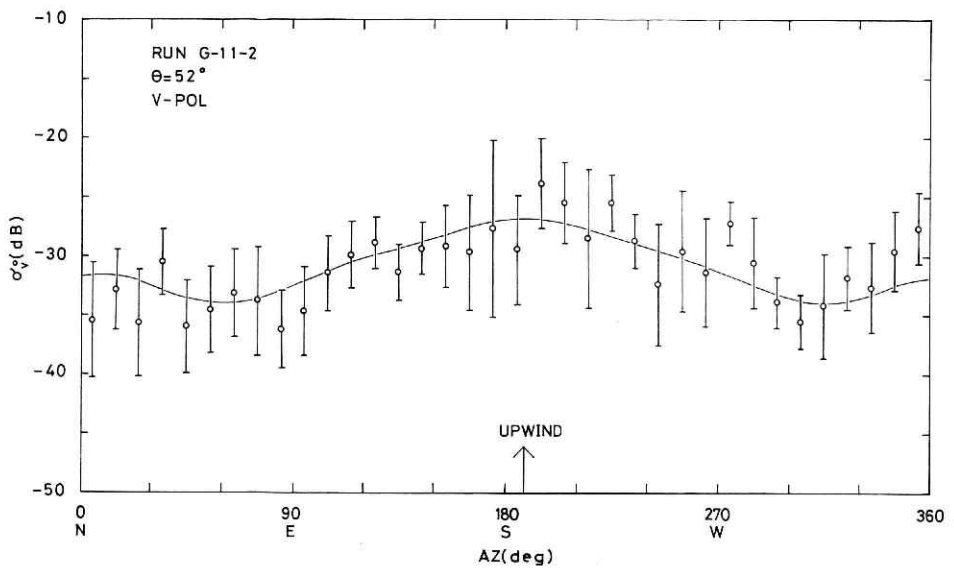


図11.9

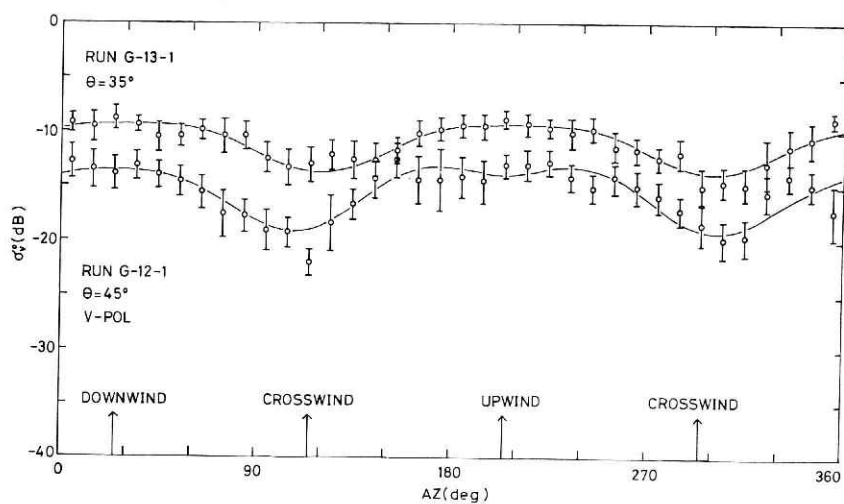


図11.10

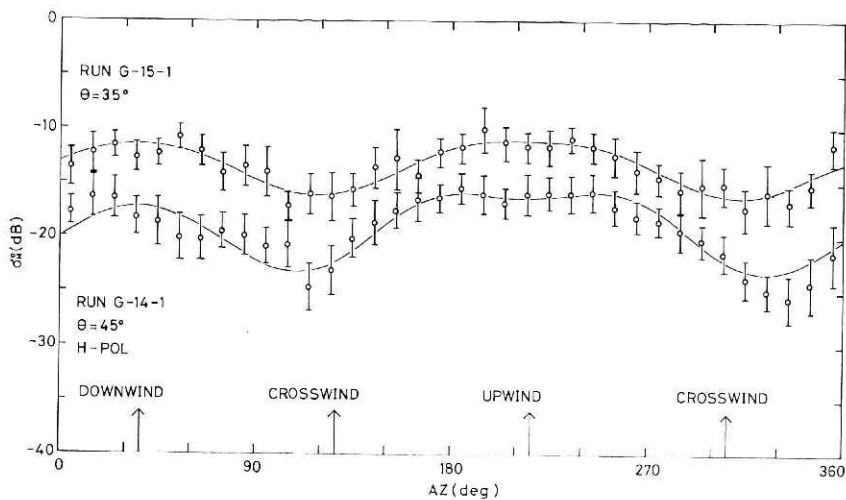


図11.11

るなら $\alpha_3, \alpha_4 < 0$ である特徴をもつ。

図 11.4 は半径 10 km の円旋回飛行をしたときの観測である。中程度の風速であるが、航空機から目視される海面にはかなり白波が存在する状態であった。NRCS の方位角分布において、向い風方向が追い風方向に比べて大きな値を示すのに碎波や白波の寄与が大きいと考えられる。即ち碎波の発生機構は波浪の峰の前後で対称性がない事に起因する。約 20 km 程度のスケールの海域では風系が一樣であり、典型的な方位角分布を持つことが同図によって示されている。図示された方位角分布は航空機の動揺による成分を含み、表 3 の解析値に多少影響を与えている。しかし全体として(8)で提案した $\cos$ 級数の第 4 項までで充分測定値を表現できることが認められる。

表 4 に湾中央部で行った直線飛行による NRCS の観測結果を示す。アンテナ方位 β は北向きを基準とする。 $\sigma^\circ(\text{dB})$ は直線飛行中の全測定値を平均したものである。RUN F-15-1 から F-22-2 までは湾中央に定めた基点(図 2 の O_3 点)を通過して往復飛行を 8 方位にわたって観測したものであり、直線の飛行距離は 20 km である。一方 RUN G-16-1 から G-19-4 までは東西に 20 km、南北に 10 km の長方形上を飛行して観測したものである。実測風は散乱計搭載機に随伴した航空機から求めた測定値を時間的空間的に平均して表 4 に示した。中程度の風速であるから実験海域の風ベクトルは一樣であると考えてよいだろう。同表の RUN の一部を図示する。図 12.1 と図 12.2 は 1 km 毎に NRCS を平均化したときの分布を示すもので、各々垂直偏波と水平偏波に対する場合である。測定値の一部にある大きなばらつきは、航空機の動揺によって生じたものであって海面の粗度の変化に対応するものではない。直線 20 km の飛行時間は約 5 分である。短時間における海面状況の急激な変化はないと考えてよいから、図の観測例において一樣と仮定する海面の粗度は NRCS に約 1.5 dB 程度の変化幅を与えるものであることを示している。両図とも飛行方向は南北方向で、両偏波の場合とも南へ(A_3 から A_1 へ)進むに従って NRCS の値が大きくなり風が強くなって行く傾向がみられる。図 13.1 と図 13.2 は前図と同様に直線飛行時の NRCS 分布で、東から西へ飛行して観測したものである。図より約 20 km のスケールは海面は一樣としてよいが、NRCS では約 1.5 dB 程度の変化があるのは前図の場合と同じである。散乱計を測風レーダとして用いるならば目標海面の大きさにもよるが、NRCS の測定値の偏差に対応する風速の不確定な幅が残る可能性を示唆している。

