

UDC 551.524.7

16 GHz 帯および 35 GHz 帯における天空温度の測定

乙 津 祐 一*

(昭和 45. 3. 27 受理)

MEASUREMENT OF SKY NOISE TEMPERATURE AT
THE FREQUENCIES OF 16 GHz AND 35 GHz

By

Yuichi OTSU

An experiment on the 16 GHz and 35 GHz radiometer for use in the ATS-V Millimeter Wave Experiment was carried out at Goddard Space Flight Center (Greenbelt, Maryland, U. S. A.) during June and July, 1969, in order to estimate the antenna and feeder loss, which caused an apparent increase in antenna temperature, and to measure the sky noise temperature under various atmospheric conditions.

For the purpose of estimating the apparent increase in temperature for both radiometers, a clear sky was used for black body radiation. By the above method, the expected sky noise temperature was calculated from the equations in the paper by Altshuler and Wulfsberg, ⁽³⁾ and the apparent increase in temperature due to the antenna and its feeder loss was obtained by the average difference between the measured and expected temperature.

The average apparent increases in temperature due to the antennae and their feeder losses were 35°K for 16 GHz and 24°K for 35 GHz radiometers.

Comparison between one-point rainfall rate at the receiving site and increase in temperature showed better correlations in case of the rainfall rate under about 10 mm/h, but did not show good correlations in case of rain like showers.

The level fluctuation within 10 minutes due to cloud movement is called "cloud scintillation" in this case. The scintillation number is defined as the number of times of crossing the average level at ten-minute interval on the recorder. Scintillation number "one" keeps most of the cloud scintillation as its remarkable characteristics. The average scintillation numbers are 2 for 16 GHz and 3 for 35 GHz, and the average increases in temperature due to cloud within the period of measurement

*衛星研究部衛星管制研究室

are 6.2°K for 16 GHz and 14.6°K for 35 GHz. This value for the 35 GHz radiometer lies nearly in the medium value of increase in temperature due to cloud measured by Wulfsberg⁽⁴⁾.

Lastly, the calculations of change in the sky noise temperature under various weather conditions were made by the use of the standard atmospheric models. On clear days, the sky noise temperature changes as follows: according to the equations of Shulkin,⁽¹⁾ the sky noise temperature changes from 3° to 9°K at 15 GHz and from 13° to 27°K at 35 GHz when the ground humidity and ground temperature change from 20 to 100 percent and from 288°K to 308°K respectively. (Calculations were made at 15 GHz instead of 16 GHz. Any difference hardly existed.) Calculations on the same weather conditions were fulfilled through the equations of Bean and Dutton.⁽²⁾ A slight difference is found between the two formulae (Shulkin's, and Bean and Dutton's equations) when water vapor content is very small. That is caused by the difference in the coefficient of oxygen attenuation in the both equations.

When cloud comes into the beam of the antenna, the sky noise temperature of 35 GHz radiometer changes remarkably according to the water content of the cloud. For example, the sky noise temperature of 15 GHz changes from 7° to 23°K, but that of 35 GHz changes from 15° to 68°K when the water content changes from zero to one gram/m³.

When it is rainy and the rainfall rate is changing from 2 mm/h to 10 mm/h (assuming the cloud water content to be 1 gram/m³), the sky noise temperature of 15 GHz changes from about 20°K to 50°K, and that of 35 GHz changes from about 40°K to 170°K. The calculated value for 4 mm/h is coincident with the experimental value by Wulfsberg⁽⁴⁾. Several problems in the radiometer experiment are discussed later in the Appendices.

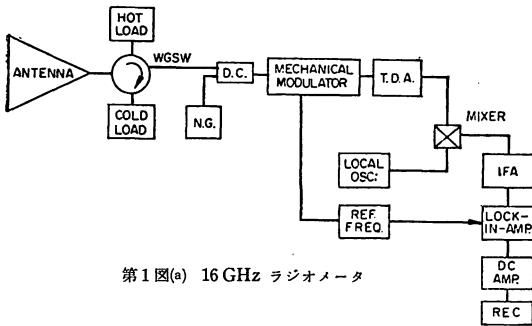
1. 序

ATS-V のミリ波伝搬試験には、15 GHz と 31 GHz が使用されるが、これらの周波数帯の電波は雨や水蒸気による散乱および吸収などの影響を受けやすい。大気中の減衰を測り得るものの中にラジオメータがあるが、そのラジオメータによる測定値は、アンテナの向っている方向の雑音温度を示し、またその温度からその方向の伝搬路の損失が簡単に計算できる⁽⁴⁾。ATS-V の計画では、気象レーダからの反射波の強度とともにラジオメータの温度を記録し、衛星からの信号の強度との相関を調べようとしている。これら二つの周波数帯のラジオメータの初期テストが行なわれているとき、夏期2か月にわたり NASA ゴダード宇宙飛行センター (Goddard Space Flight Center) で実験する機会を得たのでその

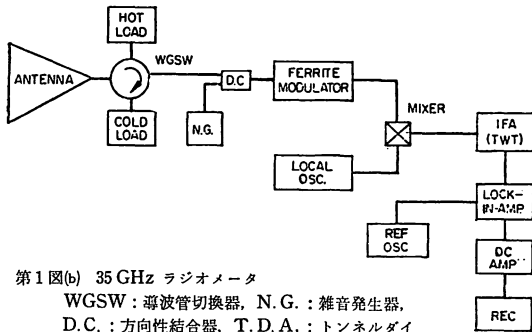
概要を報告する。またこれに関して、ミリ波の大気中での色々な気象状況での天空温度 (Sky noise temperature) を標準大気モデルを利用して計算したので併せて報告する。

2. ラジオメータの構成と設置場所

実験に使用した二つのラジオメータのブロックダイアグラムとその性能を第1図と第1表に示す。16 GHz と 35 GHz の二つのラジオメータは通常の Dicke Type のもので、16 GHz は mechanical chopper を、35 GHz は ferrite chopper を使っている。両方とも変調周波数は 94 ないし 100Hz の間可変である。これらのラジオメータは本報告に述べる実験の間第2図に示すゴダード内のビルディング 22 のそばに置かれ、観測方向は北北東仰角 45° に向けた。(ATS-V 受信局の一つロズマ



第1図(a) 16 GHz ラジオメータ



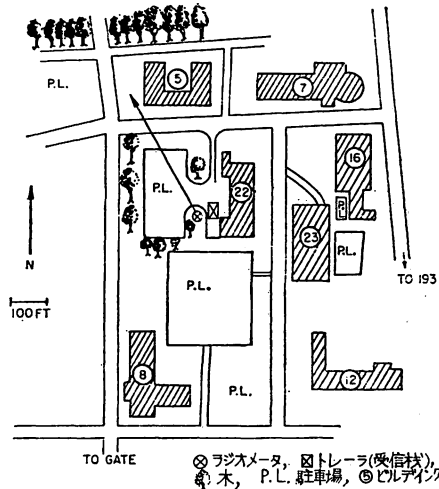
第1図(b) 35 GHz ラジオメータ

WGSW: 導波管切替器, N.G.: 雑音発生器,
D.C.: 方向性結合器, T.D.A.: トンネルダイ
オード増幅器, REF. OSC.: Reference 発振器,
REC.: チャート記録器

