

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——

佐々木保徳^{*1} 浅沼 市男^{*1}
宗山 敬^{*1} 内藤 玄一^{*2}

本研究の目的は、幾何光学モデルにより海表面における天空輝度温度の反射分の量的評価法、観測角依存特性、海面粗度すなわち海上風速依存特性などを検討することである。

海面は、マイクロ波の波長より大きい、平面とみなせる微小波面の集合から成るものとした。また、微小波面がもつ2方向への勾配の結合確率密度は、C. CoxとW. Munkの統計理論に従うものとした。さらに、1回反射のみ考慮されている。そして、観測視野内の微小波面群により反射される天空輝度温度を与える全天空点は、2方向勾配の結合確率密度で重みづけ選択されたとした。

両偏波とも反射成分は顕著な観測角依存性を示す。特に水平偏波では、高角度でも単調増加するが、鉛直偏波では 70° 以上ではやや減少する。また、両偏波とも反射成分は風速依存性を示し、風速とともにほぼ直線的に単調増加する。反射成分の大きさは、水平偏波の方が鉛直偏波より常に大きい。

Studies on the Properties of Microwave Emissions of the Surface (2nd Report)

— Estimation Procedure of Sky Brightness Temperature Reflected at the Sea Surface —

Yasunori Sasaki^{*3} Ichio Asanuma^{*3} Kei Muneyama^{*3} Genichi Naito^{*4}

The purpose of this work is to discuss, by means of a geometric optics model the quantitative estimation procedure and dependences on observation angle and sea surface roughness, in other words, wind velocity of the sky brightness temperature reflected by the sea surface.

Following assumptions are introduced: 1) the sea surface consists of a collections of small facets with a flat plane with a size larger than the wavelength of a microwave; 2) probability density of facets' bi-directional slopes that is predicted by the statistical theory proposed by C. Cox and

*1 海洋保全技術部

*2 国立防災科学技術センター平塚支所

*3 Marine Environment Department

*4 National Research Center for Disaster Prevention Hiratsuka Branch

W. Munk; 3) single reflection can explain, most of the reflected sky brightness temperature observed, and multiple reflections are of minor importance; 4) the sky points which give the sky brightness temperature to be reflected into a radiometer should be selected in a weighed form by estimating the probability density of bi-directional slopes of facets in the field of view. The reflected components of both polarizations show a pronounced dependence on observation angle. Especially for H-pol, this increases with angle continuously, but on the other hand, this turns into a slight decrease when an angle over seventy degrees is reached for V-pol. They also show clear wind velocity in a linear fashion with wind velocity. The reflected sky brightness temperature of H-pol is always higher than that of V-pol.

1. はじめに

海面から自然放射されるマイクロ波は、水温、塩分、誘電率などのほか、海表面形状やホワイトキャップの有無などによっても変化する。そこで、これらの変量と自然放射マイクロ波強度との関係、換言すれば放射率との関係をあらかじめ求めておき、観測される自然放射マイクロ波からこれらの変量を推定する方式が、パッシブ方式のマイクロ波リモートセンシングである。しかし、それもあらかじめ自然放射マイクロ波の諸変量依存特性がわかっていることである。

ところで、マイクロ波放射計により海面からの放射を測定する場合、同時に天空マイクロ波放射の海面反射分の混入が避けられない。そして、われわれの観測により、天空マイクロ波放射の海面反射分が通常、見かけの海面の輝度温度の変化に対して大きく寄与することがわかっている。そのため、海洋の諸変量に対する固有放射の依存特性を求めるためには、まず、天空輝度温度の海面反射分を正しく見積もらなければならない。

海表面におけるマイクロ波の散乱反射に関するモデルを大別すれば幾何光学モデル、摂動モデルおよび両者の複合モデルとなる。ここでは、A. Stogryn に代表される幾何光学モデルに準拠したモデルにより、海表面における天空輝度温度の反射特性を検討する。実際の海面では、多重反射散乱が生じているが、全反射輝度温度中にそれらが占める比率は小さいため、ここではそれらを考慮していない。

2. 方法

海面が、マイクロ波の波長より大きい、平面とみなすことのできる無数の微小波面から成るものとする。また、ここでは、風により生じた波のみを考えるものとし、マイクロ波放射計は風上を向いているものとする（図3参照）。