海岸に近い領域では風ベクトルが一樣であると考えられるスケールは小さい。今回相模湾奥部の沿岸で NRCS が異なる分布を示すと期待できる条件下で航空機による散乱計の実験を試みた。図 2 で示す平塚沖約 7 km の地点を通過して小田原から江の島方向へ東西 20 km の直線飛行を、陸風(北寄りの風)の場合に実施して海面の後方散乱を観測した。海岸近くの陸地には 200 m 程度の山が小田原方面に存在する以外に高い山がないけれども、陸風の場合風速分布にかなり変化があることが予め知られている。図 14.1 から図 14.7 に NRCS $\sigma^\circ(\text{dB})$ の

表 4 相模湾中央部における直線飛行による NRCS 観測.

Table 4 Observation data of NRCS by the straight flight in the central area of Sagami Bay.

RUN	z (m)	β (deg)	θ (deg)	POL	σ° (dB)	W.D (deg)	U (m/s)
F-15-1	330	180	55	V	-17.2	37	8.2
F-15-2	330	0	55	V	-17.4	37	8.2
F-16-1	330	135	55	V	-23.7	37	8.2
F-16-2	330	315	55	V	-25.3	37	8.2
F-17-1	330	90	55	V	-18.7	37	8.2
F-17-2	330	270	55	V	-21.9	37	8.2
F-18-1	330	45	55	V	-17.8	37	8.2
F-18-2	330	225	55	V	-20.0	37	8.2
F-19-1	330	180	55	H	-22.4	32	7.8
F-19-2	330	0	55	H	-26.1	32	7.8
F-20-1	330	135	55	H	-29.8	32	7.8
F-20-2	330	315	55	H	-30.2	32	7.8
F-21-1	330	90	55	H	-26.6	32	7.8
F-21-2	330	270	55	H	-30.0	32	7.8
F-22-1	330	45	55	H	-23.8	32	7.8
F-22-2	330	225	55	H	-27.7	32	7.8
G-16-1	330	180	55	H	-25.6	39	8.6
G-16-2	330	90	55	H	-23.9	39	8.6
G-16-3	330	0	55	H	-23.2	39	8.6
G-16-4	330	270	55	H	-25.7	39	8.6
G-17-1	330	180	55	H	-27.2	53	7.7
G-17-2	330	90	55	H	-24.8	53	7.7
G-17-3	330	0	55	H	-23.8	53	7.7
G-17-4	330	270	55	H	-26.4	53	7.7
G-18-1	330	180	55	V	-18.3	51	7.9
G-18-2	330	90	55	V	-19.9	51	7.9
G-18-3	330	0	55	V	-17.7	51	7.9
G-18-4	330	270	55	V	-18.8	51	7.9
G-19-1	330	180	55	V	-18.2	53	7.7
G-19-2	330	90	55	V	-20.9	53	7.7
G-19-3	330	0	55	V	-18.5	53	7.7
G-19-4	330	270	55	V	-18.7	53	7.7

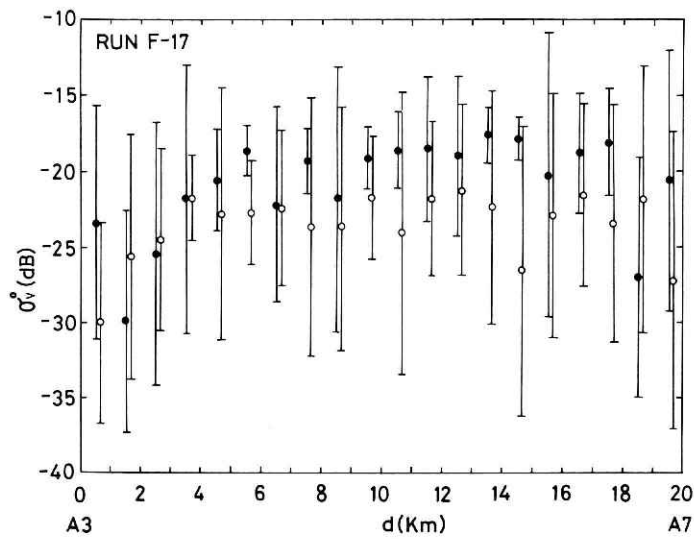


図12.1

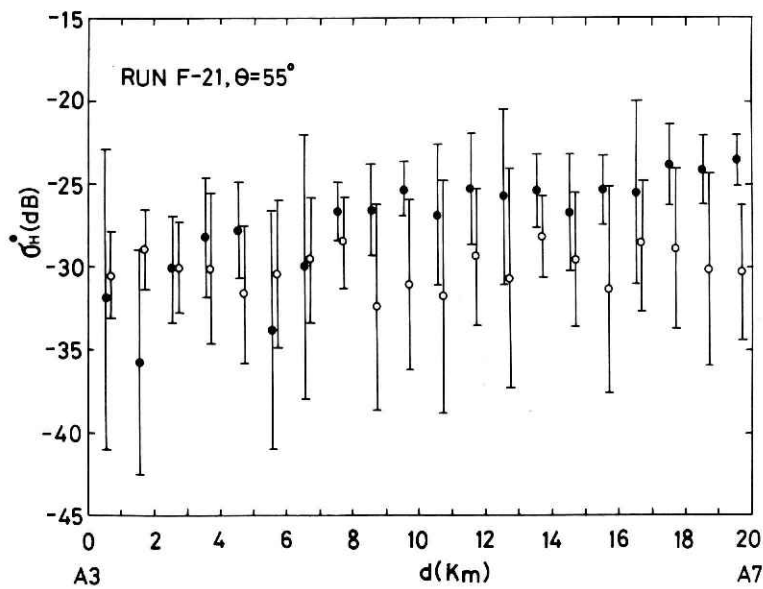


図12.2

図12 相模湾中央部での直線飛行によるNRCS $\sigma^{\circ}(\text{dB})$ の分布。1 km毎にデータ処理を行った。観測条件は表4に示す。

Fig. 12 NRCS $\sigma^{\circ}(\text{dB})$ distribution for the straight flight in the central area of Sagami Bay. The data proceed every 1 km. Corresponding experimental conditions are shown in Table 4.

