

航空機搭載用マイクロ波雨域散乱計／放射計による海洋のリモートセンシング*

増子 治 信, 岡 本 謙 一, 吉 門 信,
尾 嶋 武 之, 猪 股 英 行, 畚 野 信 義**

要 旨

航空機搭載マイクロ波雨域散乱計／放射計を用いて、それぞれ海面の微分後方散乱断面積 (σ^0) および輝度温度 (T_B) が、入射角 ($0\sim 60^\circ$), 方位角 ($0\sim 360^\circ$), 偏波 (H/V) をパラメータとして測定された。使用マイクロ波は、散乱計が X-バンド (波長 3 cm), 放射計が X-バンド (波長 3 cm) と Ka-バンド (波長 8.7 mm) である。観測は日本海中央部に設置された大型気象ブイ付近で行なわれ、Sea Truth (海上における直接測定) データは気象ブイによって観測されたものが用いられた。 σ^0 が風向と観測方向のなす角によって周期的に変化することが確認され、それにもとづくモデル計算による解析結果と米国において測定されたデータの比較から導き出された風速値は、気象ブイによって観測されたものと良く一致した。また輝度温度分布図を作成し、その波長による違いを確認したが、そこでは島や海岸線の形が放射率の違いによって明瞭に識別できる。本実験から得られたデータは、海洋観測衛星 MOS 2 に搭載が予定されているマイクロ波海面散乱計および MOS 1, MOS 2 に搭載が予定されているマイクロ波放射計の基礎資料として活用できよう。

1. はしがき

地球表面の約70%の領域を海洋が占めている。この広大な領域の海況を、従来の海洋測器によって常時監視することはほとんど不可能である。一方、海洋現象は人間生活に密接に結びついており、短期・長期の気象現象を支配し、更に赤道太平洋の海面状態が台風発生的重要因素となっていることは周知の事実である。また洋上を航行する船舶や漁船にとっては、航路や漁場にあたる海上の気象変化は、乗組員の生命や経済活動に直接影響する重大な問題となる。このため、人工衛星によって海洋の

状態を常時、広域的に監視しようとする試みは、以前から行なわれて来た。しかし、従来使用されてきた可視、赤外の光学センサでは、降雨の場合はもちろん、雲のある場合には観測が困難であったが、観測が必要とされるのはむしろそのような状況下での海面状態である。更に光学センサによって得られたデータから海面状態と直接結びつく情報を引き出すことは、一部の要素を除いてかなり困難である (Walsh, 1976)。このため、近年マイクロ波の利用が注目されるようになったが、この場合、昼夜に拘わらず、且つ天候に左右されずに観測できるという利点の他に、光学センサによるデータと異なり、海面のマイクロ波散乱特性および放射特性が海洋面現象と直接結びついて説明できるという重要な利点が存在する (Moore and Fung, 1979; Wilheit, 1978; Swift, 1980)。

電波の海面による散乱特性は、レーダの発明された当初から研究されてきた (Skolnik, 1970)。これは主として、レーダによって物体を識別する場合に、干渉雑音として作用する海面散乱の影響を取り除くために行なわれ

* Remote Sensing of Sea Surfaces Using the Airborne Microwave Rain-Scatterometer/Radiometer System.

** Harunobu Masuko, Kenichi Okamoto, Shin Yoshikado, Takeyuki Ojima, Hideyuki Inomata and Nobuyoshi Fugono, 郵政省電波研究所。

—1981年6月2日受領—

—1981年9月14日受理—

第1表 観測装置諸元.

Airplane Velocity	160 kt(296 km/h)
Altitude	2910 m
Antenna Angle*	20°
Antenna Beam Width	8.5°
Scatterometer Frequency	10.00 GHz(3 cm)
PRF	440 Hz
Integration Number of Pulses	128
Polarization	HH/VV
Pulse Width	0.5 μ sec
Range Gate	$c\tau/2=75$ m
Data	Log Output
Radiometer Local Frequency	9.86 GHz(3 cm)/ 34.21 GHz(8.8 mm)
Radiometer Integration Time	0.25 sec

* Definition is referred to Figure 2.

た。研究の初期の段階で、すでに海面の微分後方散乱断面積 σ^0 が海上を吹く風と相関があり、さらに、電波の入射角、偏波等によって散乱の性質が異なることも判明していた。

その後、マイクロ波を用いた海洋のリモートセンシングが注目され始め、その面から、マイクロ波の海面散乱特性を調べるための実験が数多くなされている (Moore and Fung, 1979)。1960年代に米国海軍研究所 (NRL) は、ペンシルビウム方式の4周波レーダ (0.4, 1.2, 4.5, 9.3 GHz) を用いて、 σ^0 を風速、風向、偏波および周波数の関数として定量的にとらえようとする試みを行っている。その後、NASA ジョンソン・スペースセンタ (JSC) の航空機実験 (13.3 GHz, ファンビーム・ドップラ方式) を経て、1975年の NASA ラングレー・スペースセンタ (LaSC), ニューヨーク市立大学, カンサス大学等による共同航空機実験 AAFE (13.9 GHz, ペンシルビウム散乱計 RADSCAT) によって初めて、 σ^0 が方位角の周期関数の形で、各入射角、偏波および風速ごとに測定された。さらに、これらの実験と並行して、人工衛星 SKYLAB 搭載の S193 マイクロ波センサによって、軌道上から海上風を観測する実験が行なわれた。これらの成果をふまえ、米国では1978年に海洋観測衛星 SEASAT を打ち上げ、搭載された海面散乱計 (14.6 GHz, ファンビーム・ドップラ方式) によって多くの貴重なデータを取得した。

一方、マイクロ波放射計を用いた海面状態のリモートセンシングも、米国を中心として活発に行なわれてい

る (Wilheit, 1978; Swift, 1980)。米国では1972年に打ち上げられた NIMBUS 5号にマイクロ波放射計 (19.35 GHz ラジオメータ, 22, 31, 50~60 GHz スペクトロメータ) が搭載され、海上での降雨、水蒸気、海面温度、海上風の風速の測定、および、氷雪のリモートセンシングが行なわれた。その後、SKYLAB, NIMBUS 6号による同種の実験を経て、NIMBUS 7号および SEASAT に搭載された5周波マイクロ波放射計 (6.6, 10.7, 18, 21, 37 GHz) によって、降雨や水蒸気を含む海面状態を総合的に測定しようとする試みが行なわれている。

日本においては、科学技術庁、宇宙開発事業団が1987年に打ち上げを計画している海洋観測衛星 MOS 2号に海面散乱計の搭載が予定されている。また、1984年打ち上げ予定の MOS 1号および MOS 2号にマイクロ波放射計の搭載が予定されている。しかし、米国においても基礎データの集積は未だ十分ではなく (Moore *et al.*, 1978), またマイクロ波散乱断面積から風向、風速を導き出すアルゴリズムにも解決すべき点が多数存在する (Moore and Fung, 1979)。すなわち、我が国がマイクロ波散乱計を衛星に搭載しようとする場合、自ら基礎データを収集し、アルゴリズムを確立して行かなければならない。この点はマイクロ波放射計の場合も全く同様である。

郵政省電波研究所 (RRL) では、1980年に航空機搭載マイクロ波雨域散乱計/放射計が完成し、衛星軌道上からレーダを用いて降雨量の3次元分布を計測する場合の問題点を調査するために、上空から2周波のレーダおよびラジオメータを用いて降雨観測実験を行って来た。それとともに、この装置の多面的な運用を目的として、海面のマイクロ波微分後方散乱断面積およびマイクロ波輝度温度の測定の可能性を試験した。この章以降には、1980年7月13日に日本海で行なわれた航空機実験の概要、およびこの実験で得られた微分後方散乱断面積と輝度温度の測定結果について述べる。

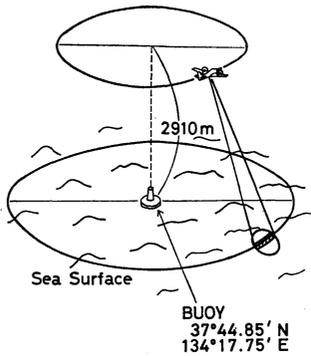
2. 観測の概要

マイクロ波雨域散乱計/放射計の装置の詳細については、Okamoto *et al.* (1980) および Inomata *et al.* (1981) に報告されている。第1表には、観測パラメータの概要を示す。

実験に使われた散乱計は X-バンド (10.00 GHz) であった。送信管はマグネトロンを使用しており、送信出

第2表 観測における, 入射角 ($\theta=Q+20^\circ$, Q はバンク角), 直距離 (r), 旋回半径 (R_1, R_2), 分解能 (r_1, r_2), 角度分解能 (α_1, α_2), 旋回周期 (T), および旋回数 (N).

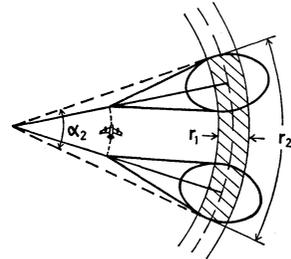
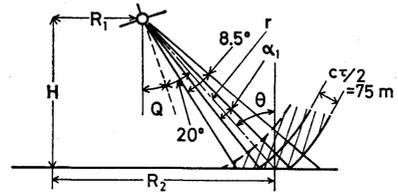
θ (Deg)	r (m)	R_1 (km)	R_2 (km)	r_1 (m)	r_2 (m)	α_1 (Deg)	α_2 (Deg)	T (min ; sec)	N (HH/VV)
25	3210	7.90	9.25	180	500	2.9	3.1	10:03	2/2
30	3360	3.92	5.60	150	530	2.2	5.4	4:59	3/3
40	3800	1.90	4.34	120	620	1.3	8.2	2:25	3/3
50	4530	1.20	4.66	100	770	0.8	9.5	1:32	5/5
60	5820	0.82	5.86	90	1030	0.4	10.1	1:03	5/5
65	6890	0.69	6.93	80	1100	0.3	9.1	0:53	-/-



第1図 航空機実験の概念図.