第1表 二つのラジオメータの特性

周波数 特 性	16 GHz Radiometer	35 GHz Radiometer
アンテナ	TRG Lens Ant.	TRG Lens Ant.
直 径	12 inch (30cm)	12 inch (30cm)
利 得	32 dB	39 dB
V S W R	<1.01	<1.01
開口能率	~0.8	~0.8
ビーム幅	4.0°	2.0°
高周波増幅	T.D.A. 15 dB(NF 7 dB)	Not used.
中間周波		
中心周波数	16 MHz	3.0 GHz
帯域幅	80 MHz	2.0 GHz
雑音指数	6 dB	12 dB
局 発	Klystron (Varian)	Klystron (Varian)
変 調 器	Mechanical	Ferrite Switching
変調周波数	94~100 Hz	94~100 Hz
記 録		
増 幅	Lock-in Amp	Lock-in Amp
出 力	0-5 V	0-5 V
感 度 ($=k \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}}$) $\tau=1 \text{ sec}$ $k=2$	0.22°K	0.45°K

高周波部 周囲温度	40°C ± 1°C
高温負荷	318°K (45°C)
低温負荷	Liquid nitrogen (77°K), Dry Ice (198°K) or Ice cubes (273°K)

第2図
設置場所

ンにおける仰角は41°なのでこれに近い値が選ばれた。) 気温, 湿度, 雨量などの気象測定はラジオメータの近くで行ない, ワシントンの Weather Bureau のデータと比較した。

3. 天空温度の測定と測定値の補正

3.1. 導波管損失を考慮した温度測定値の補正法

3.1.1. 天空温度の測定

アンテナから変調器までの導波管に損失があると天空の雑音温度(以下天空温度と略す)は見かけ上高くなる。低温負荷や高温負荷も同じ影響を受ける。実際に導

第2表 16 GHz フィーダロスと α

	損失 (dB)	α : 透過係数	$1/\alpha$
アンテナ系	0.9	0.813	1.23
高温負荷から変調器	0.95	0.804	1.24
低温負荷から変調器	1.15	0.767	1.30

第3表 35 GHz フィーダロスと α

	損失 (dB)	α : 透過係数	$1/\alpha$
アンテナ系	1.30	0.741	1.35
高温負荷から変調器	1.40	0.725	1.38
低温負荷から変調器	1.40	0.725	1.38

波管損失を計ったものを第2, 3表に示す。ただしアンテナ系は測定がむずかしいので損失は仮定してあるが、それは少なくとも導波管切換器から変調器までの損失を含んでいる。

導波管の損失を考慮した場合, Dicke temperature (Dicke switch, すなわち変調器のところでの温度) T_{ds} は天空温度 T_s と次のような関係にある。

$$T_{ds} = T_s \alpha + T_{amb}(1 - \alpha) \quad (1)$$

(T_{ds} : ディック温度, T_{amb} : 高周波匡体の中の温度 ($40^\circ \pm 1^\circ\text{C}$) α : 透過係数)

初めに 16 GHz における高温負荷, 低温負荷の較正点に対する T_d を求めると次のようになる。ただし T_{dh} は高温負荷のディック温度, T_{dc} は低温負荷のディック温度である。

高温負荷に対しては,

$$T_s = T_H = 318^\circ\text{K}, T_{amb} = 313^\circ\text{K}, \alpha = 0.804$$

$$\therefore T_{dh} = 317.0^\circ\text{K}.$$

これがレコーダ上で, 高温負荷の較正点になる。

低温負荷に対しては,

$$T_s = T_C = 77^\circ\text{K}, T_{amb} = 313^\circ\text{K}, \alpha = 0.767$$

$$\therefore T_{dc} = 132^\circ\text{K}.$$

これが同じく低温負荷の較正点になる。

アンテナの信号出力に関しては, レコーダスケールが直線的なので*, 高温負荷, 低温負荷より内挿して得られたレコーダ上の温度 T_{ds} からアンテナロス 0.9 dB を使って天空温度は次のようになる。

(1)式から

$$T_s = \frac{1}{\alpha} T_{ds} - \frac{1}{\alpha} (1 - \alpha) T_{amb}.$$

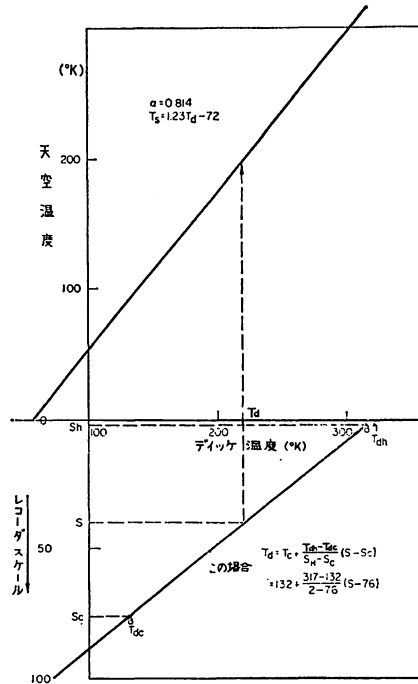
$$T_{amb} = 313^\circ\text{K}, \alpha = 0.813 \text{ を用いて}$$

$$T_s = 1.23 T_{ds} - 72 \quad (2)$$

実際のレコーダの記録から T_s を読み取る方法を第3図に示す。レコーダ上の任意の点 S から図の下部の線から T_d を求めさらに上に延ばして図の上部の線(2式)から天空温度を容易に求めることができる。

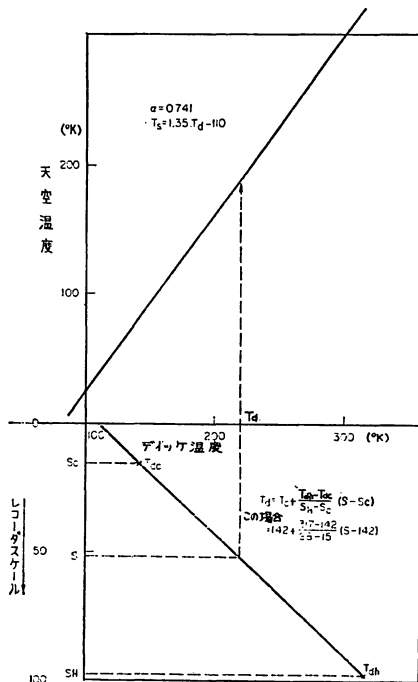
また 35 GHz に対しては, 導波管損失は第3表のように与えられている。同様にして高温負荷, 低温負荷, アンテナに関して Dicke temperature を計算すると次のようになる。

高温負荷; $T_{dh} = 317^\circ\text{K}.$



第3図
天空温度
読取り法
(16 GHz)

T_s : 天空温度, T_d : ディック温度, T_{dh} : 高温負荷ディック温度 (317°K), T_{dc} : 低温負荷ディック温度 (132°K), S : レコーダ上の信号のレベル, S_H : レコーダ上の高温負荷のレベル, S_C : レコーダ上の低温負荷のレベル



第4図
天空温度
読取り法
(35 GHz)
〔記号内容は第3図
に同じ〕

低温負荷; $T_{dc} = 142^\circ\text{K}$

アンテナ; $T_s = 1.35 T_{ds} - 110$

(3)

*付録1参照

35 GHz に対する T_a の読み取り方法は第 4 図のようになる。なお第 3 図、第 4 図の下部の線の勾配が反対なのは、二つのペンでレコーダ上に記録する場合、読み取りをわかりやすくするためにスケールを反対にした。

3.1.2. 測定温度の補正

レコーダ上の T_{da} から天空温度 T_a が得られるわけであるが、アンテナおよびフィーダの損失の絶対値が明らかでない。そこで天空温度の予測値を文献(3)の地上の水蒸気量と全大気中の損失に関する実験式から計算して、(2)、(3)式から得られた実測値と比較し、その温度差からアンテナとフィーダの損失を推定した。実際の測定データを第 4 表および第 5 表に示す。これらの表によれば差の平均は 16 GHz で 35°K、35 GHz で 23°K となっ