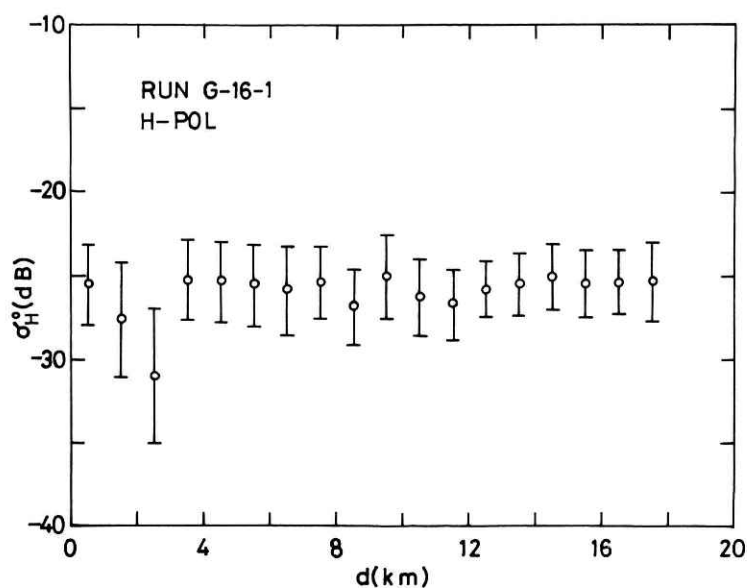


図13.1

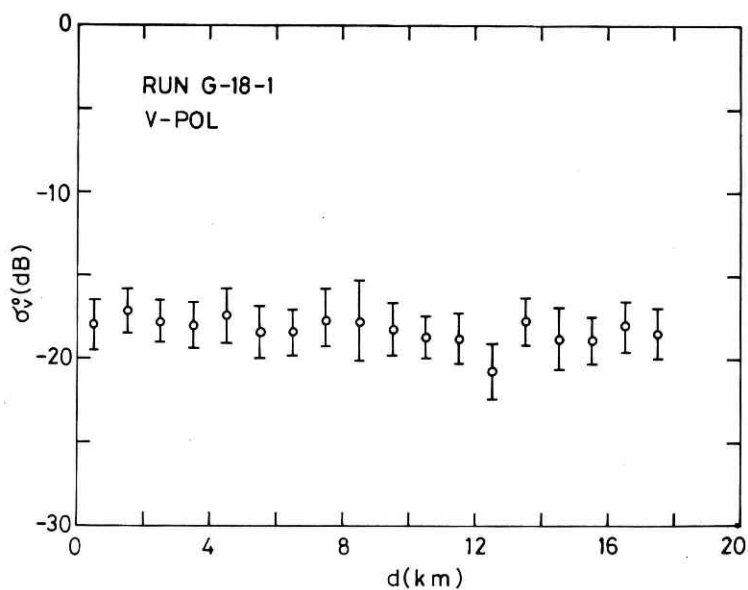


図13.2

図13 相模湾中央部での直線飛行によるNRCS $\sigma^0(\text{dB})$ の分布. 1 km毎にデータ処理を行った.

Fig. 13 NRCS $\sigma^0(\text{dB})$ distribution for the straight flight in the central area of Sagami Bay. The data proceed every 1 km. Corresponding experimental conditions are shown in Table 4.