力は20 KW である. パルス巾は $0.5 \mu\text{sec}$, 繰り返し周波数は 440 Hz, パルス積分数は 128 で実験が行なわれた. アンテナはオフセットパラボラ方式が採用されており, 電力半値巾は $8.5^\circ \times 8.5^\circ$ でアンテナ利得は 25.8 dB, サイドローレベルは -30 dB 以下である. 受信機の雑音指数は 5.3 dB, 帯域幅は 2.97 MHz で, ダイナミックレンジは 80 dB, 最小受信感度は -105 dBm ($3.16 \times 10^{-11} \text{ mW}$) である. 散乱計にはこの他にも Ka-バンドのものがあるが, 本実験時には受信機不良のためデータを取ることができなかった.

放射計は, X および Ka-バンド共, 雑音注入型 Null balance Dicke 方式 (Moore, 1976) で, 雑音の注入はパルス状に行なわれ, パルス巾を変化させることにより Null balance を実現している. 受信機のローカル周波数は, X-バンドが 9.86 GHz, Ka-バンドが 34.21 GHz で, ダブルサイドバンド方式が採用され, バンド幅は 100 MHz である. 受信機雑音指数は X, Ka-バンド共 6 dB 以下, 積分時間は 0.25 sec で, これによって受信機入力での受信感度を計算すると 0.44 K となるが (Tiuri, 1966), 実測値は X, Ka-バンド共 0.5 K であ



第2図 観測における配置図. 断面図 (上) 及び平面図 (下).

った.

散乱計と放射計はアンテナ系および伝送線路系の一部を共用しており, 観測は時間分割方式で行なわれ, 散乱計と放射計は, はば同時に同じ海面を観測できる. 得られたデータは磁気テープに収録され, 地上の汎用コンピュータで計算処理される. 使用した航空機は, 降雨観測の場合と同様にセスナ 404 型である.

本装置のアンテナは機内に設置されており, 飛行機床面に垂直な方向から左右に 23.2° の範囲でのみ走査することができるので, 大きな入射角での測定は飛行機自体を傾ける (Bank) ことによって行なわれた. 従って観測は円周状に行なわれた. 第1図に観測の概念図が示されている. 第2図には観測パラメータの配置が示されており, 各パラメータの値は第2表に示されている. 装置の制約上, 第2表に示されるように, 観測は非常に広範

困な領域で行なわれるが、海面は陸と異なり障害物がな
いたため、広い範囲にわたって一様な風が吹いていると仮
定した。

アンテナビーム幅は 8.5° であるが、入射角の不確定
さを除くため、観測は距離ゲートをかけて海面のレーダ
ビーム照射領域を分割することによって行なわれた。第
2図にはこの様子が示されている。マイクロ波放射計で
はビーム全体にわたって積分が行なわれるため、測定さ
れた海面温度は 8.5° の入射角の不確定さを持つ。

散乱計受信機は大きなダイナミックレンジを得るため
に対数増幅器を用いているが、海面からのパルスごとの
反射波振幅は絶えず変動しているため、この出力は信号
処理装置によって平均化される。一般に真数平均と対数
平均は異なるが、海面による散乱瞬時電力がどのような
確率分布をするかは明確に知られていないので、データ
解析の際の平均化作業はすべて対数で行ない、標準偏差
も対数値を用いて算出した。

航空機の位置はロランCによって、姿勢はジャイロに
よって決定される。ジャイロの測定範囲は降雨観測の場
合には3方向とも $\pm 12.7^\circ$ であったが、海面観測の場合
には飛行機の横方向の傾き角を示すロールおよび機首の
方位角変位を示すヨーが $\pm 180^\circ$ まで測定できるように信
号処理部を変更した。

飛行機の高度は気圧高度計によって測定されている
が、この出力は散乱計を用いて電波の往復時間から較正
された。その結果、散乱計のパルス幅(τ)は $0.5 \mu\text{sec}$
を用いると、高度の測定精度は絶対値で $cr/2=75 \text{ m}$ と
なる。

第3図には飛行コースが示されている。飛行時間は5
時間、観測時間は2時間30分である。観測は、気象庁が
日本海中央部に設置した6号大型気象ブイ周辺で行なわ

れた。第3表には、気象庁がNNSS (Navy Navigation
Satellite System) を用いて決定しているブイの位置と、
搭載したロランC受信装置によって測定されたブイの位
置が示されている。これによってロランCが日本海中央
部でも使用可能であることが確認された。またブイの位
置は、最も近い陸から180 km 離れており、海の深さは
2000 m 以上で、海岸線や海底が表面の状態に影響を与
えることはないと考えて良い。

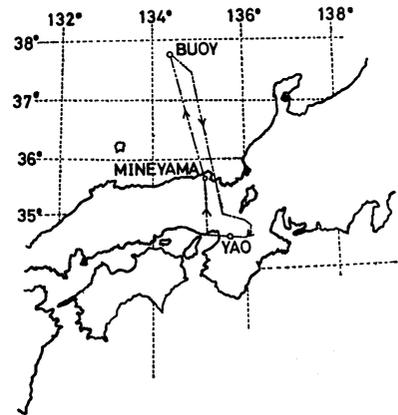
3. Sea Truth データ

Sea Truth データとしては、6号大型ブイによって観
測されたものが用いられた。第4表には観測データが示
されている。観測は3時間ごとに行なわれるが、将来の
実験では各種の方法を導入し、さらに詳細に Sea Truth
を行う必要があると考えており、この点について更に後
章で述べる。

4. 散乱計データの解析の概要および結果

4.1. 散乱計データの解析

第4図には、Up wind (アンテナが風上を向いたと
き) の場合の受信電力波形の一例が、各入射角ごとに表
示されている。入射角 0° はビームが天底を向いている場
合であって、各入射角に対応するデータとしては、アン



第3図 本実験時の飛行経路。

第3表 6号大型気象ブイの位置。

	Announcement of JMA	Loran C
N	$37^\circ 45'$	$37^\circ 44.85'$
E	$134^\circ 23'$	$134^\circ 17.75'$

第4表 6号大型気象ブイによって得られた Sea Truth データ。

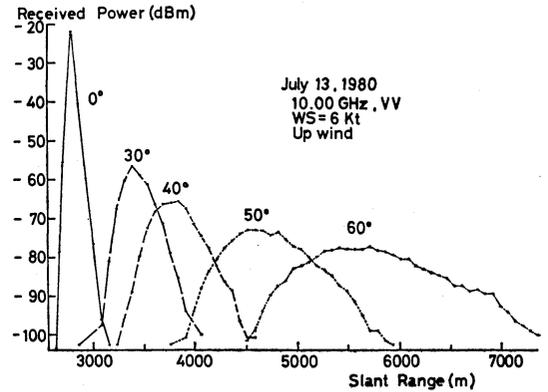
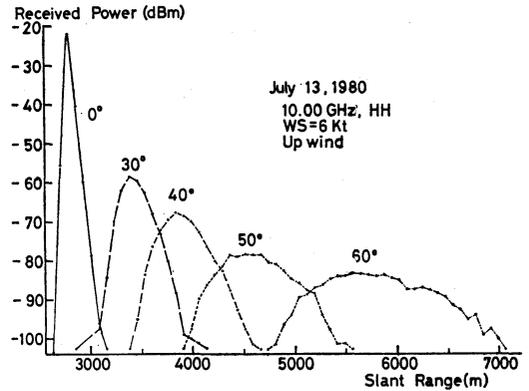
Time	Wind Speed	Wind Direction	Env. Temp.	Wave Height	Water Temp. (20 m below)	Current Speed	Current Direction
12:12	6 kt	16/32	22.2°C	Under 50 cm	18.5°C	0.01 kt	161°
15:13	5 kt	12/32	22.9°C	Under 50 cm	18.4°C	0.03 kt	164°

テナビーム軸の位置に対応する海面からの散乱電力が受信電力波形の極大値に対応すると仮定して、これらの受信電力波形の極大における値を採用した。後に述べるが、後方散乱断面積は入射角の増加とともに減少するので、この仮定は必ずしも正しくはないが、これによって生ずる誤差はわずかであると推定される。電波の入射角は、飛行機の高度と電波の往復時間から求められた直距離 (Slant Range) から決定される。第5図には、この様にして得られたデータの一例が、観測時間の経過によってプロットされている。入射角は60° (バンク角40°) で、上が送受信とも垂直偏波 (VV), 下が送受信とも水平偏波 (HH) のデータである。この場合は5回の施回観測を行ったが、それによって、Up wind における極大値 (Up wind peak) と Down wind (アンテナが風下を向いた場合) における極大値 (Down wind peak) が交互に現われる様子がよく示されている。極小値は Cross wind (アンテナビームと風向が直交する場合) に対応する。垂直偏波の場合は Up wind peak (大きな方) と Down wind peak (小さな方) の差が小さく、水平偏波の場合はこの差が極端に大きい。