ている(第 3 表および 4 表で*は平均から省いている)。16 GHz のほうが差が大きいのは、導波管スイッチから各導波管への整合がときどき悪くなったためである。これらの温度差平均を考慮に入れて(2)、(3)式を書きなおすと次のようになる。

$$T_a = 1.39 T_d - 121 \quad (16 \text{ GHz}) \quad (2. A)$$

$$T_a = 1.50 T_d - 157 \quad (35 \text{ GHz}) \quad (3. A)$$

これにより真の天空温度を求めることができる。

3.2. 周囲環境の影響

設置した場所は第 2 図のようにビルディング 22 のそばでまわりに木などがあり、かなり影響を与えるものと考え(第 5 図(a)参照)、水平方向および 30° 仰角での空の温度を測定してみると第 5 図(b)および(c)になる。図中 30° 仰角で同図の 180° から 270° (Azimuth) に二つのピークがあるのは 2 本の高い木からの輻射である。なお天頂から水平方向へアンテナを動かしたとき、測定値が $\cos \phi$ の法則からずれる値を考慮して、仰角 45° における周囲環境の影響を概略調べてみると、16 GHz で 2.5°K、35GHz で 11°K くらいになることがわかった(付録 4 参照)。

4. 雨と雲による天空温度の上昇

この章では雲または雨による天空温度の晴天の日からの上昇についてのとべる。

雷雨のときなどは 35 GHz は約 2~3 分で晴天の日の温度から 250° 270°K に、16 GHz のほうは 8~10 分でその温度に達する(第 9 図参照)。

アンテナウィンドウとしてマイラーフィルムを使っていたとき雨粒がつきやすく、20°~30°K くらいの上昇になることもあったが、測定にあたってはじゅうぶん注意した。実験の後半では、その代わりにテフロン系のラフな表面のものを使うことによりウィンドウ面に露を結ぶことはさけられた。

第 4 表 測定温度と予測天空温度との比較

16 GHz 仰角 45°							
期 日	期 刻	絶対湿度 (g/m³)	文献(3)による 天空温度 の予測値 (°K) C	アンテナ系ロス $\alpha=0.813$ としたときの 測定温度 (°K) D	温度差 (°K) D-C	参 考	
						Shulkin の式による 計算値 (°K)	Bean & Dut- ton の式に よる計算値 (°K)
6. 25	16:50	15	11 11	B. 37 A. 46	36 35	(8)	(8)
6. 26	16:30	16	11	45	34	(8)	(8.5)
6. 28	16:30	19	12	51	39	10	9.5
6. 29	18:30	10	9	53	44	(6.4)	(6.5)
6. 30	17:05	11	9 9	B. 54 A. 70	45 61*	(7)	(7)
7. 1	17:40	13	10 10	B. 64 A. 46	54* 36	8	7.5
7. 2	16:20	11.5	9 9	B. 34 A. 39	15 30	7	7

平均温度差 35°K、* 導波管切換器の不完全動作。

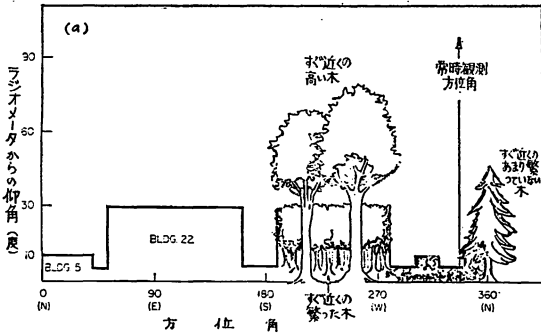
B 較正前、A 較正後、() 内挿値

第 5 表 測定温度と予測天空温度との比較

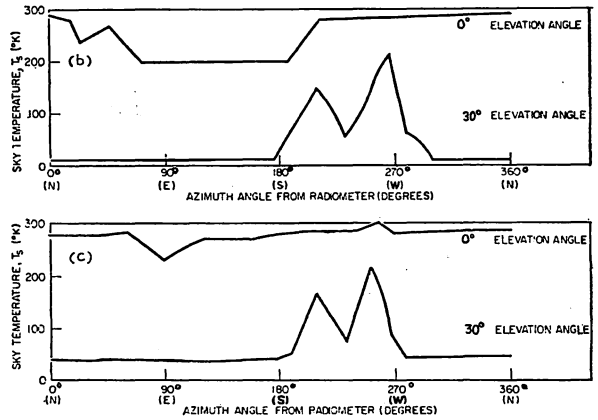
35 GHz 仰角 45°							
期 日	期 刻	絶対湿度 (g/m³)	文献(3)による 天空温度 の予測値 (°K) C	アンテナ系ロス $\alpha=0.741$ としたときの 測定温度 (°K) D	温度差 (°K) D-C	参 考	
						Shulkin の式による 計算値 (°K)	Bean & Dut- ton の式に よる計算値 (°K)
6. 25	16:50	15	32	64	32	27	32
6. 26	16:30	16	33	60	27	(28.5)	(33)
6. 27	17:30	18	35	00	25	31	36
6. 28	16:30	19	35	71	36*	(31.5)	(32)
6. 29	18:30	10	26	51	25	(20.5)	(26)
6. 30	17:05	11	27	B. 50 A. 77	23 50*	(22)	(27)
7. 1	17:40	13	30	48	18	(24)	(30)
7. 2	16:20	11.5	28	40	12	23	28
7. 3	16:00	12	29	B. 68(CL) A. 50	39* 21	(24)	(28)

平均温度差 23°K、* 導波管切換器の不完全動作。

B 較正前、A 較正後、() 内挿値、CL 部分的な曇り



第5図(a) 周囲環境図

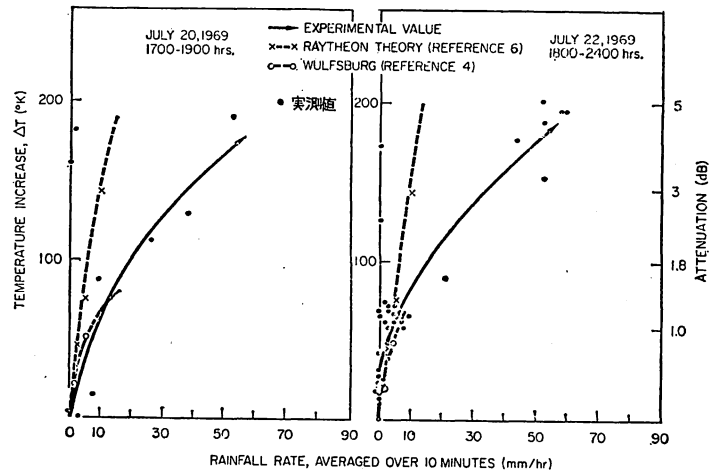


第5図(b) 16 GHz, (c) 35 GHz の周囲温度

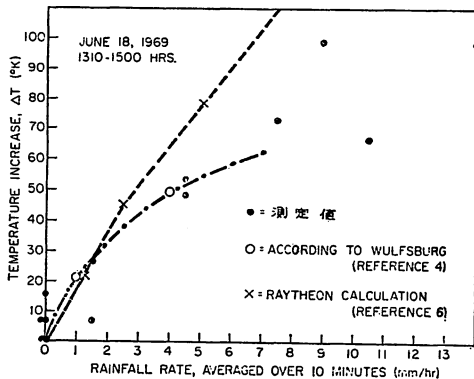
4.1. 雨による天空温度の上昇

雨による測定温度の上昇 ΔT の10分間平均値と、そのときの雨量の10分間平均値を取って、二、三の雨について調べてみると、雨量が10mm/hr以下ぐらいの一樣な雨の場合には雨量と平均温度上昇はだいたい計算に合うようである (Raytheon の計算⁽⁶⁾ および Wulfsberg⁽⁴⁾ の実験)。それを第6図に示す。10mm/hr以上の雨になると、それがしゅう雨性の場合は45°の仰角で見ているため、その天空温度と雨量とは相関が低くなる (第7図, 第8図参照)。むしろ時間をずらせて相関を求めたほうがよいと思われる場合もある。雷雨のときなどは雨域が狭いせいもあって、45°の仰角から見た天空温度は、当然雨の真下で測定するよりずっと温度が低くなっている。それをしゅう雨性の降雨構造についての一つのモデル (Raytheon のモデル⁽⁶⁾) で概略計算してみると、第10図のようにいちばん雨の多い所 (図中B点) での仰角45°での減衰量は、その点で真上を見たときの減衰量 (dB) の約60%, また雨域がまっすぐ横軸にそって0の

