

海面のマイクロ波放射特性に関する研究(第3報)

—海面でのマイクロ波の散乱モデルの比較—

佐々木保徳*¹ 浅沼市男*¹ 宗山 敬*¹
内藤玄一*²

本報告の目的は、前回報告したわれわれの海面におけるマイクロ波散乱モデル (Geometric optics モデル) を、Non-coherentモデルと比較することおよび Non-coherentモデルの紹介である。

われわれのモデルにより計算した天空マイクロ波輝度の海面反射分は、Non-coherentモデルによるそれらと比較した結果、観測角20~60°においてほぼ同様のパターンを与えることがわかった。また、これによりわれわれがモデルを提案するにあたって設定した仮定はほぼ妥当であろうと推測される。なお、観測角70°以上では、水平偏波において両モデルによる予測値の間に大きい差が見られるが、現段階では説明できない。Non-coherentモデルについては、利用しやすいように計算の過程と必要なパラメータ値の求め方が述べられている。

Studies on the Properties of Microwave Emissions of the Sea Surface (3rd Report) — Comparison of Models for Microwave Scattering at the Sea Surface —

Yasunori Sasaki *³ Ichio Asanuma *³ Kei Muneyama *³
Gen'ichi Naito *⁴

The purposes of this report are following two: first, a comparison of our model for microwave scattering at the sea surface, proposed in a previous paper (geometric optics model), with a noncoherent model by Wu & Fung; second, the introduction of a noncoherent model for users.

These two models give almost the same pattern of the surface reflection of the sky microwave temperature in the range of incidence angle from 20 to 60 degrees. This fact means that the assumptions introduced in our model might be reasonable. Above the 70 degree incidence angle, considerable differences are seen between the two models in the horizontally polarized reflections predicted, but no clear explanations are available at present.

This paper also summarizes the calculation processes of the noncoherent model for easier employment for users.

*¹ 海洋開発研究部

*² 国立防災科学技術センター平塚支所

*³ Marine Research and Technology Department

*⁴ Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention

1. はじめに

海面からマイクロ波が自然放射される過程および天空マイクロ波が海面で反射、散乱される過程は非常に複雑である。しかし、この過程を正しくとらえておかなければマイクロ波リモートセンシングにつながらない。

海面におけるマイクロ波の放射、反射、散乱などの過程を評価するモデルはいくつかあり、分類の方法もいくつかあるが、その1つに鏡面反射モデル (Single Surface Model, Geometric Optics Modelとも呼ぶ)¹³⁾と複合海面モデル (Composite Surface Model^{11) 12)} およびその他のモデルという分類法がある。

鏡面反射モデルは、A. Stogryn¹³⁾により提案されたモデルで、海面を微小な平面の集合体として取り扱う幾何光学モデルである。このモデルも最近また再評価されている。前回われわれが報告した方法¹⁶⁾も、考え方はやや異なるが鏡面反射モデルに属する。

一方、複合海面モデルは、B. I. Semyonov¹²⁾が提案したモデルで、のちにS. T. Wu と A. K. Fung が改良を加えている。このモデルでは、海面をうねりまたはこれに近い成分 (Large Undulations) と小さな風浪成分 (Small Irregularities) に分け、おのおのの面におけるマイクロ波の反射または散乱を加え合わせるという方法がとられる。このモデルはまた Non-coherent Model である。

これら二つのモデルのうちどちらを選ぶかは、目的、精度、正確さなどを十分検討して決めるべきである。

これらのモデルは、単なる利用者の立場からは非常に難解であり、容易に利用できないという不利がある。そこで本報告では、Wu と Fung により改良された Non-coherent Model の紹介をしたのち、海面におけるマイクロ波の反射、散乱に対するうねりやこれに近い成分の寄与と小さな風浪成分の寄与を評価する。そして、Non-coherent Model による結果とわれわれの Geometric Optics Model による結果を比較する。

2. 計算のためのモデル

2.1 Geometric Optics Model

(佐々木らによる)

このモデルの本来の目的は、

(1)海面での天空マイクロ波反射分の評価

(2)マイクロ波放射計が観測する海面反射分が海面の微小波面上で放射計と光学的対称な天空方向から入射するマイクロ波の反射成分であり、このとき天空方向は Cox と Munk による微小波面の2次元勾配分布関数で重みづけ選択されると推測されることの確認