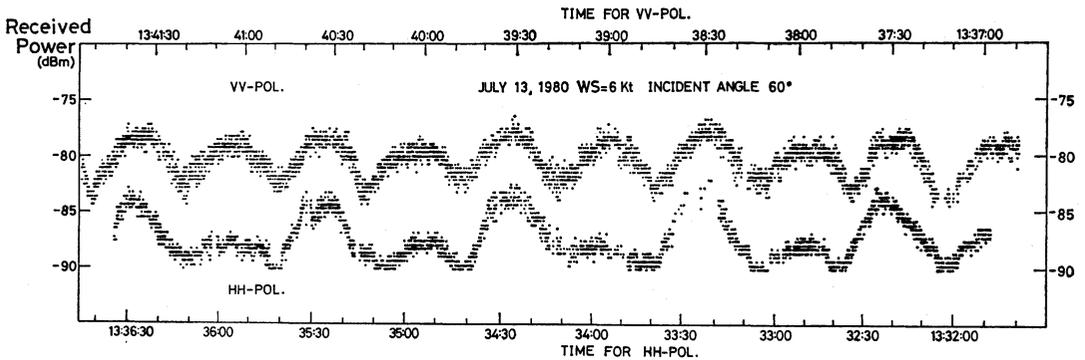
海面散乱のレーダ方程式は次の様に表示される (Moore, 1975)。

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot P_t}{(4\pi)^3 \cdot L} \int \frac{G^2(\hat{\theta}, \hat{\varphi}) \cdot \sigma^0}{r^4} dA \quad (1)$$

P_t , P_r はそれぞれ送信電力と受信電力, λ は電波の波長を表わす。L は装置の損失で 5dB である。大気ガス等の吸収, 散乱による減衰の影響は、快晴の日に実験が行なわれたので考慮しない。 $G(\hat{\theta}, \hat{\varphi})$ はアンテナに固定



第4図 Up-wind における各入射角ごとの受信電力波形の一例。上が送受信とも水平偏波、および下が垂直偏波の場合で、横軸は時間の替りに直距離で示してある。



第5図 入射角60°の場合における受信電力の時間変化を示す。航空機は、水平偏波(下)および垂直偏波(上)のそれぞれの場合にプイの周囲で5回の施回を行ったが、それによって受信電力の変化する様子が示されている。

第5表 入射角 0°における微分後方散乱断面積の比較.

Observers	σ^0 [dB]	Frequency	Wind Speed
RRL ¹⁾	10.65	10.00 GHz	6 kt
Grant & Yaplee (1957)	7	9.38 GHz	≤ 5 kt
	5		5~10 kt
	3		10~15 kt
	-1		15~20 kt
JSC(1971) ²⁾	13.5	13.3 GHz	25 kt
LaLC (1977) ³⁾	9.5 (Theory)	13.9 GHz	6 kt
	12		14 kt
	10		25 kt
	10		—
SKYLAB (1976) ⁴⁾	13	13.9 GHz	—
Wentz (1978) (Theory)	10~14.7	13.9 GHz	25~2.4 kt

- 1) RRL: Radio Research Laboratories.
- 2) See Krishen (1971).
- 3) See Jones *et al.*(1977).
- 4) See Moore and Fung (1979).

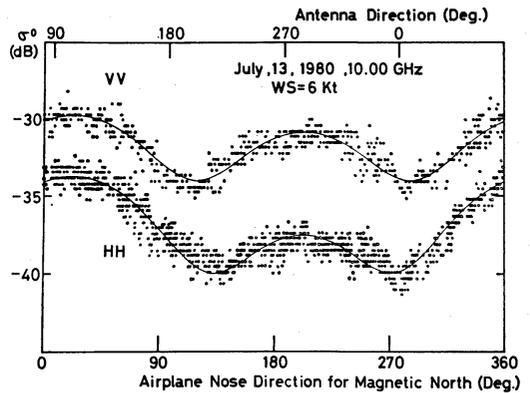
された座標系で表わしたアンテナ利得を、 r は直距離を示す。 σ^0 は海面の微分後方散乱断面積 (Differential Back-scattering Cross Section) で、入射電力に対する入射波と同じ方向 (後方) に散乱される電力の比 (後方散乱断面積) を照射面積で規格化した無次元の量を表わし、次式の様に定義される。

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi) \cdot (\text{後方単位立体角への散乱電力})}{(\text{入射電力密度}) \cdot (\text{散乱体の面積})} \quad (2)$$

アンテナ利得に対しては、 $\hat{\theta}$ 方向 (アンテナビーム軸からの角度方向) にはガウシアン分布を持ち、 $\hat{\varphi}$ (アンテナ座標系における方位方向) には依存しないと仮定して、次の様な式で近似した。

$$\left. \begin{aligned} G(\hat{\theta}, \hat{\varphi}) &= G_0 \cdot f(\hat{\theta}) \\ f(\hat{\theta}) &= \exp \left\{ - \left(\frac{\hat{\theta}}{\theta_h} \right)^2 \cdot \ln 2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\theta_h = \theta_0/2 = 4.25^\circ$ である。レーダ方程式中の積分を行なう際、レーダビーム照射領域は距離ゲートによって細いバンド状に分割されているので、1つのバンドの中では距離方向に利得は変化しないと仮定すると、入射角 θ におけるバンドの幅 $(75/\sin \theta)m$ を用いて、(1) 式は次の様に表わすことができる。



第6図 入射角 50° の場合の微分後方散乱断面積の観測値。水平偏波 (下) および垂直偏波 (上) のそれぞれの場合の値が、方位角の変化に従って示されている。

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot P_t \cdot G_0^2 \cdot \sigma^0}{(4\pi)^3 \cdot L \cdot r^4} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp \left\{ - \left(\frac{\hat{\theta}}{\theta_h} \right)^2 \cdot 2 \ln 2 \right\} \frac{75}{\sin \theta} r \hat{d}\hat{\theta} \quad (4)$$

この式に前述のパラメータ値を代入し、対数表示を用いて、結果的に σ^0 は次の式で示される。

$$(\sigma^0)_{\text{[dB]}} = (P_r)_{\text{[dBm]}} + 10 \log(r_{\text{[m]}}^3) + 10 \log(\sin \theta) - 65.29_{\text{[dB]}} \quad (5)$$

計算を行う際、送信出力の変動に対する補正と受信機利得の補正を行ない、補助データとして用いた。

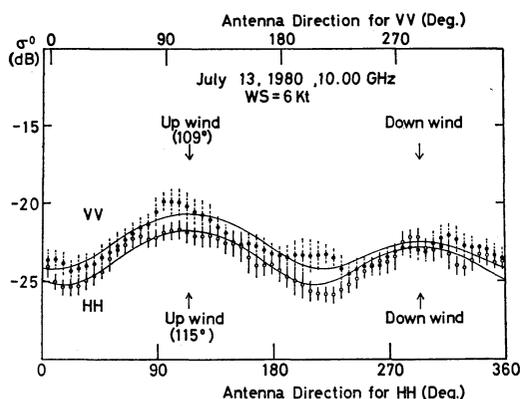
鉛直入射の場合の σ^0 は、上記の方法とは異なり、レーダビーム照射域全体に渡って積分を行うことによって求めた。この場合、(1) 式は次の様に表わされる。

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot P_t \cdot G_0^2 \cdot \sigma^0}{(4\pi)^3 \cdot L} \int_0^{2\pi} \hat{d}\hat{\varphi} \int_0^{\pi/2} \exp \left\{ - \left(\frac{\hat{\theta}}{\theta_h} \right)^2 \cdot 2 \ln 2 \right\} \frac{\sin \theta}{r^2} \hat{d}\hat{\theta} \quad (6)$$

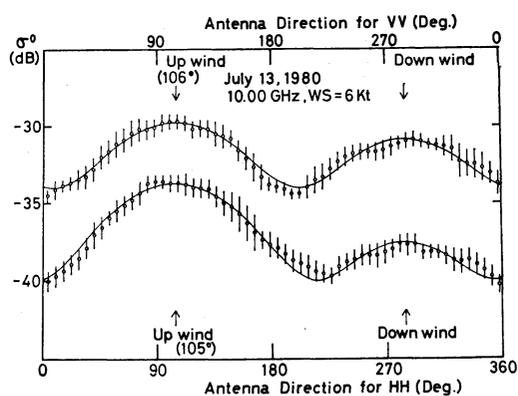
この式より、 σ^0 は対数表示を用いて次の様になる。

$$(\sigma^0)_{\text{[dB]}} = (P_r)_{\text{[dBm]}} + 10 \log(h_{\text{[m]}}^2) - 36.93_{\text{[dB]}} \quad (7)$$

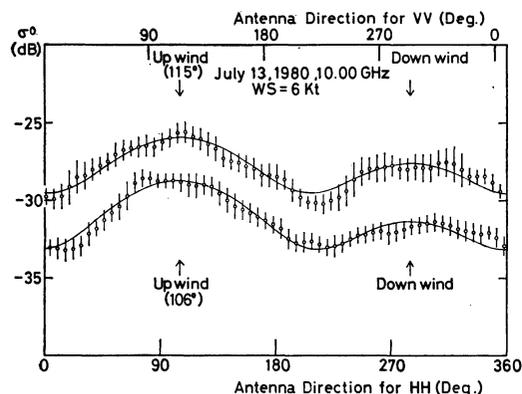
ここで $h(=r)$ は飛行機の高度を表わす。第5表には、今回の実験で得られた鉛直入射の σ^0 の値 (同表第1項) と、他の実験および理論による値との比較が示されている。この表によると、今回の実験で得られた σ^0 の値が、今までの多くの研究者の値とよく対応していること