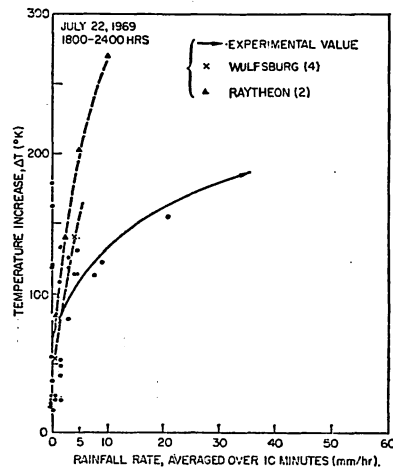
方向へ動いて行ったとき (図中45°の線②の所) 最高80%となっている。なお、第9図に雷雨のときの雨量と、測定温度のデータの1例を示す。



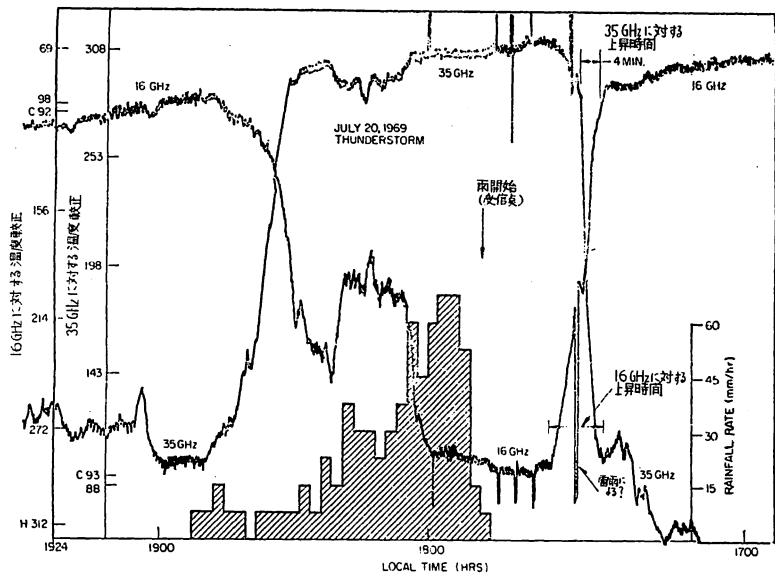
第7図 雨による天空温度の増加 (16 GHz)



第6図 雨による天空温度の上昇 (16 GHz)



第8図 雨による天空温度の増加 (35 GHz)

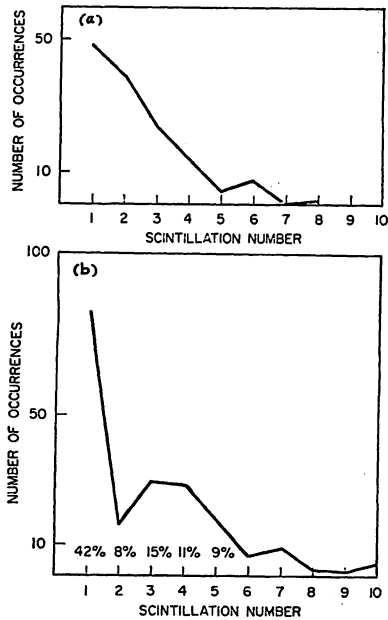


第9図 データ記録の1例 (雷雨のとき、斜線は雨量を示す)
(縦軸の H, C は校正点)

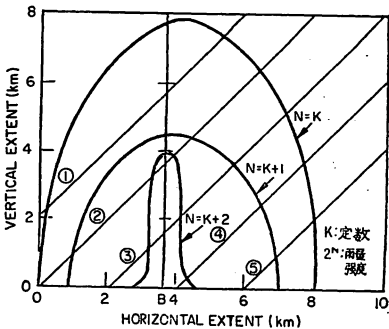
4.2 雲による天空温度の上昇

4.2.1 雲によるシンチレーション

この二つのラジオメータは時定数1秒であるが、1分以内の測定値の変動は雑音レベルの変動におおわれてしまいよくわからない。雲による温度の上昇は非常にゆるやかで、通常1分以上の時定数である。そこで10分間のintervalを取り、その中での平均レベルを切る回数をここでは雲によるシンチレーションナンバと称し、10分間での最高、最低の温度変動幅を ΔT とし、各シンチレーションナンバでの ΔT の平均を平均温度上昇とす



第11図
(a) 16 GHz,
(b) 35 GHz の10
分間シンチレー
ションナンバの
分布



第10図 Raytheon のモデル (雨量の
プロフィール)

る。シンチレーションナンバの分布を第11図に、またその分布をパーセントで示した値および平均温度上昇を第6表に示す。実験期間は1969年6月~7月でありその間、全シンチレーションナンバの90%を占める値は、16GHzで4、35GHzで5であった。平均シンチレーションナンバは

第6表 10分間シンチレーション ナンバ
(a) 35 GHz

シンチレーション ナンバ	頻 度	比 率(%)	平均温度上昇
1	82	42.2	15.6°K
2	16	8.2	11.9
3	29	14.9	13.4
4	28	14.5	12.1
5	17	8.8	17.0
6	6	3.1	13.0
7	9	4.6	11.5
8	2	1.0	18.5
9	1	0.5	13.0
10	4	2.0	16.3
加 重 平 均	2.9		14.3°K

(b) 16 GHz

シンチレーション ナンバ	頻 度	比 率(%)	平均温度上昇
1	49	36.0	6.6
2	39	28.6	4.3
3	24	17.6	9.5
4	13	9.6	5.0
5	3	2.2	6.0
6	7	5.1	4.7
7	0	0	0
8	1	0.7	3.0
加 重 平 均	2.2		6.1

16 GHz で 2, 35 GHz で 3 となる。シンチレーションナンバ 1 がいちばん多く全体の約 40% を占める。これは雲による温度上昇の特徴といえる。なお雲による 10 分間の温度上昇の平均値は 16 GHz で 6°K, 35 GHz で 14°K である。35 GHz で 14°K という値は K. N. Wulfsberg (AFCRL, Reference 4) が雲に関して測定したデータ 5°~25°K の中間の値を示している。

4. 2. 2. シンチレーションナンバ 1 の中での

天空温度の分布

シンチレーションナンバ 1 のデータの中での天空温度の分布を微細にみると、16 GHz で全体の 92% が温度上昇 10°K 以下、35 GHz で 90% が 30°K 以下になっている (第 7 表参照)。残り約 10% が乱層雲などの含水量の多い雲がビームの中に入ったということがいえる。

