

2 周波マイクロ波ラジオメトリによる水蒸気と 雲水の観測モデル

佐々木保徳^{*1} 内藤 玄一^{*2} 田辺 光教^{*2}

本研究の目的は、衛星が同時に観測する2チャンネル輝度温度から水蒸気量と雲水量を推定するためのマイクロ波モデルを実験的に誘導することである。議論に採用した周波数は22.23GHzと31.4GHzである。著者らはまた、推定される水蒸気量および雲水量の誤差の観点から、衛星が観測する輝度温度の許容誤差を評価するための誤差評価モデルも誘導した。海面から衛星に至るまでのマイクロ波放射の伝達過程は、上向き及び下向きの天空輝度温度と透過率をパラメータとして含み、これら2つのパラメータで記述することができるが、このモデルにより推定されるパラメータ値は合理的な値であった。近年は、31.4GHzは37.0GHzほどは用いられないが、22.23GHzと37.0GHzの組み合わせは基本的には上述の組み合わせと同じである。

キーワード：マイクロ波、水蒸気量、雲水量、モデル、輝度温度

Microwave Model for Observation of Water Vapor and Cloud Water with Two Frequency Microwave Radiometry

Yasunori SASAKI^{*3} Gen'ichi NAITO^{*4}
Mitsunori TANABE^{*4}

The purpose of this study is to derive an empirical model to estimate both water vapor and cloud water contents from 2-channel brightness temperatures of satellite simultaneously. The frequencies adopted for discussion are 22.23GHz and 31.4GHz. We also derived an error estimation model to estimate error tolerance in satellite brightness temperatures in terms of errors in retrieved water vapor and cloud water contents. Microwave radiative transfer process from the sea surface up to the satellite, which involves upward and downward sky brightness temperatures and transmittance as parameters, could be expressed in terms of these two parameters, and this model provides reasonable estimation of the parameters. Recently 31.4GHz is less frequently adopted than 37.0GHz, however, the combination of 22.23GHz and 37.0GHz is also practical as well as the above combination.

* 1 海洋観測研究部

* 2 防衛大学校地球科学科

* 3 Marine Research Department

* 4 Department of Geoscience, National Defense Academy Japan

Key words : water vapor, cloud water, model, microwave, brightness temperature

1 はじめに

大気による熱輸送や大気海洋間熱交換を始めとする地球上における熱循環過程において、水蒸気および雲水が重要な役割を果たしていることは、今更いうまでもないことである。そして、わが国でも、熱帯降雨観測衛星による熱帯観測計画である TRMM 計画が、1996年度に、衛星の打ち上げとともに始まる一方、わが国初の本格的な人工衛星搭載型マイクロ波放射計である新マイクロ波放射計 AMSR が、1998年度に打ち上げ予定の ADEOS-II に搭載される予定である。そこで、わが国でも、これらの人工衛星センサーによる水蒸気、雲水、降雨等の大気物質の観測に向けて準備が進められている。

ところで、わが国でも、これまでにマイクロ波放射計による大気観測センサーによる研究はなされてきた。例えば、海洋観測衛星 MOS シリーズのマイクロ波走査放射計 MSR 等がこれである。そして、周波数は 22.23 GHz と 31.4 GHz である。この周波数は、かつて米国で打ち上げられた NIMBUS-5 に搭載された NEMS と同じ周波数である。現在開発中の AMSR には、31.4 GHz という周波数帯は見られず、代わりに 37.0 GHz という周波数帯が採用されている。これは、AMSR に限らず、他の外国のセンサーについても同様の傾向である。しかし、31.4 GHz と 37.0 GHz の間には、特に著しい差はない。しいて言えば、31.4 GHz よりも 37.0 GHz の方が雲水に対する感度が高いという点くらいなものである。

そこで、ここでは、22.23 GHz と 37.0 GHz の 2 周波による水蒸気量および雲水量の観測を考える。上で述べたように、37.0 GHz は 31.4 GHz でもよく、ここで提案する方法は、そのまま 37.0 GHz での方法に拡張することができる。

2 理論および方法

いま、降雨がない大気を考える。このとき、人工衛星が受信する輝度温度は(1)式で与えられる。ただし、人工衛星は垂直観測を行うものとする。

$$T_B^{\text{sat}} = t [\varepsilon (T_{\text{SST}}, W) T_{\text{SST}} + (1 - \varepsilon (T_{\text{SST}}, W)) T_B^{\downarrow \text{sky}}] + T_B^{\uparrow \text{sky}} \quad (1)$$

ここで、

T_B^{sat} : 人工衛星高度での輝度温度
 $T_B^{\downarrow \text{sky}}$: 海面での下向き大気輝度温度

$$T_B^{\downarrow \text{sky}} = \int_0^{H_{\text{sat}}} T_{\text{atm}}(z) \alpha(z) e^{-\int_0^z \alpha(z') dz'} dz \quad (2)$$

H_{sat} : 人工衛星高度

$T_{\text{atm}}(z)$: 気温

$\alpha(z)$: 大気物質の吸収係数

$$\alpha(z) = \alpha_v(z) + \alpha_c(z)$$

α_v, α_c : 水蒸気および雲水の吸収係数

$T_B^{\uparrow \text{sky}}$: 人工衛星高度での上向き大気輝度温度

$$T_B^{\uparrow \text{sky}} = \int_0^{H_{\text{sat}}} T_{\text{atm}}(z) \alpha(z) e^{-\int_z^{H_{\text{sat}}} \alpha(z') dz'} dz \quad (3)$$

ε : 海面放射率

T_{SST} : 海面水温

W : 海上風速

q_v, q_c : 鉛直気柱中の全水蒸気量および雲水量

t : 大気透過率

$$t = e^{-\int_0^{\infty} [\alpha_v(z) \rho_v(z) + \alpha_c(z) \rho_c(z)] dz} \quad (4)$$

ρ_v, ρ_c : 大気中での水蒸気および雲水の鉛直分布

z : 高度

以下の議論において必要な、人工衛星による観測輝度温度、下向き大気輝度温度、上向き大気輝度温度、大気透過率は、それぞれ(1)~(4)式により推定した。そして、(1)~(4)式により推定した値をもとに、それぞれの値を推定するためのモデル式を、水蒸気量および雲水量をパラメータとして誘導した。

また、水蒸気量の鉛直分布は(5)に示す指数分布を仮定した。

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H_v} \quad (5)$$

ここで、

ρ : 水蒸気密度

ρ_0 : 海面における水蒸気密度

H_v : 水蒸気分布のスケールハイト (通常は $H_v = 2.5$ km とすることが多い)

である。その結果、大気柱中の全水蒸気量 q_v は、

$$q_v = \int_0^{\infty} \rho_0 e^{-z/H_v} dz \\ = \rho_0 H_v$$

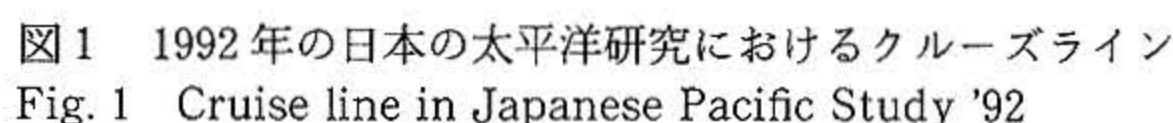
となる。なお、海面での水蒸気密度を与えれば全大気柱中の水蒸気量がわかるため、以下の議論では、海面での水蒸気分布密度を用いている。また、雲水については、

用いたデータは、地上トランスデータとしては、1991年12月24日から1992年1月25日の間、南緯5°から北緯15°、東経145°から175°(図1参照)にかけて実施した海洋、気象観測データと、同時に観測した米国軍事気象衛星DMS (Defense Meteorological Satellite) のイメージ型マイクロ波放射計SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) のデータである。この他に、Grody, および Chang et al. による NIMBUS-5 搭載のNEMSにより観測した輝度温度データ、並びに解析により推定した水蒸気量および雲水量も比較のため使用した。

3.1 水蒸気および雲水に対する大気の輝度温度と透過率の応答感度と、大気の輝度温度および透過率の簡易モデル

ない場合、(b) は雲水量が 0.2g/m^3 の場合である。同様に、図3(a)、(b)は、雲水量変化に対する1~40GHz帯の大気輝度温度の応答感度を示したものである。