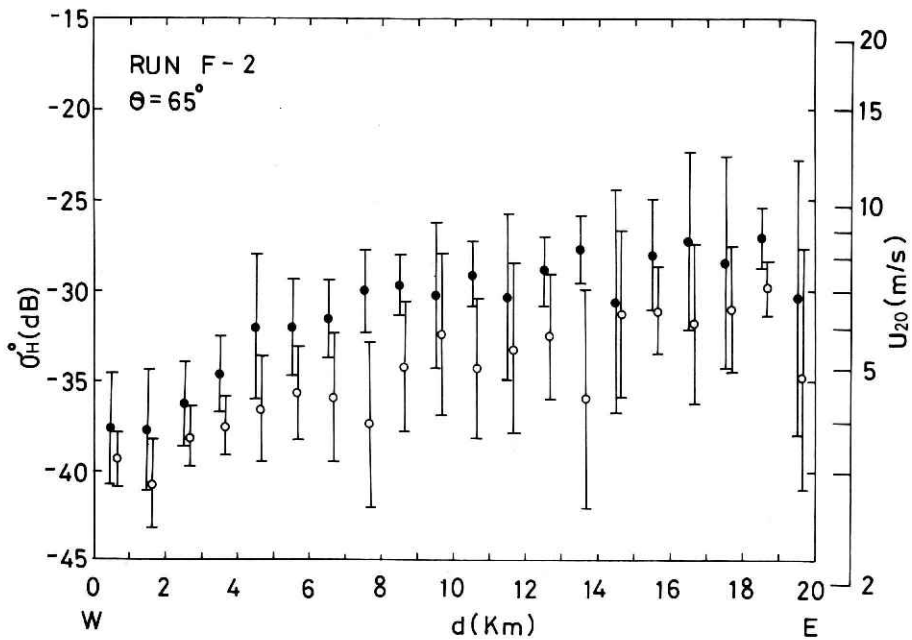


図14.1

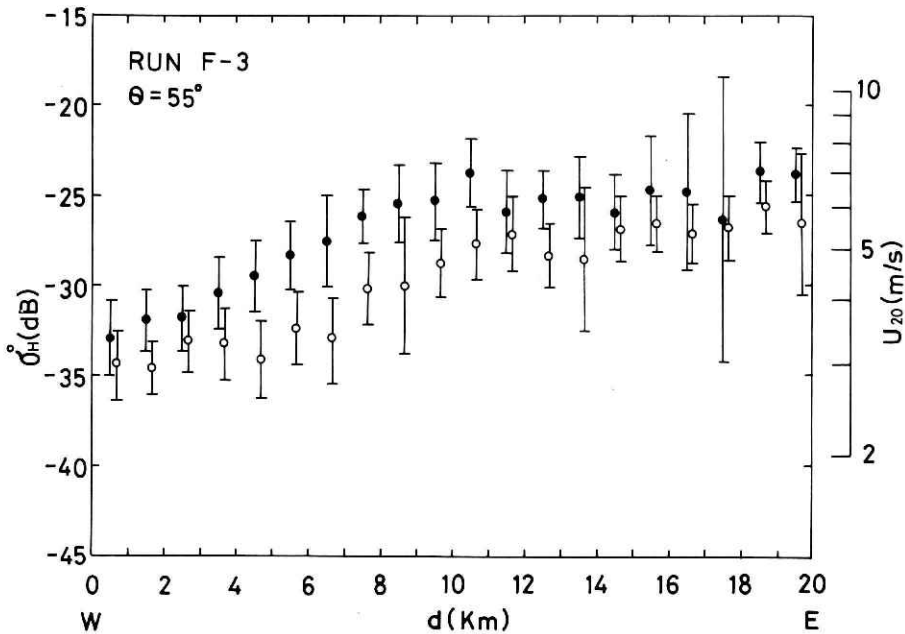


図14.2

図14 沿岸海域での直線飛行によるNRCS σ^0 (dB) の分布. 一部の図に付した右側の風速目盛は観測塔での実測風を基準にして作った. 観測条件は表5に示す.

Fig. 14 NRCS σ^0 (dB) distribution for the straight flight in the coastal area. In several diagrams, a wind speed scale is tentatively given in the right side, based on the wind speed measured at the tower.