雲は通常大きなかたまりで動いている。はっきりそれとわかる場合について測定した例を第 8 表に示す。継続時間は長くて約 30 分以内で温度上昇は 35 GHz で 80°K に達していた。 ΔT は第 12 図に示すように、晴天時からの温度上昇で Δt はその継続時間を示す。第 8 表によると、35 GHz と 16 GHz の雲による温度上昇の比は 35 GHz のほうが 16 GHz の 3.2 倍となっている。(これは 5 章の第 15 図に示すように、水蒸気量による天空温度上昇における勾配の項が 15 GHz と 35 GHz で約 3 倍となっている。)

第 7 表 シンチレーション ナンバ 1 の中の温度分布

(a) 35 GHz

温 度 増 加	頻 度	%
100 → 110(°K)	1	
90 → 100	0	
80 → 90	1	
70 → 80	1	
60 → 70	2	
50 → 60	2	
40 → 50	0	
30 → 40	1	
20 → 30	9	11%
10 → 20	21	26%
0 → 10	42	52%

(b) 16 GHz

温 度 増 加	頻 度	%
40 → 50(°K)	0	
30 → 40	1	
20 → 30	2	
10 → 20	1	
0 → 10	45	92%

第 8 表 雲塊による温度上昇と継続時間

月 日	35 GHz		16 GHz		比 率 $\Delta T_{35}/\Delta T_{16}$
	Δt	$T(^{\circ}\text{K})$	Δt	$T(^{\circ}\text{K})$	
6/13	5.5	19	2	5	3.8
	33	82	16	24	2.9
	7	37	6	10	3.7
	2.5	16	1.5	3	5.3
	4	25	9	19	1.3
	1	10	2	3	3.3
6/18	10	54			
	3	17	4	4	4.3
	1.5	7	2	3	2.3
6/19	3	20	4	7	2.8
	2	7			
	3	7			
	16	46	17	17	2.7
	8.5	13	7	3	4.3
	11	17	7	8	2.1
					平均比率 3.2



第 12 図 雲塊による温度上昇と継続時間

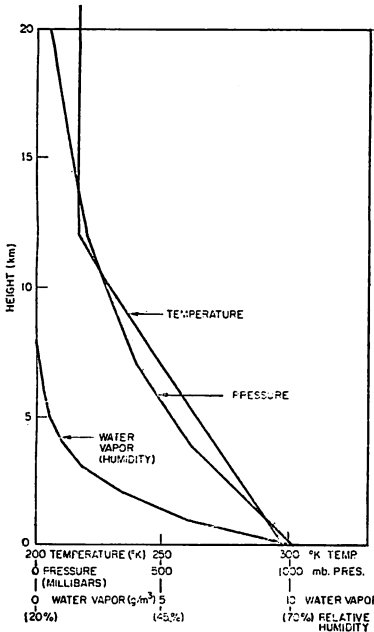
5. 10 GHz から 40 GHz までの
天空温度の計算

5. 1. 天空温度の計算方法

この報告では、Van Vleck の式を修正した Morris Shulkin の式(A)と同じく Bean & Dutton の式(B)を使って天空温度を計算した。始めに各 1km の高さでの減衰を以下に述べる式により計算し、第 13 図のような標準大気モデルに関して積分した。また雲や雨のときについても標準的な気象状況のモデルを使って雲や雨による温度上昇を計算した。

(A) Van Vleck—Morris Shulkin の式

$$\frac{k}{\rho} \left| H_2O = \frac{C_1 \times 10^{-278}}{T^{\frac{5}{2}} \lambda^2} \left[\frac{\Delta \nu / c}{\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right)^2 + (\Delta \nu / c)^2} + \frac{\Delta \nu / c}{\left(\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda} \right)^2 + (\Delta \nu / c)^2} \right] + \frac{c_2 \Delta \nu / c}{T \lambda^2} \right. \quad (3)$$



第13図
標準大気モデル
(文献3)

k ; 減衰 dB/km, c_1 ; 4.77×10^4 (定数), $\Delta\nu/c = 1.51$

$\times 10^{-3} (P + 3.7e) T^{-\frac{1}{2}}$, $c_2 = (0.207 \times \rho + 14.4)$,
 ρ ; 水蒸気量 (g/m³), $\lambda_0 = 1.349$ cm, p ; 気圧 mb,
 e ; 水蒸気圧 mb, T = ある高さの温度 (°K)

$$\frac{k}{\rho} \Big|_{O_2} = \frac{0.358}{T \lambda^2} \left[\frac{\Delta\nu/c}{\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)^2} + \frac{\Delta\nu/c}{\left(\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)^2} + \frac{\Delta\nu/c}{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)^2} \right] \quad (4)$$

k ; 減衰 dB/km, ρ ; 酸素密度 g/m³, $\Delta\nu/c$; $3.38 \times 10^{-4} \cdot p \cdot T^{-\frac{1}{3}} = 0.02$ ($T = 293^\circ\text{K}$, $P = 1013$ mb)
 $\lambda_0 = 0.5$ cm.

(B) Van Vleck-Bean & Dutton の式

$$\frac{k}{\rho} \Big|_{H_2O} = \frac{3.53 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \left[\frac{\Delta\nu/c}{\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)^2} + \frac{\Delta\nu/c}{\left(\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)^2} \right] \left(\frac{293}{T} \right)^{2.5} + \frac{0.05}{\lambda^2} (\Delta\nu/c) \cdot (293/T)$$

$$\Delta\nu/c = 0.087 \times \left(\frac{p}{1013.25} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{318}{T} \right)^{\frac{1}{2}} (1 + 0.0046 \times \rho)$$

$$\frac{k}{\rho} \Big|_{O_2} = \frac{0.34}{\lambda^2} \left[\frac{(\Delta\nu/c)_1}{\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)_1^2} + \frac{(\Delta\nu/c)_1}{\left(\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)_1^2} + \frac{(\Delta\nu/c)_2}{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 + (\Delta\nu/c)_2^2} \right] \times \left(\frac{293}{T} \right) \quad (6)$$

$$(\Delta\nu/c)_1 = 0.018 \times (P/1013.25) (293/T)^{0.75}$$

$$(\Delta\nu/c)_2 = 0.049 \times (P/1013.25) (293/T)^{0.75}$$

$$\rho_{O_2} = 0.385 \times \frac{P_{20}}{T} \quad \rho_{O_2}; \text{酸素密度}$$

$$P_{O_2} = 0.210 \times p \quad P_{O_2}; \text{大気中の酸素の分圧}$$

P , T , λ_0 などは (A) の場合と同じ

(A) と (B) による計算のおもな違いは、酸素吸収に関する項で、Bean & Dutton が Van Vleck 以降の研究者による実験値を使っている点である。

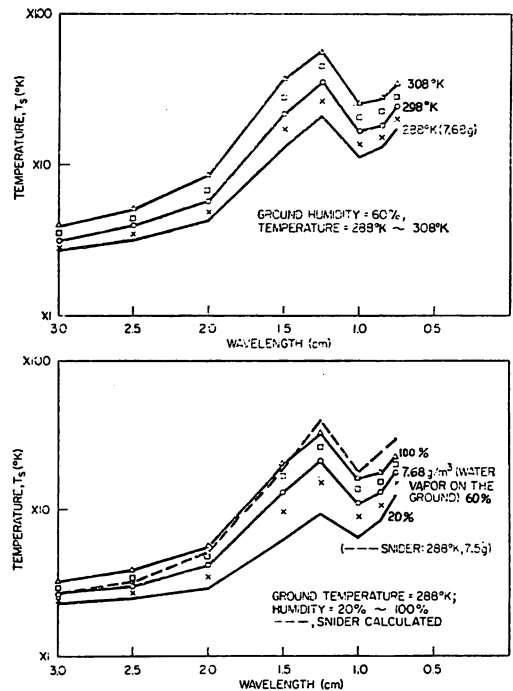
5.2. 晴天の日の天空温度変化

第14図に Shulkin の式によって求めた天空温度の水蒸気量や地上温度による変化範囲を示す。たとえば地上温度一定で、湿度を 20~100% 変えると、 T_s (天空温度)