水蒸気と雲水のみの効果による大気の輝度温度と透過率は、(2)~(4)式で推定される。しかし、輝度温度からこれらを推定する場合、これはその度ごとに逆問題を解く



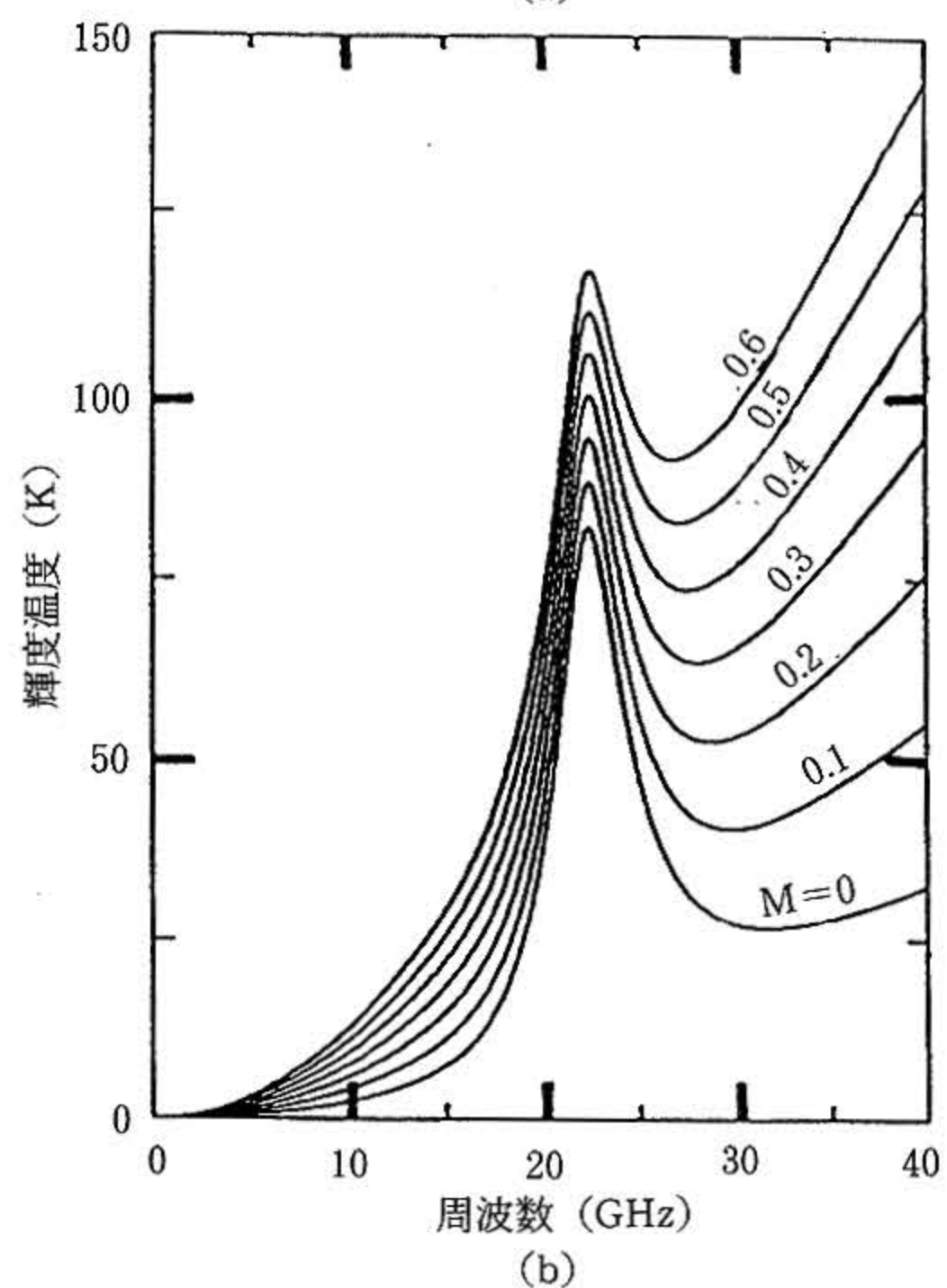
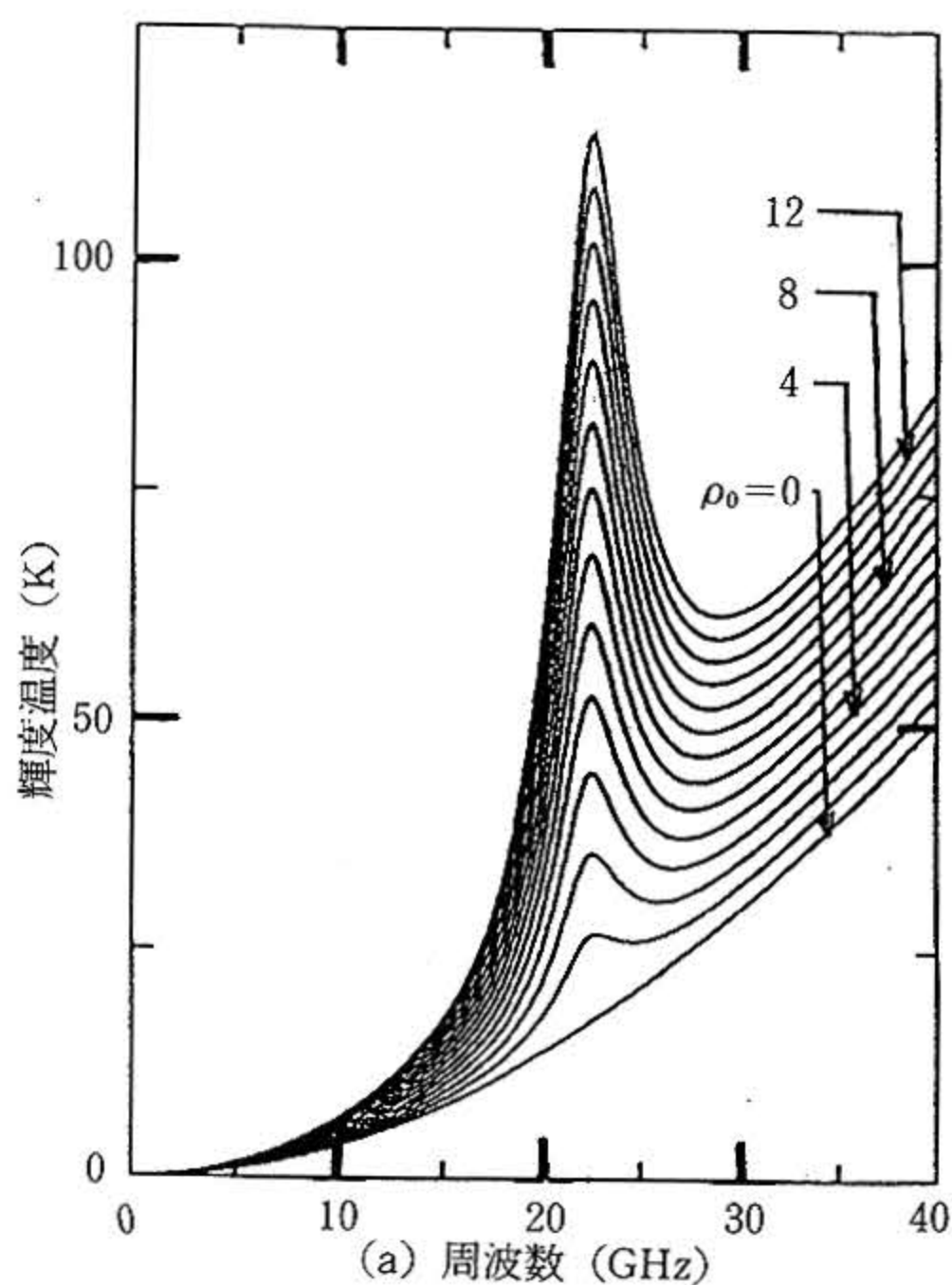
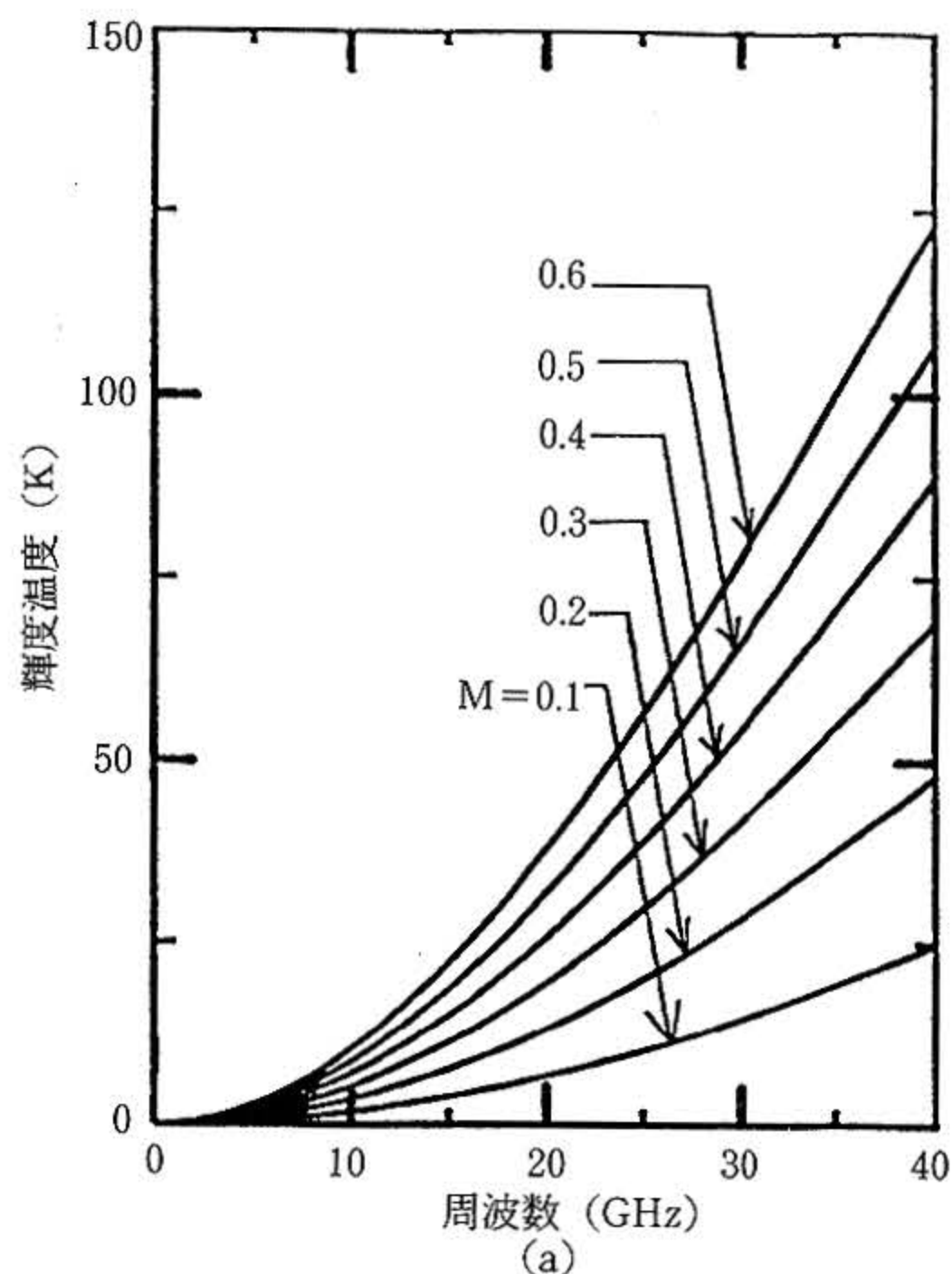
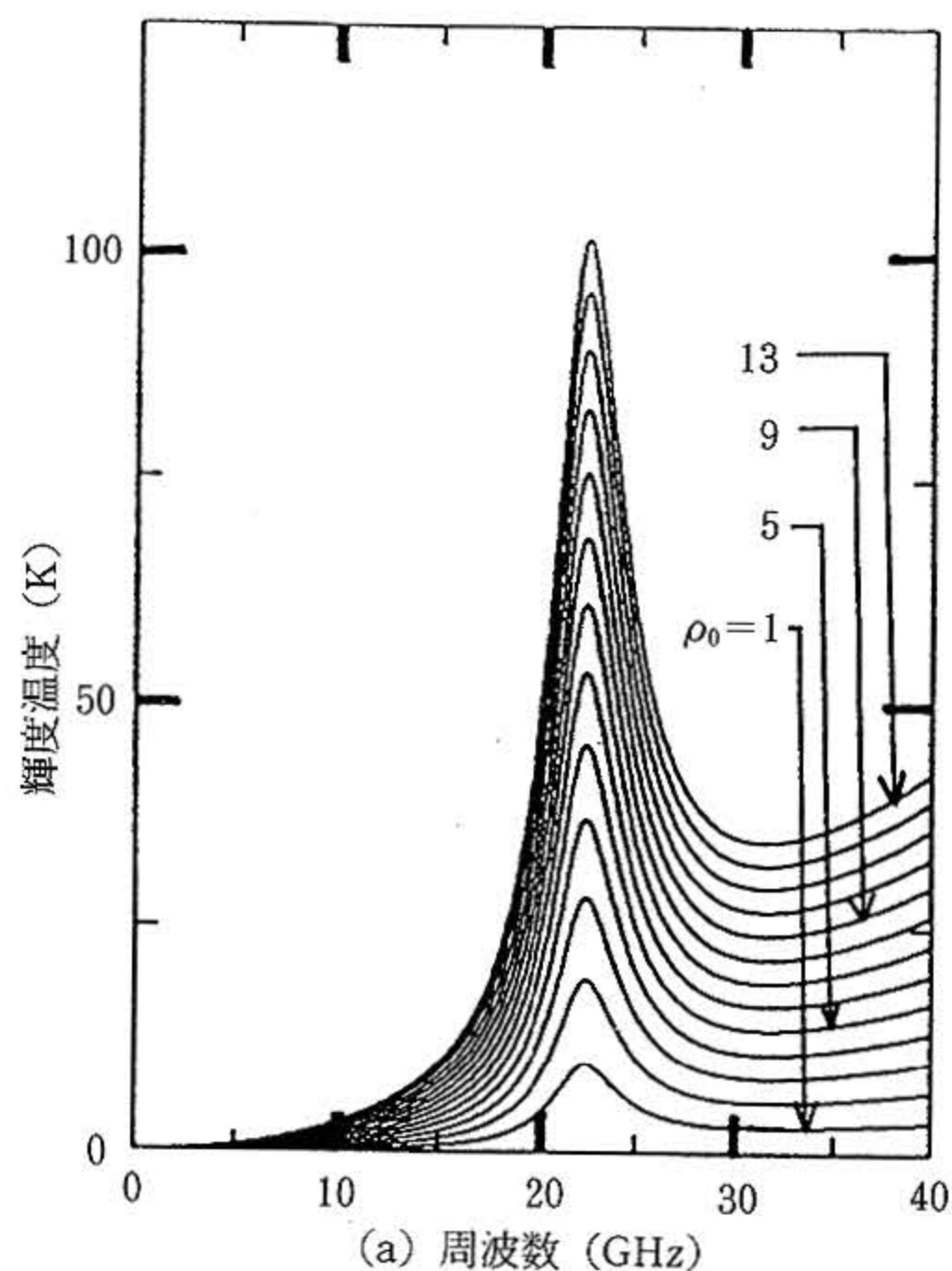