(3)電場は本来ベクトル量であり、任意の勾配をもつ微小波面に任意の方向から入射する垂直または水平偏波の反射、散乱を評価する場合、各偏波を微小波面に垂直な偏波成分と水平な偏波成分に分けてそれぞれの反射、散乱を別々に評価したのち再合成することの妥当性の確認

(4)その他
である。

このモデルの詳細は前回報告したとおりである。

なお、微小波面とマイクロ波の波長が同程度の大きさになれば回折の効果を考慮しなければならない。そこで本報告では Fresnel の反射係数の計算に、Wu と Fung により改良された Fresnel 反射係数計算法を使用した。

2.2 Non-coherent Model

(Wu と Fung による)¹¹⁾

以下では、記号を図1のようにとるものとする。Peake によれば、 θ の方向への全天空輝度温度の反射分 $T_B^{\text{refl}}(\theta)$ は、次式で与えられる。

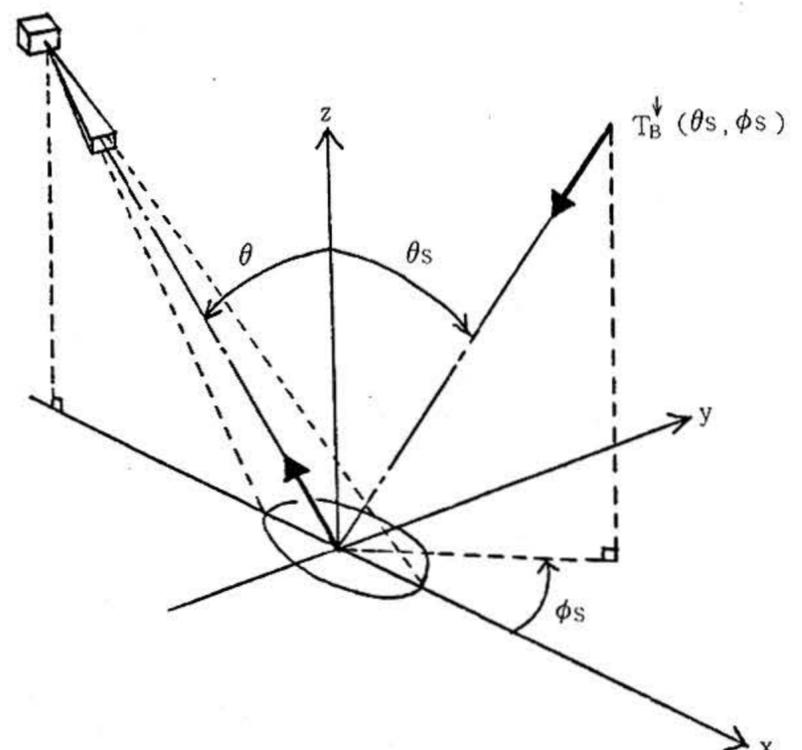


図1 海面での天空マイクロ波の散乱の幾何学
Geometry of scattering of microwave
from the sky

$$T_B^{\text{refl}}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_B^\downarrow(\theta_s, \phi_s) \cdot r_P(\theta, \theta_s, \phi_s) \cdot \sin \theta_s \cdot d\theta_s \cdot d\phi_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで,

$T_B^\downarrow(\theta_s, \phi_s)$; (θ_s, ϕ_s) の方向から海面へ入射する天空マイクロ波の輝度温度
 $r_P(\theta, \theta_s, \phi_s)$; 入射角 θ (方位角 $\phi = 0$) で海面に入射した天空マイクロ波に対する (θ_s, ϕ_s) 方向への散乱係数

P ; 偏波の種類をあらわす添字

$$P = \begin{cases} H; \text{水平偏波のとき} \\ V; \text{垂直偏波のとき} \end{cases}$$

Wu と Fung は, $r_P(\theta, \theta_s, \phi_s)$ を以下のように取り扱っている。すなわち,

$$r_P(\theta, \theta_s, \phi_s) = r_P^\circ(\theta, \theta_s, \phi_s) + \langle r_P^1(\theta, \theta_s, \phi_s) \rangle \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで,

$r_P^\circ(\theta, \theta_s, \phi_s)$; Large Undulations による項
 $\langle r_P^1(\theta, \theta_s, \phi_s) \rangle$; Small Irregularities による項

