

海面のマイクロ波放射特性に関する研究 (第1報)

—マイクロ波放射計による海面温度観測 (速報)—

佐々木保徳^{*1} 浅沼市男^{*1} 宗山 敬^{*1}

マイクロ波による海洋観測法を研究中である。ここでは、18.6 GHz のマイクロ波放射計により海面温度および海上大気中の水蒸気量を推定することを試みた。あわせて、大気輝度温度の海面反射成分の大きさと観測値の関係についてしらべた。海面温度および海面反射成分の推定には Wentz のモデルを用いた。解析においては、Wentz により 18.6 GHz の波長のマイクロ波に対して与えられた数値を用いている。大気中の水蒸気量の推定にさいしては、液状水分がないものと仮定した。また、水蒸気量は高度に対して指数則に従うものと仮定した。観測された水温は実測値より約 10K 高かった。大気中の水蒸気量は $5.5 \sim 7.5 \text{ g/cm}^2$ —全大気柱であった。また、海面での大気温度の反射成分は、垂直、水平両偏波とも観測角 $20^\circ \sim 60^\circ$ の範囲ではほとんど変化せず、実測値は Cox-Munk 理論による推定値とほぼ一致した。

Studies on the Properties of Microwave

Emissions of the Sea Surface (1st report)

— Sea Surface Temperature Observations with a Microwave Radiometer (short communications) —

Yasunori Sasaki^{*2} Ichio Asanuma^{*2} Kei Muneyama^{*2}

Studies have been made on the ocean observation method using microwaves. This is a preliminary report on the estimation procedure of sea surface temperature and water vapor content in the ocean atmosphere using a 18.6 GHz microwave radiometer. Dependency on the observation angle of magnitude of brightness temperature of the sky reflected at the sea surface is also reported. Wentz's model is adopted in order to estimate sea surface temperature and reflected component of brightness temperature of the sky. Numerical values of constants used here are those given for the 18.0 GHz microwave by Wentz. It is assumed in the prediction of water vapor content that no liquid water (cloud) exists and the abundance of water vapor drops with altitude in an exponential fashion.

The retrieved sea surface temperature was approximately 10K higher than actual temperature. The total content of water vapor in the entire atmospheric column ranges from between 5.5 and 7.5 g/cm^2 -whole atm. column. The reflected sky brightness temperatures at the sea surface showed little variations in the angular range of observation from 20 to 60 for both polarizations, and the actual values agreed with ones predicted by Cox-Munk theory.

*1 海洋保全技術部

*2 Marine Environment Department

1. ま え が き

この10年間の世界のマイクロ波リモートセンシングに関する研究の進歩はめざましい。特にマイクロ波衛星シーサット-Aが打上げられた1978年以降の進歩には目を見張るものがある。

米国には遠くおよばないが、近年わが国でもかなり活発な研究が行われるようになってきた。1986年には、わが国初の海洋観測衛星 MOS-1 が打ち上げられる予定である。この衛星には、マイクロ波放射計が他の2つの可視・赤外センサーとともに搭載されるため、マイクロ波センサー・データの解析法を早急に確立しなければならない。この要請に応えるため、われわれも実海域でのマイクロ波、他のデータの解析を行っている。MOS-1のマイクロ波放射計の周波数は23.8 GHzと31.4 GHzであるのに対し、われわれが現有する放射計の波長は18.6 GHzである。観測対象の波長特性の違いはあるが、解析手法そのものは原理的に同じである。マイクロ波放射計により観測できるとされている量や現象はいくつかあるが、ここでは海面温度を観測対象とする。あわせて、マイクロ波放射が大気中を伝搬するとき減衰効果をもたらす水蒸気量の推定法についても検討する。

海面のマイクロ波放射強度から海面の諸特性を観測する場合には、海面でのマイクロ波放射および大気中でのマイクロ波の伝達をモデル化することである。本報告では、Wentzのモデルを用いることとし、われわれが独自に検討中のモデルによる解析は機会をあらためて報告することとする。

なお、まだ十分な観測データが得られていないため、詳細な報告は別途行う。

2. 解 析 方 法

海面のマイクロ波放射を観測して海洋の情報を得ようとする場合、次の三つの過程に分けて考えなければならない。すなわち、

- ① 海面からのマイクロ波放射の放射過程
- ② 海面における天空からのマイクロ波放射の反射過程
- ③ 海面直上の上向マイクロ波放射の大気中での伝達過程

である。

海面の固有マイクロ波放射特性は、海面の状態に依存して変化する。最も大きく寄与する因子としては、水温、塩分などのほか海面の粗さ、ホワイトキャップの有無などがある。したがって、後2者と密接な関係をもつ海上風とも間接的に関係をもつことになる。