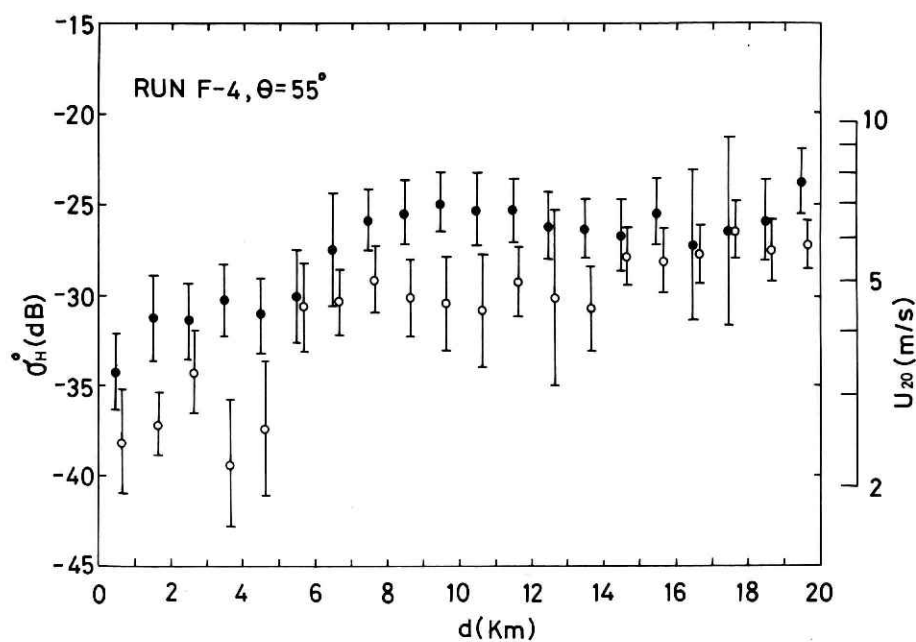


図14.3

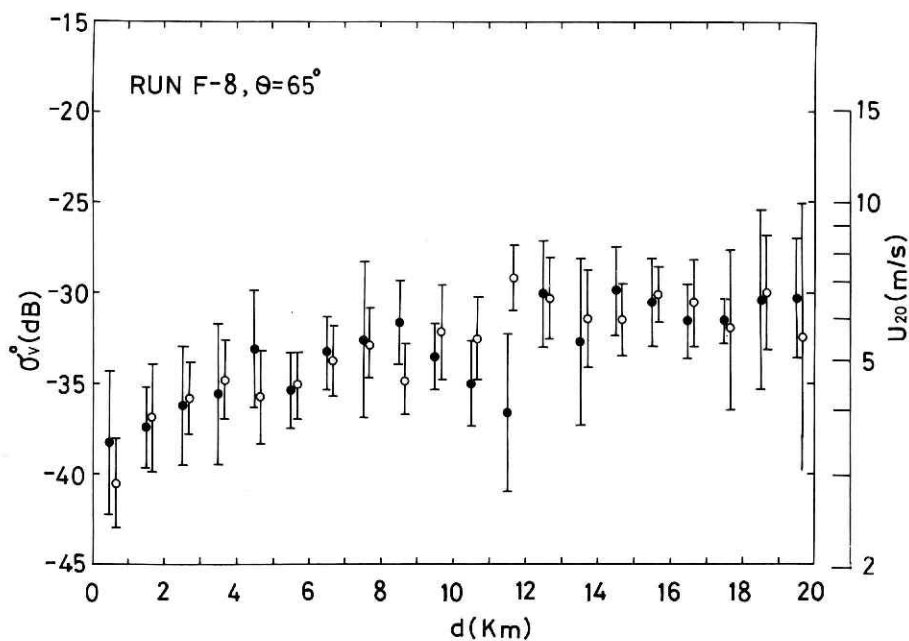


図14.4

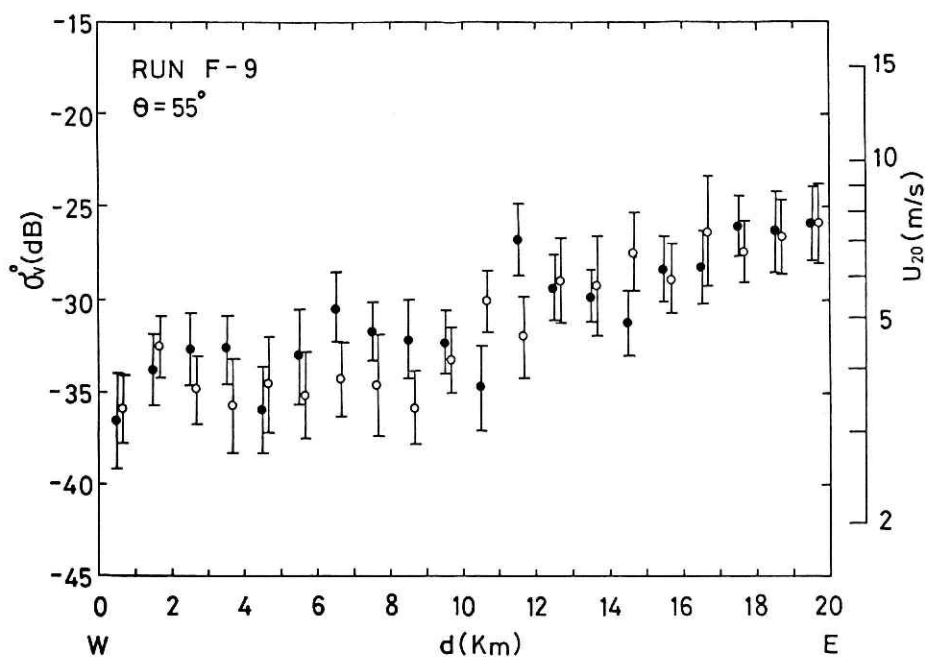


図14.5

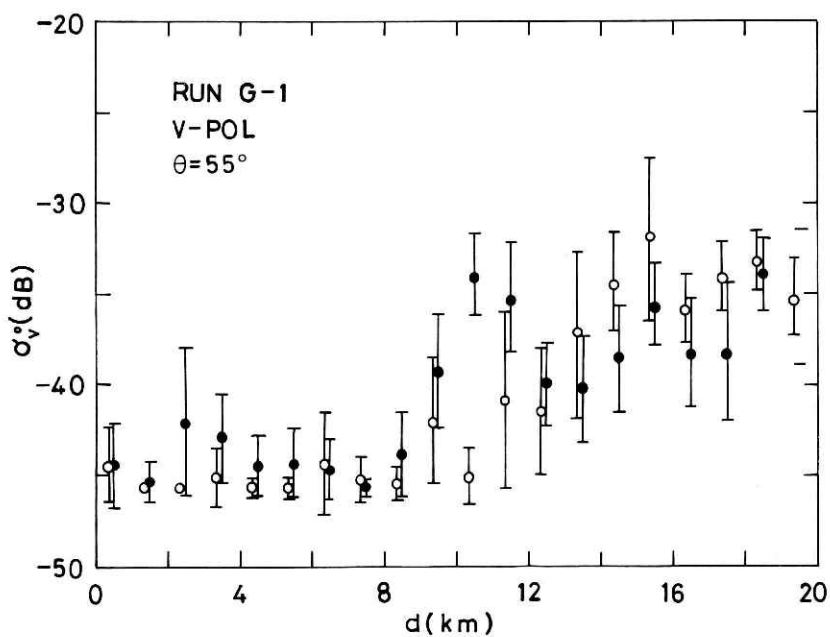


図14.6

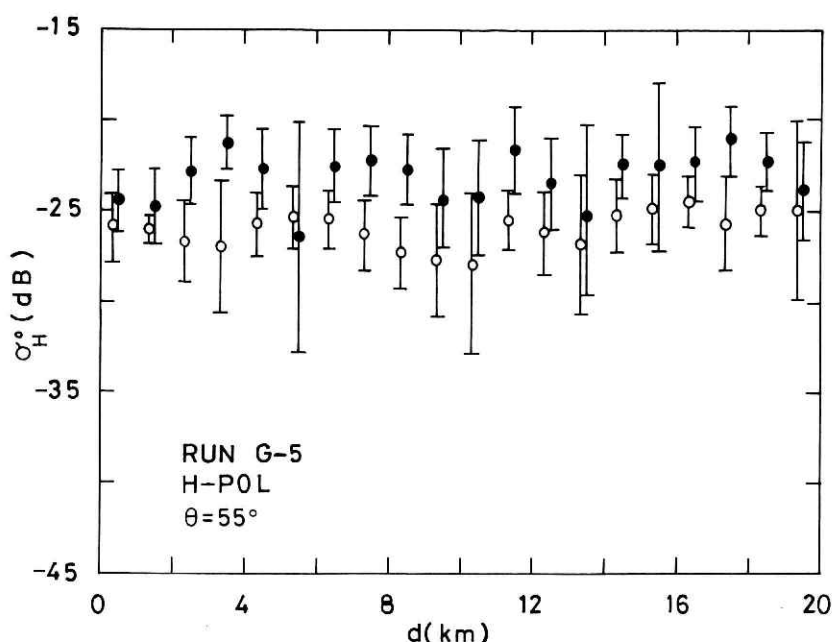


図14.7

沿岸海域での測定結果を示す。東西方向の飛行であるからアンテナ方位角 β は、小田原から江の島へ向うとき（往路）は 0° 、江の島から小田原へ向うときは 180° である。横座標の距離10kmの地点は平塚であって、観測塔近傍を通過する。表5は図に対応する観測条件及び平塚沖でのNRCS σ° (dB)測定値、観測塔での実測風を示す。一部の図の右側に風速の目盛が付してある。この目盛は平塚沖での実測風をNRCS測定値と対応させ、NRCSと平均風速の関係を(4)で示される形をとるとして与えたものである。ここで係数 $H(\theta, \phi)$ は観測塔での測定結果から推定して求めた。即ち(6)、(7)で示される値に近いものを選んだ。従ってNRCSと平均風速の関数関係が確立された後に与えられる座標ではなく、NRCSが測定された海面のおおよその状態を示す指標である。なおこの目盛は東へ向う時（往路）のNRCS分布に適用する。中程度の風速が平塚沖で観測された時の分布をみると、小田原周辺で風が弱く、平塚から江の島にかけて強い分布が良く現われている。北寄りの風の場合には両者の海域でかなり大きな風速の差異が生じることが見出される。また往復の飛行観測ともNRCS分布の同じ傾向を示すことから、数km程度のスケールで海面の粗度が変わることも分る。弱風時の分布から、平塚より西方では風速がほとんど認められなくても東方では多少大きく観測される可能性を示していて、平塚沖が湾奥部の風系の分岐点となっていることが示唆される。これらの観測から期待されることは、多くの実験によって散乱計の測風アルゴリズムが完成された後には、航空機からの海面の後方散乱の測定によって沿岸域のようにかなり小さい海

表5 沿岸域での直線飛行によるNRCS観測。実測風は平塚沖観測塔で測定したもの。

Table 5 Observation data of NRCS by the straight flight in the coastal area. The truth wind vector was measured at the tower off Hiratsuka.