である。そして、これら二つの項はそれぞれ以下のように計算される。

(1) Large Undulations による項

$$r_H^\circ(\theta, \theta_s, \phi_s) = \frac{k^2 \cdot a_1^2}{\pi \cdot A_0 \cdot \cos \theta \cdot q_z^2} \cdot \left[\frac{|\langle R_H \rangle|^2 \cdot b^2 + |\langle R_V \rangle|^2 \cdot d^2}{b^2 + d^2} \right] \cdot \langle |I|^2 \rangle \quad \dots\dots(3)$$

$$r_V^\circ(\theta, \theta_s, \phi_s) = \frac{k^2 \cdot a_1^2}{\pi \cdot A_0 \cdot \cos \theta \cdot q_z^2} \cdot \left[\frac{|\langle R_V \rangle|^2 \cdot b^2 + |\langle R_H \rangle|^2 \cdot d^2}{b^2 + d^2} \right] \cdot \langle |I|^2 \rangle \quad \dots\dots(4)$$

ここで,

$$\langle |I|^2 \rangle = \frac{2 \pi \cdot A_0}{k^2 \cdot q_z^2 \cdot m^2} \cdot \exp \left[-\left(\frac{q_x^2 + q_y^2}{2 \cdot q_z^2 \cdot m^2} \right) \right]$$

- A_0 ; マイクロ波の入射断面積
- k ; マイクロ波の波数 ($= 2\pi / \lambda$)
- λ ; マイクロ波の波長
- m ; Large Undulations の rms 勾配
 $(\sqrt{\sigma^2 \cdot \rho''(0) |})$
- σ^2 ; 表面の分散
- $\rho(\xi)$; 表面の自己相関係数
- $b = \sin \theta \cdot \cos \theta_s + \cos \theta \cdot \sin \theta_s \cdot \cos \phi_s$
- $d = \sin \theta_s \cdot \sin \phi_s$
- $a_1 = 1 + \cos \theta \cdot \cos \theta_s - \sin \theta \cdot \sin \theta_s \cdot \cos \phi_s$
- $q_x = \sin \theta_s \cdot \cos \phi_s - \sin \theta$
- $q_y = \sin \theta_s \cdot \sin \phi_s$
- $q_z = \cos \theta + \cos \theta_s$

$\langle R_P \rangle$; 改良 Fresnel 反射係数

$$R_P(\theta) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot \cos\theta \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(u - k \cdot \sin\theta, v) \cdot F_P(u, v) \cdot du \cdot dv \right]$$

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (1 + \cos\theta_s \cdot \cos\theta_s - \sin\theta \cdot \sin\theta_s \cdot \cos\phi_s)^{1/2}$$

$$R_H(\theta) = \frac{\cos\theta - (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2}}{\cos\theta + (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2}}$$

$$R_V(\theta) = \frac{\epsilon_r \cdot \cos\theta - (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2}}{\epsilon_r \cdot \cos\theta + (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2}}$$

$$W(u - k \cdot \sin\theta, v) = \frac{\sigma_1^2 \cdot \ell^2}{\pi} \cdot \exp \left[-\frac{\ell^2}{4} \cdot (u^2 + v^2 - 2k \cdot u \cdot \sin\theta + k^2 \cdot \sin^2\theta) \right]$$

ϵ_r ; 海水の複素誘電率

σ_1 ; Small Irregularities の相関長

ℓ ; Small Irregularities の標準偏差

$$F_H(u, v) = k \cdot (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2} - (e - f) \cdot \left(1 - \frac{v^2}{u^2 + v^2 + e \cdot f} \right)$$

$$F_V(u, v) = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r \cdot \cos\theta - \sin^2\theta} \cdot \left[k \cdot (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{2k \cdot u \cdot \sin\theta}{u^2 + v^2 + e \cdot f} \right) - \frac{e - f}{u^2 + v^2 + e \cdot f} \cdot \left\{ \sin^2\theta \cdot \left(\sin^2\theta \cdot \left(e \cdot f + \frac{u^2}{\epsilon_r} \right) - u^2 \right) \right\} \right] - (e - f)$$

$$e = [k^2 \cdot \epsilon_r - (u^2 + v^2)]^{1/2}$$

$$f = [k^2 - (u^2 + v^2)]^{1/2}$$

(2) Small Irregularities による項

$$\begin{aligned} \langle r_P^1(\theta, \theta_s, \phi_s) \rangle = & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{ r_P^1(\theta', \phi', \theta'_s, \phi'_s) |_{\theta_n = \tan^{-1}(m)} \\ & + r_P^1(\theta', \phi', \theta'_s, \phi'_s) |_{\theta_n = -\tan^{-1}(m)} \} \cdot d\phi_n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで,