任意の2方向勾配をもつ微小波面へ入射する天空からの水平偏波や鉛直偏波の反射率を直接求めることはやや面倒である。そこで、ここでは、両偏波とも微小波面に平行な成分と垂直な成分に分けて考えることにする。任意の微小波面において、マイクロ波放射計と光学的に対称な天空方向を (θ, ϕ) とし、この方向から微小波面に入射する天空マイクロ波放射の輝度温度を $T_{\text{SKY}p}(\theta, \phi)$ とする。ただし、 p は偏波の種類をあらわす。また、 θ は天頂角、 ϕ は水平面内での方位角である（図3参照）。このとき、微小波面の法線と偏波の振動面の法線とのなす角を β_p とすれば、微小波面に平行な成分と垂直な成分はそれぞれ $T_{\text{SKY}p}(\theta, \phi) \cdot \cos \beta_p$, $T_{\text{SKY}p}(\theta, \phi) \cdot \sin \beta_p$ となる。結局、微小波面で反射される成分は

$$T_{\text{SKY}p}(\theta, \phi) \cdot (R_H \cdot \cos \beta_p + R_V \cdot \sin \beta_p) \cdots (1)$$

となる。

ここで、

R_p ; Fresnel の反射係数

$$R_p = \left| \frac{\eta \cdot \cos \theta_r - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_r}}{\eta \cdot \cos \theta_r + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_r}} \right|^2$$

η, ϵ ; 複素誘電率

$$\eta = \begin{cases} 1 & (p=V) \\ \epsilon & (p=H) \end{cases}$$

θ_r ; 反射角 (=入射角)

ところで、各微小波面に対応する $T_{SKYp}(\theta, \phi)$ は、それぞれの微小波面の2方向勾配により定まる。そして、微小波面全体についてみると、

2方向勾配結合確率密度に比例して選ばれる。その結果、マイクロ波放射計が観測する反射天空輝度温度は、2方向勾配結合確率密度で重みづけ選択された $T_{SKYp}(\theta, \phi)$ の反射分となる。これを式であらわすと式(2)となる。^{*3}

$$\frac{\int_{\Omega} \int_{-\cot \mu_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_{SKYp}(\theta, \phi) \cdot (R_H \cdot \cos \beta_p + R_V \cdot \sin \beta_p) \cdot P(Z_x, Z_y) \cdot G(\theta', \phi') \cdot dZ_x \cdot dZ_y \cdot d\Omega}{\int_{\Omega} \int_{-\cot \mu_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(Z_x, Z_y) \cdot G(\theta', \phi') \cdot dZ_x \cdot dZ_y \cdot d\Omega} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$P(Z_x, Z_y)$; Cox と Munk による微小波面の2方向勾配結合確率密度関数

$$P(Z_x, Z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_c} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right] \cdot \left[1 - \frac{1}{2}C_{21}(\xi^2 - 1)\eta - \frac{1}{6}C_{03}(\eta^3 - 3\eta) + \frac{1}{24}C_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{4}C_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \frac{1}{24}C_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3)\right]$$

式中の記号は以下のとおりである。

$$\xi = \frac{Z_x}{\sigma_c}$$

$$\eta = \frac{Z_y}{\sigma_u}$$

$$\sigma_c^2 = 0.003 + 1.92 \times 10^{-3} \cdot W \pm 0.002$$

$$\sigma_u^2 = 0.000 + 3.16 \times 10^{-3} \cdot W \pm 0.004$$

$$\sigma_c^2 + \sigma_u^2 = 0.003 + 5.12 \times 10^{-3} \cdot W \pm 0.004$$

$$C_{21} = 0.01 - 0.0086 \cdot W \pm 0.03$$

$$C_{03} = 0.04 - 0.0033 \cdot W \pm 0.12$$

$$C_{40} = 0.40 \pm 0.23$$

$$C_{22} = 0.12 \pm 0.06$$

$$C_{04} = 0.23 \pm 0.41$$

Z_x, Z_y ; x および y 方向の微小波面の勾配

W ; 風速 (m/sec)

θ' ; アンテナの主軸と、視野内の任意の微小波面を結ぶ直線のなす角

ϕ' ; アンテナの主軸に直角な平面内における微小波面の方位角

$G(\theta', \phi')$; アンテナの受信感度分布

μ_0 ; 各微小波面に対する観測角

$$\mu_0 = \mu_0(\theta_0, \theta', \phi')$$

θ_0 ; 主軸方向の観測角

Ω ; アンテナの立体角

$$\Omega = \Omega(\theta', \phi')$$

また、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(Z_x, Z_y) \cdot dZ_x \cdot dZ_y = 1$$

である。 θ, ϕ は $\theta_0, \theta', \phi', Z_x$ および Z_y から決まる(付記参照)