①の過程を考える場合には、静穏海面のマイクロ波放射率を計算し、海面の粗さによる変化分を実験的に導かれる関係から与えるというのが通常の方法である。これは、ホワイトキャップがない場合である。ホワイトキャップがある場合には、ホワイトキャップのない海面部分について前述の方法により放射率を求め、ホワイトキャップ部分の放射率を別の方法により求める。そのうち、両者の面積比にて合成した放射率をその海面の放射率とする。ホワイトキャップ部分の放射率を求めることは非常に難しいが、Stogrynが実験的に誘導した経験式があり、多くの場合これが用いられている。

②の過程を考える場合に問題となることは天空からのマイクロ波放射強度と海面での反射率の評価である。天空からのマイクロ波放射は大気物質に起因する。そのため、将来、衛星、その他からマイクロ波により海洋観測を行う場合は、同時に大気物質と気温の鉛直分布を測定しなければならない。また、(反射率) = 1 - (放射率) の関係にあることから、反射率を求めるうえで海上風の寄与を考えなければならない。

大気中を伝搬するマイクロ波放射は、放射計に到達するまでに大気物質による消散効果を受ける。大気中でのマイクロ波の消散は、主に吸収によるもので、雨滴や雪などがなければ散乱の影響は小さい。吸収に寄与する大気物質のうち主なものは酸素、水蒸気、液状水分(雲)などである。

Wentzのモデルは以下のとおりである。大気中でのマイクロ波放射輝度温度の伝達方程式は、

$$\frac{\partial T_B(K_j, \epsilon)}{\partial K_j} = -\alpha(K_j) \cdot [T_B(K_j, \epsilon) - T_a(K_j)] \quad \cdots (1)$$

で与えられる。

ここで、

T_B ; マイクロ波放射輝度温度

K_j ; 放射伝搬の方向ベクトル

ϵ ; 偏波面をあらわすパラメーター
 α ; 放射に対する大気吸収係数
 T_a ; 大気温度

である。

式(1)を解くと、海面での上向放射輝度温度は、

$$T_B(K_j, \epsilon)|_0 = E(K_j, \epsilon) \cdot T_s + \frac{1}{4\pi \cdot \cos \theta_j} \int_{2\pi} dK_s \cdot T_B(K_s) \times [\sigma^0(K_s, \epsilon, K_j, \epsilon) + \sigma^0(K_s, \epsilon^*, K_j, \epsilon)] \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

$E(K_j, \epsilon)$; K_j 方向への放射率
 T_s ; 海面温度
 θ_j ; K_j が鉛直方向からなす角(天頂角)
 K_s ; 海面へ入射する放射の方向ベクトル
 $T_B(K_s)$; K_s 方向から入射する放射の輝度温度
 σ^0 ; 2方向規格化散乱断面積

である。

式(2)はこのままでは解析的に解けないため、Wentz は以下のように取扱っている。

$T_B(K_s)$ については、 K_s 方向(基準方向)と K_r 方向(任意方向)との放射輝度温度の差を $\Delta(K_r, K_s)$ とすれば、

$$T_B(K_s)|_0 = T_B(K_r)|_0 + \Delta(K_r, K_s) \quad \dots\dots(3)$$

式(2)と式(3)から

$$T_B(K_j, \epsilon)|_0 = E(K_j, \epsilon) \cdot T_s + [1 - E(K_j, \epsilon)] \cdot T_B(K_r)|_0 + \frac{1}{4\pi \cdot \cos \theta_j} \times \int_{2\pi} dK_s \cdot \Delta(K_r, K_s) \cdot [\sigma^0(K_s, \epsilon, K_j, \epsilon) + \sigma^0(K_s, \epsilon^*, K_j, \epsilon)] \quad \dots\dots(4)$$

式(4)の右辺第3項(I_Δ ; 散乱積分)については、

$$I_\Delta = \omega \cdot U_* \cdot T_B(K_r)|_0 \cdot [1 - E(K_j, \epsilon)] \quad \dots\dots(5)$$

であることを報告している。

ここで、

ω ; 定数

U_* ; まさつ速度

である。

また、

$$T_B(K_r)|_0 = \tau(\theta_j, 0, H) \cdot T_c + \int_0^H dh \cdot \sec \theta_j \cdot \alpha(h) \cdot T_a(h) \cdot \tau(\theta_j, 0, h) \\ \approx \tau(\theta_j, 0, H) \cdot T_c + (1 - \tau) \cdot (T_a - \lambda \cdot d) \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

