マイクロ波散乱計による海洋観測

—その 1 実験水槽におけるマイクロ波散乱について—

正員 林 昌奎* 学生員 小林 豪毅**
 深井 英五** 岡田 和三*

Sea Surface Measurement by Using Microwave Scatterometer
 — Part 1 Study on the Microwave Scattering in Experimental Tank —

by Chang kyu Rheem, *Member* Hidetaka Kobayashi, *Student Member*
 Eigo Fukai Kazumi Okada

Summary

The microwave scatterometer is one of the useful remote sensors for the sea surface measurement. The basic principle of the measurement is a scattering at sea surface. Therefore, it is necessary to understand the characteristic of the microwave scattering at sea surface in order to measure the sea surface condition. The purpose of this study is to investigate characteristics of microwave scattering under the various conditions in the experimental tank and also the consideration of measurement technique and data analysis method. Bragg scattering model is applied to the experimental condition, and the tendency in the measuring results of scattering strength is explained in this model. For the quantitative evaluation, however, it is necessary to more accurately grasp water surface profiles. The Doppler shift of scattering microwave has related to the speed of the scatterer.

1. はじめに

海面に電磁波を照射すると、電磁波は海面の状態に応じていろいろな方向に反射される。この海面における電磁波の散乱現象は sea clutter とよばれるノイズとして古くから知られていたが、Crombie(1955)¹⁾の研究以後海洋のリモートセンシングに応用されるようになった。現在では海洋観測法の一分野として確立され、すでに海洋短波レーダのように実用段階に入っているものもある²⁾。電磁波を利用した海洋観測は広域的な情報を大まかに捉えるという特徴を有する。これは空間の 1 点におけるデータを正確に収集する従来の計測機器とは対照的で

あり、これまで観測が困難だった海域の情報が得られる可能性がある。

なかでも近年注目されているのがマイクロ波とよばれる波長約 1cm～1m の電磁波を用いたマイクロ波散乱計である。マイクロ波は送・受信用のアンテナが小さく、かつ雲を透過する特徴があるため人工衛星からの観測に適している。送信アンテナから照射されたマイクロ波は海面の形状に反応して散乱される。マイクロ波散乱計はこの散乱されたマイクロ波を受信アンテナで捉え、マイクロ波の散乱状況から海面の状態を推定することを基本的な原理とする。したがって、マイクロ波散乱計により高精度の観測を行うには、まず海面における電磁波の散乱特性を理解することが不可欠である^{3), 4)}。しかし、不規則な水面での散乱現象は複雑で、特に風、波浪、潮流の複合的な作用のもとで形成された海面に対してはほとんどわかっていないのが現状である。

* 東京大学生産技術研究所

** 東京大学大学院工学系研究科

筆者らはマイクロ波散乱計の出力から海面情報を引き出すための解析手法の確立を最終的な目標とした研究を進めており、その第一段階として風路付造波回流水槽においてマイクロ波散乱実験を行った。この水槽は設定した風、波、流れを同時に発生することが可能であり、実際の海面を模した複雑な水面を再現することができる。既知の水面形状に対するマイクロ波散乱計の計測結果を詳細に検討し、散乱に寄与する要因を解明することが実験の目的である。

本論文はマイクロ波散乱実験についての第一報として、マイクロ波散乱計の特性や実験、解析方法など基本的な事項についてやや詳しく述べる。また、既存の電磁波散乱モデルによる計算法を説明し、実験条件に対する適用を試みる。海洋観測に対するマイクロ波散乱計の典型的な応用は海上風の測定であるため、今回は風波を対象に検討を行う。

2. マイクロ波散乱計の特性

2.1 マイクロ波散乱計の仕様と出力

マイクロ波は人間の五感で感知することができないため、その散乱状況は計測装置を通してしか知ることができない。しかも、受信アンテナで捉えられるのは散乱されたマイクロ波の一部であり、その情報は変換された電気信号として出力される。計測結果を正確に理解するには、まず使用する装置の性能を十分に把握する必要がある。よって、ここではマイクロ波散乱計の仕様と出力について説明する。

本研究で使用するマイクロ波散乱計(明星電気製 NUS-7)は送信装置および受信装置からなる。この装置は中のユニットとアンテナを付け替えることにより、Xバンド(9.6GHz)、Cバンド(5.4GHz)およびLバンド(1.2GHz)のマイクロ波を送・受信することができる。送信出力はすべて 10mW で、本体とアンテナをつなぐ給電線の損失は 2.0dB である。それぞれのアンテナの仕様を Table1 に、アンテナパターンを Fig.1 に示す。なお、送信用と受信用のアンテナは同型である。