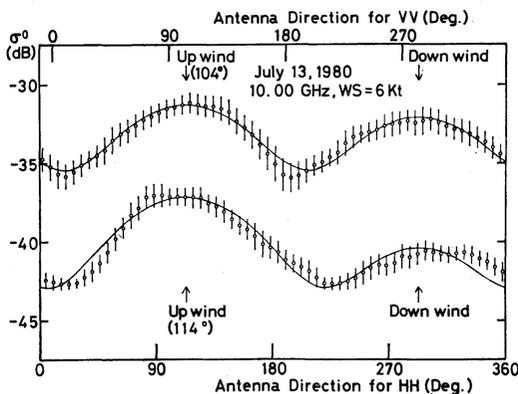
第7図 入射角 30°における σ^0 の平均値の方位角依存性および回帰曲線。下が水平偏波および上が垂直偏波の場合を示す。



第9図 入射角 50°における σ^0 の平均値の方位角依存性および回帰曲線。下が水平偏波および上が垂直偏波の場合を示す。



第8図 入射角 40°における σ^0 の平均値の方位角依存性および回帰曲線。下が水平偏波および上が垂直偏波の場合を示す。



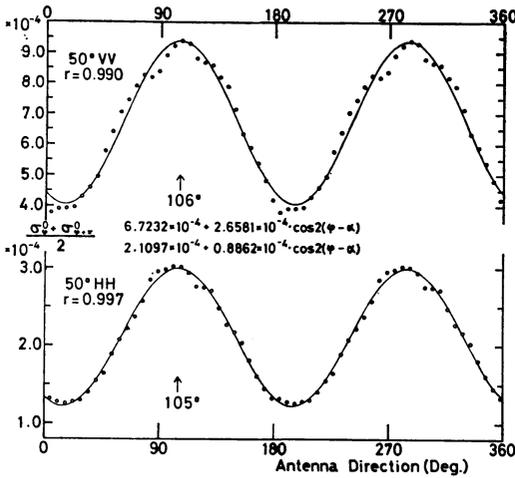
第10図 入射角 60°における σ^0 の平均値の方位角依存性および回帰曲線。下が水平偏波および上が垂直偏波の場合を示す。

がわかる。

第6図には、(5)式を用いて処理を行った入射角 50°の場合の水平偏波(下)と垂直偏波(上)の σ^0 の値が示されている。横軸は磁北に対する飛行機の方向で、右回りに測っている。この図に示されるように σ^0 の変動幅が大きいため、各方位角の前後 6°の間のデータを用いて平均化を行ない、その方位角の代表値とした。平均化の作業は 2~5 周分のデータを重ね合わせて行なわれ、 σ^0 の値は前述したように対数値のまま処理されて、標準偏差が算出された。標準偏差の値は、入射角 30~60°にわたって、HH, VV とも 0.6~0.7 dB 程度である。第7~10図には、このようにして得られた入射角 30~60°の範囲の4種類の解析結果が示されている。図中の

各点に付した縦線は標準偏差を示す。また垂直偏波のデータは、Up wind peak が水平偏波のデータと一致するように 1~10°平行移動してある。図中の実線は、4.2.1. 節で述べる最小 2 乗法によって求めた理論曲線である。これらの図に示されるように、Jones *et al.* (1977) 等の結果と同様に、今回の実験でも σ^0 が方位角とともに周期的に変化することが確認された。

散乱断面積の大きさは、方位角が同じなら、水平偏波よりも垂直偏波の方が大きく、その比(図では対数値なので差をとる)は入射角の増大とともに増大する。この事実、摂動法を用いた Rough Surface Scattering の理論 (Ishimaru, 1978) によって予想されている。即ちこの理論によれば、水平偏波の散乱では摂動展開の 1 次



第11図 $(\sigma_\phi^0 + \sigma_{\phi+\pi}^0)/2$ の値の方位角変化および回帰曲線の入射角 50° における例。下が水平偏波，上が垂直偏波によるデータで， r は相関係数を表わす。

第6表 散乱計によって測定された風向 括弧内はジャイロのデータではなく，別の記録を用いて導びいた値を示す。

Incident Angle	Time	Wind Dir.	Correlation Coeff.
(Buoy)	12:12	169°	
30°HH	12:26:29~32:37	115°	0.966
30°VV	12:38:48~45:51	109°	0.947
40°HH	12:53:28~ 13:00:27	106°	0.977
40°VV	13:00:29~07:49	115°	0.992
50°HH	13:12:49~17:16	105°	0.997
50°VV	13:20:30~26:40	106°	0.990
60°HH	13:31:48~35:30	(114°)	0.989
60°VV	13:38:20~40:25	(104°)	0.993
(Buoy)	15:13	124°	

の項が主に寄与し，垂直偏波の散乱では0次の展開項が主に寄与することが知られており，これによって垂直偏波の場合の σ^0 の値が水平偏波の場合のそれより大きいことが導かれる。また全入射角を通じて Up wind の極大値が Down wind の極大値より大きい。このことは，大気と海面の非線形相互作用によって，表面張力波が大きくなると（重力波）の風下側に成長する（海面傾斜の分散に対する表面張力波の寄与が風上側より風下側で大きい）ということによって説明が試みられている (Chan and Fung, 1977)。

4.2. 散乱計実験の結果

4.2.1. 方位角特性

第6~10図から期待されるように， σ^0 は方位角 (ϕ) の周期関数である。このため，まず余弦関数の2次の項までを考慮して，理論曲線による実験値の近似を行なった。この2次式は次の様に表わすことができる。

$$\sigma_\phi^0 = A_0 + A_1 \cos(\phi - \alpha) + A_2 \cos(2(\phi - \alpha)) \tag{8}$$

α は Up wind の方位（風向）で，係数 A_0, A_1, A_2 は入射角，風速，偏波および電波の波長の関数である。また風向 α は，余弦展開式の性質を利用して，次の式を用いて決定された。

$$\frac{\sigma_\phi^0 + \sigma_{\phi+\pi}^0}{2} = A_0 + A_2 \cos(2(\phi - \alpha)) \tag{9}$$

第7~10図の平均 σ^0 分布で α を任意に仮定して上式か

ら最小2乗法による計算を行ない，相関係数が+1に最も近い場合の α をこのときの風向とした。計算は各 σ^0 の値を真数値に変換することによって行なわれた。第11図には，入射角 50° の場合についてこのようにして求めた(9)式のグラフを示した。求められた各入射角における α および相関係数の値が第6表に示されている。これらの相関係数の値は，余弦展開式の4次以上の偶数項がどの程度の割合で存在するかの指標となると考えられるが，ここで得られた値は全て0.95以上で，(9)式が非常に良い近似であることを示している。表中にはブイで測定された風向も示したが，散乱計によって得られた風向はブイによるものより小さな値（東寄りの風向）を示している。この原因の1つとして，使用した方位ジャイロの Free Drift ($\pm 9^\circ/\text{hour}$) も考えられるが，それだけでは説明が出来ず，同時刻の Sea Truth データもないため，正確なことは今後の実験で明らかにする必要がある。

得られた α の値を(8)式に代入して，最小2乗法から σ_ϕ^0 の展開式の係数 A_0, A_1, A_2 が求められた。第7表には，このようにして得られた A_0, A_1, A_2 の値および標準偏差 σ が，各入射角，偏波ごとに示されている。表中には，同時に重相関係数の値も示した。この値と第6表に示した相関係数の値を比較することによって，余弦展開式の3次以上の奇数項がどの程度の割合で存在するかの目安を得ることができよう。第6~10図に示されている曲線は第7表の値を用いて描かれたもの

第7表 (8) 式中の係数 A_0, A_1, A_2 の, 各入射角およびそれぞれの偏波における値, σ は標準偏差を表わし, R^2 は重相関係数 (Multiple Correlation Coefficient) を示す.

(a) 10.00 GHz, HH

Incident Angle	A_0	A_1	A_2	σ	R^2
30°	4.4814×10^{-3}	0.7034×10^{-3}	1.4435×10^{-3}	4.50×10^{-4}	0.930
40°	7.8235×10^{-4}	3.0258×10^{-4}	2.5007×10^{-4}	6.95×10^{-5}	0.971
50°	2.1096×10^{-4}	1.2412×10^{-4}	0.8862×10^{-4}	1.35×10^{-5}	0.992
60°	9.9572×10^{-5}	4.9720×10^{-5}	4.0995×10^{-5}	1.05×10^{-5}	0.973

(b) 10.00 GHz, VV

Incident Angle	A_0	A_1	A_2	σ	R^2
30°	5.4888×10^{-3}	1.4468×10^{-3}	1.5616×10^{-3}	7.90×10^{-4}	0.887
40°	16.4468×10^{-4}	4.0062×10^{-4}	4.8706×10^{-4}	1.28×10^{-4}	0.962
50°	6.7232×10^{-4}	1.1904×10^{-4}	2.6581×10^{-4}	3.84×10^{-5}	0.983
60°	4.7842×10^{-4}	0.5986×10^{-4}	1.9409×10^{-4}	2.71×10^{-5}	0.983

で, 実測値と非常によく一致していることがわかる. 2 次の余弦展開近似式の欠点は, 極小値が Cross wind の位置と一致せず, Down wind 側によった位置に現われることである. このことは形式的には高次の項まで考慮した近似式を用いることによって逃れることが可能であるが, 海面によるマイクロ波の散乱機構が解明されていない現在, 各展開項の係数の物理的な意味は明らかではない. しかし今後, 衛星によって測定された σ^0 の値から風向, 風速を求める際に σ^0 の展開近似式を用いるならば, 何次の展開項まで用いるのが良いか, 各展開係数の妥当な値はいくらか等について研究が行なわれる必要がある (Moore *et al.*, 1978).