図2 大気輝度温度の水蒸気密度依存性。 ρ_0 : 海面での水蒸気密度 (g/m^3)

(a) 雲水ない場合, (b) 雲水量が $0.2\text{g}/\text{m}^3$ の場合

Fig. 2 Dependence of atmospheric brightness temperature on water vapor density. ρ_0 : water vapor density at surface (a) cloud water free (b) cloud water content is $0.2\text{g}/\text{m}^3$.

図3 大気輝度温度の雲水量依存性。 M : 雲水量 (g/m^3)
(a) 水蒸気ない場合, (b) 海面の水蒸気密度が $10\text{g}/\text{m}^3$ の場合

Fig. 3 Dependence of atmospheric brightness temperature on cloud water content. M : cloud water content (mg/m^3). (a) with vapor free (b) water vapor density at surface is $10\text{g}/\text{m}^3$.

ことになる。その場合、本来ならば、大気中での鉛直分布も正確に推定すべきであるし、また、そのためには、気温の鉛直分布も予め必要である。しかし、通常、水蒸気の分布は、鉛直的には指数関数分布に近く、接地大気

層に大部分が集中し、高度とともに急激に減少する。また、雲水は、雲底高度と雲頂高度間に大部分が集中する。そこで、上述の逆問題を解く場合でも、十分なる情報がない場合を考えると、得られる結果の正確さにも問

題があることを考えれば、水蒸気、雲水ともに、全大気柱中での全量として扱っても、大きな間違いはないと考えられる。

そこで、この仮定のもとに、22.23GHzと31.4GHzにおける上向きおよび下向き大気の輝度温度、並びに大気透過率を、水蒸気量と雲水量をパラメータとして表す

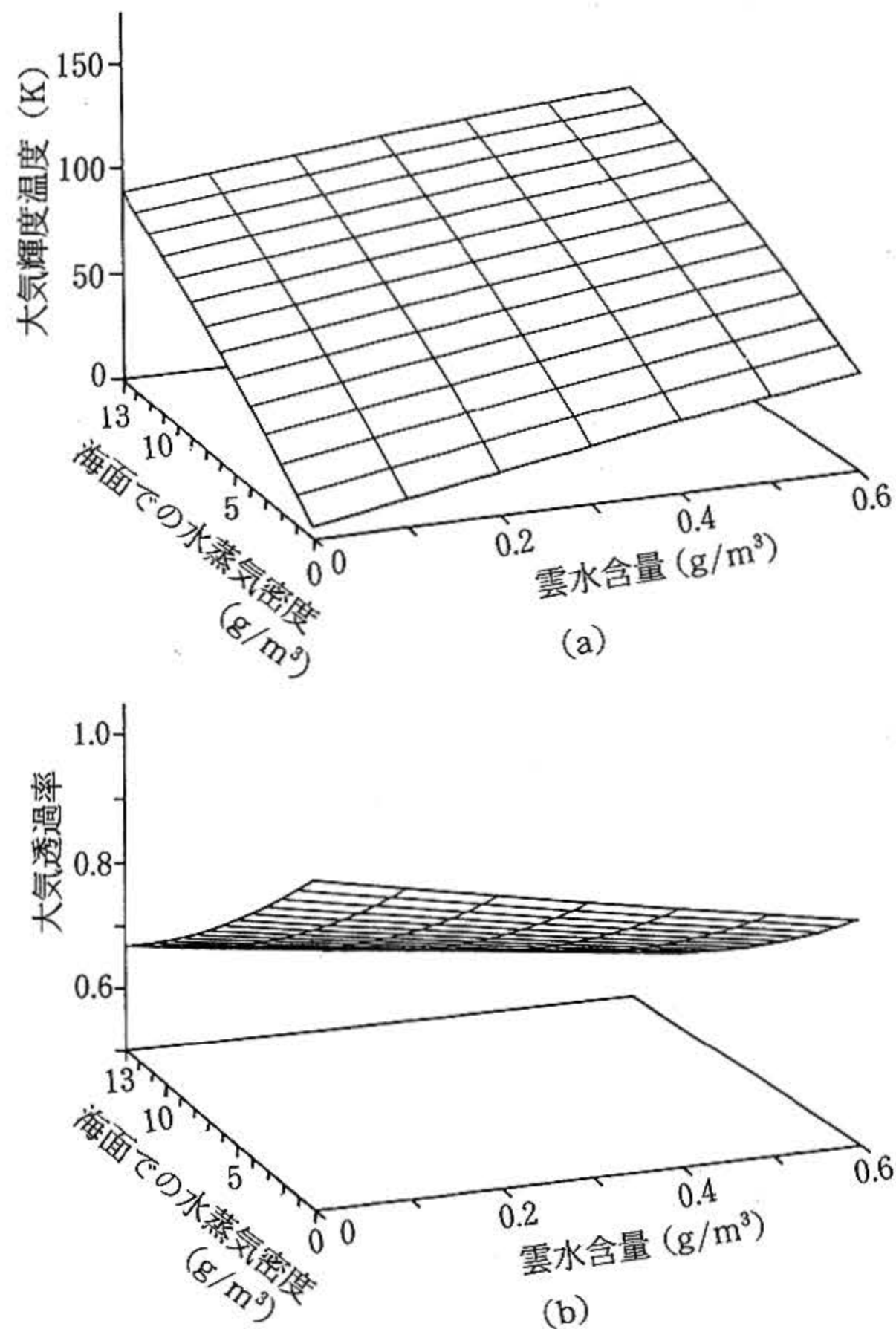


図4 大気輝度温度 [(a)] および透過率 [(b)] に水蒸気と雲水が及ぼす効果 (22.23GHz)。

Fig. 4 Effect of water vapor and cloud water on atmospheric brightness temperature (a) and transmittance (b) at 22.23GHz.