なお、ここではマイクロ波放射計のビーム幅が比較的狭い場合を考えて、偏波面の回転の効果については考慮していない。

3. 結果および検討

式2を計算するためには $T_{SKYp}(\theta, \phi)$ を決めなければならない。そこで、1984年6月28日に観測した天空輝度温度分布を図1に示す。これは水平偏波の場合であるが、本来、大気はマイクロ波に対して等方性を有するため、鉛直偏波についてもほぼ同じ結果が得られる。また、天空のマイクロ波輝度温度は、大気の状態、特に気温、水蒸気、液状水分などの量に関係する。図1は、肉

*3; 各変数のとり方については、図3参照。
また θ, ϕ と θ', ϕ', θ_0 の関係についても付記参照。

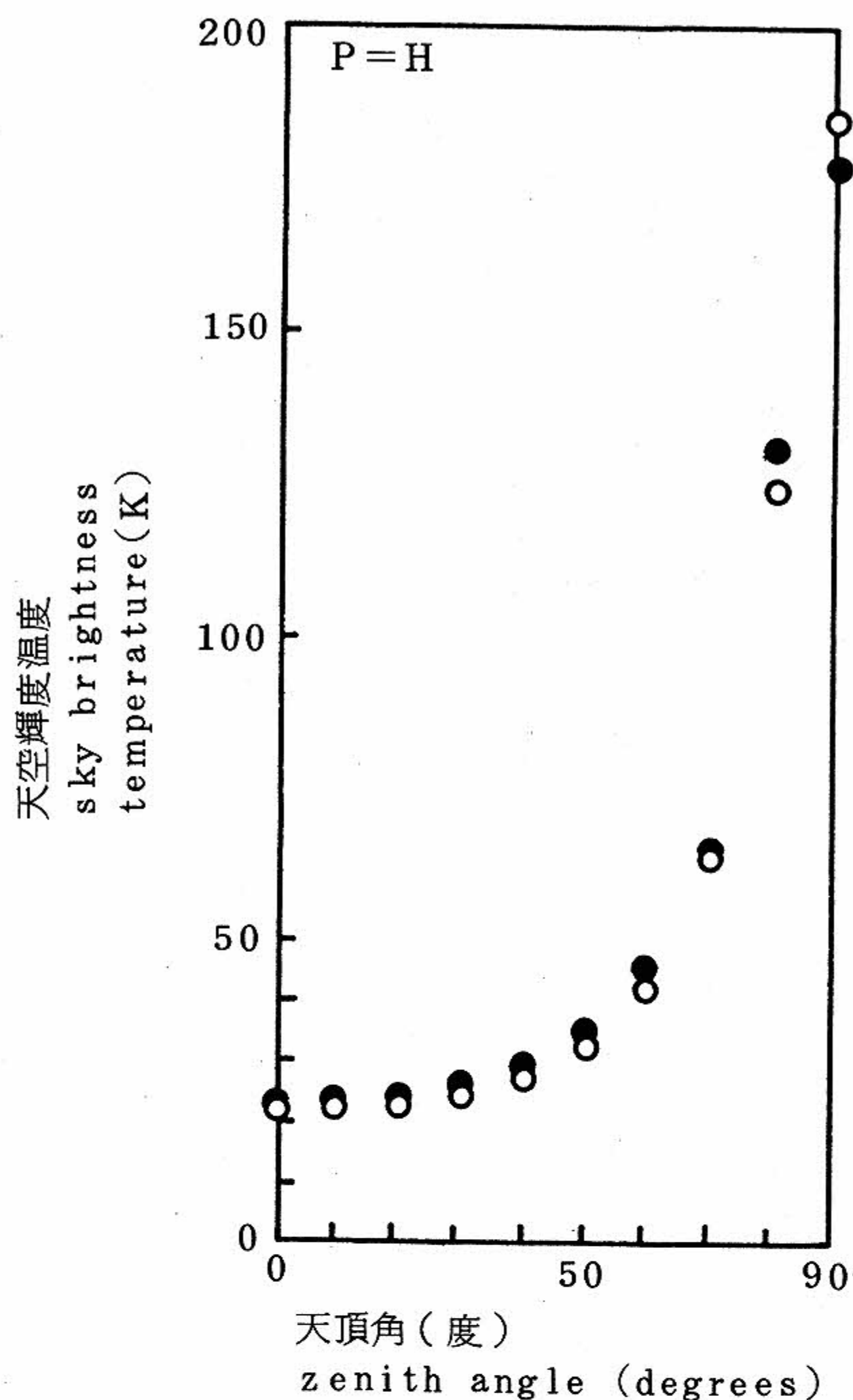


図1 天空輝度温度分布
Zenith angle dependence of the sky brightness temperature

眼的に雲が比較的少なく均一であると認められる天空について得たものである。この場合、水平方向には $T_{\text{SKYp}}(\theta, \phi)$ はほぼ一定となる。実際にこれまでのわれわれの観測では、大気状態が肉眼的に均一な条件のもとでは、 $\theta = 65^\circ$ のとき、 $T_{\text{SKYp}}(\theta, \phi)$ の変動は東、南、西の方向の間でせいぜい 0.5 K 程度であった。そこで、 $T_{\text{SKYp}}(\theta, \phi)$ は水平方向には一定値をとるものとし、 $T_{\text{SKYp}}(\theta, \phi) \approx T_{\text{SKYp}}(\theta, 0^\circ)$ として計算に用いる。