RUN	z (m)	β (deg)	θ (deg)	POL	σ° (dB)	W/D (deg)	U (m/s)
F-2-1	330	0	65	H	-29.6	20	7.0
F-2-2	330	180	65	H	-33.7	20	7.0
F-3-1	330	0	55	H	-25.0	25	6.4
F-3-2	330	180	55	H	-27.3	25	6.4
F-4-1	330	0	55	H	-25.1	25	7.0
F-4-2	330	180	55	H	-30.2	25	7.0
F-8-1	230	0	65	V	-33.7	80	4.9
F-8-2	230	180	65	V	-32.8	80	4.9
F-9-1	230	0	55	V	-32.7	80	4.6
F-9-2	230	180	55	V	-32.0	80	4.6
G-1-1	330	0	55	V	-35.3	110	0.9
G-1-2	330	180	55	V	-42.0	110	0.9
G-5-1	330	0	55	H	-24.3	20	7.6
G-5-2	330	180	55	H	-27.6	20	7.6

域でも風速分布が短時間に決定できることである。

5. SASSモデルとの比較

海面のNRCSと風ベクトルの関係を表現するモデルは多くあるが、SASS Iモデルと今回の結果を対比して解析結果を考察する。同モデルはSEASAT-1の散乱計(SASS)の収集データを解析するために作られたものである。これ以前に提案されたモデル関数は今回のデータの解析の際に参考にしたUKモデルの他に代表的なものとしてニューヨーク市大(CUNY)モデルとその改良を加えたCWK-5モデル、及びWentz(又はRSS)モデルとその改良を加えたW-7モデルがある。SASS IモデルはW-7とCWK-5モデルを中心にして作られた複合モデルであり、1980年の5月に提案された。関連するモデルとの比較あるいは完成に至るまでの経過はSchroeder *et al.* (1982)に報告されている。

同モデルの関数形は(4)を仮定している。そして水平偏波と垂直偏波の送受信の場合に分けて、係数 G と H を表にして示した。SASS I $G-H$ 表では入射角 θ は 2° 毎に、方位角 ϕ は 10° 毎に数値を与えている。

散乱計航空機搭載実験の円旋回飛行より得た NRCS データの入射角特性を調べる。図15は方位角分布から求めた向い風方向の σ° (dB) を入射角 θ に対して示したものである。平均風速が 5 % 以内の差しかない RUN を使って 2 つの事例を示した。同図の中の破線につながれた例は平塚沖観測塔での実験によって得た分布である。また参考のために SASS I モデルによる入射角分布を鎖線で表わして示した。入射角の広い範囲にわたるデータでないため厳密な比較は出来ないが、航空機のデータは SASS I モデル及び観測塔データに比べて入射角の増加に対し σ° (dB) の減少が緩やかである。また絶対値は異なるが、同モデル関数と観測塔データは大きな入射角を除いて非常に良く似ている。大きな入射角における観測塔データは、4.1 節で調べたように単調に減少する。この入射角依存性は W-7 モデルで表わされる。他の方位角における NRCS の入射角特性は、向い風方向の場合の比較でみられた性質とほぼ同様である。

図16は向い風方向の NRCS σ° (dB) を平均風速に対して示したものである。水平偏波の場合で、円旋回飛行によって得た全方位にわたる方位角分布のピークより σ° (dB) を求めた。図中の実線は観測塔の測定値を近似したもので、図 7 で示されている。また破線は SASS I

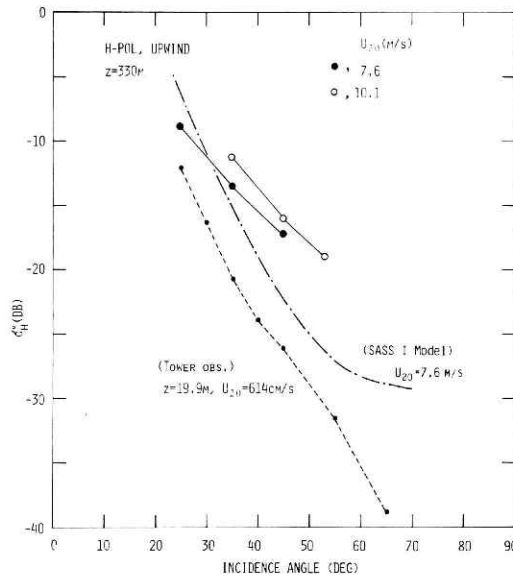


図15 航空機実験で求めた向い風方向 NRCS σ° (dB) の入射角特性。破線と鎖線は各々観測塔の測定の結果と SASS I モデル関数である。

Fig. 15 Incidence dependency of the upwind NRCS σ° (dB) in the airborne experiment. Broken and dot-dashed lines show the result of the tower experiment and the SASS I model function, respectively.

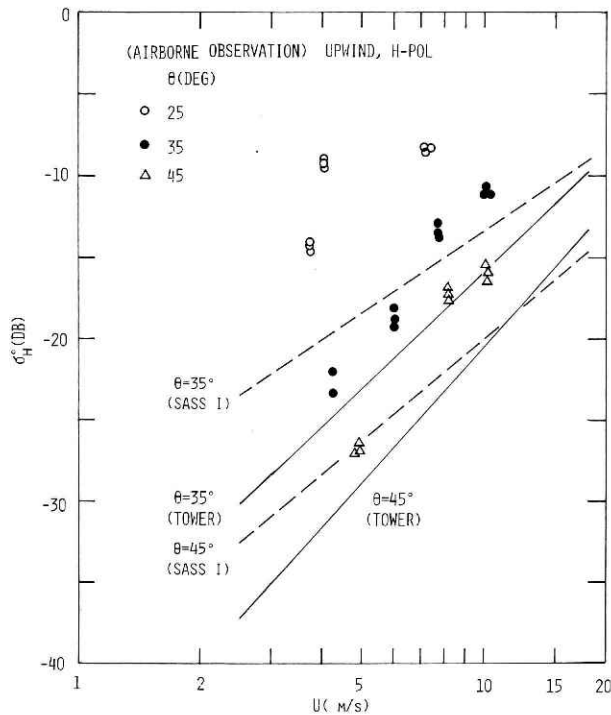


図16 航空機実験で求めた向い風方向NRCS σ^0 (dB) の風速依存性。水平偏波の場合。実線と破線は各々観測塔の測定結果と SASS Iモデル関数である。

Fig. 16 Wind dependency of the upwind NRCS experiment under horizontal polarization. Solid and broken lines shows the result of the tower experiment and the SASS I model function, respectively.