τ ; 大気透過率
 H ; 大気上面高度
 λ ; 気温減率
 d ; 大気の有効厚さ

である。

したがって、式(4)～式(6)から

$$T_B(K_j, \epsilon)|_0 = E(K_j, \epsilon) \cdot T_s + (1 + \omega \cdot U_*) \times [1 - E(K_j, \epsilon)] \cdot [\tau \cdot T_c + (1 - \tau) \cdot (T_a - \lambda d)] \quad \dots\dots(7)$$

放射率 E は以下により求める。

$$E = E_s + \Delta E \quad \dots\dots(8)$$

ここで、

E_s ; 静穏海面の放射率

$$E_s = 1 - \left| \frac{\eta \cdot \cos \theta_j - (\epsilon - \sin^2 \theta_j)^{0.5}}{\eta \cdot \cos \theta_j + (\epsilon - \sin^2 \theta_j)^{0.5}} \right|^2 \quad \dots\dots(9)$$

η, ϵ ; 複素誘電率

垂直偏波に対しては、 $\eta = \epsilon$

水平偏波に対しては、 $\eta = 1$

ΔE ; 海面の波による放射率の増加分

$$\Delta E = \Delta \bar{E} + b \cdot U_* (\theta_j - 49^\circ) \quad \dots\dots(10)$$

b ; 定数

$\Delta \bar{E}$ については

(i) $U_* \leq 65 \text{ cm/s}$ のとき

$$\Delta \bar{E} = m_1 \cdot U_*$$

(ii) $65 \text{ cm/s} < U_* < 75 \text{ cm/s}$ のとき

$$\Delta \bar{E} = m_1 \cdot U_* + 0.05(m_2 - m_1) \cdot (U_* - 65)$$

(iii) $75\text{cm/s} \leq U_*$ のとき

$$\Delta E = m_2 \cdot U_* - 70 \cdot (m_2 - m_1) \\ m_1, m_2; \text{定数}$$

である。

なお、式(8)はホワイトキャップがない海面の放射率である。ホワイトキャップが発生している場合は、ホワイトキャップ部分の放射率を求め、ホワイトキャップがない部分とホワイトキャップ部分の面積比により合成した放射率を用いなければならない。

大気透過率 τ に関する大気物質のうち主なものは酸素、水蒸気、液状水分（雲）である。それぞれの規格化吸収係数を $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_v, \bar{\alpha}_L$ 、吸収係数の温度感度係数を r_0, r_v, r_L 、さらに鉛直分布密度を $O(z), V(z), L(z)$ とすれば、

$$\alpha(z) = \bar{\alpha}_0 \cdot r_0 \cdot O(z) + \bar{\alpha}_v \cdot r_v \cdot V(z) \\ + \bar{\alpha}_L \cdot r_L \cdot L(z) \quad \dots\dots(11)$$

となり、

$$\tau(\theta_j, 0, H) = \int_0^H \exp[-\alpha(z)/\cos\theta_j] \cdot dz \quad \dots\dots(12)$$

となる。

ここでは、 r_0, r_v, r_L はすべて1と仮定する。また、観測時に肉眼的に特に雲が認められなかった日のデータを用いたため、 $L(z) = 0$ と仮定する。

また、大気物質および宇宙雑音による海面直上での下向放射輝度温度は、次式で与えられる。

$$T_B|_0 = \int_0^H T_a(z) \cdot \alpha(z) \cdot \sec\theta_j \cdot e^{-\int_0^z \alpha(z') \cdot \sec\theta_j \cdot dz'} \cdot dz \\ + \tau(\theta_j, 0, H) \cdot T_c \quad \dots\dots(13)$$

ここで、

T_c ; 宇宙雑音

である。

式(12)を用いれば、大気放射温度の観測から、水蒸気量が推定できる。なお、計算にあたっては、酸素および水蒸気の鉛直分布をそれぞれ次式によって仮定する。

$$O(z) = \rho_0 \cdot e^{-z/H_0}$$

$$V(z) = \rho_v \cdot e^{-z/H_v}$$

ここで、 ρ は海面での分布密度、 H はスケールハイトで $H_0 = 15.7\text{km}$, $H_v = 2.5\text{km}$ である。計算により求まるのは ρ_v であり、これを海面から大気上面まで積分して全水蒸気量を求める。

3. 観測方法

3.1 観測器

観測には、島田理化工業製の 18.6GHz マイクロ波放射計を用いた。表1にこの主要項目ごとの性能を示す。また、写真1にその外観を示す。

3.2 観測

海面のマイクロ波放射観測は、1983年9月から平塚沖の国立防災科学技術センター波浪等観測施設で実施している。海面からマイクロ波放射計までの高さは約20mである。海面マイクロ波放射とあわせて天空マイクロ波放射も観測している。