15 GHz ($\lambda = 2$ cm) 3 ~ 5.5°K

24 GHz ($\lambda = 1.25$ cm) 9 ~ 32°K

35 GHz ($\lambda = 0.86$ cm) 8 ~ 18°K



第14図 地上の温度、湿度による天空温度の変化

第 9 表 天空温度变化 (Shulkin の式)

Frequency (GHz)		10	15	20	30	35	40
$T_0(^{\circ}\text{K})$	波長, λ (cm)	3	2	1.5	1.0	0.8	0.75
	湿度 20%~100% (g/m ³)						
		天 空 温 度 上 昇 (°K)					
280	2.6	2.3	2.9	6.2	6.5	8.3	12.7
	13.0	3.1	2.5	20.1	26.1	17.5	23.1
293	3.4	2.3	3.1	7.4	7.2	8.9	13.2
	17.2	3.4	6.7	26.2	20.3	21.6	27.7
298	4.6	2.3	3.3	9.0	8.1	9.7	14.1
	23.0	4.0	8.3	34.2	26.1	27.3	34.1
303	6.0	2.4	3.6	11.1	9.3	10.8	15.2
	30.3	4.6	10.4	44.3	33.7	35.0	42.7
308	7.9	2.5	4.0	13.7	10.9	12.3	16.8
	39.6	5.6	13.4	56.9	44.0	45.4	54.6

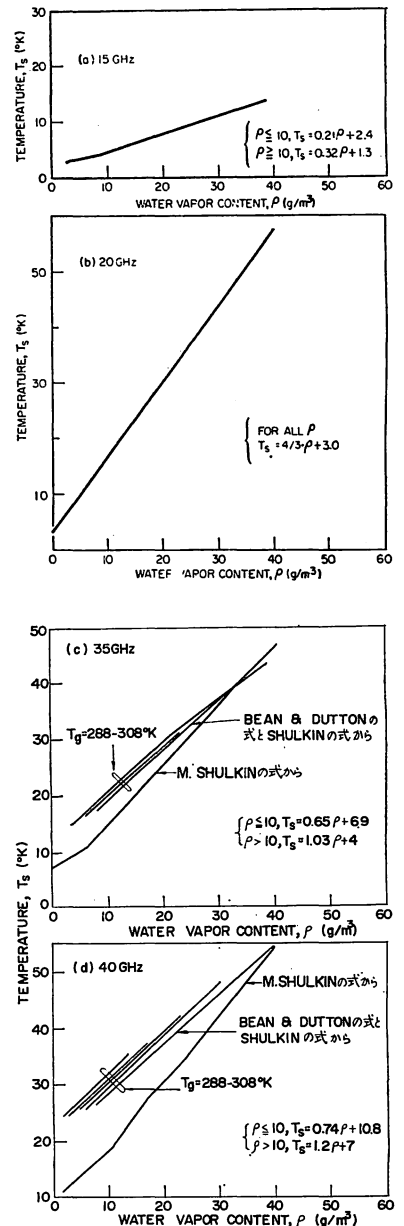
第 10 表 天空温度变化 (Bean & Dutton の式)

Frequency (GHz)		10	15	20	30	35	40
$T_{\theta}(^{\circ}\text{K})$	波長, λ (cm)	3	2	1.5	1.0	0.86	0.75
	湿 度 20%~100% (g/m ³)						
		天 空 温 度 上 昇 (°K)					
288	2.6	2.4	3.3	7.3	9.8	14.4	24.7
	13.0	3.2	5.9	22.0	19.3	23.2	14.2
293	3.4	2.4	3.4	8.3	10.4	14.7	24.8
	17.2	3.4	6.9	27.5	22.9	26.4	37.5
298	4.6	2.4	3.6	9.8	11.1	15.3	25.2
	32.0	3.8	8.2	34.5	27.6	30.8	42.1
303	6.0	2.4	3.8	11.5	12.1	16.1	25.8
	30.3	4.3	9.9	42.8	33.5	36.4	48.1
830	7.9	2.5	4.2	13.7	23.4	17.2	26.9
	39.6	5.0	12.1	52.9	41.1	43.6	45.8

地上湿度 (60%) 一定では

15 GHz 4 ~ 9 $^{\circ}\text{K}$
24 GHz 21 ~ 57 $^{\circ}\text{K}$
35 GHz 13 ~ 37 $^{\circ}\text{K}$

第14図を数値で示したものが第9表であり, 第10表に



第15図 (a) (b) (c) (d) 水蒸気量による天空温度上昇

は Bean & Dutton の式で計算した値を示す。30 GHz 以下の周波数では両者はだいたい一致しているが, 30 GHz 以上の周波数では水蒸気量が低いときは差が 10 $^{\circ}\text{K}$ 近くになっていることがわかる。この差は主として酸素の減衰の計算の違いによるものである。水蒸気量を横軸にし, 縦軸に天空温度を取って第9, 10表を図にすると第15図(a)~(d)のようになる。これから簡単に地上の水蒸気量により天空温

第11表 垂直方向損失 (dB)

地上温度 (°K)	絶対湿度 (g/m³)	15* GHz		35 GHz	
		Shulkin (Reference 1) の式	Bean & Dutton の式 (Reference 2)	Shulkin	Bean & Dutton
288	2.56(20%) 12.8(100%)	0.05 dB 0.09	0.05 dB 0.096	0.14 dB 0.29	0.24 dB 0.39
293	3.4 17.2	0.05 0.105	0.055 0.109	0.14 0.35	0.24 0.44
298	4.6 23.0	0.05 0.13	0.056 0.127	0.15 0.44	0.25 0.50
303	6.06 30.3	0.055 0.16	0.06 0.15	0.17 0.55	0.25 0.58
308	7.9 39.6	0.06 0.2	0.06 0.18	0.29 0.71	0.27 0.69

* 計算は 15 GHz で行なった。Radio meter は 16 GHz

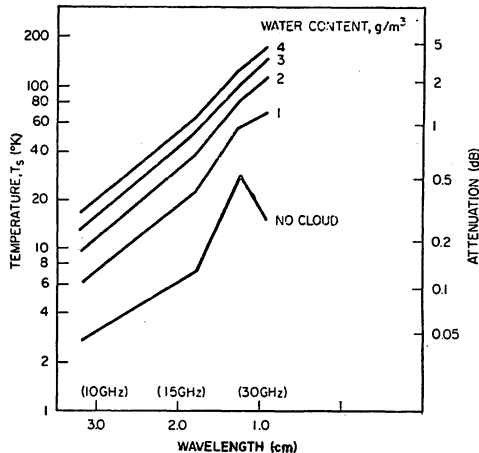
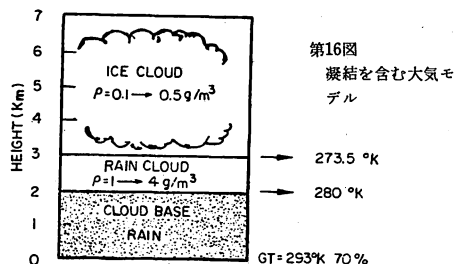
第12表 NASA TN Report からの減衰測定一覧