モデル関数から求めたものである。測定値はかなりばらついていて近似曲線を得ることは困難である。 $\theta = 35^\circ$ の場合には SASS I モデルに近いが、強風時のデータがないので十分な比較ができない。観測塔での実験式と SASS I モデルを比較すると、前者の風速に対する勾配が大きい、即ち(4)の指数 H が大きいことが分る。強風時には両者の NRCS はほとんど同じ値になることから、弱風時の海面の後方散乱を測定する条件に差異が生じる要素が含まれていると考えられる。観測塔での実験時に散乱計のペンシルビームが照射する海面の大きさは 4.1 節で論じたように非常に小さい、従って後方散乱に寄与する可能性がある広い海面での大きなスケールの現象は NRCS データに含まれない部分があると考えられる。時系列として捕えたデータでは空間特性を充分表現できないかもしれない。SASS の目標海面 (セル) は 50 km のスケールであり、種々の海面情報を含んでいると思われる。

図17は図16と同じであるが、垂直偏波の場合を示す。前図と同様に測定値のバラツキが大きい。垂直偏波の場合は入射角の変化による差が水平偏波より顕著でないため、データに対

する近似線を求めるのが更に困難となる．弱風時には装置及び実験条件による NRCS データへの影響の他に，風浪による海面粗度に比べて他の物理的要因が後方散乱に相対的に寄与する割合が大きくなる．SASS I モデルに対する比較は図16で示されている水平偏波の場合の傾向と同様である．

NRCSの方位角に対する変化は向い風方向にピークを持ち， $\cos$ 関数に近いパターンを示す．円旋回飛行による観測から与えられた NRCS 分布と SASS I モデル関数で示される NRCS の変化のパターンを比較する．即ちレーダビームが照射する方位角方向の違いによる海面の後方散乱の非一様性を調べる．表 6 に向い風方向と追い風方向の σ° (dB) の差，及び向い風方向と横方向の σ° (dB) の差を今回の観測と SASS I モデルについて示す．各 RUN は同一条件での旋回飛行の場合には平均値をとってある．また SASS I モデルは各 RUN の平均風速に対する σ° (dB) から導出した．弱風時の比較は検討すべき問題が多いため， $U > 6$ m/s の場合における今回のデータと SASS I モデルを表 6 から抽出して図18に示した． σ° (dB) の変動幅が小さくなるのは風速が強くなることを指す．図から分るように変動幅が

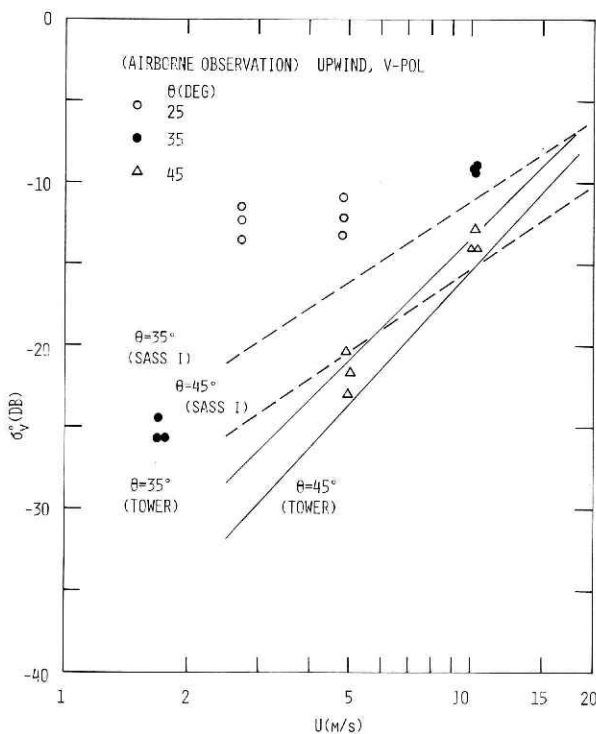


図17 航空機実験で求めた向い風方向NRCS σ° (dB) の風速依存性．水平偏波の場合．実線と破線は各々観測塔の測定結果と SASS Iモデル関数である．但し垂直偏波の場合．

Fig. 17 Same as Fig. 16, but for vertical polarization.

表 6 NRCS の方位角分布における非一様性の比較.

Table 6 NRCS anisotropy for the present data and the SASS I model function.

RUN	θ POL (deg)	U_{20} (m/s)	UPWIND-DOWNWIND		UPWIND-CROSSWIND	
			PRESENT (dB)	SASS I (dB)	PRESENT (dB)	SASS I (dB)
F-7	25 V	4.9	2.72	0.39	2.88	4.48
G-4	25 V	2.7	1.00	0.27	7.22	4.93
F-1	25 H	4.0	-0.26	1.67	1.27	4.49
F-12	25 H	3.7	1.32	1.70	4.32	4.54
G-8	25 H	7.2	-0.80	1.39	2.00	4.10
G-3	35 V	1.7	2.66	3.06	9.59	9.29
G-13	35 V	10.1	0.30	0.53	4.81	5.40
F-5	35 H	6.0	1.20	1.92	3.00	5.55
F-11	35 H	4.2	2.30	2.19	4.55	6.10
G-7	35 H	7.7	1.40	1.73	4.90	5.17
G-15	35 H	10.1	2.06	1.52	3.29	4.76
F-6	45 V	4.8	0.48	2.77	5.56	8.57
G-2	45 V	0.7	2.26	6.79	8.99	15.01
G-12	45 V	10.1	-0.06	1.21	5.77	6.08
F-10	45 H	4.9	2.60	2.32	4.76	6.40
G-6	45 H	8.1	3.26	1.95	6.75	5.53
G-14	45 H	10.1	1.34	1.79	5.59	5.15
G-9	55 V	2.6	4.34	4.39	8.57	11.25
F-13	53 V	8.8	1.50	1.65	6.65	6.58
G-11	53 V	3.1	4.50	3.98	4.45	10.58
F-14	53 H	8.8	3.60	2.12	7.40	5.32
G-10-1	53 H	2.8	3.80	2.78	6.70	7.57

小さくなる割合は、SASS I モデルに比べて今回の観測値の方が大きい。換言すれば観測値が示す傾向は、風速の増加とともに急速に振幅が小さくなることを表わしている。

