

マイクロ波放射伝達モデルによる冠雪の マイクロ波物性推定

佐々木保徳^{*1}

筆者は、既に冠雪～海水系からのマイクロ波放射が、多重散乱のため強い拡散放射であることと、この散乱過程は、拡散放射の伝達過程の対称性のため、後方散乱のみが減衰に寄与することから、単一粒子に入射するペンシル・ビームの散乱とは大きく異なることを報告している。

このマイクロ波相互作用モデルにより、海水上の冠雪層のマイクロ波特性、例えば、冠雪表面輝度温度の冠雪深度依存性や、吸収および後方散乱係数など、を推定することができる。また、このモデルにより、冠雪層中のマイクロ波放射伝達過程も推定することができる。冠雪層のマイクロ波特性の推定結果は、観測値と比較して合理的なものであった。

キーワード：マイクロ波，多重散乱，拡散放射，冠雪，モデル，吸収係数，後方散乱係数

Estimation of Microwave Properties of Snow Layer with Microwave Radiative Transfer Model

Yasunori SASAKI^{*2}

Author has already reported that microwave emission from snowcover-sea ice system is highly diffused due to multiple scattering, and the scattering process is quite different from that of pencil beam incidence by single snow particle, since only backward scattering contributes to attenuation due to the symmetry in propagation process of diffused radiation.

This microwave interaction model enables us to estimate microwave properties of snow cover on sea ice such as snow depth dependence of brightness temperature of snow cover surface and absorption and back scattering coefficients. Even the radiative transfer process in the snow layer can be estimated with this model. The estimation of the microwave properties of snow layer showed very reasonable results comparable to actual observation.

Key words : snowcover, sea ice, multiple scattering, absorption, back scattering

* 1 海洋観測研究部

* 2 Marine Research Department

はじめに

海水および海水上の冠雪が、氷海における熱輸送過程において果たす重要性については既に述べたとおりである。そして、これらの観測には、マイクロ波ラジオメトリが効果的であると言われてきたこともはや周知のとおりである。しかし、冠雪をマイクロ波ラジオメトリにより正確に観測する方法はまだ確立されたわけではないし、海水にあっては、大抵の場合は冠雪を伴い、冠雪を通して観測することになるため、海水の観測においても冠雪の正確な観測が重要となる。

本研究では、オホーツク海における観測から誘導した海水上の冠雪中のマイクロ波伝達モデルを利用して、マイクロ波に対する冠雪の物性推定法を検討し、冠雪のマイクロ波ラジオメトリ観測に応用するための方法を議論するとともに、冠雪をとおして海水を観測する上での問題点等を議論する。

1 理 論

1.1 氷上冠雪中のマイクロ波放射伝達モデル

氷上冠雪を垂直観測した場合、氷上冠雪中を上向きおよび下向きに伝搬するマイクロ波の輝度温度は、以下のようにならされる。

$$\begin{cases} A(z) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{k}{r} \right] C_1 e^{rz} + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{k}{r} \right] C_2 e^{-rz} + E & (1) \\ B(z) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{k}{r} \right] C_1 e^{rz} + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{k}{r} \right] C_2 e^{-rz} + E & (2) \end{cases}$$

ただし

$A(z), B(z)$: 冠雪層内をそれぞれ上方および下方に進行するマイクロ波の強度

z : 冠雪層の下端から測る深度

s, k : 拡散放射に対する全散乱係数および吸収係数

E : 完全黒体放射強度

$$r = \sqrt{(2s+k)k} \quad (r > 0)$$

C_1, C_2 : 積分定数

$$C_1 = \frac{2rb\{T_B^{\downarrow sky} - E\}}{b(r+k)e^{rZ} - a(r-k)e^{-rZ}}$$

$$C_2 = -\frac{2ra\{T_B^{\downarrow sky} - E\}}{b(r+k)e^{rZ} - a(r-k)e^{-rZ}}$$

Z : 冠雪の全深度

$T_B^{\downarrow sky}$: 天空輝度温度

$T_B^{\uparrow ice}$: 海水の輝度温度

γ_{ice} : 海水の反射率

$$a = (r-k) - \gamma_{ice}(r+k)$$

$$b = (r+k) - \gamma_{ice}(r-k)$$

である。

1.2 輝度温度の深度依存性モデル

(1)式において、寄与の小さい項を無視し、 $z=Z$ とおき、輝度温度の観測値を当てはめることにより、輝度温度の深度依存性が(3)式で与えられる。(3)式は、6.7GHzの場合であり、18.6GHzの場合も同様である。

$$T_B^{\uparrow}(Z) = T_B^{\uparrow ice} + 53.2[(1 - \exp(-1.80 \times 10^{-2} Z))] \quad (3)$$

ここで

Z : 冠雪の深度 (cm)

$T_B^{\uparrow ice}$: 海水の輝度温度 (K)