と、それぞれ(6)～(8)式が得られる。ただし、大気温度については、標準大気モデルを採用した。

$$T_B^{\uparrow sky} = a_1 \cdot q_v^2 + a_2 \cdot M^2 + a_3 \cdot q_v \cdot M + a_4 \cdot q_v + a_5 \cdot M + a_6 \tag{6}$$

$$T_B^{\downarrow sky} = b_1 \cdot q_v^2 + b_2 \cdot M^2 + b_3 \cdot q_v \cdot M + b_4 \cdot q_v + b_5 \cdot M + b_6 \tag{7}$$

$$t = c_1 \cdot q_v^2 + c_2 \cdot M^2 + c_3 \cdot q_v \cdot M + c_4 \cdot q_v + c_5 \cdot M + c_6 \tag{8}$$

ここで、 $a_1 \sim a_6$ 、 $b_1 \sim b_6$ 、 $c_1 \sim c_6$ の値は表1に示すとおりである。なお、(6)～(8)式により与えられる輝度温度と透過率の標準偏差は、表1に示すように、それぞれ0.85～1.4Kおよび0.0018～0.003であり、(6)～(8)式は十分実用であると考えてよい。なお、酸素の効果も考慮し、2周波における輝度温度の観測値から水蒸気量および雲水量を推定するまえに、輝度温度から酸素による輝度温度を差し引いて置く必要がある。

3.2 モデル関数による推定輝度温度と衛星観測輝度温度との比較

(1)式に(6)～(8)式を代入すると、人工衛星が観測する輝度温度を、水蒸気量と雲水量をパラメータとするモデル関数を用いて簡単に表すことができる。そして、このモデル関数により推定される人工衛星高度での輝度温度の推定値を実際に人工衛星が観測した輝度温度と比較したものが、図5および6である。図5は、22.23GHzの場合で、佐々木らの推定値は、図1に示す海域において船舶により観測した気象観測データから推定したものである。この観測では、海面水温、気温、相対湿度、降雨、風速等が観測されている。雲水量については測定がなく、GrodyとChang et al.の場合の気象条件から、その中間値である0.3g/m³と仮定した。また、GrodyとChang et al.は、人工衛星データから彼らの解析法を用いて水蒸気量、並びに雲水量を推定しており、逆にこれ

表1 大気の輝度温度と透過率のモデルの係数（標準偏差はこのモデルによる輝度温度と透過率の推定値に対するもの）
Table 1 Coefficients of model function of atmospheric brightness temperature and transmittance. Standard deviations are those of brightness temperature and transmittance estimated by the model.

Coefficient	Frequency (GHz)	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	Standard deviation
a_i	22.23	-0.125	-7.15	0.153	7.48	57.1	10.4	1.40 (K)
	31.4	-7.40×10^{-3}	-28.8	9.41×10^{-2}	1.97	127.0	11.7	0.880 (K)
b_i	22.23	-0.120	-7.14	0.147	7.53	57.7	10.2	1.40 (K)
	31.4	-7.05×10^{-3}	-28.8	9.13×10^{-2}	1.96	128.0	11.7	0.850 (K)
c_i	22.23	4.50×10^{-4}	2.54×10^{-2}	2.06×10^{-3}	-2.86×10^{-2}	-0.224	0.971	3.00×10^{-3}
	31.4	2.61×10^{-5}	1.03×10^{-1}	1.26×10^{-3}	-7.66×10^{-3}	-0.472	0.963	1.80×10^{-3}