なお、 $T_{\text{SKYp}}(\theta, 0^\circ)$ は

$$T_{\text{SKYp}}(0^\circ, 0^\circ) \cdot 10^{a \times 10^{-7 \cdot \theta^b}} \dots\dots (3)$$

の形で十分近似できる。

図2は式(2)によって計算した天空輝度温度の反射の様子を示したものである。図2(a)は、天観測角依存性、同じく(b)は風速依存性を示す。これらのデータを海面における天空輝度温度の海面反射分として利用するには、まだ多少の検討の余地があるが、傾向を理解することはできる。すなわち、図2(a)では、両偏波とも観測角に強く依存するが、水平偏波の方がより顕著な依存性を示している。そして、鉛直偏波では $60 \sim 70^\circ$ 近傍に極大をもつが、水平偏波には認められない。一方、両偏波とも風速とともに反射成分が増大しており、風による海面の粗度に対しても顕著な依存性を示し

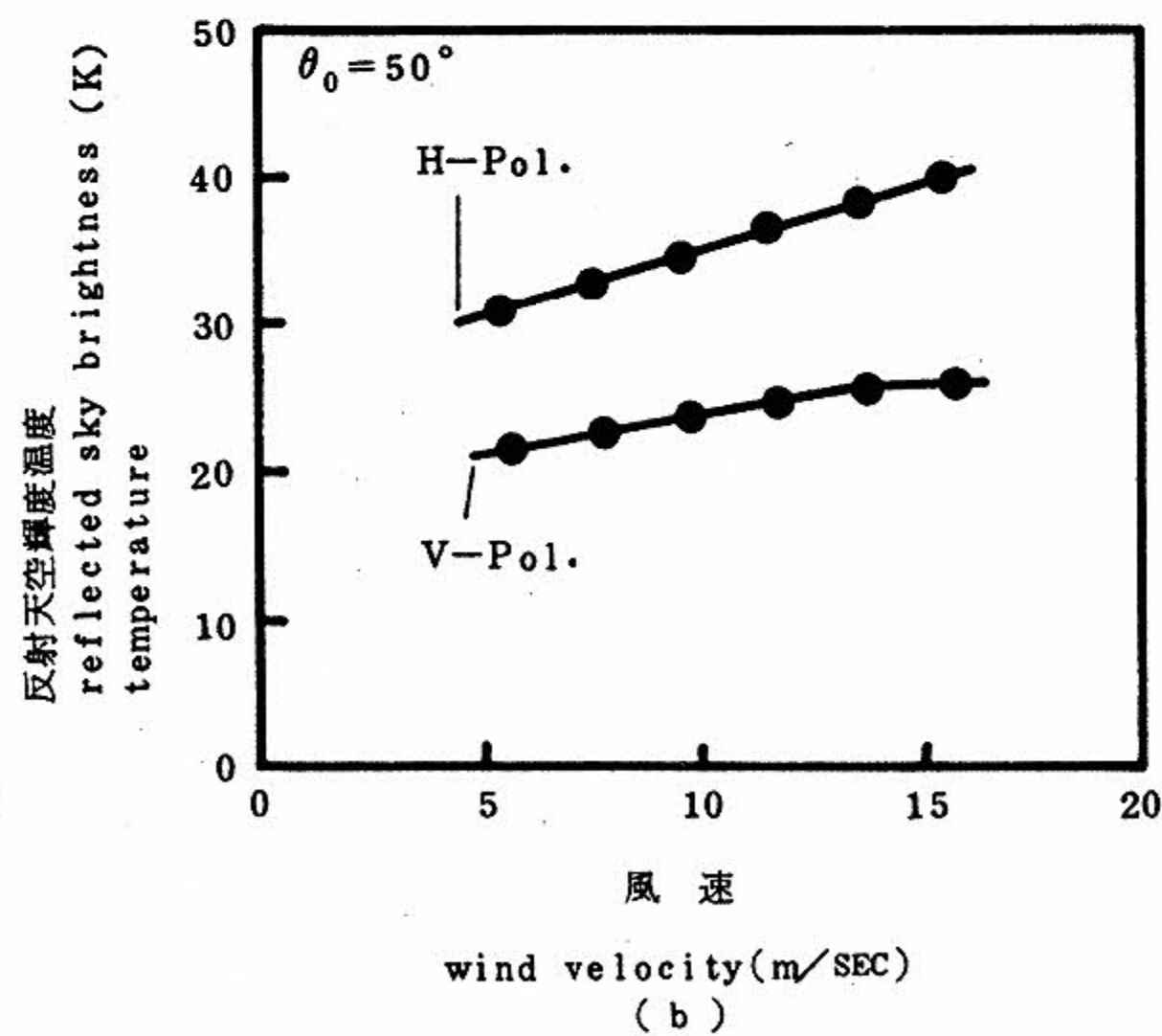
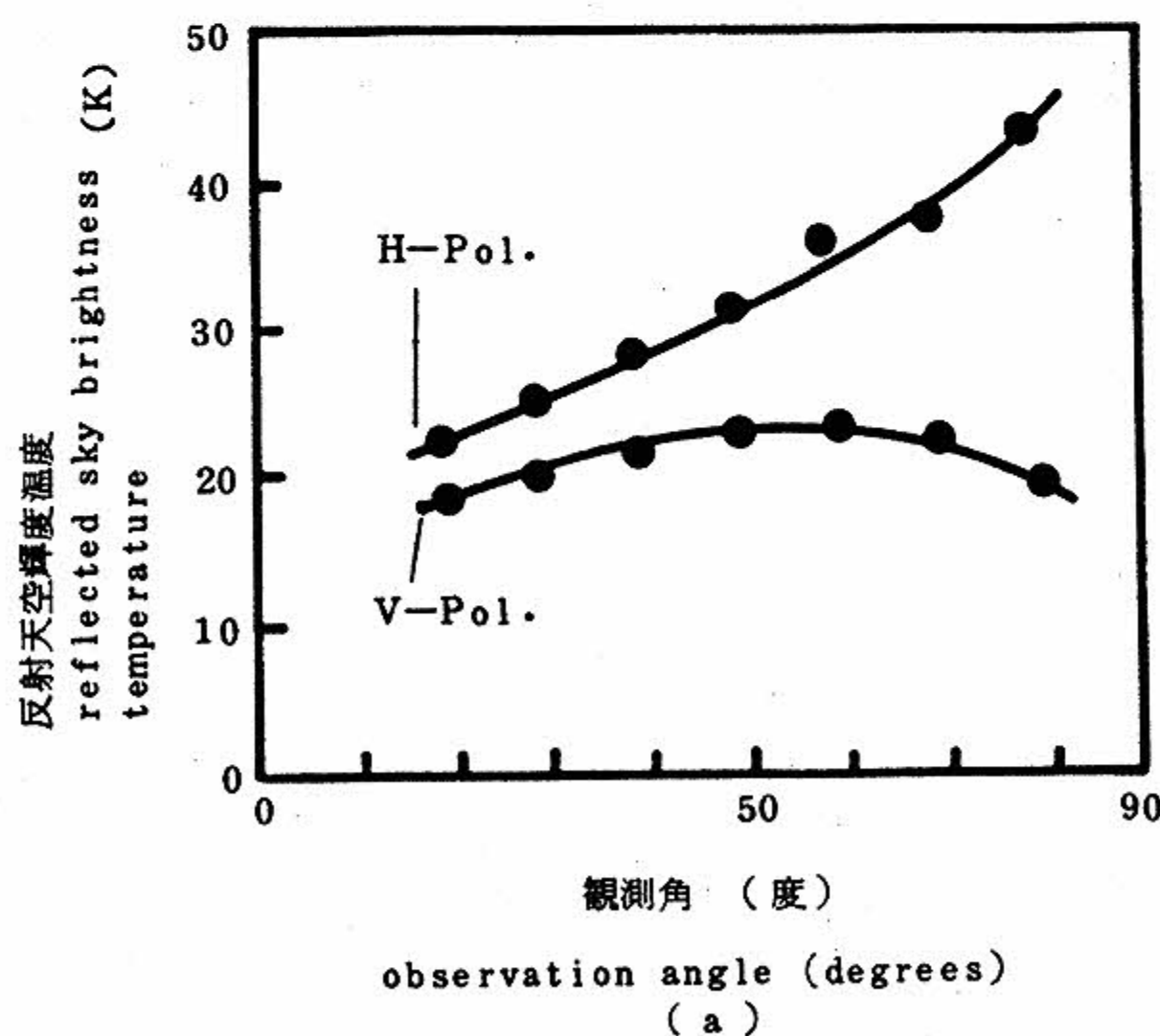


図2 反射天空輝度温度の観測角および風速依存性
Dependences of the reflected sky brightness temperature on the observation angle and the wind velocity.