$T_B^{\downarrow sky}$: 冠雪表面輝度温度 (K)

そして、(3)式により、冠雪表面の輝度の深度依存性、その他を定量的に評価することができる。

1.3 冠雪海水の反射率

冠雪海水の反射率は、天空放射に対する補正、その他を推定する上で重要である。これには、海水の効果が現れる場合と、冠雪深度が十分大きく、その影響が現れない場合とがある。

1.3.1 冠雪深度が小さく、海水の影響が現れる場合

(1)式および(2)式から、反射率は(4)式で与えられる。

$$\frac{A(Z)}{B(Z)} = \frac{(r-k) \cdot C_1 e^{rZ} + (r+k) C_2 e^{-rZ} + 2rE}{(r+k) \cdot C_1 e^{rZ} + (r-k) C_2 e^{-rZ} + 2rE} \quad (4)$$

1.3.2 冠雪が十分大きな深度を持つ場合

(1)式において $z=Z$ とおくと冠雪深度が Z のときの輝度温度が(4)式で与えられる。

$$A(Z) = \frac{\{b(r-k)e^{rZ} - a(r+k)e^{-rZ}\} \{T_B^{\downarrow sky} - E\}}{b(r+k)e^{rZ} - a(r-k)e^{-rZ}} + E \quad (4)$$

冠雪深度が十分に大きい場合は、 $Z \rightarrow \infty$ とすると(4)式から(5)式が導かれる。

$$\begin{aligned} \lim_{Z \rightarrow \infty} A(Z) &= A(\infty) = \frac{r-k}{r+k} \cdot \left[T_B^{\downarrow sky} - \frac{E}{k} \right] + \frac{E}{k} \\ &= \frac{2kE}{r+k} + \frac{r-k}{r+k} \cdot T_B^{\downarrow sky} \end{aligned} \quad (5)$$

結局、冠雪深度が十分大きい場合の反射率は、(6)式で与えられることがわかる。

$$R_{\infty} = \frac{r-k}{r+k} \quad (6)$$

また、冠雪感度が十分大きくなった場合の輝度温度は、(5)式で与えられる輝度温度に近づくことがわかる。

1.4 マイクロ波との相互作用定数

深度が十分大きい場合の輝度温度と、天空輝度温度の観測値を(5)式にあてはめると、 r と K の関係が得られる。

一方、任意の冠雪深度Zにおける輝度温度の観測値を(1)式にあてはめるとrが決定できる。したがって、吸収係数kが決定でき、rとKとsの関係から後方散乱係数sが決定できる。

2 データおよび観測

冠雪のマイクロ波特性を調べるために用いたデータは、1987年と1988年に、オホーツク海沿岸で観測したもので、それぞれ、紋別港および沙留港の港内氷上の冠雪を対象としている。この他、航空機により、1988年～1992年にサロマ湖（汽水湖）および流水（いずれも冠雪氷）のマイクロ波を、1991年～1992年に海水面のマイクロ波をそれぞれ観測した。特に、海水面の観測データは、機器類のバイアス較正等に使用している。港内氷は自然定着氷であり、冠雪はその上の積雪層である。観測の方法の詳細は、既に述べたとおりである。

なお、輝度温度観測値は、雪氷の物理温度変化に伴う輝度温度変化、湿潤度や構造の変化に伴う輝度温度変化、および観測機器の環境条件依存性（特に環境温度依存性）等、環境条件や機器的条件に非常に敏感である。特に、雪氷の湿潤度に対する依存性が大きい。そこで、まず雪氷がほぼ乾燥状態にあると考えられる気温 -4°C 以下での観測データを採用した。さらに過冷却に伴う輝度温度変化の影響を除くため、 -8°C 以下のデータを除いた。それでもなお、バラツキが大きなデータも認められたため、統計的処理を行った。

3 結果および検討

図1は、1987年および1988年の2～3月に観測した冠雪海水の輝度温度の深度依存性を示したものである。2周波数における輝度温度は、深度とともに上昇するが、70～100cm近辺で交差する。

次に、理論において述べた方法にしたがって、冠雪のマイクロ波に対する後方散乱係数および吸収係数を決定した。その結果、それぞれ次の範囲の値を得た。これらの値はUlabyが報告する値とほぼ一致する。

後方散乱係数 s

$$s = 1.16 \sim 1.29 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \text{ (6.7GHz)}$$

$$s = 8.28 \sim 5.56 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \text{ (18.6GHz)}$$

吸収係数 k

$$k = 7.38 \sim 9.12 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \text{ (6.7GHz)}$$

$$k = 3.41 \sim 2.18 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1} \text{ (18.6GHz)}$$