マイクロ波と同時に観測している項目は、海面水温、風向、風速、波高、波向、乾湿球温度（湿度）、雲量などである。

これらの観測データは、日本電気（株）製マイコン PC-8000 のフロッピー・ディスクに自動的にデジタル値でサンプリング記録される。これを海洋科学技術センターにおいて読み出し、DEC社製 VAX/11-780 で処理している。

4. 結果および考察

式(7)により求めた水温は両偏波とも 303K 以上となり、実測水温より約 10K 以上高くなっている。

式(8)により計算した 18.6GHz における放射率を図1に示す。このとき風速は $5 \sim 7\text{m}$ であり、例えば観測角 $\theta_j = 50^\circ$ のときの風浪による放射率増加分 ΔE は E に対して 1% 以下にすぎない。また、このときの全輝度温度および海表面での下向天空輝度温度の反射分を図2に示す。図中の上の $\bullet$ — は観測した全輝度温度、下の $\bullet$ — は全輝度温度、実測水温および放射率から計算した海表面での下向天空輝度温度の反射分である。また $\circ$ — は、C. Cox と W. Munk による海面勾配の2次元結合確立密度関数を導入して求めた天空輝度温度の海面反射分である。

一方、Wentz の式(7)の右辺第2項は、天空輝度温度の海面反射分に相当する。そこで、これから推定した天空輝度温度の海面反射分は、観測角が

50°のとき両偏波とも20～45Kとなった（これは大気中の水蒸気量に幅があるためである）。そして、水平偏波の方が垂直偏波よりもやや高くなった。また、Wentz の理論により求めたこれらの値を、実測値および Cox と Munk の波面勾配分布理論から求めた推定値と比べると、7～8 K以上大きくなっている。なお、図2から明らかなように、実測値と Cox と Munk の理論による推定値とは、観測角20～60°の範囲では非常に良く一致しており、マイクロ波放射観測には、観測角20～60°の範囲が効果的であることがわかる。われわれ自身の観測データの精度や解析の不十分さも考えられるが、Wentz モデル中のパラメーターの数値の決定法自体にも議論の余地がある。本来、このWentz モデルは、全地球規模的なモデルとして開発されたものであり、個々のパラメーターの数値の決定にさいしては全地球的規模の観測データを統計的に処理している。

また、式(13)により求めた大気中の全水蒸気量は5.5～7.5 g/cm²-atm.columnであった。この値はやや高いが、おそらく液状水分の寄与が加味されていると考えられる。