ている。そして、水平偏波の方が鉛直偏波よりもやや強い粗度依存性を示すこともわかる。そして、全体として水平偏波の方が鉛直偏波に対して大きい反射成分をもち、観測角の増大とともにこの傾向は一層顕著になっている。

4. ま と め

以上の検討から、天空輝度温度の海面反射特性に関し次の定性的な結論を得た。

- (1) 両偏波とも強い観測角依存性をもつ。特に水平偏波において顕著であり、観測角とともに単調増加する。一方、鉛直偏波の場合 $60 \sim 70^\circ$ 近傍に極大をもつ。
- (2) 両偏波とも顕著な海面粗度依存性を有する。また、両偏波とも単調増加する。

5. おわりに

以上の検討により、天空輝度温度の海面反射に関し定性的ではあるが特性を把握することができた。得られた結果をもとに海面反射分を風速と観測角の関数の形に誘導することは容易であるが、実際に用いるためには真の値との間で多少の検討を要する。なお、この方法で得られた結果を別の方法による結果とも比較する予定である。

付 記

1. (θ, ϕ) の求め方

図3のように $x-y-z$ 座標系と $\theta_0, \theta, \phi, \theta', \phi'$ をとるものとする。また、 $x-y-z$ 座標系におけるマイクロ波放射計および微小波面の座標を、それぞれ $R(x_R, y_R, z_R)$, $F(x_F, y_F, z_F)$,