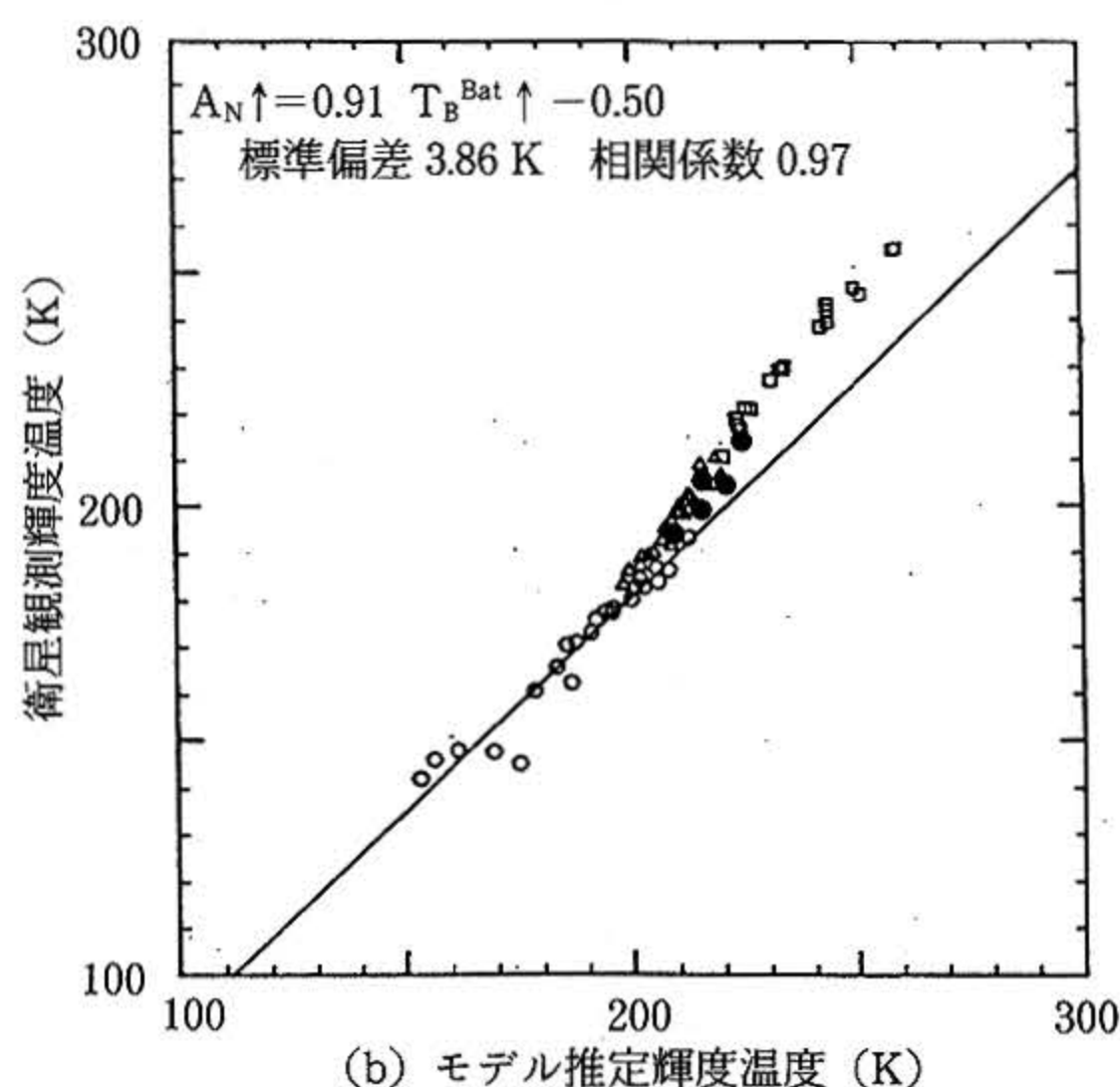
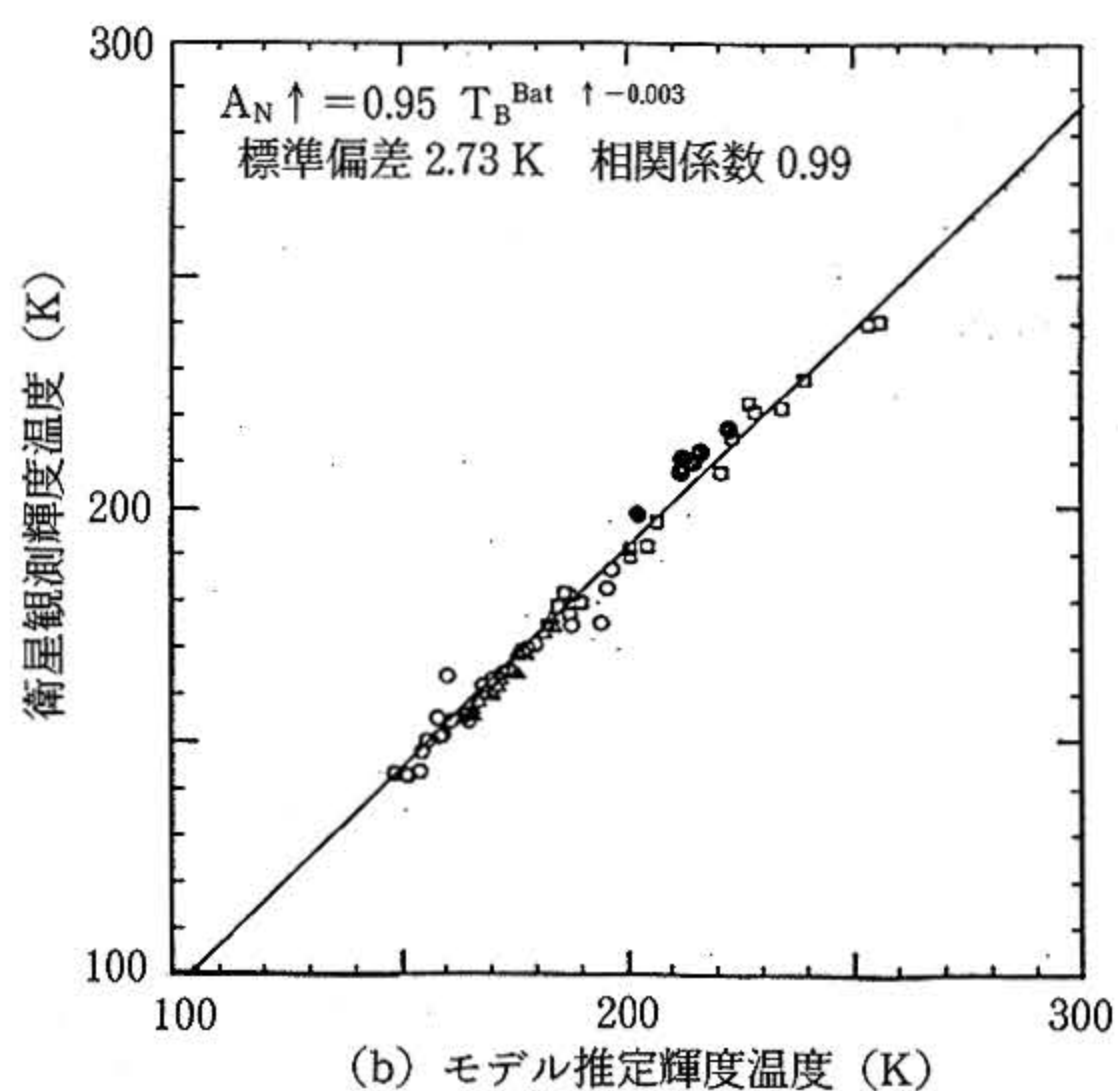
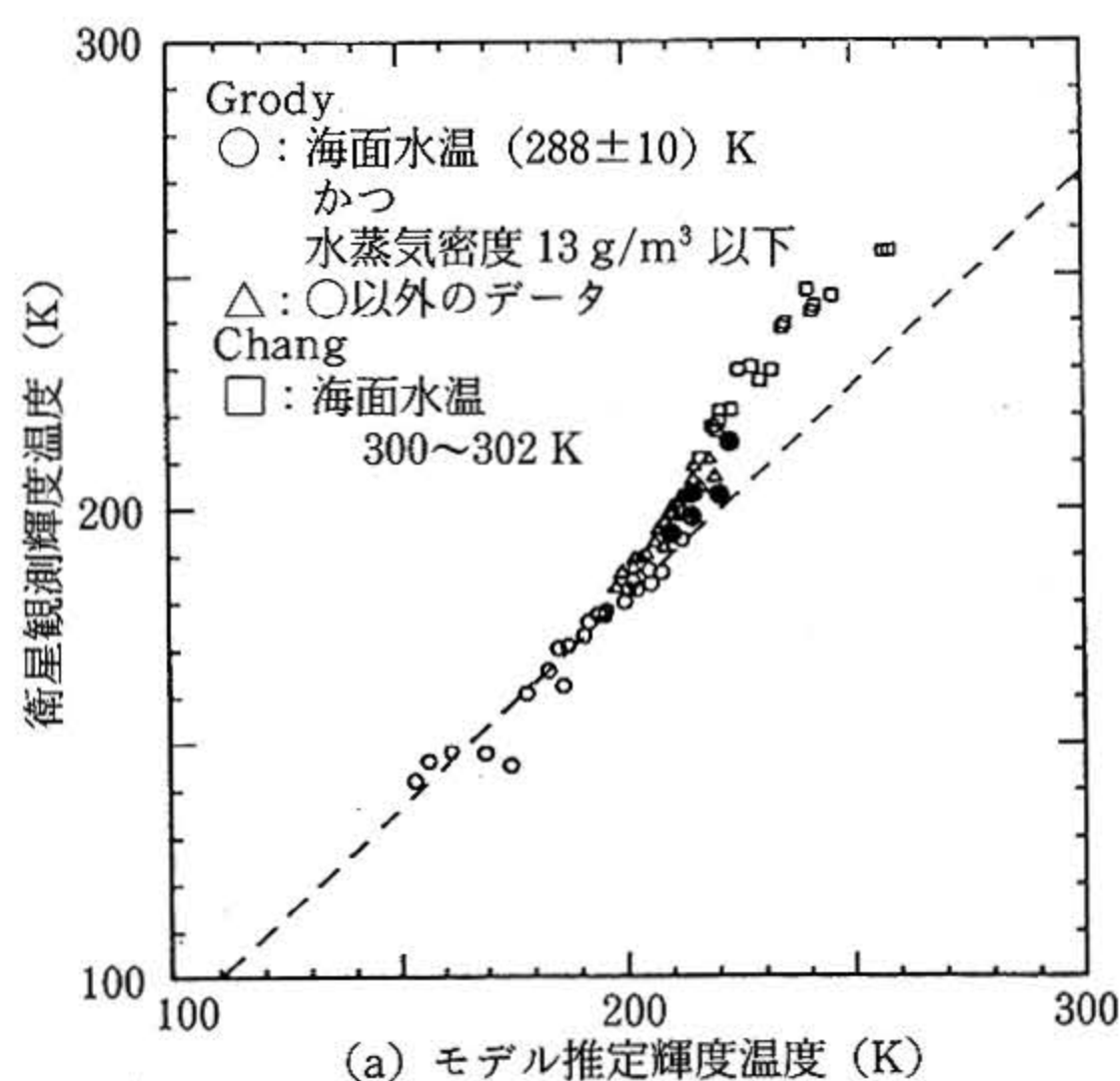
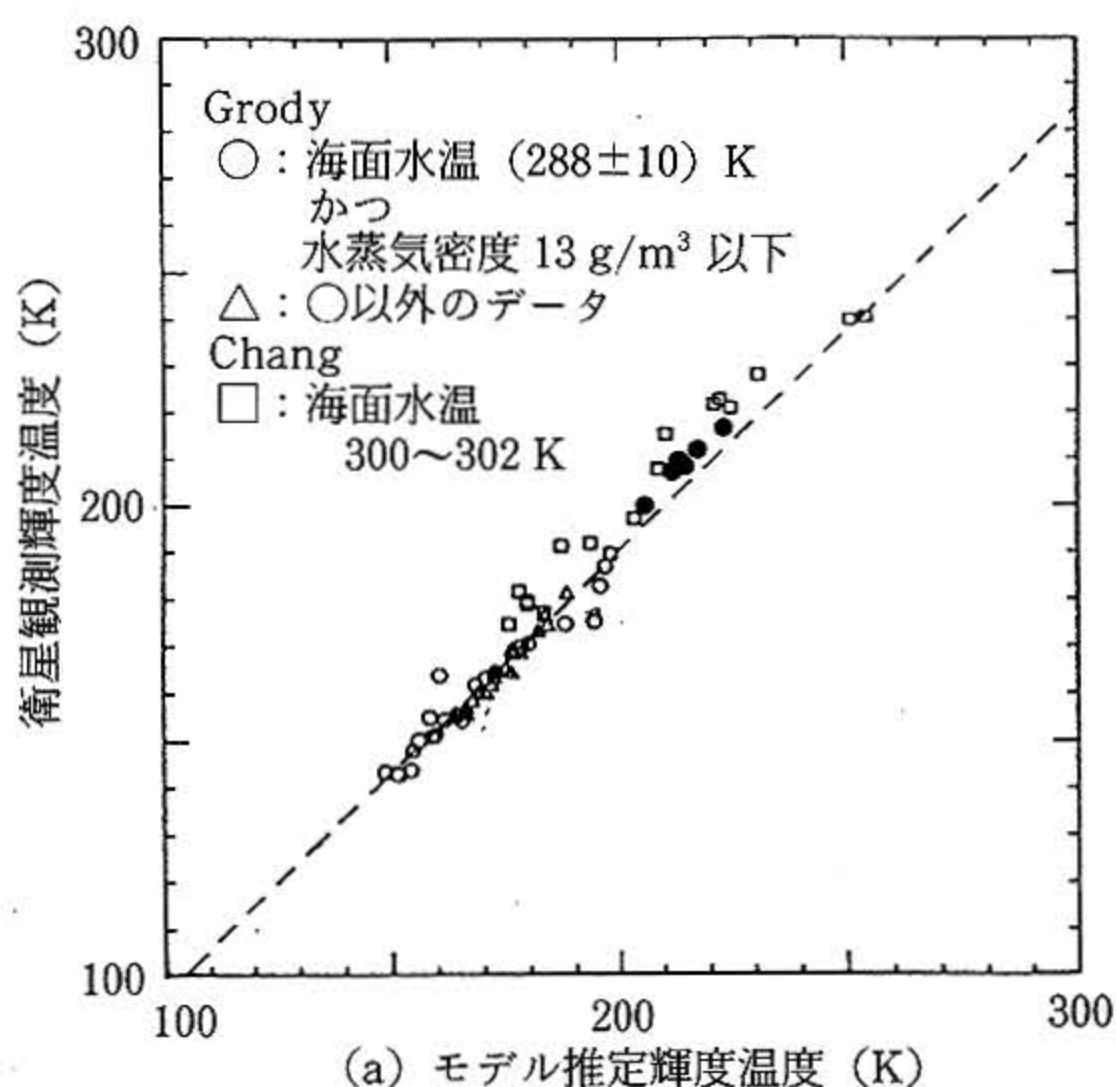


図5 22.23GHzにおける大気輝度温度の衛星観測値とモデル推定値の比較

(a) 海上風の効果を考慮しない場合, (b) 海上風の効果を考慮した場合 (Grody のものをのぞく)

●: 佐々木ら, □△: Grody, ○: Changら

Fig. 5 Comparison of atmospheric brightness temperature at 22.23GHz between satellite observation and model estimation. Effect of sea surface wind is not considered in (a) and considered in (b) except Grody.