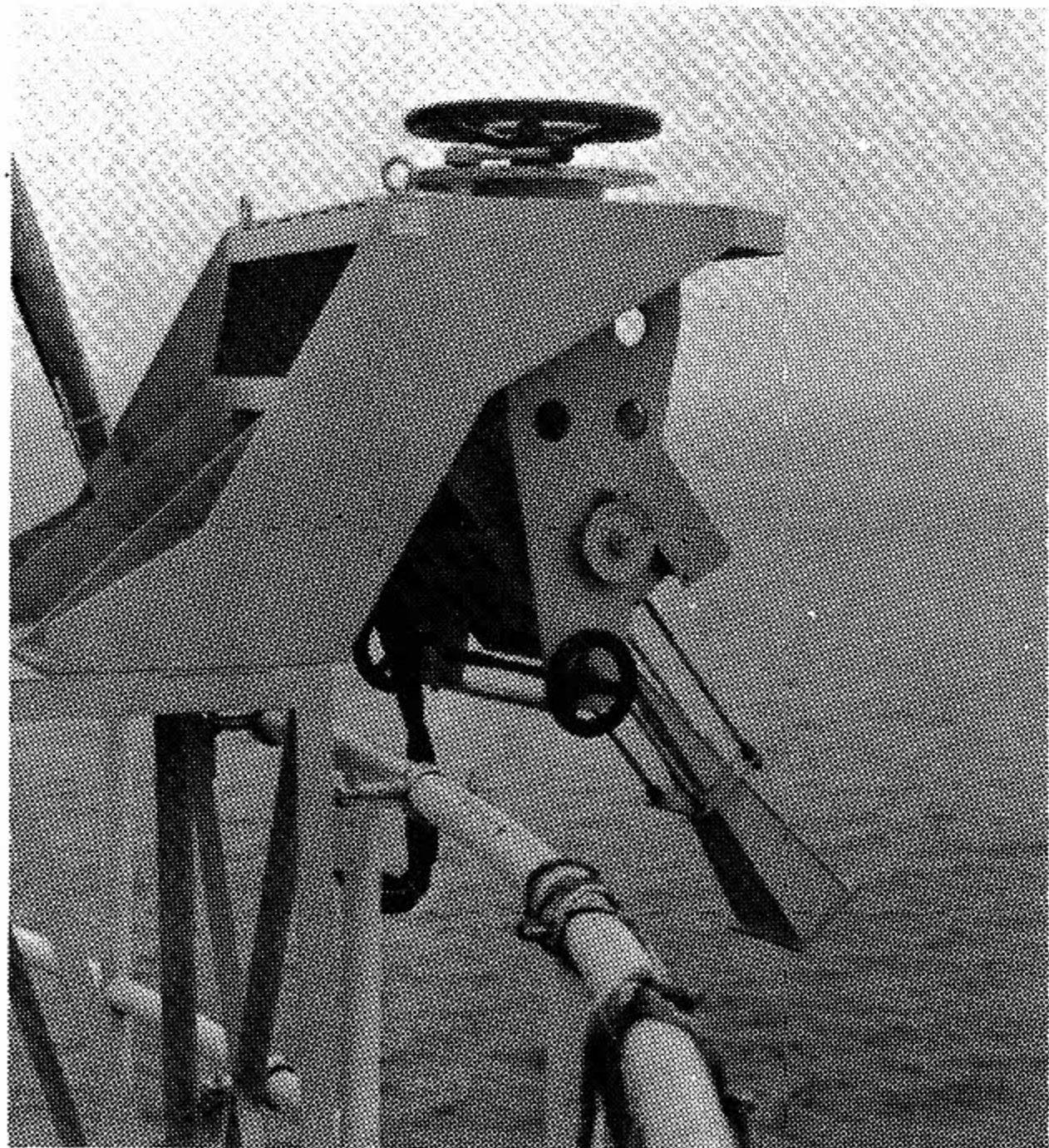


写真1 マイクロ波放射計の外観
Microwave radiometer (18.6 GHz)

表1 マイクロ波放射計の性能
Performances of microwave radiometer

項 目		仕 様
構 成		アンテナ部, 高周波部, 指示部, アンテナ駆動台, 電源部, 標準 雑音発生器
アン テ ナ 部	利 得	約 25 dB
	ビ ム 幅	約 10° (H, Vともに)
	サイドローブ	- 20 dB 以下
	V S W R	1.3 以下
高 周 波 部	偏 波	水平 (H) および垂直 (V)
	受信周波数	18.6 GHz
	受信帯域幅	約 200 MHz
	基準雑音指数	300 ～ 340 K
	総合雑音指数	4.9 dB
放 射 計 指 示 部	最 小 入 力 感 度	0.5 K rms
	方 式	自動ゼロバランス・ディック方式
	IF 中心周波数	約 100 MHz
	IF 帯 域 幅	約 100 MHz
	積 分 時 間	1, 10, 30, 60, 120 各 sec.
総 重 量		約 123 Kg