ところで、冠雪層によるマイクロ波の散乱過程は多重散乱であるが、個々の散乱過程はMie散乱である。した

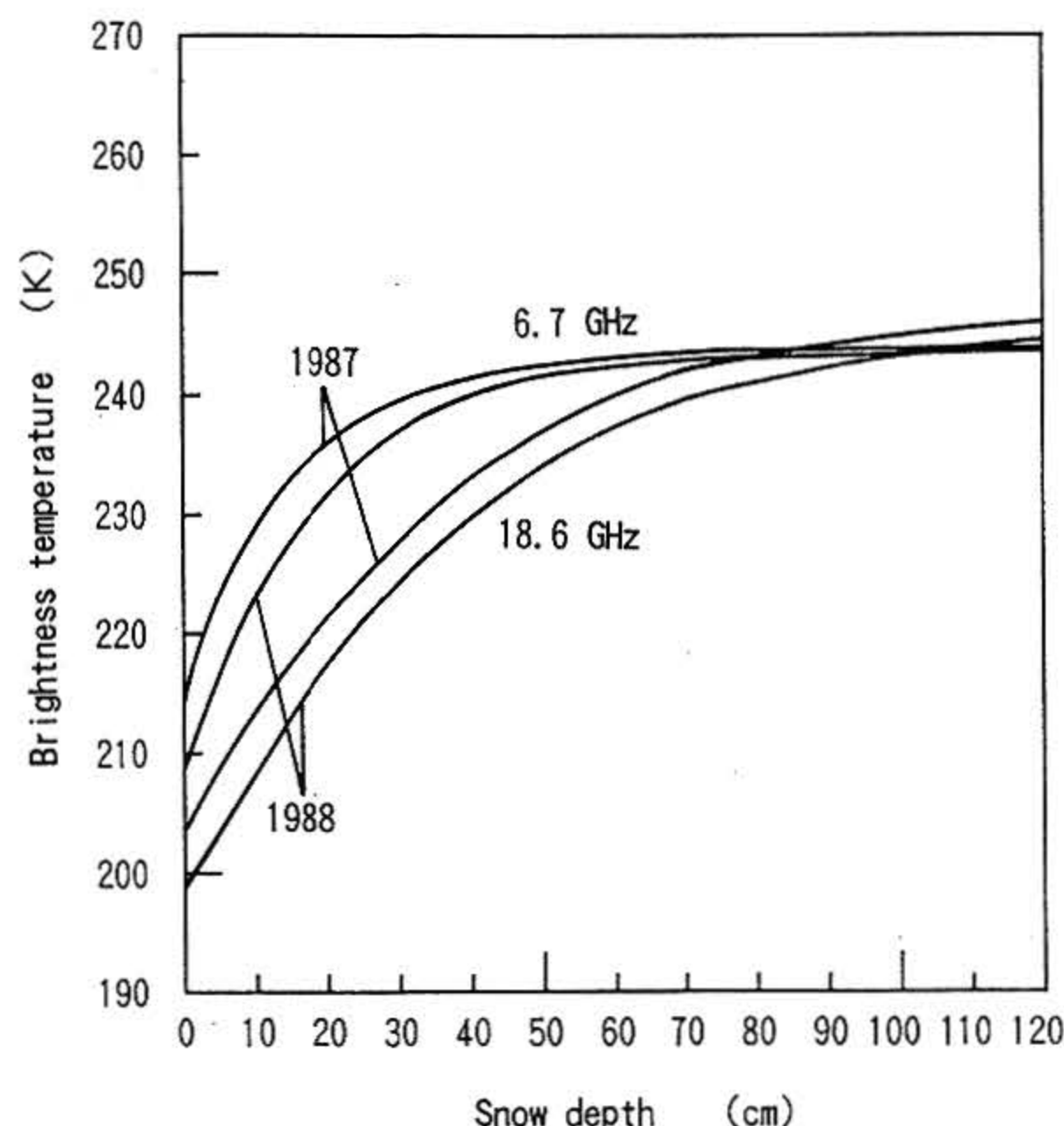


図1 垂直観測時の6.7GHzと18.6GHzの冠雪表面輝度温度の冠雪深度依存性

Fig. 1 Snow depth dependence of snow surface brightness temperature at 6.7 and 18.6 GHz. at normal incidence.

がって、散乱、吸収ともに波長依存性がある。そこで、散乱係数および吸収係数に対して以下の波長依存性を仮定する。

$$\frac{s(18.6\text{GHz})}{s(6.7\text{GHz})} = \left[\frac{18.6}{6.7} \right]^m \quad (7)$$

$$\frac{k(18.6\text{GHz})}{k(6.7\text{GHz})} = \left[\frac{18.6}{6.7} \right]^n \quad (8)$$