●: Sasaki et al.

○△: Grody

□: Chang et al.

図6 31.4GHzにおける大気輝度温度の衛星観測値とモデル推定値の比較

(a) 海上風の効果を考慮しない場合, (b) 海上風の効果を考慮した場合 (Grody のものをのぞく)

●: 佐々木他, ○△: Grody, □: Chang 他

Fig. 6 Comparison of atmospheric brightness temperature at 31.4GHz between satellite observation and model estimation. Effect of sea surface wind is not considered in (a) and considered in (b)

●: Sasaki et al.

○△: Grody

□: Chang et al.

らを用いて再び人工衛星高度での輝度温度を推定した。この場合, Grody と Chang et al. らの水蒸気量と雲水量の値は実測値ではないが, 筆者らの観測結果と一致しており, 逆に彼らの解析法が妥当性であることもわかる。また, 筆者らは, 人工衛星データとしてSSM/Iを使用しており, 31.4GHzという周波数帯はなく, これに

代わる周波数帯として37.0GHzがある。そこで, やはり, 大気中の雲水量を 0.3g/m^3 と仮定し, 水蒸気量の観測値とも併せて, 図2および3をもとに, 37.0GHzでの人工衛星の観測値から, 22.23GHzにおける輝度温度と37.0GHzにおける輝度温度の差相当分(25~32K)に対し, SSM/Iの観測角 53° (SSM/Iごとに異なる)を考慮したの

ちの値を差し引いた。なお、筆者らは、海面水温については自らの観測値を採用しているが、Grody と Chang et al. の結果では、海面水温についての記述がなく、海面水温は不明であった。そこで図7に示す過去30年間の海面水温の平均値を用いた。

さらに、図5および6においては、Chang et al. および佐々木らの結果には、風速に関するデータがある。そこで、これら両者のデータに対しては、モデルによる輝度温度の推定にさいして、海面輝度温度に対する海上風の影響の補正も行った。これを示したものが図4(a)および5(b)である。垂直観測の場合の海面放射率に対する海上風による効果の補正式には、Hollinger (1971) による(9)式があるが、佐々木らは彼らの海面放射率に関する一連の実験から(10)式を提案している。

$$\varepsilon(f, T_{\text{SST}}, W) = \varepsilon_0(f, T_{\text{SST}}) + 1.15 \times 10^{-1} \times f^{0.5} \times W / T_{\text{SST}} \quad (9)$$

$$\varepsilon(f, T_{\text{SST}}, W) = \varepsilon_0(f, T_{\text{SST}}) + (0.23 + 0.017f) \times W / T_{\text{SST}}$$

ここで、

ε_0 : 静海面放射率

f : 周波数

W : 海上風速

T_{SST} : 海面水温

である。

3.3 観測輝度温度の誤差による水蒸気量および雲水量の推定値の誤差

人工衛星で観測する輝度温度（アンテナ温度）には、観測誤差が含まれる。そこで、観測輝度温度の誤差と、これに基づく水蒸気量および雲水量の推定値の誤差との関係を求め、一定の誤差範囲のもとに水蒸気量および雲水量を推定するために必要な観測輝度温度の許容誤差範囲を検討しておく必要がある。

22.23GHzおよび31.4GHzでの輝度温度の代表値として、それぞれ180Kおよび170Kを選び、この値に対する

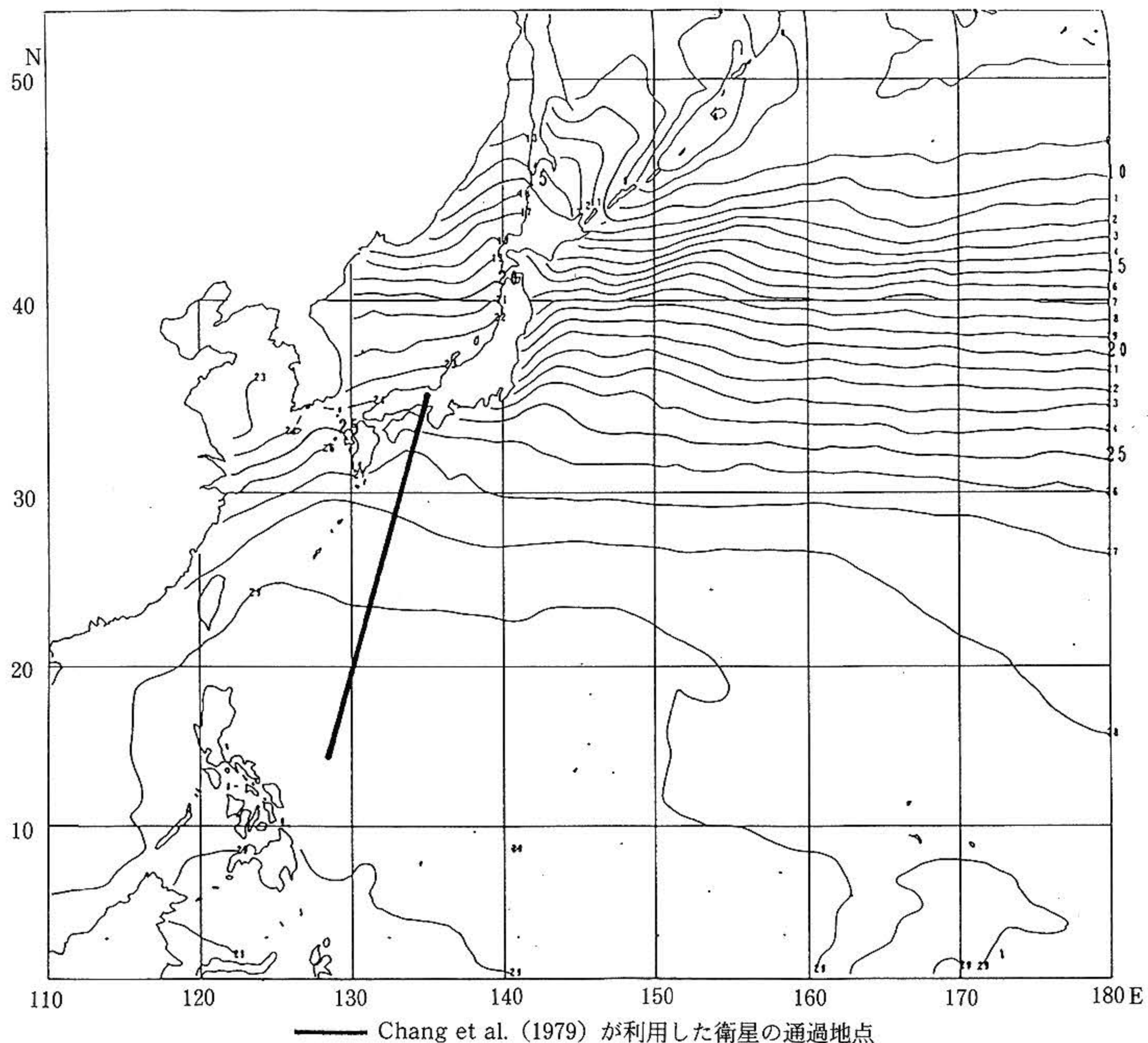


図7(a) 過去30年間の7月11日～20日の平均水温図（1956年～1985年）

Fig. 7(a) 30-year normal of 10-day (July 11-20) mean sea surface temperature (°C) (1956-1985).