$$\begin{aligned} r_P^1(\theta', \phi', \theta'_s, \phi'_s) = & 4k^4 \sigma_1^2 \ell^2 \cdot \cos\theta' \cdot \cos^2\theta'_s \\ & \times [|M_{PH}|^2 + |M_{PV}|^2] \cdot \exp \left[-\left(\frac{\ell t}{2} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$t = \sqrt{r^2 + s^2}$$

$$r = k \cdot [\sin \theta'_s \cdot \cos(\phi'_s - \phi') - \sin \theta']$$

$$s = k \cdot \sin \theta'_s \cdot \sin(\phi'_s - \phi')$$

$$\cos \theta' = \cos \theta_n \cdot \cos \theta + \sin \theta_n \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi_n$$

$$\cos \theta'_s = \cos \theta_n \cdot \cos \theta_s - \sin \theta_n \cdot \sin \theta_s \cdot \cos(\phi_s - \phi)$$

$$\sin \phi'_s = \sin \theta_s \cdot \sin(\phi_s - \phi) / \sqrt{1 - \cos^2 \theta'_s}$$

$$\sin \phi' = \sin \theta \cdot \sin \phi_n / \sqrt{1 - \cos^2 \theta'}$$

$$M_{HH} = \frac{(\epsilon_r - 1) \cdot \cos(\phi'_s - \phi')}{[\cos \theta' + (\epsilon_r - \sin^2 \theta')^{1/2}] \cdot [\cos \theta'_s + (\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s)^{1/2}]}$$

$$M_{HV} = \frac{(\epsilon_r - 1) \cdot \sin(\phi'_s - \phi') \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta_s)^{1/2}}{[\cos \theta' + (\epsilon_r - \sin^2 \theta')^{1/2}] \cdot [\epsilon_r \cdot \cos \theta'_s + (\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s)^{1/2}]}$$

$$M_{VH} = \frac{-(\epsilon_r - 1) \cdot \sin(\phi'_s - \phi') \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta_s)^{1/2}}{[\epsilon_r \cdot \cos \theta' + (\epsilon_r - \sin^2 \theta')^{1/2}] \cdot [\cos \theta'_s + (\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s)^{1/2}]}$$

$$M_{VV} = \frac{-(\epsilon_r - 1) \cdot [\cos(\phi'_s - \phi'_s) \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta')^{1/2} \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s)^{1/2} - \epsilon_r \cdot \sin^2 \theta'_s \cdot \sin \theta']}{[\epsilon_r \cdot \cos \theta' + (\epsilon_r - \sin^2 \theta')^{1/2}] \cdot [\epsilon_r \cdot \cos \theta'_s + (\epsilon_r - \sin^2 \theta'_s)^{1/2}]}$$

である。

k , l , σ_1 および m の値は以下のようにして求めている。なお、計算の過程では前3者は $k \cdot l$, $k \cdot \sigma_1$ という積の形であらわれるので、これら積の形で求める方がよい。

一般に、高周波スペクトル領域の海面波においては、スペクトル分布は、

$$BK^{-4} \dots \dots \dots (6)$$

で近似できるとされている。

ここで、

B; スペクトル領域により決まる定数
Cox と Munk, Pierson, Phillipsらによれば高周波スペクトル領域では 4.6×10^{-3} 3.26×10^{-2} とされる。

K; 見かけの波数

である。ここでいう Small Irregularities もこのスペクトル分布をもつ海面波領域に属するものとする。そして、そのスペクトル分布がガウス分布に従うものと仮定して、入射角 $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ の範囲において次式が近似的に成り立つように kl を

定めるものとする。

$$BK^{-4} \leq \frac{\sigma_1^2 \ell^2}{\pi} \cdot \exp\left(-\frac{K^2 \ell^2}{4}\right) \dots \dots \dots (7)$$