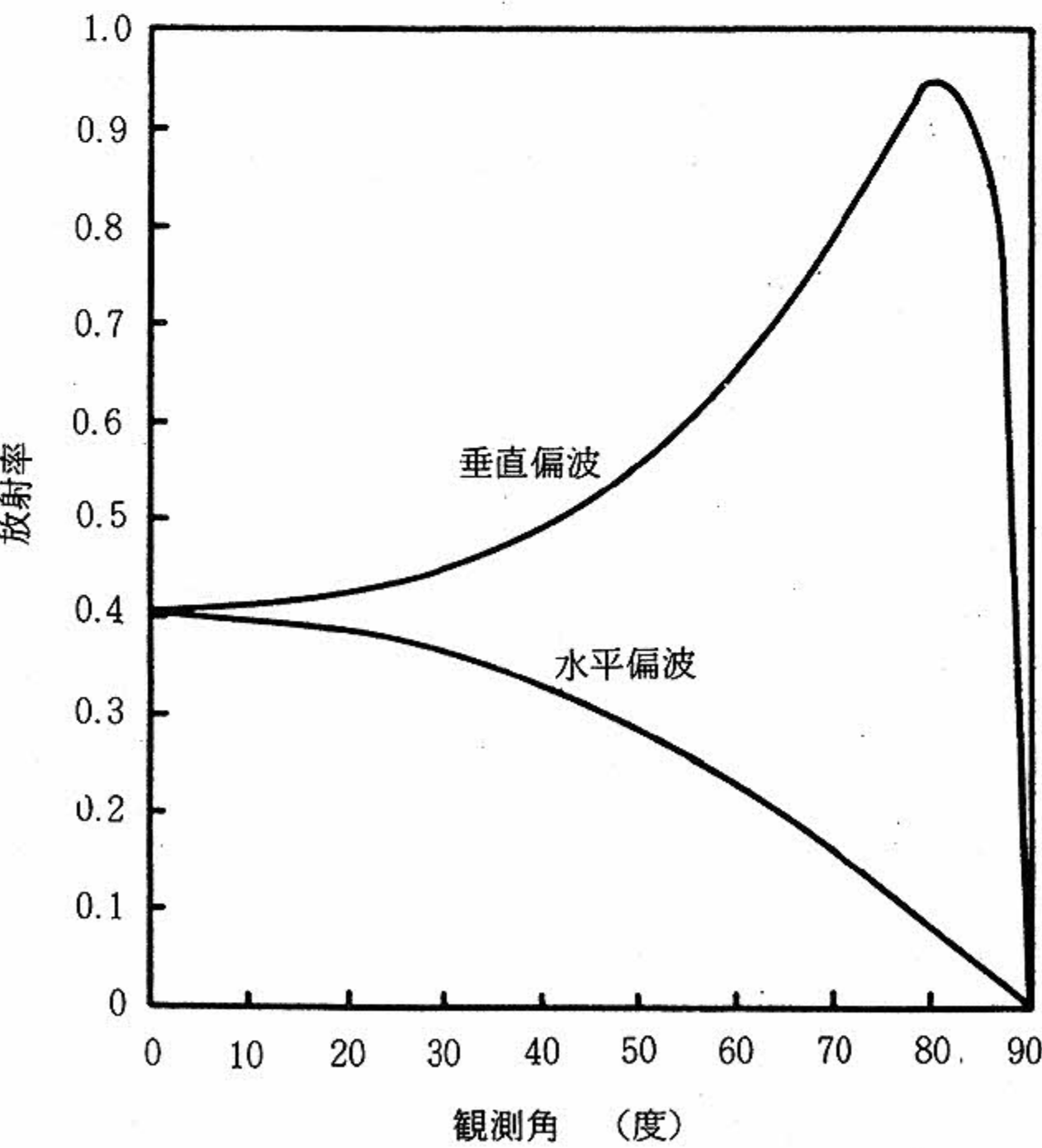


図1 観測角と放射率の関係
Angular dependency of emissivity