Moore and Fung (1979) は, 13.9 GHz ($\lambda=2.2$ cm) のマイクロ波を使用した場合における σ^0 の余弦展開式中の各係数の値を, 風速の冪乗の形,

$$A_i = a_i U^{\gamma_i} \quad (i=0, 1, 2) \quad (10)$$

で与えている. ここで U は風速を表わし, 各係数 a_i, γ_i は入射角, 偏波および電波の波長の関数である. 今回の実験で得られた結果を彼らの与えた各 A_0, A_1 および A_2 に代入して得られた風速の値が, 第8表に示されている. 表中には同時にブイで測定された風速の値も示した. ブイにおける風速の観測は, 海面上約 7.5 m の高さの所で行なわれている. 一般に, 海上風の値としては海面上 19.5 m の高さのものが用いられており, Moore and Fung (1979) もこの値を用いて係数 a_i, γ_i を決定しているので, ブイによる観測値は Cardone

第8表 Moore and Fung (1979) によって測定された値を用いて, 余弦展開近似の各係数値から導びかれた風速値.

(a) 10.00 GHz, HH

Incident Angle	A_0	A_1	A_2	Time
30°	2.26 m/s	1.89 m/s	2.19 m/s	12:32:37
40°	3.12	2.88	2.76	13:00:27
50°	3.62	3.49	3.42	13:12:49

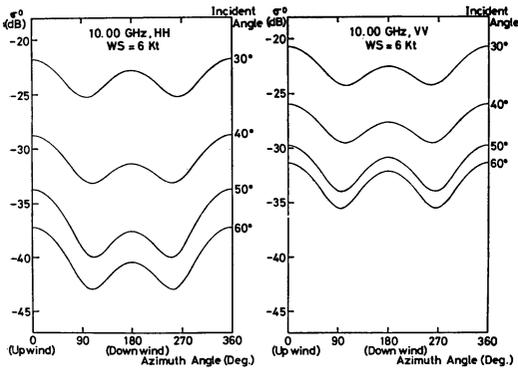
(b) 10.00 GHz, VV

Incident Angle	A_0	A_1	A_2	Time
30°	2.76 m/s	6.55 m/s	2.22 m/s	12:45:51
40°	3.26	3.35	2.45	13:07:49
50°	3.27	2.47	2.86	13:26:40

(c) Data of Buoy

Time	7.5 m high	19.5 m high	V_*
12:12	3.1 m/s	3.4 m/s	11.8 cm/s
15:13	2.6 m/s	2.8 m/s	10.2 cm/s

(1970) の関係式を用いて 19.5 m の高さの風速に換算された. 本来微分後方散乱断面積と直接関係づけられる量は, 海面すれすれの所の風速である摩擦速度 V_* なので, 表中には換算の際に得られた V_* の値も参考のため



第12図 風速 6 kt の場合、X-バンドにおける σ^0 の回帰曲線の入射角変化。左が水平偏波、右が垂直偏波の場合を示す。

め同時に示した。10 GHz と 13.9 GHz の違いにもかかわらず、算出された風速値とパイによって観測されたものとは合理的な一致を示している。ただ垂直偏波、入射角 30° の場合の一次展開項を用いて得られた風速値 6.55 m/s はパイによる観測値と大きくずれているが、この原因としては、入射角 30° の場合に本実験におけるデータのゆらぎが大きく精度が悪いこと（第7図参照）、および Moore and Fung (1979) が与えた関数形が風速の小さなところでは精度が悪いことがあげられる。因に、SEASAT に搭載された海面散乱計の風速の測定精度は ± 2 m/s ($4 \text{ m/s} \leq U \leq 20 \text{ m/s}$) または $\pm 10\%$ ($U \geq 20 \text{ m/s}$) で、風向の測定精度は $\pm 20^\circ$ である。

4.2.2. 入射角特性

第12図には、4.2.1. 節で述べた解析法によって得られた σ^0 の方位角特性が入射角別に示されている。この図で入射角が増大するに従い σ^0 の値は減少するが、その変化の割合は垂直偏波より水平偏波の方が大きい。この変化の傾向をさらに詳細に検討するために、Up, Down および Cross wind のそれぞれの場合のデータを抽出して、各偏波ごとに分類したものが第13図 (a), (b) に示されている。この図に示されるように、微分散乱断面積の入射角変化は、Up, Down, Cross wind のそれぞれの場合で異なり、また、偏波によっても異なる。

入射角 $0 \sim 30^\circ$ の領域の破線は、準鏡面散乱理論 (Quasi Specular Surface Scattering Theory) による近似式 (Valenzuela, 1978),

$$\sigma^0 = \frac{|R(0)|^2}{S^2} \cdot \frac{1}{\cos^4 \theta} \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{S^2}\right)$$

を用いて得られたもので、参考のために示した。 θ は入

射角、 $|R(0)|^2$ は鉛直入射の場合の海水の Fresnel の反射係数で、 S^2 は海面の平均2乗傾斜 (Total mean-square surface slope) を表わす。 $|R(0)|^2 = 0.62$ (Hollinger, 1973) および本実験における鉛直入射のときの σ^0 の値 $+10.65$ dB を用いると、 $S^2 = 0.0534$ となる。この値は、Cox と Munk の実験式 (Chan and Fung, 1977) から予想される値 (~ 0.02) より約 2.5 倍大きい。準鏡面散乱理論が適用されるのは入射角が 20° より小さな領域で、この理論を今回の実験結果に応用することはできない。入射角が 20° 以上の領域では共鳴散乱 (Bragg 散乱) が主要な役割を果し、多くの理論的検討がなされているが、Moore and Fung (1979) は入射角を 12° 付近で2つの領域に分け、それぞれの領域で $\sigma^0 = C \cdot \exp(-\theta/\theta_i)$; $i=1, 2$ という実験式を提案した。この式によれば、共鳴散乱領域では対数で表わした σ^0 と入射角の関係は1本の直線で近似されることになるが、第13図の結果はそのような近似では説明できない。この領域に関しては、これからも実験、理論両面での検討が必要であると考えられる。

Up wind peak の方が Down wind peak より大きい理由についてはすでに述べたが、さらに、第13図 (a) の中でこれらの比を入射角ごとにたどってみると、水平偏波の場合はこの比は入射角が増加するに従って増加するが、垂直偏波の場合は逆に減少している。この傾向は第7図と第10図を比較することによってもわかる。以上に述べた事柄は、海面によるマイクロ波の散乱のメカニズムを解明する手がかりとなろう。

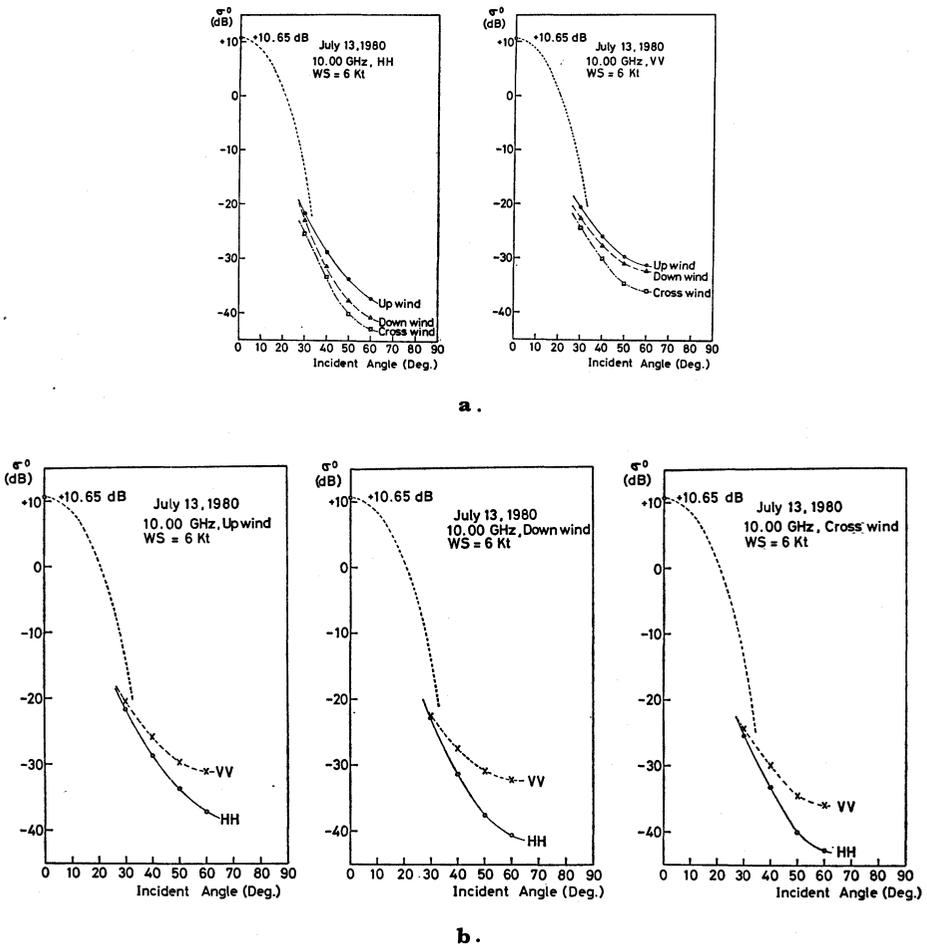
4.2.3. 海面のマイクロ波 (10.00 GHz) 散乱特性のまとめ

[1] 微分後方散乱断面積は方位角とともに周期的に変化する。

[2] Up wind の極大値は Down wind の極大値より大きく、風速が小さい (6 kt) 場合、その比は水平偏波では入射角の増加とともに増加し、垂直偏波では逆に入射角の増加とともに減少する。