また、この入射角範囲内では Bragg の散乱条件

$$K = 2k \sin \theta \dots \dots \dots (8)$$

が満たされるものとする。

このとき、Wu と Fung によれば式(7)が θ によらず近似的に成り立つのは、 $kl = 2$ のときであるとされている。また、 $\theta = 60^\circ$ において式(7)の両方が完全に等しくなるようにすれば、

$$\frac{16 k^4 \sigma_1^2 \ell^2}{\pi B} = 35.3 \dots \dots \dots (9)$$

となる。そして、Wu と Fung は Hollinger により観測された 8.36 GHz の水平偏波の放射特性の平均をもとに $k \sigma_1$ を求めた。それらは、風速 14.7 kt (7.6 m/sec) のもとで $k \sigma_1 = 0.13$, 24.6 kt (12.6 m/sec) のもとで $k \sigma_1 = 0.173$ と報告されており、明らかに風速に依存する。なお、式(9)は、

$$\frac{16(k\sigma_1)^2 \cdot (kl)^2}{\pi \cdot B} = 35.3 \quad \dots\dots\dots(10)$$

となり、 kl および B を観測マイクロ波の波長によらない定数として扱っているため、式(10)から明

らかなように $k\sigma_1$ に対しても観測マイクロ波の波長に対する依存性を特に考慮することはしないこととする。

また、 m はCoxとMunkによる実験データか

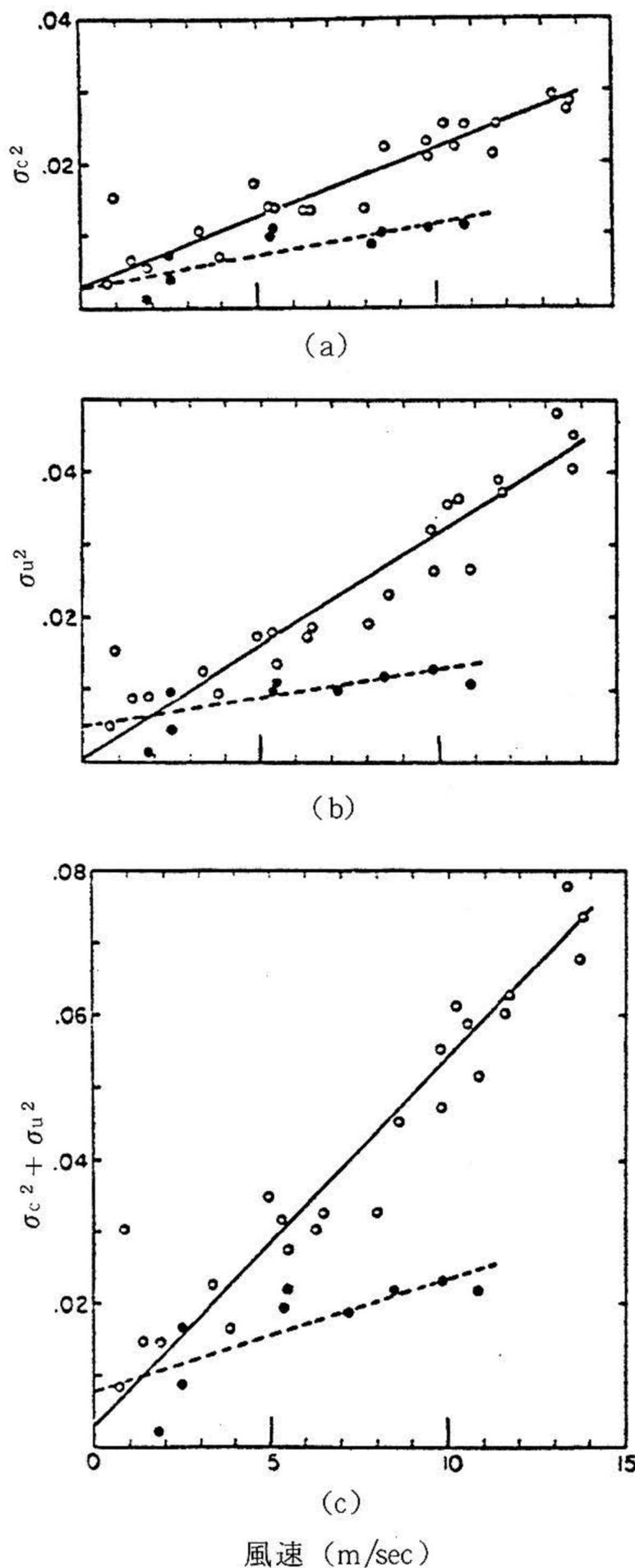


図2 海面の2方向平均自乗勾配成分とそれらの和の風速依存性
〔CoxとMunk(1954)による〕

Mean square slope components and their sum as functions of the wind speed〔after Cox and Munk(1954)〕