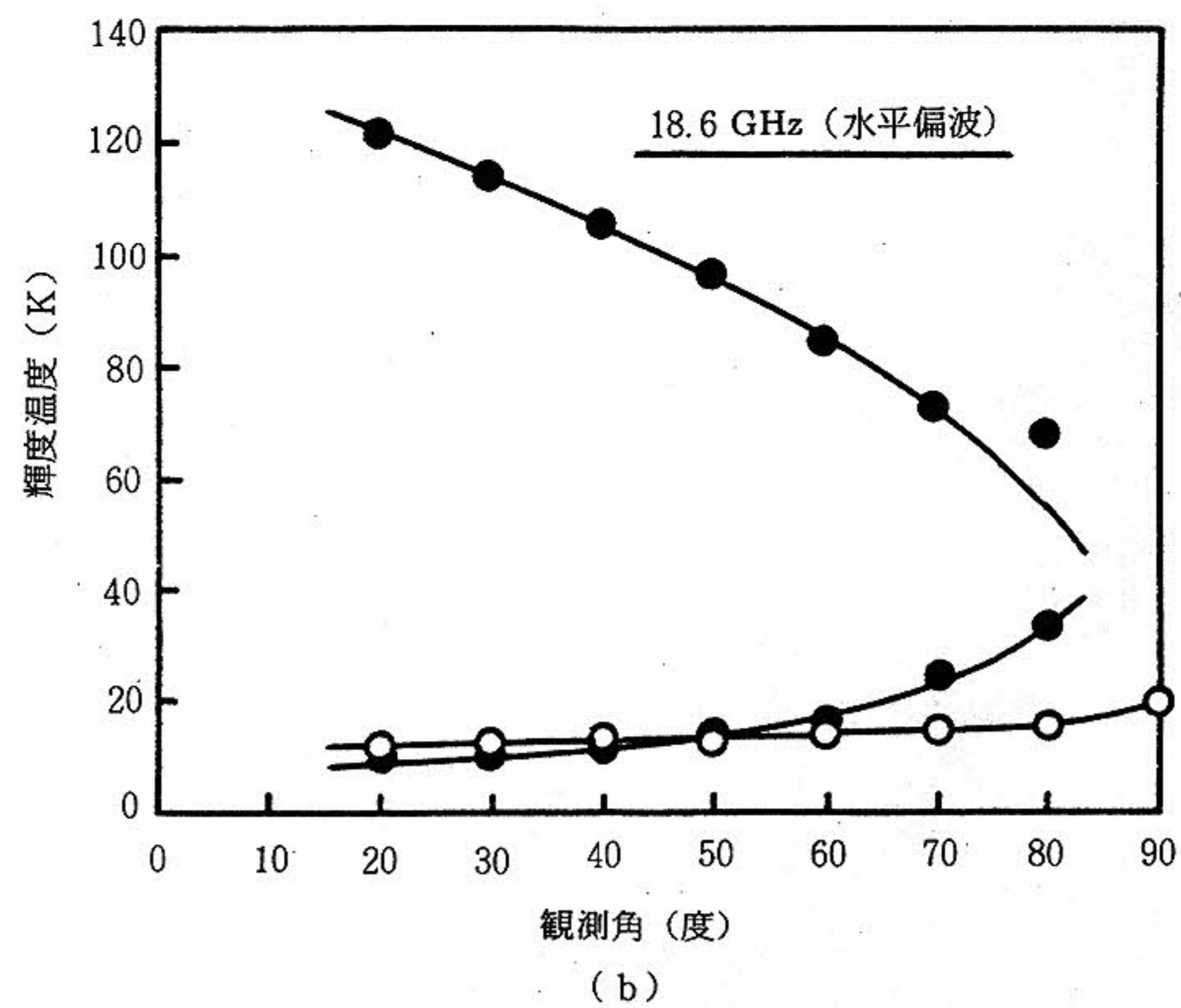
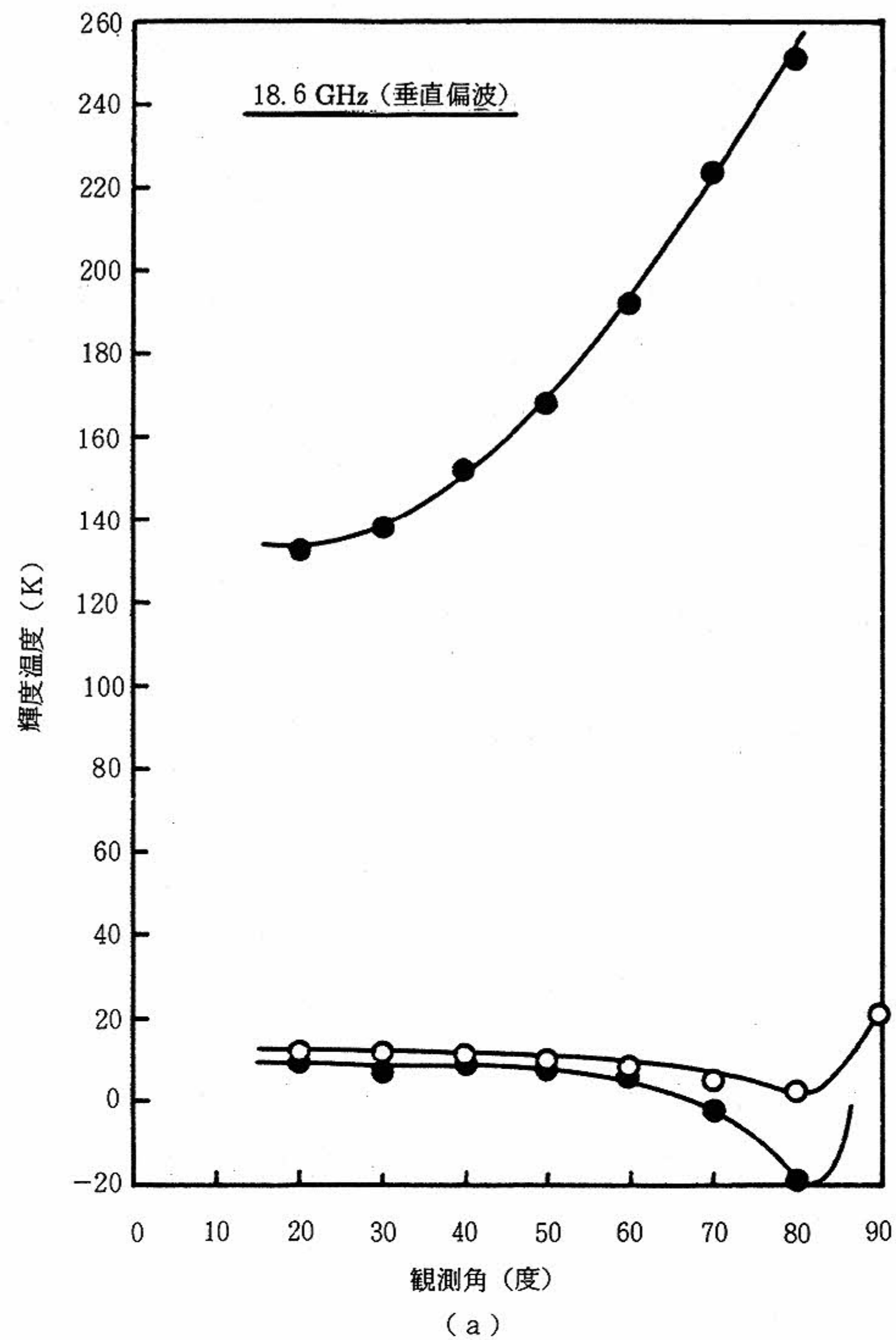