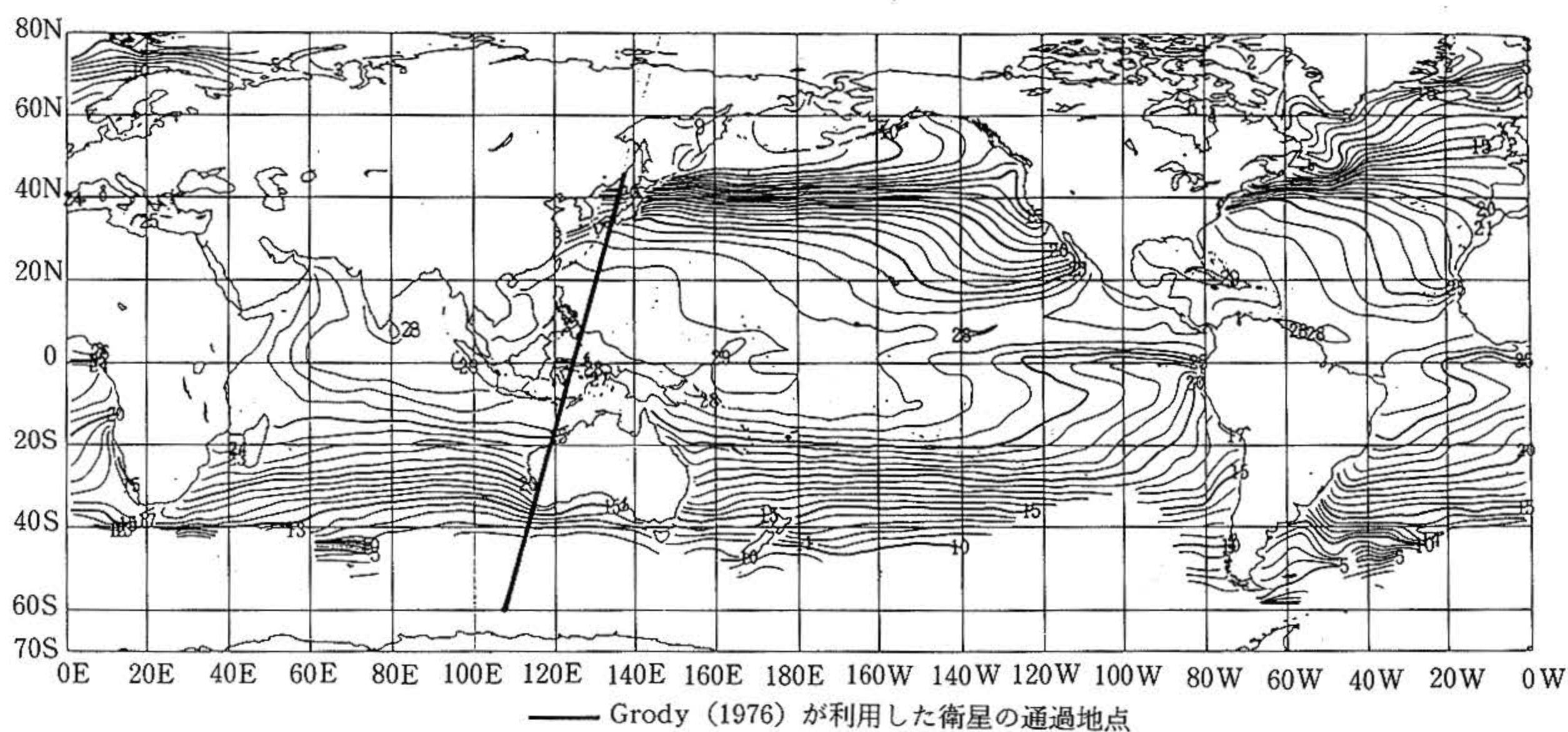


図 7 (b) 過去 30 年間の 7 月の平均水温図 (1956 年～1985 年)
 Fig. 7 (b) 30-year normal of monthly mean sea surface temperature (°C) of July (1956-1985).

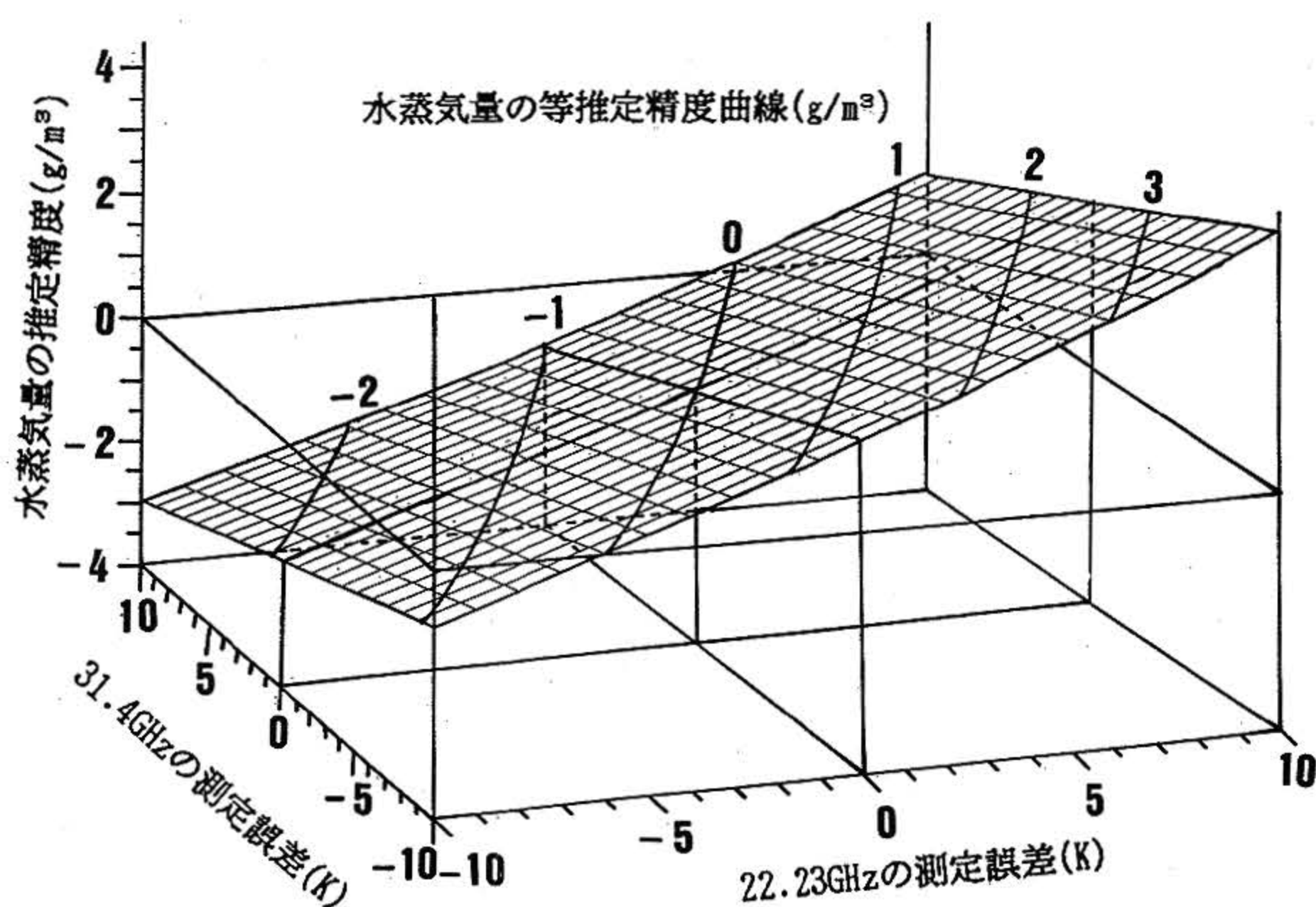


図 8 (a) 22.23GHz 及び 31.4GHz の輝度温度の測定誤差と水蒸気量の推定精度
 Fig. 8 (a) Error in observed brightness temperature at 22.23 and 31.4GHz and corresponding accuracy in water vapor estimation.

水蒸気量および雲水量を、ここで提案した輝度温度モデルにより推定する。そして、これらの輝度温度を中心として、 -10K から 10K の幅で 0.5K ごとに誤差を与え、これらを基に水蒸気量および雲水量を推定する。このようにして得られた、水蒸気量および雲水量の推定値の誤差曲線は、それぞれ図 8 (a) および (b) に示すとおりであり、これらの誤差曲線から、水蒸気量および雲水量の所要推定精度に対して必要とされる観測輝度温度の許容誤

差範囲が設定される。

図 8 (a) および (b) はやや複雑であるため、さらに求めやすくするために、等誤差線図として表示したものが図 9 である。そして、水蒸気量および雲水量の推定にさいして希望する誤差が与えられれば、図 9 から観測輝度温度に対する許容誤差が与えられることとなる。例えば、水蒸気量の推定誤差を $\pm 0.5\text{g}/\text{m}^3$ ($\pm 1.0\text{g}/\text{m}^3$)、雲水量の推定誤差を $\pm 0.025\text{g}/\text{m}^3$ ($\pm 0.05\text{g}/\text{m}^3$) 以下にするた