ら求めている。図2はこの過程を示したもので、CoxとMunkから引用されている。(a)は、風に直角な方向の海面の平均自乗勾配 σ_c^2 , (b)は(a)と(b)の平均自乗勾配の和をそれぞれ風速に対してプロットしたものである。いずれの図とも、白丸は通常海面、黒丸は大量の油をまいた海面のデータに相当する。海面に油をまいた場合、油膜のために風による応力が作用せず、この場合の海面は Large Undulation のみから成ると考えられる。また、(a)および(b)から明らかなように、Large Undulation の勾配には、風に対し直角な方向と平行な方向とでほとんど差が認められないため、両方向における平均自乗勾配の相加平均を用いている。すなわち、

$$m^2 = \frac{\sigma_c^2 + \sigma_u^2}{2} \dots\dots\dots(11)$$

である。

結局、以上をまとめると $k \cdot l$, $k \cdot \sigma_1$, m は以下のようにして求められる。

$$k \cdot l = 2$$

$$k \cdot \sigma_1 = (0.86 \cdot W + 6.46) \times 10^{-2}$$

$$m = \sqrt{(\sigma_c^2 + \sigma_u^2)/2}$$

ただし、 W は風速である。海面に対し応力が作用しはじめる最低風速は5~6 m/sec とされており、これらの式があてはまる風速域も5~6 m/sec 以上ということになる。

3. 結果および考察

両モデルによる天空マイクロ波輝度温度の反射分の推定値を比較したものが図3である。計算に用いた天空輝度温度分布 T_B^{\downarrow} は、1984年6月31日に平塚沖の国立防災科学技術センター観測塔で実測したものである。図3において、上の2本の線が水平偏波に対応し、下の2本の線が垂直偏波に対応する。また、黒丸は Non-coherent Model による値を、白丸は Geometric Optics Model による値をそれぞれ表わす。風速は8 m/sec を仮定した。

図3から明らかなように、両モデルとも天空輝度温度の反射分の観測角依存特性をよく示している(図3において、Incidence angleは観測角とい

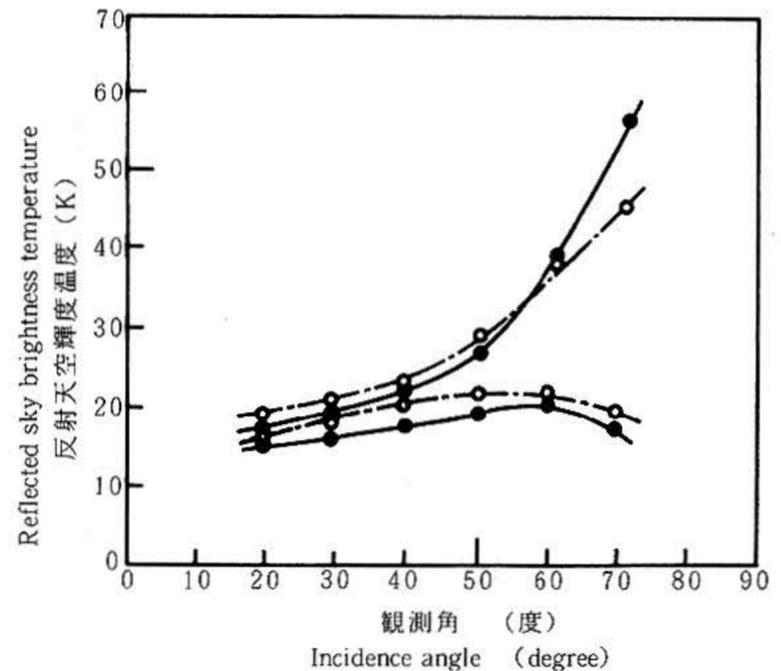


図3 2つのモデルから予測される反射天空輝度温度の比較

Comparison of reflected sky brightness temperatures predicted with two models

う用語に正しくは対応しないが、一般的によく使われている。また逆に、この場合 Incidence angle に対応する適切なる用語が日本語に見当たらないため、意味を考えて“観測角”を用いた)。特に、観測角20°~60°の範囲では、両モデルによる予測値は両偏波においてほぼ一致している。そして、両モデルとも、水平偏波では、観測角50°付近から急激に増加する一方、垂直偏波では観測角60°付近に極大をもち上に凸となるという一致した予測を与えている。なお、観測角70°以上では、水平偏波において両モデルの予測値の間に開きが見られるが、現段階ではこれに対する明確な説明はできない。