マイクロ波散乱計の出力は基本的には受信アンテナが受けとった電力の時間変化のみである。しかし、マイクロ波は非常に高周波数の振動であるため、その変化をそのまま検出することは難しい。そのため、一般には途中で電氣的に演算が行われ、高周波数成分の情報を含むゆっくりとした信号に変換される。Fig.2 に示したのはXバンドの場合の信号処理であり、受信装置からは4つの信号が出力される。

受信方式としてはスーパーヘテロダイン方式を用いており、受信された 9.6GHz 帯の信号は 9.45GHz の信

号とかけ合わされ、150MHz 帯の中間周波数信号に変換される。この中間周波数信号のスペクトルは中心周波数がシフトしただけで、元の受信信号のスペクトルと相似である。この中間周波数信号にさらに 150MHz の信号をかけ合わせて位相に関する情報を含む信号に変換された出力が DOPPLER OUT、中間周波数信号の包絡線を検出した出力が IF DET-1 である。すなわち、IF DET-1 と DOPPLER OUT からそれぞれ受信された電力の大きさと瞬時周波数の変化がわかる。LEVEL DATA-1、DOPPLER OUT F/V はそれぞれ IF DET-1、DOPPLER OUT を平均化した信号と考えてよい。C、Lバンドの場合も局部発振器からの信号の周波数が違うだけで同様の操作が行われる。本論文では受信電力の大きさについては LEVEL DATA-1、ドップラーシフトについては DOPPLER OUT F/V の出力を平均した値で結果を示す。

Table1 Specification of antennas

	Type	Gain	Beamwidth (TE wave)	Beamwidth (TM wave)
X-band	Conical horn	20dBi	13.7°	16.6°
C-band	Pyramidal horn	18dBi	19°	22°
L-band	Microstrip array	13dBi	36°	36°

Fig.1 Antenna patterns

Fig.2 Block diagram for receiver (X-band)

2.2 アンテナ間隔の検討

能動型マイクロ波センサのほとんどがマイクロ波の後方散乱を利用したものであり、送・受信のアンテナはほぼ同じ位置に設置される。このとき、送信アンテナのサイドにわずかに洩れたマイクロ波を直接受信アンテナが拾ってしまうことが考えられる。このようなアンテナ間の干渉は測定の際にノイズとなるため、できるだけ小さくすることが望ましい。そこで、マイクロ波の後方散乱を測定するときの適切なアンテナ間隔を調べるために野外実験を行った。この実験では、送信アンテナから直接伝わるマイクロ波だけを受信するように、送・受信のアンテナを散乱体のない上空に向かって設置して計測を行った。Cバンド垂直偏波の測定結果を Fig.3 に示す。

アンテナ間の干渉は平均で -73dBm ($1 \times 10^{-7.3}\text{mW}$) と小さい値であった。また、アンテナ間の距離が広がるほど干渉が小さくなることが予想されたが、Fig.3 をみると受信電力はほぼマイクロ波の波長で変動していることがわかる。Xバンドのについても同じ実験を行ったところ、ややばらつくがやはり同様の変動が認められた。この結果をもとにマイクロ波散乱実験のときのアンテナ中心間距離は Xバンド、Cバンドでそれぞれ 27.5cm 、 30.2cm と定めた。

2.3 レーダ方程式

散乱体の散乱特性は一般に散乱断面積を用いて表される。これは基本的には散乱体に入射した電力密度がある方向にどの程度の強さで散乱されるかを表すパラメータで、散乱方向の関数である。散乱断面積は散乱方向の電力密度で等方的に広がると考えたときの電力(W)と入射電力密度(W/m^2)の比で定義され、面積(m^2)の次元をもつ。特に入射と散乱の方向が同じで向きが逆の場合には後方散乱断面積あるいはレーダ断面積とよばれる。後方散乱断面積 σ は通常送信電力 P_t と受信電力 P_r から次のレーダ方程式を用いて求められる⁵⁾。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (1)$$

ここで、 λ はマイクロ波の波長(Xバンド: 3.1cm , Cバンド: 5.6cm , Lバンド: 25cm)、 r はアンテナから散乱体までの距離、 G はアンテナのゲインで送・受信のアンテナで等しいとしている。

式(1)は単一散乱体に対する式であるので、三面体コーナリフレクタを用いた基礎実験を試みた。三面体コーナリフレクタはマイクロ波散乱計の検定用の散乱体であり、散乱断面積の最大値が 1m^2 になるように設計されて