(cm)	Vertical Att. (dB)	Experimenters
2	0.06—0.1	Wulfsberg (Radio Science, Vol. 2, p. 319, 1969)
0.87	0.363	Aarons, Barron (IRE, Vol. 46, p. 325, 1958)
0.86	0.22—0.32	Wulfsberg (Radio Sci., Vol. 2, p. 3129, 1967)
0.86	0.13—0.34	Kalagham and Albertini (AFCRL, 1965)
0.86	0.2 (Nov. 12—Dec. 9)	Copeland and Tylor (Astrophys. J., Vol. 139, p. 407, 1964)
0.86	0.12—0.39 (one year)	Gibson (IRE, Vol. 46, p. 280, 1958)
0.86	0.2—0.6 (Sept)	Gibson (Astrophys. J., Vol. 137, p. 611, 1963)
0.85	0.15—0.18 (Clear cold weather)	Lynn, Meeks (Astron. J., 69, p. 65-67, 1964)

度がわかる。図中に描いてある ρ と T_s の関係式は ρ (地上水蒸気量) を入れて簡単に天空温度 T_s を求めるための最適近似式である。なお 35 GHz と 40 GHz に関する図では、Shulkin の式からの値と Bean & Dutton の式からの値に少し差が出てきている。Bean & Dutton の式で直線が 3～5 本あるのは、地上温度をパラメータにして計算した値を各々直線近似したものである。

第5表参考欄に Shulkin⁽¹⁾ と Bean & Dutton⁽²⁾ の式による天空温度の計算値を示した。後者のほうがその表の第4欄の実験から得られている予測値とだいたい同じ値を示している。第4表の 16 GHz に関しては、どちらの計算も差がないことがわかる。第11表に第9、10表の天空温度変化を損失 (dB) で表わしたものを示す(こ

れは天頂方向に関する計算である)。第12表に NASA の Technical Note⁽¹¹⁾ から引用した、垂直方向の減衰に関する測定がのせてある。それによると 35 GHz (0.86cm) で天頂方向の損失が 0.13 dB から 0.6 dB にわたっている。これは第11表の計算値によると、晴天で 0.14～0.7 dB に達している。したがって第12表の損失測定値のばらつきは、主として地上気象要素の変化によるものと思われる。特に Gibson は IRE Vol. 46, p. 280(1958) で地上水蒸気量による損失の変化を計算し、また実測している。



第17図 Water cloud による天空温度上昇

5.3. 雲による天空温度の上昇

第16図に Altshuler その他の人^{(3), (7)} による凝結した水蒸気(水滴、氷滴など)を含む場合における標準大気構造を示す。また雲による減衰係数としては第13表 Gunn & East の数値を用いた。ただし 3km 以上の氷の層の減衰係数は水に比べ2けた少ないので計算では省略した。第17図に示すように雲の含水量による天空温度上昇は、16 GHz では低いがミリ波領域において顕著になる。たとえば

雲なし 雲(1g含水量)

 $\lambda = 1.8 \text{ cm} : 7^\circ \sim 23^\circ \text{K}$ $\lambda = 0.9 \text{ cm} : 15^\circ \sim 68^\circ \text{K}$ となる。

第13表 雨、雲による減衰係数

Condition of Atmosphere	Wavelength, λ (cm)	3.2	1.8	1.24	0.9
Rain	Attenuation, dB/km	$0.0074 R^{1.31}$	$0.045 R^{1.14}$	$0.12 R^{1.05}$	$0.22 R^{1.00}$
Water (0°C)	M water content, M (g/m ³)	$8.58 \times 10^{-2} M$	$26.7 \times 10^{-2} M$	$53.2 \times 10^{-2} M$	$99 \times 10^{-2} M$
cloud (10°C)		$6.3 \times 10^{-2} M$	$17.9 \times 10^{-2} M$	$40.6 \times 10^{-2} M$	$68.1 \times 10^{-2} M$
Ice (-10°C)	M (g/m ³)	$8.19 \times 10^{-4} M$	$14.6 \times 10^{-4} M$	$21.1 \times 10^{-4} M$	$29.3 \times 10^{-4} M$
cloud (-20°C)		$5.63 \times 10^{-4} M$	$10 \times 10^{-4} M$	$14.5 \times 10^{-4} M$	$20.0 \times 10^{-4} M$

5.4. 雨による天空温度の上昇

これは前と同じく第16図のモデルと第13表の雨に対する減衰係数を使って計算した。地上の気温と湿度はそれぞれ 293°K と 70% と仮定する。

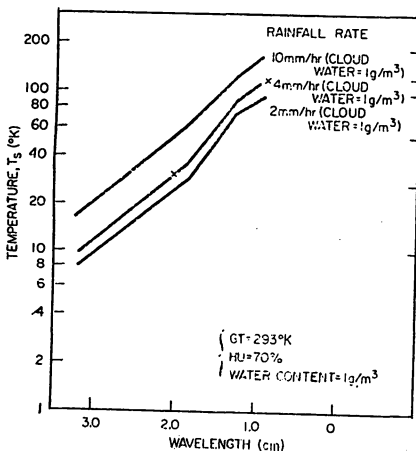
雨が降っている場合の全損失は次のようになる。

$$\beta_t = \beta_{at} + \beta_{cl} + \beta_r \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

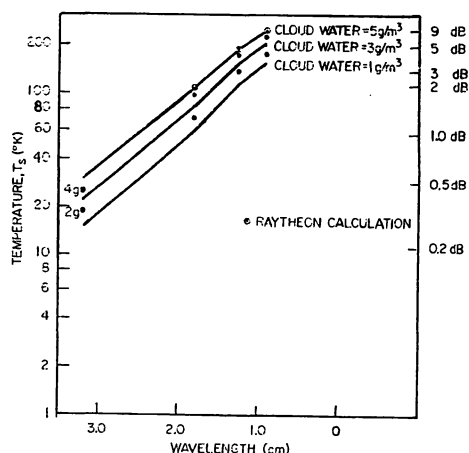
β_{at} ; 大気中の損失, β_{cl} ; 雲による損失, β_r ; 雨による損失

(7)式の β を透過係数 α に変換して天空温度を計算すると第18図, 第19図のようになる。第18図は雨が 2mm/hr から 10mm/hr まで変化したときの天空温度の変化範囲であり(雲の含水量は 1g/m³ で一定), 第19図は 10mm/hr の雨が降った場合の雲の含水量による天空温度変化の値である。たとえば 10mm/hr のとき 35 GHz では雲の含水量により 155~235°K まで上がり, 16 GHz では 50~90°K まで上がる(この項特に 16 GHz で計算)。

5.5. 平均天空温度の計算



第18図 雨による天空温度上昇(垂直方向)
(× Wulfsberg の実験⁽⁴⁾)



第19図 雨が10mm/hrのときの雲の含水量による天空温度上昇
(◎ Raytheon の計算値⁽⁶⁾)