[3] 風速、入射角が同じなら、微分後方散乱断面積の方位角分布は垂直偏波の方が水平偏波より大きい。

[4] 微分後方散乱断面積の値は入射角の増加とともに減少するが、その割合は垂直偏波に比べ水平偏波の方が大きい。



第13図 Up wind, Down wind, および Cross wind の場合の σ^0 の入射角依存性。破線は準鏡面散乱理論から導びかれた σ^0 の値を示す。(a) 水平偏波(左)および垂直偏波(右)における比較。(b) Up wind(左), Down wind(中), および Cross wind(右)における比較。

5. 放射計データの解析の概要および結果

5.1. 放射計データの解析

マイクロ波放射計によって測定されるアンテナ温度 (T_A) は、次のように表わされる。 T_B は海面の輝度温度、 G はアンテナ利得である。

$$T_A = \frac{1}{\Omega_A} \int \int_{4\pi} T_B(\theta, \varphi) \cdot G(\hat{\theta}, \hat{\varphi}) d\Omega \quad (11)$$

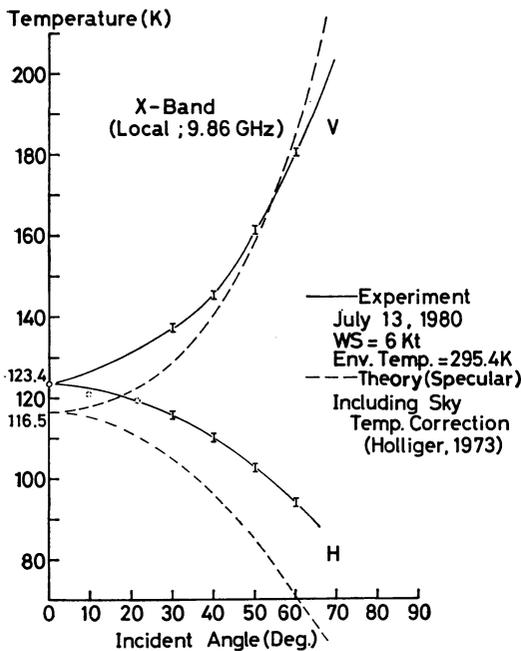
$$\Omega_A = \int \int_{4\pi} G(\hat{\theta}, \hat{\varphi}) d\Omega$$

この式によって示されるように、放射計によって測定された輝度温度は、アンテナビーム照射領域全体にわたってアンテナ利得で平均された輝度温度である。快晴の日

に実験が行なわれたので、アンテナと海面との間の大気による減衰および放射の影響を無視すると、 T_B は次の式によって表わされる (Swift, 1980)。

$$T_B = \epsilon T_0 + (1 - \epsilon) T_{sky} \quad (12)$$

ϵ は海面の放射率 (Emissivity) で、海水の複素誘電率および観測入射角の関数である。この結果として T_B がわずかではあるが方位角にも依存することは、後に述べる。 T_{sky} は宇宙および地球大気からの放射 (天空温度) で、上式の第2項は海面によるこの反射量を表わす。快晴の日の標準的な T_{sky} は入射角 $0 \sim 60^\circ$ でそれぞれ、X-バンドでは $7 \sim 10$ K, Ka-バンドでは $20 \sim 36$ K 程度である (King, 1970)。 T_0 は実際の海面温度で、



第14図 9.86 GHzにおける海面輝度温度の水平偏波および垂直偏波成分の入射角依存性。破線は Holliger (1973) が、平らな海面を仮定して理論的に計算した結果を示す。

敵密には第1項 ϵT_0 が海面の輝度温度であるが、本論文では天空温度の補正を行わず、(12)式で表わされた T_B を海面の輝度温度とした。

アンテナ温度 T_A は、散乱計と共通に使用している導波管系、切換スイッチ等(共通系)を経由して放射計受信機へ導かれる。この共通系による損失(Xバンドで2.95 dB, Kaバンドで5.25 dB)および共通系部分の雑音温度の影響は、以下のような方法で考慮された。即ち、共通系各装置のうち、アンテナ、切換スイッチ等は集中定数系と仮定して、次の式によってその装置の入力温度 T_{in}^i と出力温度 T_{out}^i の関係を導いた(Kraus, 1966)。

$$T_{out}^i = \frac{T_{in}^i}{L_i} + \left(1 - \frac{1}{L_i}\right) T_i \quad (13)$$

L_i , T_i はそれぞれその装置の損失および温度を表わす。また導波管系は分布定数系と仮定して、次の式を使用した(Kraus, 1966)。

$$T_{out}^i = T_{in}^i e^{-\gamma l_j} + (T_{j_f} - T_{i_b}) \times \left\{1 - \frac{1}{\gamma l_j} (1 - e^{-\gamma l_j})\right\} + T_{i_b} (1 - e^{-\gamma l_j}) \quad (14)$$

T_{i_b} と T_{j_f} はそれぞれその導波管の始点と終点の温度を表わし、 l_j はその導波管の長さ、 γ は導波管の単位長さあたりの損失を表わす。共通系の温度は、アンテナ部、送受切替器、散乱計/放射計切替器の3カ所で測定されている。以上の影響の他に、放射計自身の持つ Dicke の比較雑音源からの漏洩および散乱計受信機の雑音の影響も考慮しているが、電圧定在波比(VSWR)で表わされる共通系部分での反射による影響は考慮されなかった。即ち、共通系の VSWR は X-バンド, Ka-バンドとも 1.1 (電力損失で 0.01 dB) 程度で、これによって生ずる誤差は無視できるためである。以上に述べられた各種の影響を考慮し、共通系の各装置に対して順次(13)式あるいは(14)式を用いることによって、アンテナ温度と放射計入力温度の関係が導かれた。

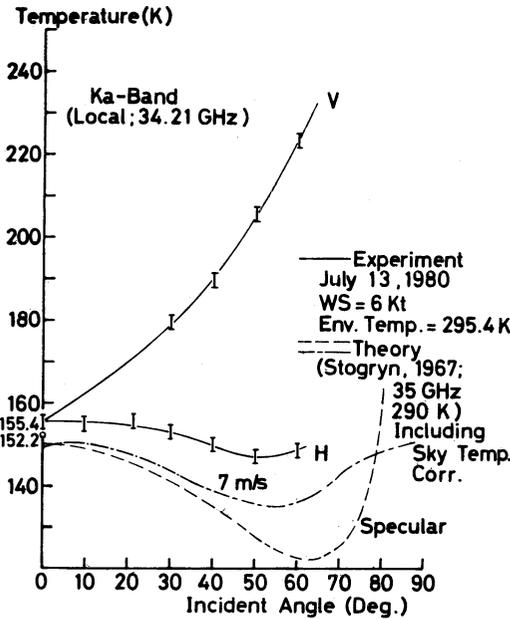
温度較正直線は、機上で得られた約 408 K の高温標準雑音源(Hot Dummy)による較正值と、地上で液体窒素を用いて求めた較正直線の傾きの両者から求められた。放射計受信機入力での温度分解能は2章で述べたように X および Ka-バンド共 0.5 K (標準偏差) であるが、アンテナ温度分解能は、共通系部分の影響によって、本実験時は X-バンドで、1.0 K, Ka-バンドで 1.7 K (いずれも標準偏差) であった。

5.2. 放射計実験の結果

5.2.1. 入射角依存性

第14図には X-バンド放射計による海面の輝度温度の入射角特性が示されている。各温度は、Up, Down, Cross wind のそれぞれの場合の平均値が用いられており、図中の各点に付した縦線は標準偏差を示している。破線は Holliger (1973) によって求められた平らな海面の場合の X-バンド輝度温度を表わす。この場合、海面の温度は 295 K (22°C) で計算が行なわれ、天空温度の影響も考慮されている。入射角 0° の場合、理論値よりも実験値の方が約 7 K 高い値を示した。この図に示されるように、垂直偏波の場合に入射角の増加とともに海面のマイクロ波輝度温度は増加し、逆に、水平偏波の場合に減少する傾向は既存の理論とよく一致する。絶対値における実測値と理論値の違いは、実際の海面では風速が 6 kt あり、完全な平面とは異なることによるためと考えられる。

第15図には、Ka-バンド放射計による、垂直および水平偏波における海面輝度温度の入射角変化が示されている。水平偏波の場合、入射角変化の割合は、X-バンドに比べて小さい。また入射角 50° 付近に極小値が存在

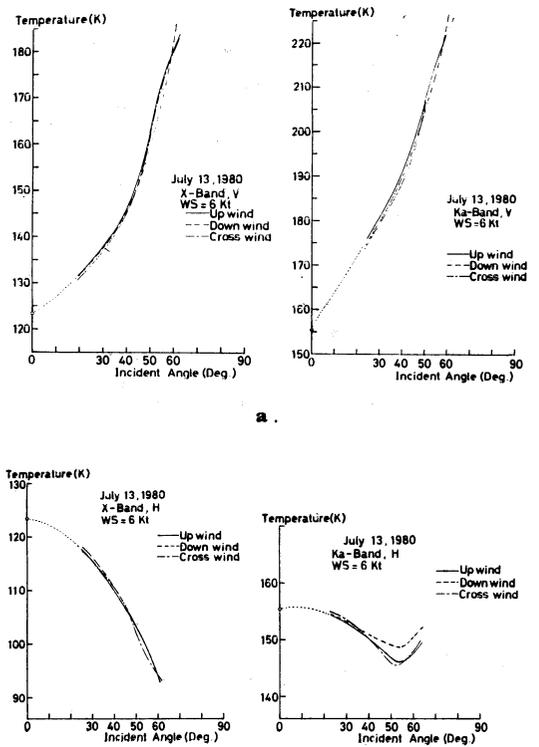


第15図 34.21 GHz における海面輝度温度の水平偏波および垂直偏波成分の入射角依存性。破線は Stogryn (1967) によって理論的に求められた結果を示す。