(7)式および(8)式に、上述のsおよびkの値を当てはめると、sおよびkの周波数依存性指数mおよびnは以下のように決定される。

$$m = 1.43 \sim 1.92$$

$$n = 0.85 \sim 1.50$$

したがって、任意の周波数 ν (GHz)における後方散乱係数および吸収係数は(9)式および(10)式で与えられる。

$$s(\nu) = s_{6.7\text{GHz}} \cdot (\nu/6.7)^m \quad (9)$$

$$k(\nu) = k_{6.7\text{GHz}} \cdot (\nu/6.7)^n \quad (10)$$

(9)式および(10)式により推定した、後方散乱係数および吸収係数の波長依存性を示したものが図2である。

また、(6)式により与えられる、十分深度の大きな冠雪層の反射率は、sとkを用いて表すと(11)式のようにになる。

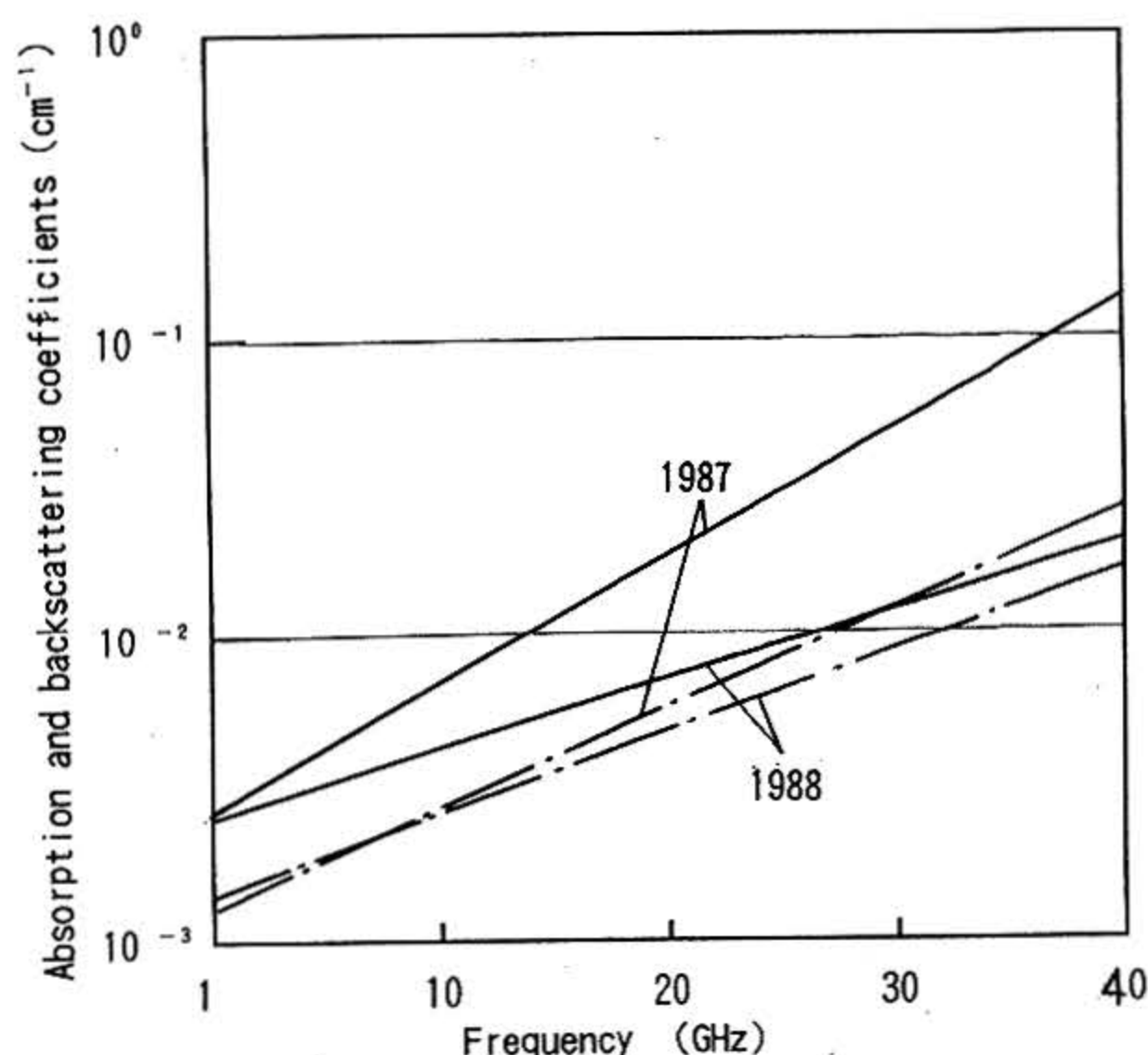


図2 吸収係数と後方散乱係数の周波数依存性
Fig. 2 Frequency dependence of absorption (—) and back-scattering (---) coefficients.

$$R_{\infty} = \frac{[s(\nu)(2s(\nu) + k(\nu))^{1/2} - k(\nu)]}{[s(\nu)(2s(\nu) + k(\nu))^{1/2} + k(\nu)]}$$

$$= \frac{[\alpha \cdot \nu^P + 1]^{1/2} - 1}{[\alpha \cdot \nu^P + 1]^{1/2} + 1} \quad (11)$$