図2 観測角と輝度温度の関係
Angular dependency of brightness temperature

5. あとがき

本研究は現在継続中であるためデータも不十分で、完全な解析とは言えないが、マイクロ波放射観測による海洋および海上大気の観測が技術的には十分可能であることは明らかとなった。

われわれが観測したい海洋および海上大気に関する情報量は数多い。しかし、1チャンネルだけでの観測では到底多くは望めない。さいわいにもマイクロ波の放射は、海洋や海上大気中の諸量の変化に応じて変化するうえに、極めて強い波長特性を有する。そのため、いくつかの波長で同時に観測すれば複数の情報量が得られる。現在、この目的に沿って多波長観測データの解析法も検討中である。

なお、データ解析の基本となるマイクロ波放射モデルとしては、ここでは Wentz モデルを採用したが、今後はこのモデルの検討とあわせてわれわれ自身のモデルとも比較する。なお、今回は特に海表面での下向天空輝度温度の反射分推定に Cox & Munk の波面分布理論を応用したわれわれのモデルを報告したい。

なお本報告中で用いたデータを観測するにあたっては、国立防災科学技術センター平塚支所の方々に大変お世話になった。とくに、内藤玄一博士には観測に毎回立会っていただいた。心から謝意を表する。

文 献

- 1) Wentz, F.J., 1983, "A Model Function for Ocean Microwave Brightness Temperatures", *J. Geophys. Res.*, 88 (C3), 1892 - 1908
- 2) Barrett, A.H. and Chung, V.K., 1962, "A Method for the Determination of High Altitude Water-Vapor Abundance from Ground-based Microwave Observations", *J. Geophys. Res.*, 67 (11), 4259 - 4266
- 3) Wilheit, T.T.Jr., 1978, "A Review of Application of Microwave Radiometry to Oceanography", *Boundary-Layer Meteorol.*, 13, 277 - 293
- 4) Wilheit, T.T., et al., 1980, "Atmospheric Corrections to Passive Microwave Observations of the Ocean", *ibid.*, 18, 65 - 77
- 5) Swift, C.T., 1980, "Passive Microwave Remote Sensing of the Ocean", *ibid.*, 18, 25 - 54
- 6) Wentz, J.F., et al., "Dependence of Sea-Surface Microwave Emissivity on Friction Velocity as derived from SMMR/SASS", *Oceanography from Space*, Gower, J.F.R. ed. (1981), 741 - 749, Plenum Press,
- 7) Gautier, C., 1981, "Information Content of the SEASAT SMMR Brightness Temperatures for Sea Surface Temperature Retrieval", *ibid.*, 727 - 734
- 8) Taylor, P.K., "The Scanning Multichannel Microwave Radiometer - An Assessment". Allan, T.D., *Satellite Microwave Remote Sensing* (Ellis Horwood Series in Marine Science), (1983), 462 - 498, John Wiley & Sons
- 9) Francis, C.R., et al., "The Evaluation of SMMR Retrieval Algorithms", *ibid.*, 479 - 498
- 10) Sasaki, Y., et al., "On the Effects of Ocean Surface Roughness on Emissivity and Reflectivity of Microwave Radiation", to be presented at the Symposium on Wave Breaking, Turbulent Mixing and Radio Probing of the Ocean Surface, Sendai (Japan), 1984 - 7
- 11) —, "Effects of Sea Surface Roughness on Surface Brightness Temperature", to be presented at 1984 Int'l Symposium on Noise and Clutter Rejection of Radars and Imaging Sensors, Tokyo, 1984 - 10
- 12) 磯崎一郎, 1981, "マイクロ波放射計による大気と海洋の観測", 航水研ノート 空と海, (4), 71 - 98
- 13) 根本俊雄ほか, "マイクロ波リモートセンシングによる海洋の油汚染監視技術", 電子技術総合研究所調査報告 (202), (1979)