いる。実験は送・受信アンテナの中心線上に正対するようにコーナリフレクタを設置して行った。地上からアンテナおよびコーナリフレクタの中心までの高さは 136cm 、送・受信アンテナのアンテナ間隔は前節で定めた距離としている。Cバンド垂直偏波に対してアンテナからコーナリフレクタまでの距離を変化させた結果を Fig.4 に示す。図中の実線は式(1)で $\sigma = 1\text{m}^2$ としたときの計算結果であるが、これはコーナリフレクタが送信アンテナからの最大の電力密度を受信アンテナの真正面に完全に反射する場合の値に相当する。また、受信アンテナは垂直偏波を受信するように設置されているので、それ以外の偏波面のマイクロ波はほとんど受信することができない。計算結果が実験結果に比べてかなり大きいのは三面体コーナリフレクタで反射される際に、一部のマイクロ波の偏波面が変化するためであると考えられる。

水面のように散乱体が平面状に広がっている場合には、単位面積あたりの散乱断面積で定義された散乱係数 σ^0 で散乱特性を表す。微小面積 ΔA_i 内で G_i 、 r_i がほぼ一定であるとする、レーダ方程式は次式となる⁵⁾。

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^3} \sum_{i=1}^N \frac{G_i^2 \sigma^0 \Delta A_i}{r_i^4} \quad (2)$$

Fig.3 Interference between antennas (C-band, VV)

Fig.4 Received power against the distance to a single scatterer (C-band, VV)

3. 電磁波散乱理論

3.1 鏡面散乱モデル

鏡面散乱モデルは電磁波の散乱を幾何光学的に近似したモデルある。水面を微小な面の集合として扱い、電磁波の入射方向に対して垂直な面のみが後方散乱に寄与すると考える。水面勾配が等方的で、その同時確率密度関数が Gauss 分布で表されると仮定すると、散乱係数は次式で与えられる。

$$\sigma^0 = \frac{|\Gamma(0)|^2}{s^2} \frac{1}{\cos^4 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{s^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 θ は入射角、 $\Gamma(0)$ は入射角 0° に対する Fresnel の反射係数、 s は水面勾配の分散である。このモデルでは散乱係数は入射角と水面勾配で決まり、電磁波の波長や偏波面によって変化しない。一般に鏡面散乱モデルは入射角が小さい場合に適用度が高いといわれている。

3.2 Bragg 散乱モデル

Bragg 散乱モデルでは水面を構成する成分波のうち、次の Bragg 散乱条件を満たす波数成分だけが後方散乱に寄与する。

$$k_w = 2k \sin \theta \quad (4)$$

ここで、 k 、 k_w はそれぞれマイクロ波、水面の波数である。また、垂直偏波に対する散乱係数の第1次近似は次式で表される。

$$\sigma^0 = 16\pi k^4 \cos^4 \theta |g_{ww}|^2 \Psi(2k \sin \theta, 0) \quad (5)$$

ここで、 $\Psi(k_{wx}, k_{wy})$ は水面の2次元波数スペクトルであり、電磁波の入射面は $x-z$ 平面としている。垂直偏波に対する係数 g_{ww} は次式で与えられる。

$$g_{ww} = \frac{(\epsilon_r - 1) \left[\epsilon_r (1 - \sin^2 \theta) + \sin^2 \theta \right]}{\left[\epsilon_r \cos \theta + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2} \right]^2} \quad (6)$$

ここで、 ϵ_r は水の比誘電率である。 ϵ_r は本来は Debye の式等で算定する必要があるが、ここでは簡単のため水を完全導体と仮定し、 $\epsilon_r = 80$ として計算している。海面における電磁波散乱機構は Bragg 散乱モデルで説明されることが多いため、本論文では Bragg 散乱モデルの適用性を検討する。

4. マイクロ波散乱実験

4.1 実験装置および実験方法

マイクロ波散乱実験は、東京大学生産技術研究所千葉実験場内の風路付造波回流水槽(水路長 20m、幅 1.75m、高さ 1.2m)を使って行った。実験装置の概略を Fig.5 に示す。送・受信アンテナは照射角度を変えられる架台に

Fig.5 Schematic picture of experimental apparatus

Fig.6 Microwave absorber

固定し、水槽の台車に取り付けた。また、架台は上下方向に移動可能であるため、照射範囲の中心点およびアンテナまでの距離を変えずに入射角を変化させることができる。中心点からアンテナまでの距離は 350cm であるが、入射角が 0° の場合は水面以外の散乱を避けるために約半分の 170cm としている。なお、水深はすべて 100cm である。