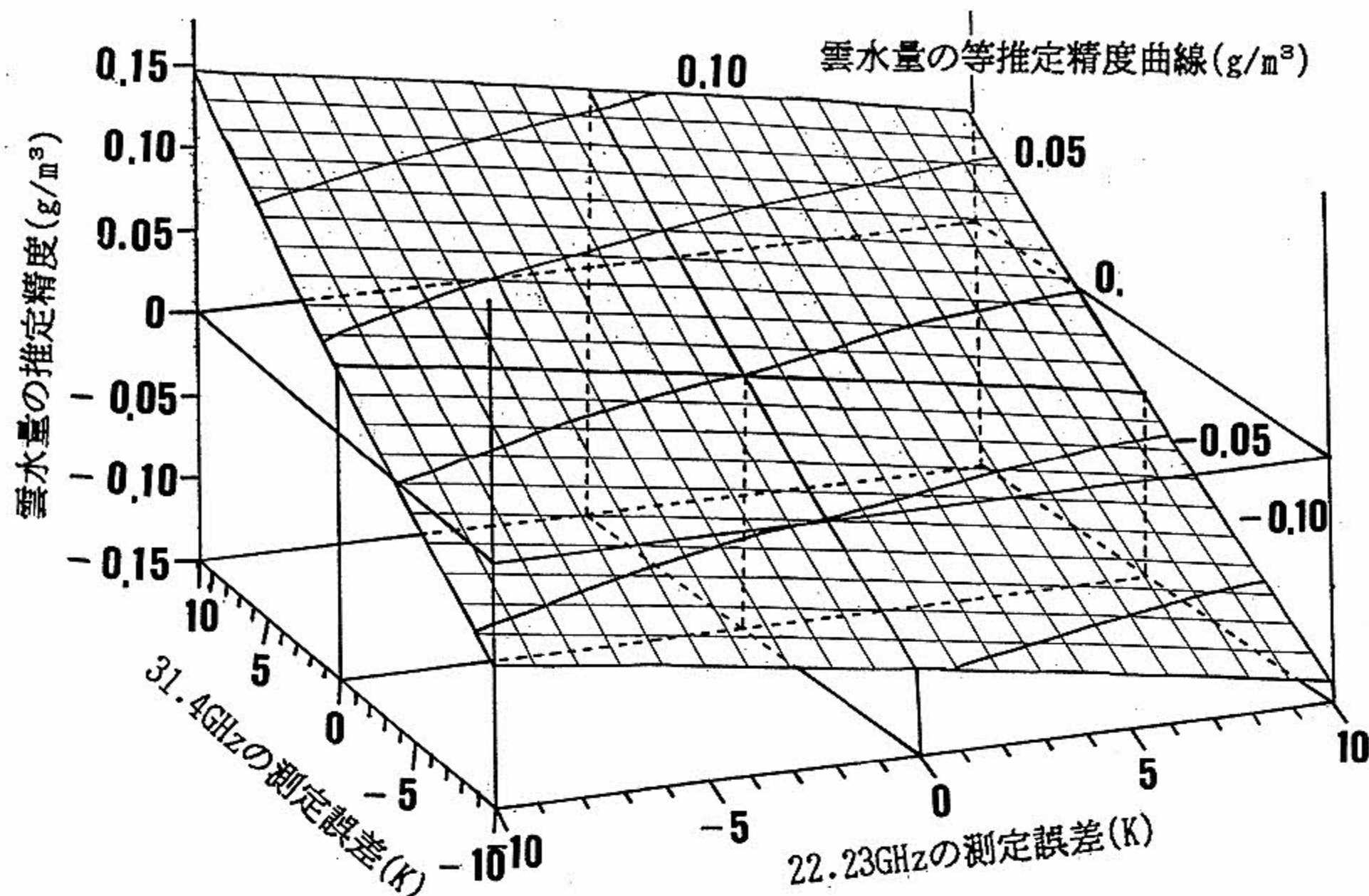


図 8 (b) 22.23GHz 及び 31.4GHz の輝度温度の測定誤差と雲水量の推定精度

Fig. 8 (b) Error in observed brightness temperature at 22.23 and 31.4GHz and corresponding error in water vapor estimation.

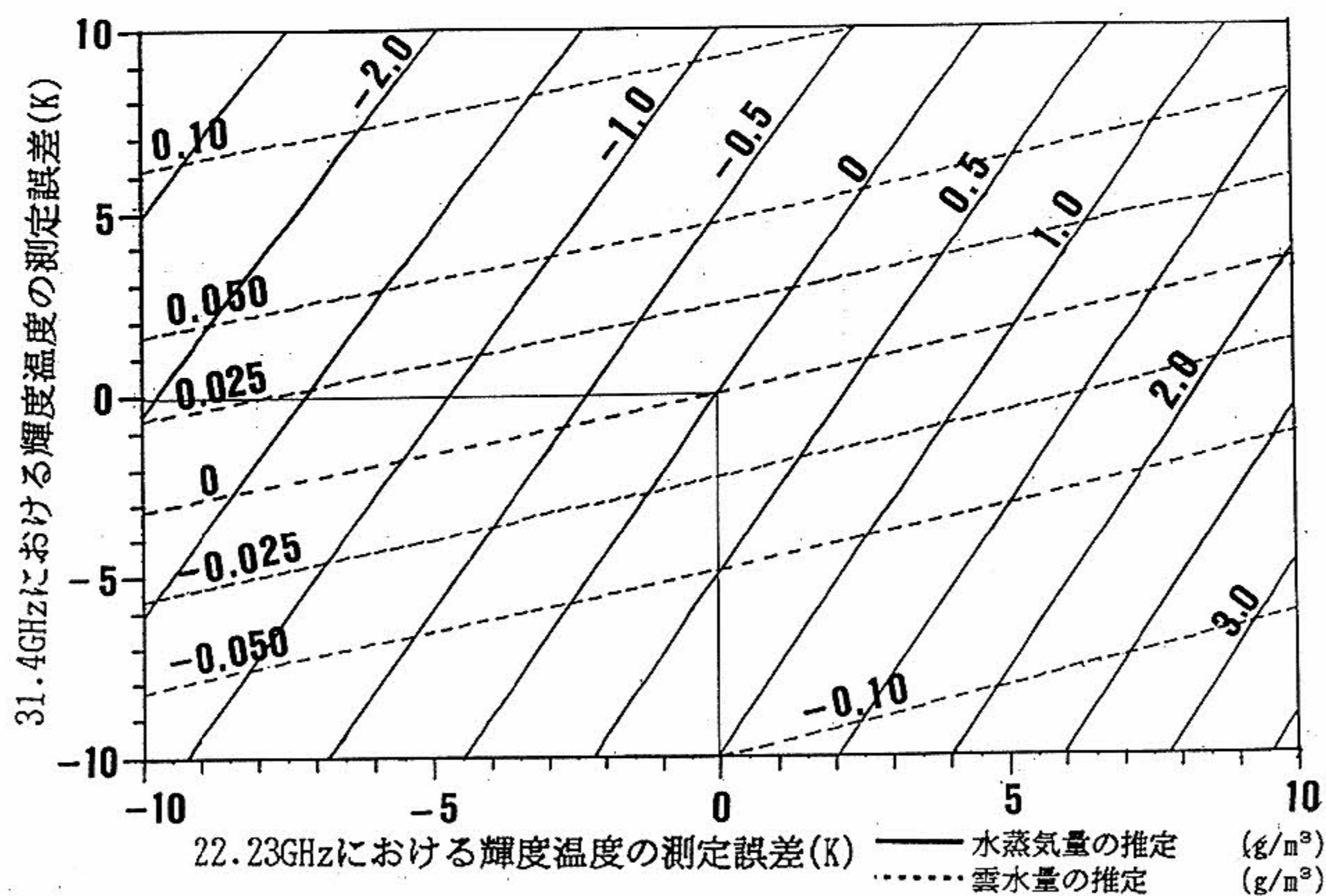


図 9 22.23GHz 及び 31.4GHz の輝度温度の測定誤差が水蒸気量及び雲水量の推定精度に及ぼす効果

Fig. 9 Effect of error in brightness temperature at 22.23 and 31.4GHz on in water vapor and cloud water estimations.

めには、22.23GHzおよび31.4GHzにおける観測輝度温度の誤差は、それぞれ約 $-1.5 \sim 1$ K (約 $-3 \sim 2.5$ K) と約 $-2 \sim 2$ K (約 $-3.5 \sim 4$ K) の間に抑えなければならないことがわかる。

4 おわりに

本報告では、2周波数として22.23GHzと31.4GHzを選んだ。最近打ち上げられる人工衛星用マイクロ波放射計では、31.4GHzの代わりに37.0GHzが採用されている。しかし、「1 はじめに」で述べたように、31.4GHzと37.0GHzとの間には基本的には差はない。しいて言えば、

37.0GHzの方が41.4GHzよりも雲水量の変化に対し感度が高いということであろう。したがって、繰り返しになるが、ここでの議論はすべて37.0GHzにおいてもそのまま当てはまるものである。

また、ここでは、筆者らのデータ以外は、海面水温の観測データがないため、30年間平均値(平年値)を用いた。しかし、ここで述べた推定法を海上大気の水蒸気量および雲水量の推定に用いて、精度良い推定を行うためには、海面水温と海上風速に関する情報が必要となる。海上風速が小さい海域でも、少なくとも海面水温データは必要である。しかし、もしあと1周波あれば、海面水温も推定量の一つとなる。その結果、推定量は、水蒸気量、雲水量、および海面水温となる。その結果22.23 GHzおよび31.4GHz (または37.0GHz) のほかにもう1周波必要となるということである。最近打ち上げられる人工衛星搭載マイクロ波放射計にもあり、最も可能性の高い周波数は18~19GHz帯ということになる。この周波数帯は、他の2周波に比して、水蒸気や雲水の変化に対する応答感度はやや低い、可能性は高い。

以上は、偏波の区別がない垂直観測の場合である。もし、SSM/Iのように、適当な入射角を持たせた観測では、双偏波観測が可能となるため、その分チャンネル数が増える。水蒸気や雲水のような大気物質の観測には、偏波観測は効果を生じないが、水温や海上風速のような海面パラメータは観測が可能となる。最近の人工衛星搭載マイクロ波放射計ではほとんど試みられていないが、水温や海上風速も併せて推定することは、水蒸気量や雲水量の推定精度を高める上でも意義があると考えられる。

参考文献

- 1) Chang, A.T.C., and T.T. Wilheit, "Remote sensing of atmospheric water vapor, liquid water, and wind speed at the ocean surface by passive microwave techniques from the Nimbus-5 satellite," *Radio Science*, vol. 14, pp. 793-802, (1979).
- 2) Grody, N.C., "Remote sensing of atmospheric water content from satellite using microwave radiometry," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-24, pp. 155-162, (1976).
- 3) Hollinger, J.P., "Passive microwave measurements of sea surface roughness," *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, vol. GE-9, pp. 165-169, (1971).
- 4) Hollinger, J.P., "Remote passive microwave sensing of the ocean surface," *Proc. 7th Int'l Symp. on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, (1971), pp. 1807-1817.
- 5) Staelin, D.H., K.F. Kunzi, R.L. Pettyjohn, R.K. Poon, and R.W. Wilcox, "Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus-5 microwave spectrometer," *J. Appl. Meteor.*, vol. 15, pp. 1204-1214, (1976).
- 6) 佐々木保徳・浅沼市男・宗山 敬・内藤玄一・鈴木務: "衛星マイクロ波ラジオメトリーによる海上風観測のための最適周波数", *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 7, pp. 99-113, (1987).
- 7) Sasaki, Y., I. Asanuma, K. Muneyama, G. Naito, and T. Suzuki, "Dependence of sea surface emissivity and reflectivity over the frequency range from 1 to 40GHz," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-25, pp. ???-???. ????
- 8) Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung, *Microwave remote sensing, active and passive*, vol. 1, 1981, Addis-Wesley, Massachusetts, pp. 264-286.

(原稿受理: 1995年5月8日)