4. 結論

(1)観測角20°~60°の範囲では、両モデルともほとんど同様の予測結果を与える。

(2)両偏波とも、その天空輝度温度の海面反射分は観測角依存性を示す。そして、予測される値の大きさから、パッシブ・マイクロ波リモートセンシングでは反射成分の除去が海洋現象観測のうえで、その正確さと精度に対する鍵となると考えられる。

(3)前報および本報において、われわれ自身の、Geometric Optics Modelを展開するにあたり設けた仮定はほぼ妥当であると考えられる。

5. おわりに

海面におけるマイクロ波の放射, 反射または散乱の過程を説明するモデルはいくつかある。しかし, それらのいずれもがすべて複雑であり, 利用する立場からはその複雑さが困難となって前途を遮っている場合が少なくないはずである。本報告では, われわれ自身の Geometric Optics Model の提案と Non-coherent Model との比較を通じて, 両タイプの Model が本来もつ特質の比較を少し試みた。そして, 純粹に利用者としての立場にある人々のために, Non-coherent Model による計算の過程もまとめて示した。この分野の研究ではわが国は大きく遅れており, 本報告が当分野における今後のわが国の研究の発展の一助になればと願うものである。

文 献

- 1) Sasaki, Y. et al., "1984, "Effects of Sea Surface Roughness on Surface Brightness Temperature", Proc. 1984 Int'l. Symp. Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors", Musha, T. et al. (ed), Tokyo, 1984 - 10, 135 - 140
- 2) Sasaki, Y. et al., "On the Effects of Ocean Surface Roughness on Emissivity and Reflectivity of Microwave Radiation" In: The Ocean Surface ; Wave Breaking , Turbulent Mixing and Radio Probing, Toba, Y. et al. (ed), Dordrecht, Holland, (1985) 311 - 318
- 3) Cox, C., Munk, W., 1954, "Statistics of the Sea Surface derived from Sun Glitter", J. Marine Res., 13, 198 - 227
- 4) _____, _____, 1958, "Measurement of the Roughness of the Sea from Photographs of the Sun's Glitter", J. Opt. Soc. Am., 44, 838 - 850
- 5) Stogryn, A., 1967, "The Apparent Temperature of the Sea at Microwave Frequencies", IEEE Trans. Antennas and Propag., AP - 15, 278 - 286
- 6) Stogryn, A., 1972, "The Emissivity of Sea Foam at Microwave Frequencies", J. Geophys. Res., 77, 1658 - 1666
- 7) Nordberg, W. et al., 1969, "Microwave Observations of Sea State from Aircraft", Quart. J. Res. Met. Soc., 95, 408 - 413
- 8) Hollinger, J., 1971, "Passive Microwave Measurements of Sea Surface Roughness", IEEE Trans. Geos. Elec., GE-9, 165 - 169
- 9) Claasen, J. P., Fung, A. K., 1974, "The Recovery of Polarized Apparent Temperatures Measurements", IEEE Trans. Antennas and Propag., AP - 22, 1892 - 1908
- 10) Wentz, F. J., 1983, "A Model Function for Ocean Microwave Brightness Temperature", J. Geophys. Res., 88, 1892 - 1908
- 11) Wu, S. T., Fung, A. K., 1972, "A Noncoherent Model for Microwave Emissions and Backscattering from the Sea Surface", J. Geophys. Res., 77, 5917 - 5929
- 12) Semyonov, B. I., 1966, "Approximate Computation of Scattering Electromagnetic Waves by Rough Surface", Radio Eng. Electron. Phys., 11, 1179 - 1187
- 13) Stogryn, A., 1967, "Electromagnetic Scattering from Rough, Finitely Conducting Surfaces", Radio Sci., 2, 415 - 428
- 14) Rice, D. O., 1951, "Reflection of Electromagnetic Waves from Slightly Rough Surface", Commun. Pure Appl. Math., 4, 361 - 378
- 15) Valenzuela, G. R., 1970, "The Effective Reflection Coefficients in Forward Scatter from a Dielectric Slightly Rough Surface", IEEE Proc., 58, 1279 - 1285
- 16) 佐々木保徳ほか, 1985, "海面のマイクロ波放射特性に関する研究 (第2報) - 天空輝度温度の海面反射分の評価法 -", JAMSTECTR (14) 119 - 126

(原稿受理 1985年3月28日)