ここで,

$$\alpha = 0.142 \sim 0.182$$

$$P = 0.0335 \sim 0.422$$

である。そして、図3は(11)式により推定した、反射率の波長依存性を示したものである。(11)式による推定結果は、Matzleらの結果と非常によく一致している。

さらに、任意の周波数における後方散乱係数および吸収係数が(9)式および(10)式により推定できるため、任意の周波数において任意の深度の冠雪表面の輝度温度が(1)式により推定できる。そこで、1～40GHz帯における冠雪表面の輝度温度の深度依存性を示したものが図4である。図4から明らかなように、冠雪表面の輝度温度は、周波数が高いほど深度に対して敏感である。そして、深度が10cm以下の冠雪の観測には周波数が20～30GHzの範囲が適すると考えられる一方、深度1m以上の冠雪の観測には5～10GHzの範囲が適すると考えられる。そこで、これを確認するために、深度に対する輝度温度の応答感度、すなわち、深度に対する輝度温度の微係数を示したものが図5である。図5から明らかなように、冠雪深度が小さい場合は、高い周波数ほど応答感度が高いが、周波数とともに急激に低くなり、深度が1m以上になると高周波数ではほとんど応答しなくなる。

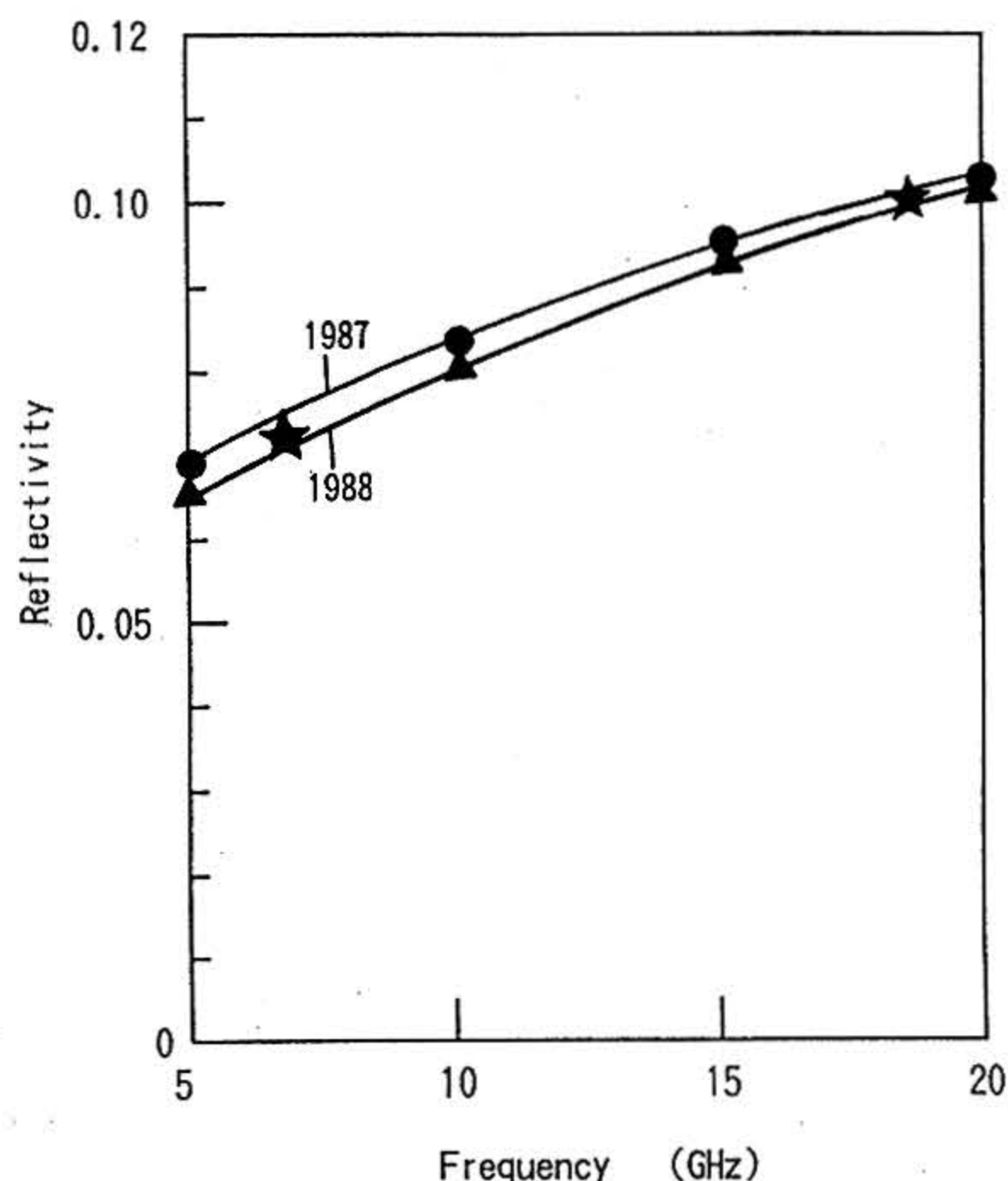


図3 モデルにより推定した反射率の周波数依存性
Fig. 3 Model estimation of frequency dependence of reflectivity.