し、それ以上の入射角では海面輝度温度はかえって増加する傾向にある。一方破線は平らな海面に対して、また一点鎖線は、7 m/s の風速下の海面に対して 35 GHz のマイクロ波の場合に、Stogryn (1967) によって計算された理論曲線である。計算の際海面の温度は 290 K (17°C) と仮定され、天空温度の影響が考慮されている。水平偏波の場合に、実験から得られた入射角に対する変化の傾向は風速 7 m/s の場合の理論曲線と良く一致しているが、絶対値では入射角 10° 付近で 5 K、入射角が大きい所では 10 K 以上の差が認められる。この原因として、Stogryn (1967) は準鏡面散乱理論を用いて計算を行っているが、この理論が入射角の大きな領域では成立しないこと、波長の短いマイクロ波に対しては表面張力波等による海面の微細構造が大きな影響を与えること等が考えられる。

5.2.2. 方位角依存性

第16図 (a), (b) には、垂直および水平偏波における Up, Down, Cross wind の場合の海面輝度温度の平均的な入射角特性が示されている。これらの図から、微分後方散乱断面積の場合と異なり、海面の輝度温度は顕

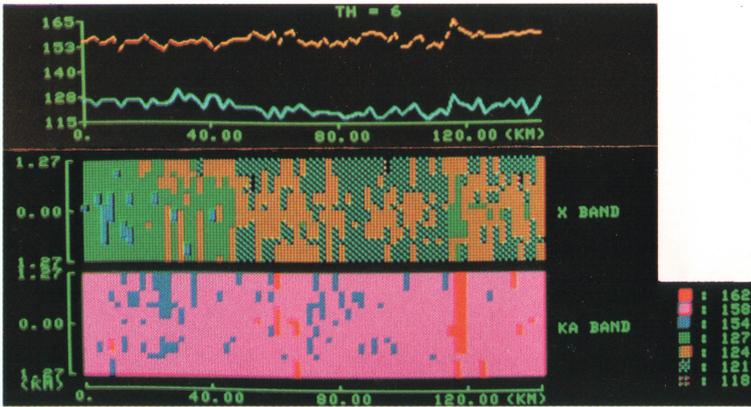


第16図 X-バンドおよび Ka-バンドにおける、Up wind, Down wind, Cross wind の場合の平均的な入射角依存性。(a) 垂直偏波成分。(b) 水平偏波成分。

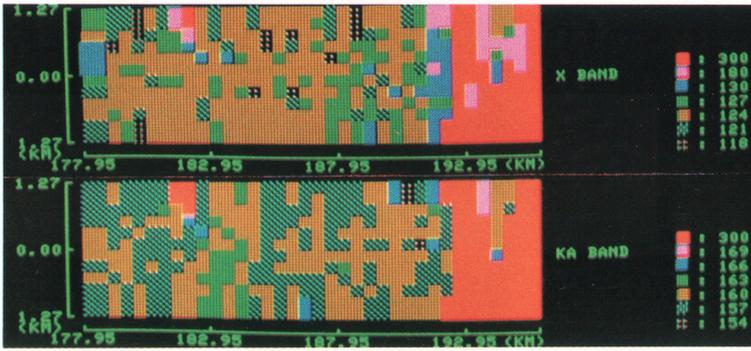
著な方位角依存性を示さないことがわかる。ただし、入射角の大きな所ではそれぞれの曲線にわずかながら差が生じており、また入射角によって Up, Down, Cross wind のそれぞれの場合の輝度温度曲線の相対的な関係が変化している。しかし、これらの曲線の差は測定精度と同程度であり、海面のマイクロ波輝度温度のより詳細な方位角特性を得るためには、さらに分解能の高い実験を行なわなければならない。

5.2.3. 海面と地表面のマイクロ波輝度温度分布図

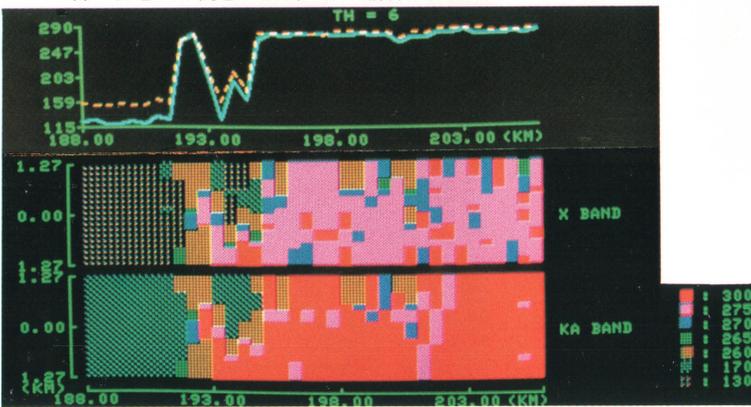
写真 1 には、マイクロ波放射計によって得られた海面、および、地表面の輝度温度分布図が示されている。観測は高度約 2,400 m で行なわれ、水平偏波が使用された。アンテナは進行方向に直角な面内で走査され、地表面分解能は走査端で 420 × 620 m である。示された図は、飛行機の姿勢ゆらぎが補正された後のもので、カラー表示の数値は温度の上限を表わしている。



(a) 日本海中央部の、X-バンド(上)およびKa-バンド(下)における輝度温度分布図。図の上の曲線は、同じ領域の入射角 θ 付近の輝度温度変化を示す。

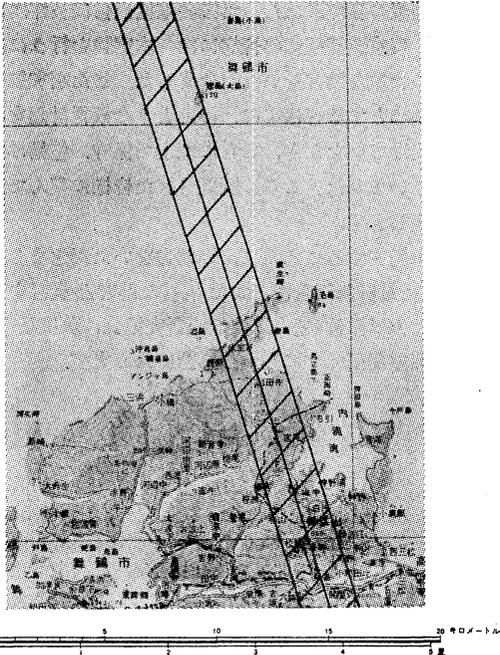


(b) 若狭湾沿岸域の、X-バンド(上)およびKa-バンド(下)における輝度温度分布図。同じ領域の地図が第17図に示してある。地図中の冠島が図中左上部の赤色又は桃色の領域として識別できる。



(c) 舞鶴市付近における海岸部のX-バンド(上)およびKa-バンド(下)における輝度温度分布図。図の上の曲線は、同じ領域の入射角 θ 付近の輝度温度変化を示す。

写真1 海面および陸のマイクロ波輝度温度モザイク映像。図中の色表示段階を示す数値は温度の上限を表わす。



第17図 舞鶴市付近における若狭湾沿岸の地図。

写真1(a)は日本海中央部付近の輝度温度分布図で、上に示された図は入射角 0° 付近の輝度温度変化を追跡したものである。黄色がKa-バンド、青色がX-バンドの輝度温度を表わす。図中で0 kmの点は北緯 $37^\circ 15'$ 、東経 $134^\circ 50'$ 付近で、飛行機は速度約290 km/hで 163° の方向へ飛んでいる。X-バンドの表示面、および、温度変化図に着目すると、50 km付近の所で輝度温度が変化するのが見られる。50 kmより前では127~124 Kの温度(緑色)が基調であるが、50 kmより後では124 K以下の温度(黄色、紺色)が基調となっている。Sea Truthデータがないので断定はできないが、対馬海流の縁をとらえたのではないかと推測される。なお50 km付近の位置は北緯 $36^\circ 48'$ 、東経 $135^\circ 00'$ 付近である。Ka-バンドの場合は、X-バンドのように温度が途中で変化する傾向は見られず、逆に岸に近づくに従って上昇する傾向さえある。海面のマイクロ波輝度温度は、観測する周波数が高くなるに従って、実際の温度よりも海面の状態への依存度が大きくなる(Wilheit, 1979)。このことから、Ka-バンド輝度温度が沿岸に近い方で高いのは、沿岸域の風速が沖合より大きいことによるのではないかと推測される。しかし、はっきりしたことは不明であり、今後、詳細なSea Truthを含むこの種の実験を

繰り返して行く必要がある。

写真1(b)は若狭湾沿岸部の輝度温度分布図で、X-バンドとKa-バンドを別の表示段階で示してある。この付近の地形図が第17図に示されており、地図中の冠島がマイクロ波輝度温度分布図でも確認できる。右端の温度が高い部分は陸で、成生岬付近である。

写真1(c)は海岸部の輝度温度分布図で、地図に示されている半島や入江の形が良く見とれる。上に示されているのは入射角 0° 付近での輝度温度変化の様子で、急激に温度が上昇しているのは海から陸に進入した場所で、その後の温度の降下は入江を横切っていることを示している。