室内におけるマイクロ波散乱実験では水面で散乱されたマイクロ波が壁や天井で再反射されることが考えられる。これを受信アンテナが拾うとノイズになるため、風路の一部を Fig.6 に示すような電磁波吸収板で構成した。この風路内はマイクロ波吸収体(E&C エンジニアリング製 ECOSORB CV)で覆ってあるため、一種の暗室のようになり、前方散乱されたマイクロ波はほとんど吸収されと考えられる。

本論文では、特に風波を対象としているため風波の実験ケースについて説明する。マイクロ波散乱計による計測は後述する基準風速 U 、に対して 4.0, 6.3, 8.6, 10.9, 13.7, 14.5m/s の 6 ケースに対して行っており、入射角は $0^\circ \sim 55^\circ$ の範囲で変化させている。なお、L バンドはビーム幅が広く、水槽からはみ出すおそれがあるので測定を行っていない。マイクロ波散乱計からの出力である 4 つの信号はサンプリング周波数 100Hz で AD 変換し、各ケースに対して 60 秒間計測した。

マイクロ波散乱実験とは別に、水面の状態を調べるために風速、流速および水位の測定を行った。風速についてはピトー管の差圧をゲッチング型マノメータで読み取って求めた。照射範囲の中心点(吹送距離 710cm)において風速分布を測定したところ、対数分布によくあて

はまった。ここでは照射範囲の中心点での水面上 30cm における測定値を基準風速として結果を示すことにする。対数分布から現地でよく用いられる水面上 10m の風速に換算すると、基準風速 4.0, 6.3, 8.6, 10.9, 13.7m/s に対して、それぞれ、6.3, 8.3, 12.4, 17.3, 22.6m/s であった。ただし、基準風速 14.5m/s のケースは水面付近の風速を測定することが難しかったので求めている。

流速の測定には電磁流速計を使用し、特に風波の場合については照射範囲の中心点で吹送流の流速分布を調べた。これも対数分布でよく表せたので、外挿して表面流速を求めた。

また、風波のスペクトルおよび成分波の波速を求めるために、2 台の容量式波高計を 4cm 間隔で設置して水位を測定した。なお、参考のためにマイクロ波散乱実験においても照射範囲外である水槽の内壁に流速計と波高計を取り付けて同時計測を行った。

4.2 水面条件

マイクロ波は水面形状に反応して散乱される。よって、散乱特性を調べるには、水面形状を既知として実験結果を検討する必要がある。前述の電磁波散乱理論で散乱係数を計算する場合にも、鏡面散乱モデル、Bragg 散乱モデルに対して、それぞれ、水面勾配の分散、2 次元波数スペクトルという水面形状に関する情報が必要になる。しかし、得られる測定データは固定点における水位の時間変化のみであることが多く、その場合には時間波形から水面形状を推定するしかない。一般には周波数スペクトルを波数スペクトル $S(k_w)$ に変換して空間波形を求める。ただし、風波の場合には主に吹送流の影響で微小振幅波理論の分散関係式が成り立たないので注意が必要である³⁾。Fig.7 は風速 8.6m/s のときの風波の周波数スペクトルおよびクロススペクトル法を用いて計算した周波数と波数の関係である。周波数スペクトルおよびクロススペクトルは 4096 個のデータを FFT 法で解析し、滑らかさを重視して 16 個で平滑化した。クロススペクトル法は 2 台の波高計の記録から各成分波の位相差を計算して波速を測定する方法である。今回の計測では特に高周波領域で波速が極端に大きい結果となり、精度の面で疑問がもたれる。やむを得ず微小振幅波理論の分散関係式を用いて、周波数スペクトルを波数スペクトルに変換することにした。

Bragg 散乱モデルで散乱係数を求めるためには、2 次元波数スペクトルが必要であるが、ここでは 2 次元波数スペクトルの等方性を仮定し、次式で計算した。

$$\Psi(k_{\text{sc}}, 0) = \frac{S(k_w)}{2\pi k_w} \quad (7)$$

Fig.7 Frequency spectrum and dispersion relation

しかし、実際には方位角により風波の散乱係数が変化し、それにより風向きが特定できることが報告されている³⁾。前述の分散関係式の問題も含めて、風波の平面的な水面形状を詳しく知るには別の方法が必要である。