4 結論

- (1) 冠雪海水の輝度温度は、冠雪の深度とともに単調増加する。
- (2) 冠雪表面の輝度温度は、周波数が高いほど深度の変化に敏感であるが、逆に、周波数が高いほど、マイクロ波と冠雪との相互作用は平衡に達する。そのため、浅深度の冠雪の観測には高い周波数が適するが、大深度の冠雪の観測には低い周波数が適する。
- (3) マイクロ波と冠雪層との相互作用係数は、周波数とともに単調に増加し、極大値も極小値もない。
- (4) 本論文で提案した反射モデルが与える反射率の推定値は、周波数とともに単調増加するのみである。また、反射率の推定値は、これまでに報告されている観測値と非常に良い一致を示した。

おわりに

海水上の冠雪に限らず、地球上の積雪の観測には多くの努力が傾注されてきたが、リモートセンシングによる観測、特にマイクロ波ラジオメトリによる観測では、積雪に関する情報を少しでも多く得るために様々な試みがなされてきた。積雪の情報を得るためには、マイクロ波と積雪層との相互作用過程を深く理解するために、積雪層のマイクロ波物性を理解する必要がある。その方法として、積雪の誘電率を測定し、これをもとに物性を推定

する方法がある。しかし、この方法では、現場から試料を採取しなければならないし、積雪層の物性は冠雪的測

定（推定）となるため、実際の積雪層の構造や状態を十分正しく反映させることに困難があるかも知れない。そ

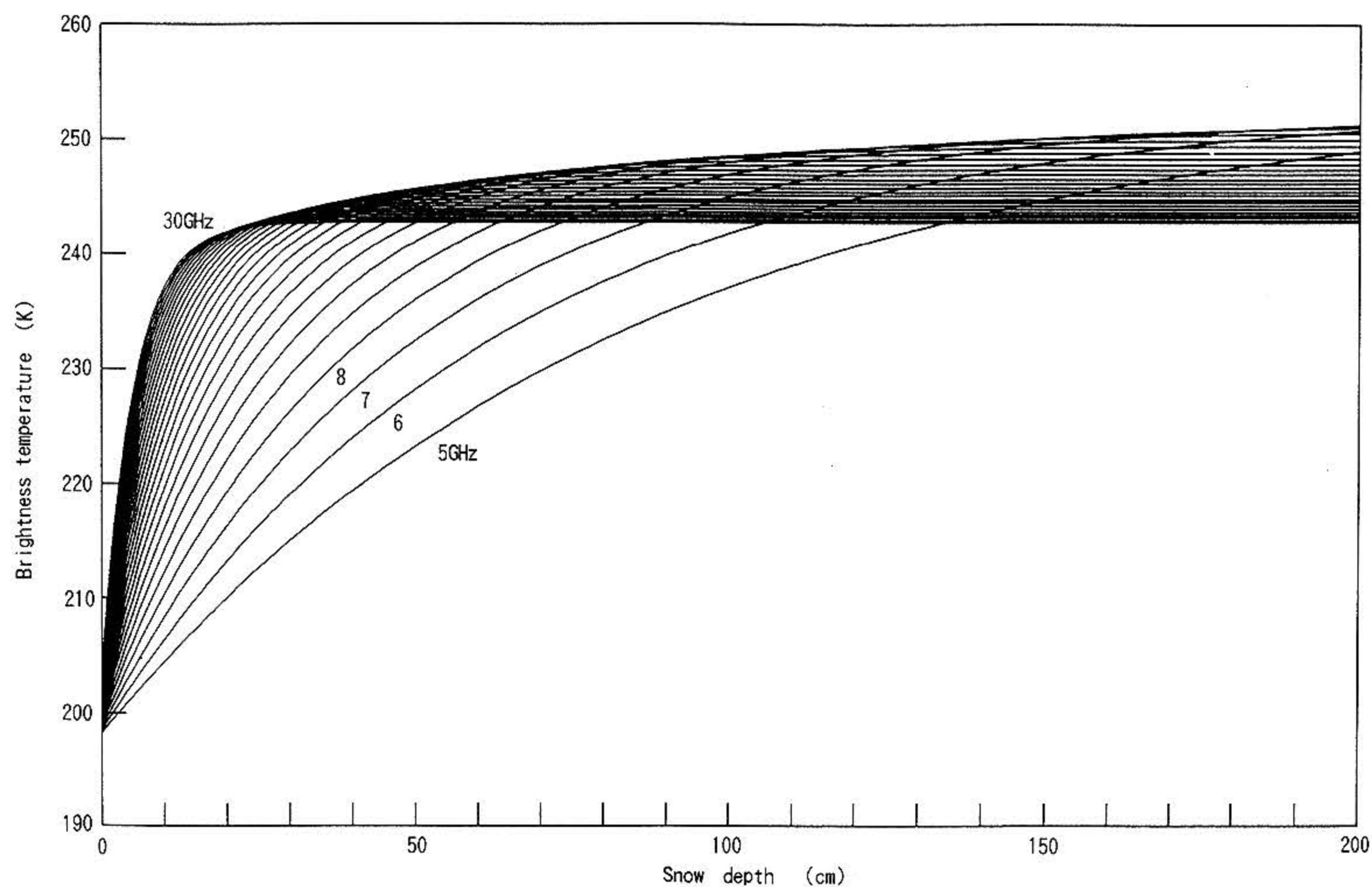


図4 冠雪輝度温度の冠雪深度および周波数に対する依存性
Fig. 4 Depth and frequency dependence of snow brightness temperature.

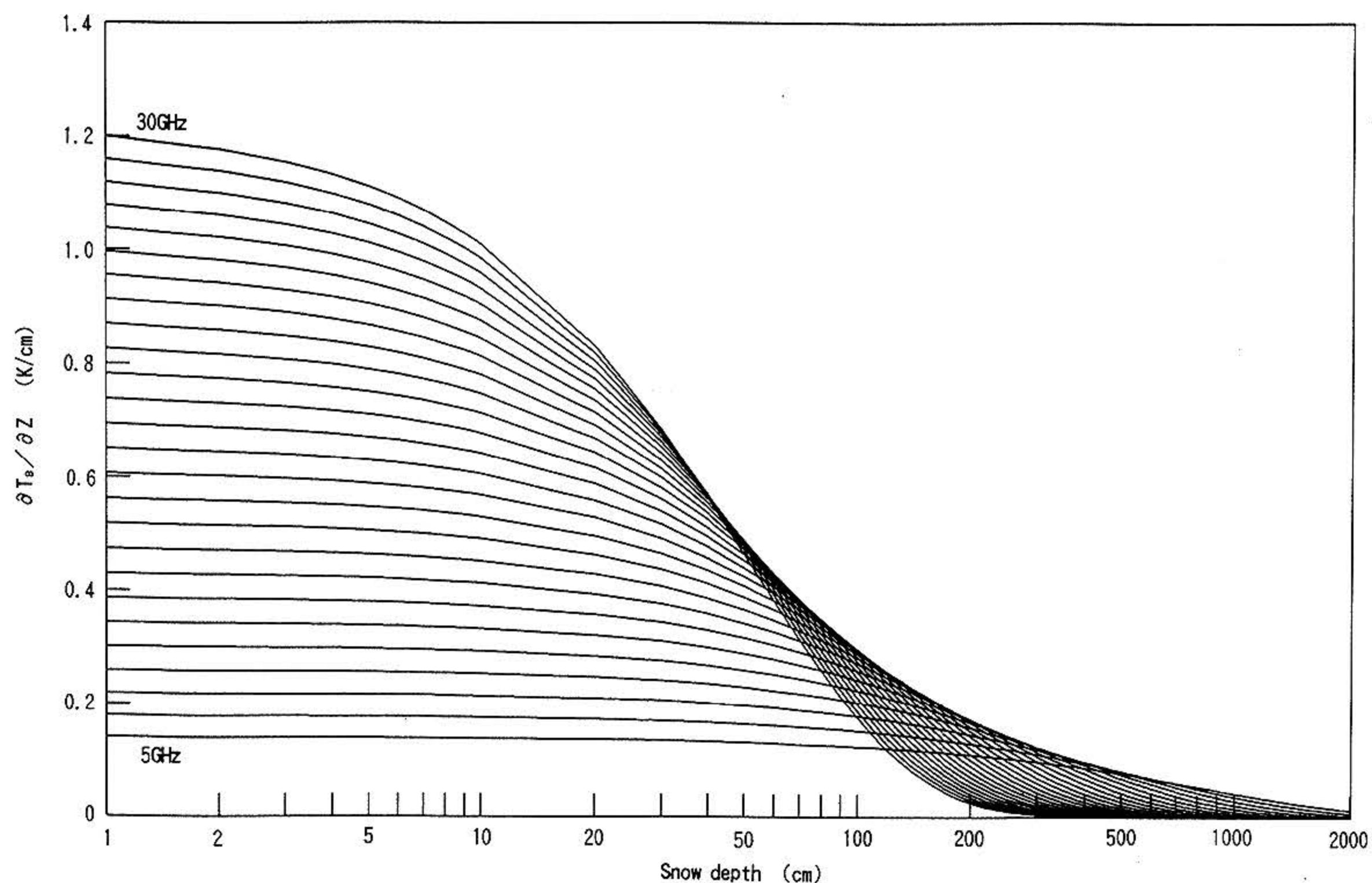


図5 冠雪輝度温度の冠雪深度変化に対する応答感度（下から順に5GHzから30GHzまで1GHzごと）
Fig. 5 Snow depth sensitivity of brightness temperature (5 to 30 GHz at every 1 GHz from top to bottom).