5.2.4. 海面のマイクロ波(X-バンドおよびKa-バンド)放射特性のまとめ

[1] 海面のマイクロ波輝度温度は、垂直偏波では入射角とともに増加し、水平偏波では減少する。減少の割合はX-バンドの方がKa-バンドに比べて大きい。

[2] Ka-バンド水平偏波の輝度温度では、入射角 50° 付近に極小値が確認され、それ以上の入射角では輝度温度は入射角とともに増加している。この事実は理論とも良く符合している。

[3] 海面のマイクロ波輝度温度の方位角依存性は極めて小さいが、入射角の大きな所ではわずかに認められる。

6. おわりに

実験を行なった当日の風速は ~ 6 ktで、この種の実験を行うには条件が良くなかったが、この装置によって海面の微分後方散乱断面積および輝度温度の測定が可能であることが確認された。これらのデータは、当研究室が計画している航空機搭載合成開口レーダ(SAR)の基礎資料として有用なものであり、またマイクロ波による海洋汚染の監視を行なう場合にも不可欠なもので、今後も実験を継続して行きたいと考えている。

マイクロ波微分後方散乱断面積と風ベクトルとの相関については本実験からも明らかであるが、衛星軌道上から観測された σ^0 の値から、逆に、海上風の風向・風速を求める問題に関しては、未だ解決されていない点が多い(Moore and Fung, 1979)。特に降雨下における風向・風速の決定に関する問題は未解決のまま残されている。降雨が σ^0 の測定に及ぼす影響としては、1) 降雨によるマイクロ波の減衰、2) 降雨からの散乱エコー、3) 降雨が海面を叩く効果、などが考えられる。1) に関す

る補正を行なうためには、伝搬路上の総雨粒量を見積る必要がある。また本装置による航空機からの降雨観測データは現在解析中であるが、それによると、2)に関する補正を行なうためには伝搬路上の雨粒量だけではなく、降雨に伴って現われるブライトバンド(上空の気温 0°C の層よりはわずかに下に現われる、表面が融解した雪あるいは氷晶よりなる層で、マイクロ波を非常に強く反射する)の影響も無視できない。3)の影響に関してはこれからの研究に待たねばならないが、Moore *et al.* (1979)は、風速の弱い場合だけでなく、強い場合にも大きな影響を受けることを報告している。マイクロ波によって海上風の観測を行なう場合、これらの事柄は避けて通ることができない問題であり、これらに関する実験も行なわれねばならない。

今後の実験の際に考慮されなければならない点として、次のものがあげられる。

1) Sea Truth を的確に行なうこと。このためにブイ以外の方法、例えば船による同時観測などを検討する必要がある。

2) 飛行機の位置、姿勢を正確に測定し記録すること。本実験では位置の測定にロランCが使用されたが、3カ所から到来する電波から自分の位置を決定する方法は場所によっては使用できず、また受信状況の悪化によって大きな誤差を生じたり、ロランC送信局自身が故障あるいは保守点検のために送信を停止することがあるので注意を要する。姿勢の測定には一般にジャイロが用いられるが、本実験ではバンク角の大きな旋回を行なった場合に方位ジャイロ装置が正常に動作しない現象がみられた。今後、A/D変換、追従速度等いくつかの点を改良して実験に対処していく必要があると考えている。

これらのことは海面観測実験に限らず、リモートセンシングを行なう場合には常にわきまえなければならないことであるが、技術的にも経済的にも困難な面が多い。特に、従来の気象測器の測定量が特定点における分単位の平均値であるのに比べ、散乱計(特に衛星搭載散乱計)による測定量は広い領域の平均値で、さらにはほぼ瞬時値であり、これらの時間平均値と空間平均値をどのように結びつけるかも問題の1つであろう。

謝辞

気象衛星センターの皆様からは、気象データを提供していただき、その取り扱い方について御助言をいただき

ました。装置の製作にあたった三菱電機通信機製作所、明星電気、東京芝浦電気の皆様には、本実験を行うにあたり多くの貴重な助言をいただきました。また昭和航空の機長を始めとする皆様には、めんどろな飛行計画を心よく引き受けていただき、さらに地上で保守、整備に励んでくださいました。ここに関係された皆様に謹んで感謝の意を表します。

本論文を発表するにあたり、御助力をいただきました桜沢 晃 衛星計測部長に、また有益な助言と批評を賜りました古浜洋治 超高周波伝搬研究室長、藤田正晴 衛星計測部主任研究官に心から感謝いたします。

文献

- Cardone, V.J., 1969: Specification of the Wind Distribution in the Marine Boundary Layer for Wave Forecasting, New York Univ. Geophys. Sci. Lab. Rep. TR 69-1, NTIS No. AD 702490.
- Chan, H.L. and A.K. Fung, 1977: A Theory of Sea Scatter at Large Incident Angle, *J. Geophys. Res.*, 82(24), 3439-3444.
- Grant, C.R. and B.S. Yaplee, 1957: Back Scattering from Water and Land at Centimeter and Millimeter Wavelengths, *Proc. IRE*, 45, 976-982.
- Hollinger, J.P., 1973: Microwave Properties of a Calm Sea, *NRL Report No. 7110-2*.
- Inomata, H., K. Okamoto, T. Ojima, H. Masuko, S. Yoshikado, and N. Fugono, 1981: Remote Sensing of Rainfall Rates Using Airborne Microwave Rain-Scatterometer/Radiometer, *Proc. 14th Int. Symp. Rem. Sen. Env.*, to be published.
- Ishimaru, A., 1978: Wave Propagation and Scattering in Random Media, Chapter 21, Academic Press.
- Jones, W.L., L.C. Schroeder, and J.L. Mitchell, 1977: Aircraft Measurements of the Microwave Scattering of the Ocean, *IEEE, AP-25(1)*, 52-61.
- King, D.D., 1970: Passive Detection, Chapter 39 in *Radar Handbook* (M.I. Skolnik ed.), McGraw-Hill Book Co.
- Kraus, J.D., 1966: *Radio Astronomy*, McGraw-Hill Book Co., 88-97.
- Krishen, K., 1971: Correlation of Radar Backscattering Cross Sections with Ocean Wave Height and Wind Velocity, *J. Geophys. Res.*, 76(27), 6528-6539.
- Moore, R.K., ed., 1975: *Microwave Remote Sensing*, Chapter 9 in *Manual of Remote*

- Sensing (R.G. Reeves ed.), American Society of Photogrammetry.
- Moore, R.K. and A.K. Fung, 1979: Radar Determination of Winds at Sea, Proc. IEEE, 67(11), 1504-1521.
- Moore, R.K., A.K. Fung, G.J. Dome, and I.J. Birrer, 1978: Estimates of Oceanic Surface Wind Speed and Direction Using Orthogonal Beam Scatterometer Measurements and Comparison of Recent Sea Scattering Theories, NASA Contractor Report 158908, NTIS No. N78-30474.
- Moore, R.K., Y.S. Yu, A.K. Fung, D. Kaneko, G.J. Dome, and R.E. Werp, 1979: Preliminary Study of Rain Effects on Radar Scattering from Water Surface, IEEE, OE-4(1), 31-32.
- Okamoto, K., T. Ojima, H. Masuko, S. Yoshikado, H. Inomata, and N. Fugono, 1980: Airborne Microwave Sensors for Remote Sensing of Precipitation, Preprint of IAF' 80, B 71.
- Skolnik, M.I., 1970: Sea Echo, Chapter 26 in Radar Handbook (Skolnik ed.), McGraw-Hill.
- Stogryn, A., 1967: The Apparent Temperature of the Sea at Microwave Frequencies, IEEE, AP-15(2), 278-286.
- Swift, C.T., 1980: Passive Microwave Remote Sensing of the Ocean—A Review, Boundary-Layer Met., 18(1), 25-54.
- Tiuri, M.E., 1966: Radio-Telescope Receivers, Chapter 7 in Radio Astronomy (J.D. Kraus ed.), McGraw-Hill Book Co.
- Valenzuela, G.R., 1978: Theories for the Interaction of Electromagnetic and Ocean Waves—A Review, Boundary-Layer Met., 13(1-4), 61-85.
- Wilheit, Jr., T.T., 1978: A Review of Application of Microwave Radiometry to Oceanography, Boundary-Layer Met., 13(1-4), 277-293.
- , 1979: A Model for the Microwave Emissivity of the Ocean's Surface as a Function of Wind Speed, IEEE, GE-17(4), 244-249.
- Walsh, D., 1976: Remote Sensing in Oceanography, Chapter 17 in Remote Sensing of Environment (J. Lintz, Jr. and D.S. Simonett ed.), Addison-Wesley.
- Wentz, F.J., 1978: Estimation of the Sea Surface's Two-scale Backscatter Parameters, NASA Contractor Report 145255, NTIS No. N78-20946.

(750頁より続く)

nce か, dissipation かあるいは nonlinearity かを問題にすることは, 収支的観点からすれば有効とは思えない. Nonlinearity を別とすれば, Rayleigh damping による dissipation と wave transience は物事の表裏の関係にすぎない.

セミナーでは Rayleigh damping ではなく, viscosity

との関連が問題にされた. Wave transience と viscosity との関係は必ずしも明確ではない. Hazel によれば, 粘性臨界層の吸収特性は非粘性の極限の場合と全く同じになるといっている. 多分これは本当だろうが, 粘性臨界層の4個の内部粘性解を解析的に求められない限り, 疑問は残り続けるであろう.