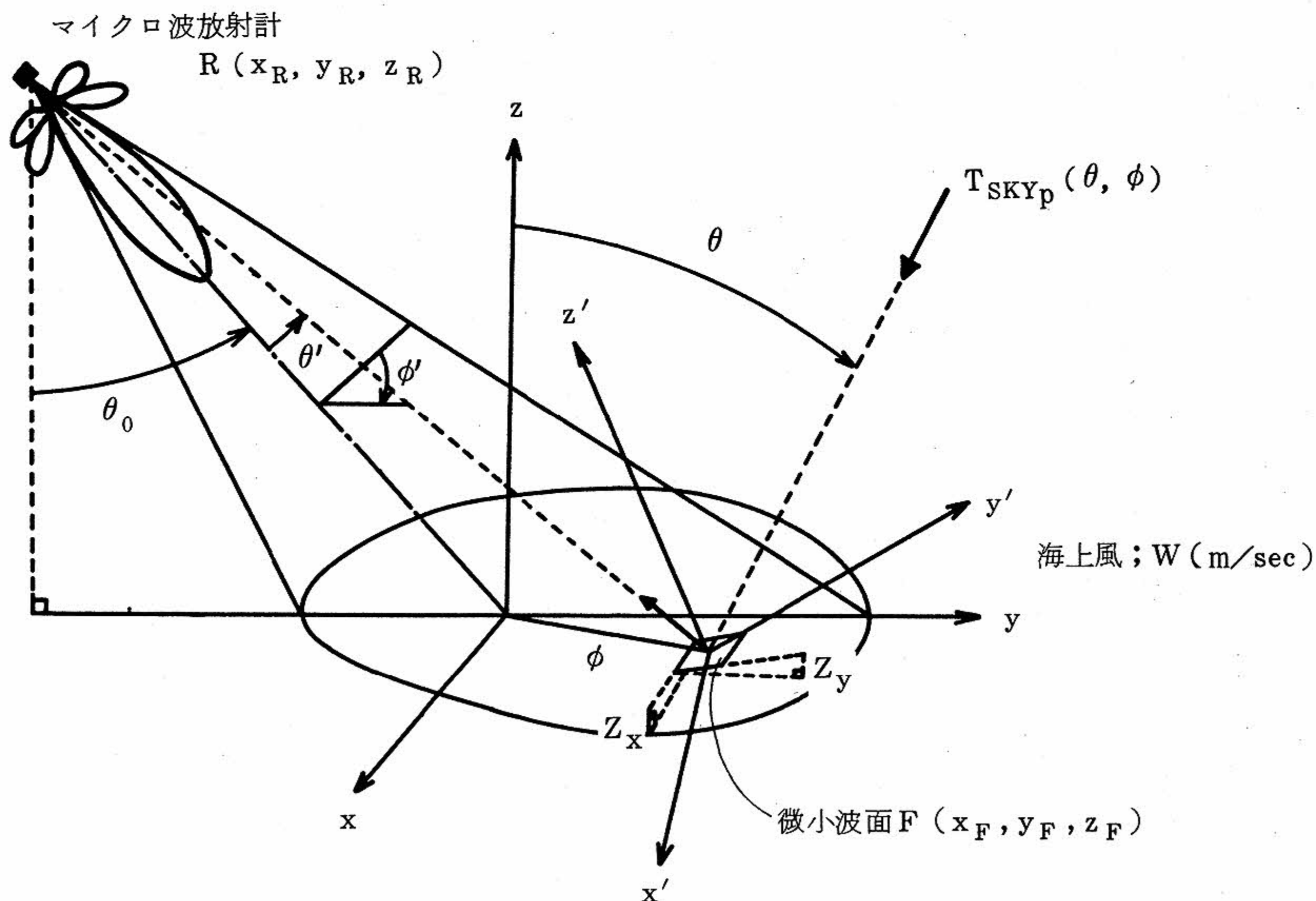


図3 マイクロ波放射観測の幾何学

Geometry of microwave radiometry

x_F, z_F) とする。そして、マイクロ波放射計は、海面から単位の高さ、すなわち $z_F = 1$ にあるも

のとする。

このとき、各点 R, F の座標は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\sin \theta_0}{\cos \theta_0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sin \theta \cdot \sin \phi}{\cos \theta_0 \cdot \cos \theta - \sin \theta_0 \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi} \\ \frac{\sin \phi \cdot \cos \phi}{(\cos \theta_0 \cdot \cos \theta - \sin \theta_0 \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi) \cdot \cos \theta_0} \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 $x-y-z$ 座標系を平行移動して原点を微小波面に移したのち、 $x-y$ 平面が微小波面と一致するように座標軸の回転を行う。この操作

により得られる座標系を $x'-y'-z'$ 座標系とする。このとき、 $x'-y'-z'$ 座標系におけるマイクロ波放射系の座標は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_x & 0 & \sin \theta_x \\ -\sin \theta_x \cdot \sin \theta_y & \cos \theta_y & \cos \theta_x \cdot \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x \cdot \cos \theta_y & -\sin \theta_y & \cos \theta_x \cdot \cos \theta_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -x_F \\ -y_F \\ -z_F \end{pmatrix}$$

ただし

$$\theta_x = \tan^{-1} [Z_x]$$

$$\theta_y = \sin^{-1} [Z_y \cdot \cos \theta_x / \sqrt{1 + (Z_y \cdot \cos \theta_x)^2}]$$

したがって、マイクロ波放射計と光学的に対称な点の座標は $(-x_R', -y_R', z_R')$ で与えられる。

そこで、再び点 $(-x_R', -y_R', z_R')$ を $x-y-z$ 座標系に戻し、あらためて点 (x_S, y_S, z_S) とすれば

$$\begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_x & -\sin \theta_x \cdot \sin \theta_y & -\sin \theta_x \cdot \cos \theta_y \\ 0 & \cos \theta_y & -\sin \theta_y \\ \sin \theta_x & \cos \theta_x \cdot \sin \theta_y & \cos \theta_x \cdot \cos \theta_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -x_R' \\ -y_R' \\ z_R' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix}$$

となる。

したがって、これから θ および ϕ は次式で与えられる。

$$\theta = \cos^{-1} \left[z_S / \sqrt{x_S^2 + y_S^2 + z_S^2} \right]$$

$$\phi = \cos^{-1} \left[y_S / \sqrt{x_S^2 + y_S^2} \right]$$

また、微小波面における天空放射の反射角 θ_r は次式で与えられる。(これはまた、微小波面に 対する入射角でもある。

$$\theta_r = \cos^{-1} \left[x_R' / \sqrt{x_R'^2 + y_R'^2 + z_R'^2} \right]$$

2. β_p の求め方

2.1 鉛直偏波の場合

$x-y-z$ 座標系の原点が $x'-y'-z'$ 座標系の原点と一致するように平行移動する。天空の点 (θ, ϕ) からくる鉛直偏波の振動面の法線の方法は $(0, \phi + \frac{\pi}{2})$ である。したがって、原点

から単位距離にあるこの法線上の点の $x-y-z$ 座標系における座標値は $(\sin(\phi + \frac{\pi}{2}), \cos(\phi + \frac{\pi}{2}), 0)$, すなわち $(\cos\phi, -\sin\phi, 0)$ である。そこで、この点の $x'-y'-z'$ 座標系における座標 (x_p', y_p', z_p') は、次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} x_p' \\ y_p' \\ z_p' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_x & 0 & \sin\theta_x & \sin\phi \\ -\sin\theta_x \cdot \sin\theta_y & \cos\theta_y & \cos\theta_x \cdot \sin\theta_y & -\sin\phi \\ -\sin\theta_x \cdot \cos\theta_y & -\sin\theta_y & \cos\theta_x \cdot \cos\theta_y & 0 \end{pmatrix}$$