6. まとめ

海上風を海面の粗度から決定しようとする実験装置としてマイクロ波散乱計を試作した。測定実験は平塚沖観測塔と航空機を利用して相模湾内で行った。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 観測塔では向い風方向の後方散乱断面積 (NRCS) を 150° の方位角範囲で測定し、水

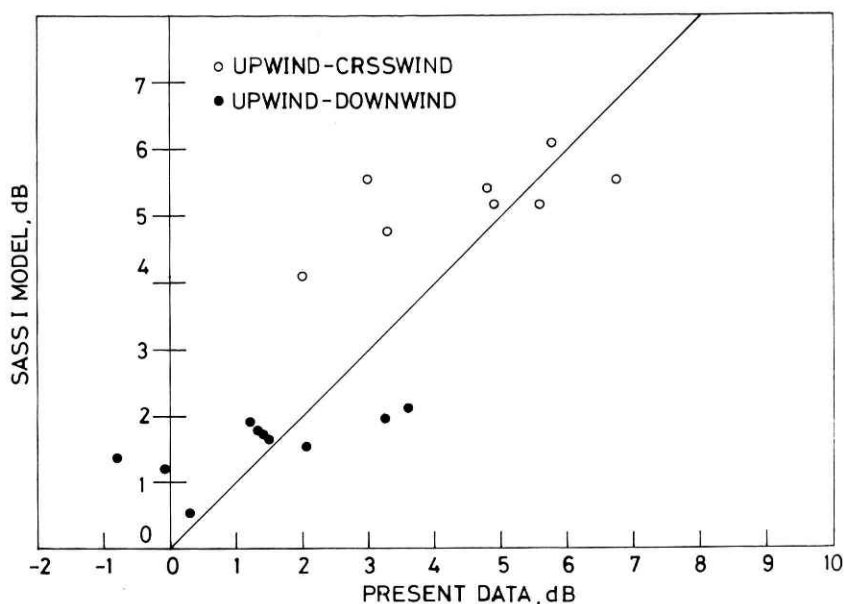


図18 NRCSの方位角分布における非一様性について今回の測定結果とSASS Iモデル関数を比較したもの。 $U > 6 \text{ m/s}$ の場合のデータを用いた。

Fig. 18 Comparison of the present result with the SASS I model function about anisotropy of NRCS azimuth distribution, under the condition of $U > 6 \text{ m/s}$.

平偏波と垂直偏波の送受信の場合における入射角依存性、風速依存性を明らかにした。これらのデータはペンシルビームによる小さな海面の情報を時系列として求めたものである。

(2) 散乱計を航空機に搭載して行った実験では、円旋回及び直線飛行によって海面のNRCSの性質を調べた。円旋回飛行においては全方位にわたる方位角分布を、海面への入射角をパラメータとして得ることができた。直線飛行においては海面からのレーダ波の後方散乱の一様性を評価した。また海岸に近い領域でのNRCSの変化を推定風速と対比して示した。

(3) NRCSの方位角分布は $\cos$ 級数の第4項までで十分に表現できる。向い風方向の決定は第1項の分布を参考にして第2項で行うが、入射角が小さいときは必ずしも適用できなかった。

(4) SASS I モデルと今回の測定結果を比較した。平均風速とNRCSの関係は観測塔での結果では、同モデルよりも低風速においてNRCSの減衰が激しいことが見出された。航空機を使った実験での両者の対比はばらつきが大きく、またデータ数が充分でないため、関数関係を示すことが出来なかった。NRCSの方位角分布は同モデルと比べると風速が比較的強くなると変動の振幅が急速に小さくなることが示された。

7. おわりに

マイクロ波散乱計は地上実験装置として製作された。従って航空機に搭載することは技術的にも相当困難であったし、散乱計の性能にも限界があった。しかし全方位にわたる NRCS は航空機からの海面探査以外に手段を持たないし、外洋での実験そのものが不可欠である。今回強風時の測定を外洋で行う機会を得なかったが、航空機搭載実験を続けて広い風速範囲の NRCS データを取得する必要があるだろう。

海面は波浪などの物理的な性質だけでなく、生物の生成する物質（リピッド・フィルム等）による化学的な性質も持つ。そのため電波の海面での干渉は一層複雑なものとなり、NRCS に含まれる情報は多い。海面の現象と電波（放射）の関係の研究は今後の発展を期待したい。

この研究においてマイクロ波散乱計に関する多くの基本的特性を明らかにすることができた。またこれから解明すべき点も指摘することができた。リモートセンシングにより広い海域での風速分布を短時間に測定するというマイクロ波散乱計の開発研究の目標に向って大きく前進したと言える。

研究を進めるに当って平塚支所都司嘉宣博士には多大な助力をいただいた。感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Dome, G.J. *et al.* (1977) : An experimental model for ocean radar backscatter and its application in inversion routine to estimate wind speed and direction effects. Proceedings URSI commission F, La Baule, France.
- 2) Kondo, J. (1977a) : Comparison of the Kondo's bulk transfer coefficient with the recently-made direct observations of fluxes on the sea surface. *J. Meteorol. Soc. Japan.* **55**, 319-323.
- 3) Kondo, J. (1977b) : Geostrophic drag and the cross-isobar angle of the surface wind in a baroclinic convective boundary layer over the ocean. *J. Meteorol. Soc. Japan.* **55**, 301-311.
- 4) Kondo, J. *et al.* (1973) : High-frequency components of ocean waves and their relation to the aerodynamic roughness. *J. Phys. Oceanogr.* **3**, 197-202.
- 5) Masuko, H. *et al.* (1981) : Application of the airborne microwave rain-scatterometer/radiometer system to the remote sensing of rains and wind vector measurements over the ocean. Proceedings 7th CSRS, Winnipeg, 567-578.
- 6) Mitsuyasu, H. and T. Honda (1974) : The high frequency spectrum of wind generated waves. *J. Oceanogr. Soc. Japan.* **30**, 185-198.
- 7) Naito, G. (1978) : Direct measurements of momentum and sensible heat fluxes at the tower in the open sea. *J. Meteorol. Soc. Japan.* **56**, 25-34.
- 8) 内藤玄一他 (1980) : 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.

- 9) Schroeder, L.C. *et al.* (1982) : The relationship between wind vector and normalized radar cross section used to derive SEASAT-A satellite scatterometer winds. *J. Geophys. Res.*, **87**, 3318–3336.
- 10) Valenzuela, G.R. (1978) : Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves—a review. *Boundary-Layer Meteorol.*, **13**, 61–85.

(1984年6月25日 原稿受理)