の点では、この方法のように、現地での放射の直接測定から諸物性を推定するという方法は、より実際の状態に即していると言えるかも知れない。ただし、方法としては検討すべき問題が多々あり、今後さらに事例を蓄積し、洗練する必要がある。

参考文献

- 1) Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung, "Microwave remote sensing, active and passive, vol. 3, From theory to applications", Artech House Inc., (1986). pp.1478-1517, pp. 1597-1646.
- 2) Kubelka, P., "New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part-1", J. Opt. Soc. Am., **38** (5), 448-457, (1948).
- 3) Yamada, N., and S. Fujimura, "Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three-color reflectance and transmittance", Appl. Opt., **30** (27), 3964-3972 (1991).
- 4) Sasaki, Y., and I. Asanuma, "Observation of the heat flux between atmosphere and ice sea", Proc. Int'l Symp. Japanese Pacific Climate Study, 143-152, Tukuba Science City, 19-20 Oct., (1989).
- 5) Lohanick, A.W., and T.C. Gremfel, "Variations in brightness temperature over cold first-year sea ice near Tuktoyaktuk, Northwest territories", J. Geophys. Res., **91**, C4, 5133-5144, (1986).
- 6) Comiso, J.C., "Sea ice effective microwave emissivities from satellite passive microwave and infrared observations", J. Geophys. Res., **88**, C12, 7686-7704.
- 7) Svendsen, E., K. Kloster, B. Farrelly, O.M. Johannessen, J.A. Johannessen, W.J. Campbell, P. Gloersen, D. Cavalieri, and C. Matzler, "Norwegian Remote Sensing Experiment: Evaluation of the Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer for sea ice research", J. Geophys. Res., **88**, C5, 2781-2791, (1983).
- 8) Hallikainen, m.t., "Retrieval of snow water equivalent from Nimbus-7 SMMR data: Effect of land-cover categories and weather conditions", IEEE J. Oceanic Eng., **OE-9** (5), 312-376, (1984).
- 9) Kim, Y.S., R.G. Onstott, and R.K. Moore, "The effect of a snow cover on microwave backscatter from sea ice", IEEE J. Oceanic Eng., **OE-9** (5), 383-388, (1984).
- 10) Gloersen, P., W. Nordberg, T.J. Schmugge, and T.T. Wilheit, "Microwave signature of first-year and multi-year sea ice", J. Geophys. Res., **78** (18), 3564-3572, (1973).
- 11) Okamoto, K., R.K. Hawkins, and C.E. Livingstone, "Remote sensing of Arctic sea-ice by the microwave scatterometer and microwave radiometer", J. Japan Soc. Remote Sens., **3** (3), 17-42, (1983) (in Japanese).
- 12) Tiuri, M., A.H. Sihvola, E.G. Nyfors, and M.T. Hallikainen, "The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies", IEEE J. Oceanic Eng., **OE-9** (5), 377-382, (1984).
- 13) Matzler, C., H. Aebischer, and E. Schanda, "Microwave dielectric properties of surface snow", IEEE J. Oceanic Eng., **OE-9** (5), 366-371, (1984).
- 14) Hall, D.K., J.L. Foster, A.T.C. Chang, and A. Rango, "Freshwater ice thickness observations using passive microwave sensors", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **GE-19** (4), 189-193, (1981).
- 15) Cavallieri, D.J., S. Martin, and P. Gloersen, "Nimbus-7 SMMR observations of the Bering Sea ice cover during March 1979", J. Geophys. Res., **88** (C5), 3913-3919, (1986).
- 16) 佐々木保徳・藤森貞夫, "海水上冠雪のマイクロ波放射伝達モデルの誘導と評価", 日本リモートセンシング学会誌, **vol. 14, No. 1**, pp. 3~14. (1994).
- 17) Sasaki, Y., H. Nakamura, and S. Fujimura, "Depth dependence of snow brightness temperature on sea ice," Proc. 1993 Int'l Symp. Geoscience and Remote Sens., Tokyo, Aug. 18-21, (1993). pp. 331-333.
- 18) 佐々木保徳, "海水上の冠雪のマイクロ波放射伝達モデル", JAMSTECTR, No. 32, (1995) (in press).

(原稿受理: 1995年5月8日)