一方、微小波面の法線は z' 軸である。そこで、 x' 軸上の単位距離にある点 $(0, 0, 1)$ をとる。

そうすると両法線のなす角 β_p は、第2余弦定理により次のようになる。

$$\beta_p = \cos^{-1} \left[1 - \frac{\sqrt{x_p'^2 + y_p'^2 + 1}}{2} \right]$$

つまり

$$\beta_p = \cos^{-1} \left[1 - \frac{\sqrt{x_p'^2 + y_p'^2 + 1}}{2} \right]$$

2.2 水平偏波の場合

天空の点 (θ, ϕ) からくる水平偏波の振動面の法線の方法は $(\frac{\pi}{2} - \theta, \phi + \pi)$ である。したがって、原点から単位距離にあるこの法線上の点の $x-y-z$ 座標系における座標値は、

$$(\cos(\frac{\pi}{2} - \theta), \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) \cdot \sin(\phi + \pi),$$

$$\sin(\frac{\pi}{2} - \theta) \cdot \cos(\phi + \pi))$$

つまり $(\sin\theta, -\cos\theta \cdot \sin\phi, -\cos\theta \cdot \cos\phi)$ である。そこで、鉛直偏波の場合の $(\cos\phi, -\sin\phi,$

$0)$ の代わりに $(\sin\theta, -\cos\theta \cdot \sin\phi, -\cos\theta \cdot \cos\phi)$ とおいて、 (x_p', y_p', z_p') を求める。そうすると、両法線のなす角 β_p は、やはり第2余弦定理により次のようになる。

$$\cos\beta_p = 1 - \frac{\sqrt{x_p'^2 + y_p'^2 + (z_p' - 1)^2}}{2}$$

つまり

$$\beta_p = \cos^{-1} \left[1 - \frac{\sqrt{x_p'^2 + y_p'^2 + (z_p' - 1)^2}}{2} \right]$$

文 献

- 1) Cox, C, Nunk, W., 1958, "Statistics of the Sea Surface derived from Sun Glitter", J. Marine Res., 13(2), 198-227
- 2) ———, ———, 1958, "Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter", J. Opt. Soc. Am., 44(11), 838-850
- 3) Stogryn, A., 1967, "The Apparent Temperature of the Sea at Microwave Frequencies", IEEE Trans. Antennas and Propag., AP-15(2), 278-286
- 4) ———, 1972, "The Emissivity of Sea Foam at Microwave Frequencies", J. Geophys. Res. 77(2), 1658-1666
- 5) Nordberg, W. et al., 1969, "Microwave Observations of Sea State from Aircraft", Quart. J. Res. Met. Soc., 95, 408-413
- 6) Hollinger, J., 1971, "Passive Microwave Measurements of Sea Surface Roughness", IEEE Trans. Geos. Elec. GE-9(3), 165-169
- 7) Claassen, J.P., Fung, A.K., 1974, "The Recovery of Polarized Apparent Temperature Distributions of Flat Scenes from Antenna Temperature Measurements", IEEE Trans. Antennas and Propag., AP-22(3), 1892-1908
- 8) Wentz, F.J., 1983, "A Model Function for Ocean Microwave Brightness Temperature", J. Geophys. Res., 88(C3), 1892-1908
- 9) Gagarin, S.P., Kutuza, B.G., 1983, Influence of Sea Roughness and Atmospheric Inhomogeneities on Microwave Radiation of the Atmosphere-Ocean System", IEEE J. Oceanic Eng. OE-8(2), 62-70
- 10) Sasaki, Y. et al., "On the Effects of Ocean Surface Roughness on Emissivity and Reflectivity on Microwave Radiation", to be published in Proc. Sympto. on Wave Breking, Turbulent Mixing and Radio Probing of the Ocean Surface, Sendai held on July 19-25, Sendai
- 11) Sasaki, Y. et al., 1984, "Effects of Sea Surface Roughness on Surface Brightness Temperature", Proc. 1984 Int'l Sympto. on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors", Tokyo, 1984-10, 135-140
- 12) Wu, S.T., Fung, A., 1972, "A Noncoherent Model for Microwave Emissions and Backscattering from the Sea Surface", J. Geophys. Res., 77(30), 5917-5929
- 13) 佐々木保徳ほか, 1984, "天空輝度温度の海面反射分の風速依存性", 1984年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 147-148
- 14) 佐々木保徳ほか, 1984, "6.7 GHz および 18.6 GHz マイクロ波の海面における放射ならびに放射特性の比較", 1984年度日本写真測量学会秋季学術講演会要旨集, 33-36

(原稿受理: 1984年9月26日)