なお、水面勾配については、波数スペクトルから水面勾配のスペクトルが計算され、これを積分することにより水面勾配の分散を求めることができる。

4.3 マイクロ波散乱特性

まず、受信電力すなわち散乱強度についての結果を示す。Fig.8 は X バンド垂直偏波の場合の風速による受信電力の変化を示したものである。実験結果は 60 秒間の LEVEL-1 DATA の出力を平均した値をプロットしている。計算結果は波数スペクトルから Bragg 散乱モデルで散乱係数を求め、式(2)で受信電力を計算している。このとき、微小要素はマイクロ波の波長の長さの正方形とし、ビーム幅の範囲で数値積分した。ただし、散乱係数は照射範囲内で一定としている。入射角 $20 \sim 70^\circ$ の範囲では、水面におけるマイクロ波の散乱特性は Bragg 散乱モデルでよく説明できることが知られている。すなわち、風速とともに水面の粗度が増し、Bragg 散乱条件を満たす成分波が発達するために散乱係数が増加する。計算結果については、Bragg 散乱条件を満たす波が X バンドの入射角 $20 \sim 70^\circ$ に対して、 $6.0 \sim 1.7\text{cm}$ と非常に短い波であり、このような高周波数成分の大きさの算定精度に対する懸念がある。定量的な評価についてはまだ問題があるといわざるを得ないが、計算結果と実験結果は同様の傾向が認められる。Fig.9 は風速 8.6m/s の場合の入射角による受信信号の変化である。これについても Bragg 散乱モデルでは説明できることがわかる。Bragg 散乱モデルによる計算結果はその絶対値はともかく、定性的にはほとんどのケースについて実験結果と同様の傾向を示した。

次にマイクロ波散乱計のもうひとつの出力であるドップラー信号についての結果を示す。Fig.10 は入射角

45° のケースについて、風速と C バンド垂直偏波のドップラーシフトから計算した水平方向の速度の関係を示したものである。ドップラー信号についても 60 秒間の DOPPLER OUT F/V の出力の平均値を用いた。図中には表面流速および表面流速と代表的な波速の和を線で示している。Fig.10 をみるとドップラー信号の平均値は後方散乱体の移動速度を表していると推定される。別に水槽に流れだけを発生させた場合についても計測も行ったが、ドップラー信号はほとんど検出されなかった。これは水面に後方散乱体が存在しないためであると考えられる。

Fig.8 Dependence of the backscattered intensity on the reference wind speed(X-band, VV)

Fig.9 Dependence of the backscattered intensity on the incident angle (X-band, VV)

Fig.10 Horizontal velocity obtained from Doppler shift (C-band, VV)

5. むすび

水面におけるマイクロ波散乱特性を理解するために、実験水槽においてマイクロ波散乱計による計測を行った。本論文では、特に風のみが存在する場合の結果を示したが、散乱強度についてはその傾向を Bragg 散乱モデルでは説明することができた。ただし、定量的な検討を行うためには、散乱に寄与するマイクロ波の波長と同オーダーの平面的な水面形状を正確に把握する必要がある。また、ドップラー信号については、その平均値は後方散乱体の移動速度を表しているようである。ここでは、マイクロ波散乱計についてもやや詳しく述べたが、実用化にあたってはこのような計測装置の基本的な特性が非常に重要となる。今後はマイクロ波散乱特性に対する流れおよび比較的長い波の影響を調べるとともに、より現実に近い電磁波散乱モデルについても検討する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本大学の前田久明教授、明星電気(株)の柴田耕志様には貴重な助言をいただきました。また、実験を行うにあたっては東京大学生産技術研究所鈴木文博技官に多大なご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Crombie, D. D. : Doppler spectrum of sea echo at 13.56Mc/s, Nature, 175, 1955
- 2) 徳田正幸, 橋本典明, 永井紀彦, 永松宏, 鈴木 寛 : VHF レーダによる波浪観測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, 1998
- 3) Ebuchi, N., H. Kawamura, Y. Toba : Physical processes of microwave backscattering from laboratory wind wave surfaces, Journal of Geophysical Research, Vol. 98, 1993
- 4) 光易恒, 丸林賢次, 石橋道芳, 草場忠夫 : 風波によるマイクロ波の散乱特性(1), 九州大学応用力学研究所所報, 第 67 号, 1989
- 5) 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信 : 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, (社)電子情報通信学会, 1986
- 6) Valenzuela, R. G. : Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review, Boundary Layer Meteorology, Vol. 13, 1978
- 7) Wright, J. W. : A new model for sea clutter, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-16, 1968
- 8) 加藤始, 鶴谷広一 : 風波の成分波の波速について, 海岸工学講演会論文集, 第 21 巻, 1974