一般に伝搬路上の T_m (mean temperature 平均天空温度) とそのときの天空温度 T_s との間には次のような関係がある。

$$T_s = (1 - \alpha) T_m \quad (8)$$

したがって T_m と T_s がわかれば大気中の損失 α を容易に求めることができる。この意味で T_m の計算は重要である。 T_m は地上温度 T_g との間に次のような簡単な関係があり, 概略的には地上温度から T_m を求めることができる。

$$T_m = 1.12 \cdot T_g - 50 \quad (9)$$

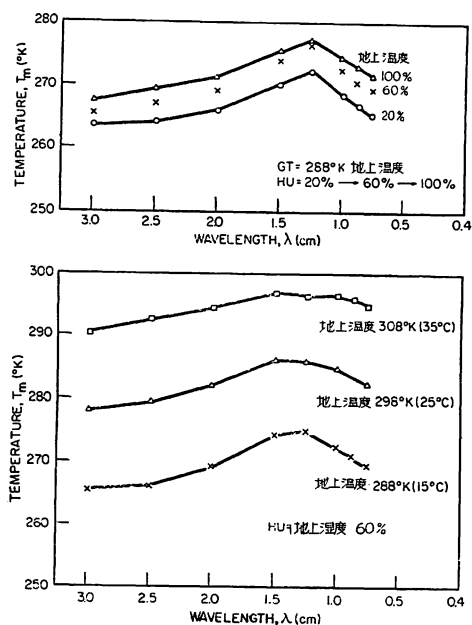
この式は Wulfsberg⁽⁴⁾ が求めているものである。ここでは厳密に T_m を計算し(9)式がだいたいの T_m の近似式を与えることを証明する。

T_m は厳密には次のように与えられる。

$$T_m = \frac{\int_0^{\tau_0} T_s e^{-\tau} d\tau}{1 - e^{-\tau_0}} \quad (10)$$

T : その高さでの温度, τ_0 : 全損失, τ : ある高さまでの減衰量, $e^{-\tau_0} = \alpha$

T_m が地上の気温, 湿度によりどう変わるかを示したのが第20図であり, 湿度の影響は顕著でないが, 地上の温度に対しては T_m はかなり変化する。これを別に地上温度 T_g を横軸に, T_m を縦軸に示したのが第21図

第20図 地上温度、湿度による T_m の変化

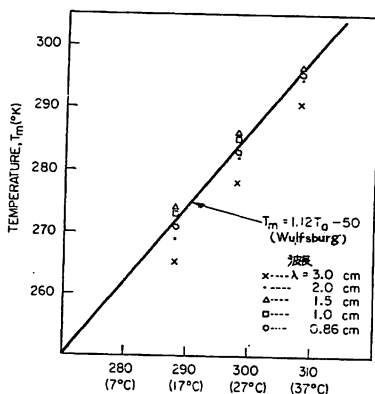
である。実線は Wulfsberg⁽⁴⁾ が求めた(9)式である。両者よく一致することがわかる。ただしこれは晴天の日に関してである。したがって T_m は地上温度の関数であるが、湿度の変化に対しても、やや変化する。地上の温度だけから T_m を求めた場合 α に多少の誤差を生ずる。詳しい計算は略すが、 α が小さいとき ($\alpha < 0.5$) で約 0.2 dB の誤差になる。

6. 結 論

ATS-V のロズマン地上局に使われる 予定の二つのラジオメータを使って予備実験を行なった。空を黒体としたときの予測値と測定値の差は 16 GHz で 35°K, 35 GHz では 23°K になった。これがアンテナから受信機までの導波管などを含めた全回路系の損失による温度上昇と考えられる。

1 点の雨量と仰角 45° のラジオメータの天空温度との相関は、雨の弱いときにはよいが、雷雨のときなどは相関がよくない。雷雨のときはむしろ時間軸をずらせて比較したほうがよいと思われる場合もある。雲によるシンチレーションは、10分間の間隔でみた場合、シンチレーションナンバ1がいちばん頻度が多く、また最高シンチレーションナンバは 16 GHz で 8, 35 GHz で 10 であった。

標準大気モデルを使って計算した天空の温度は、晴天の日で、15 GHz で 3~5.5°K, 35 GHz で 8~18°K となっている。Shulkin の式と Bean & Dutton の式の主



第21図 地上温度による平均温度の変化

15°K から 68°K にもなる。

謝 辞

これは筆者が、科学技術庁の長期在外研究員として NASA, GSFC (ゴダード宇宙航空センター) に 1 年 3 か月滞在し、ATS-V ミリ波伝搬実験に使われる予定の二つのラジオメータを使った実験の報告であるが、まず筆者の NASA 留学に関し尽力して下さった前上田所長、留学期間の延長などに関して配慮をいただいた河野所長、滞在中の仕事についてなにかと指示を与えて下さった槽谷電波部長並びに福島電波気象研究室長に深く感謝します。最後に帰国後、内容に関して深く検討していただいた船川衛星管制室長に感謝します。

参 考 文 献

- (1) Shulkin, M., Determination of Microwave Atmospheric Absorption Using Extraterrestrial Sources, Naval Res. Lab. Rep. 3843, Oct. 1951.
- (2) Bean, B. R., and Dutton, E. J., Radio Meteorology, NBS. Monograph 92, March 1966.
- (3) Altshuler, E. E., Falconne, Jr., and Wulfsberg, K. N., Atmospheric Effects on the Propagation at Millimeter Wavelengths, I. E. E. E. Spectrum, 5, pp. 83-90, July 1968.
- (4) Wulfsberg, K. N., Apparent Sky Temperature Measurements at Millimeter Wave Frequencies, Phys. Sci. Res. Papers No. 38, Air Force Cambridge Res. Labs., July 1964.
- (5) Snider, J. B., Proposed Program for the Study of Atmospheric Attenuation of Satellite Signals, ESSA. Tech. Report RL 62-WPL 1, Jan. 1968.

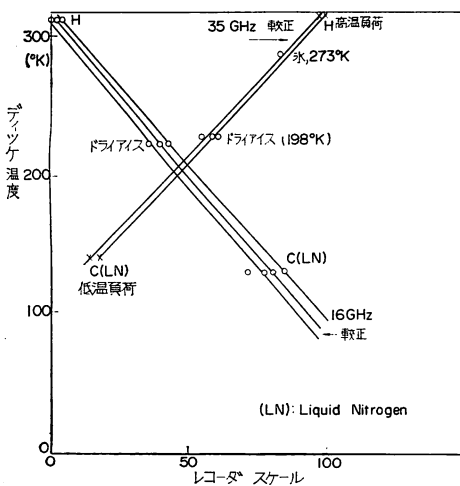
たる差は酸素の吸収係数によるもので、水蒸気量の多いところでは両者はとんど一致した。

雨や雲による天空温度増加を計算してみるとここに使った Model では、雲の含水量がいちばん大きな影響を与えていることがわかった。 $\lambda=0.9$ cm では雲の含水量が全くないときから 1g 増加したとき、天空温度は

- (6) "Final Report for Millimeter Communication Propagation Program" extension, 28 May 1966-27 Feb. 1967) Vol. 1, Sections 1 through 3. Prepared by Raytheon Co. Space and Information Systems Division, Contract No. NAS 5-9525.
- (7) Mason, B. J., The Physics of Clouds, Oxford, Clarendon Press, 1957.
- (8) Van Vleck, J. H. and Weisskopf, V. F., On the Shape of Collision-Broadened Lines, Rev. Mod. Phys., 17, Nos. 2 and 3, 227-236, April to July 1945.
- (9) Van Vleck, J. H., The Absorption of Microwaves by Oxygen, Phy. Rev., 71, No. 7, 413-424, April 1947.
- (10) Van Vleck, J. H., The Absorption of Microwaves by Uncondensed Water Vapor, Phy. Rev., 71, No. 7, 425-433, April 1947.
- (11) Tompson III, W. I., and Haroules, G. G., A Review of Radiometric Measurements of Atmospheric Attenuation at Wavelengths from 75 cm to 2 mm, NASA TND-5087, Electr. Res. Center, Cambridge, Mass, April 1969.
- (12) Gunn, K. L. S., and East, T. W. R., The Microwave Properties of Precipitation Particles, Quat. J. Roy. Met. Soc., 80, 522-545, 1954.

付録 1. 較正方法とその問題点

二つのラジオメータの較正は、低温負荷を入れた後、



付1図 ラジオメータの較正

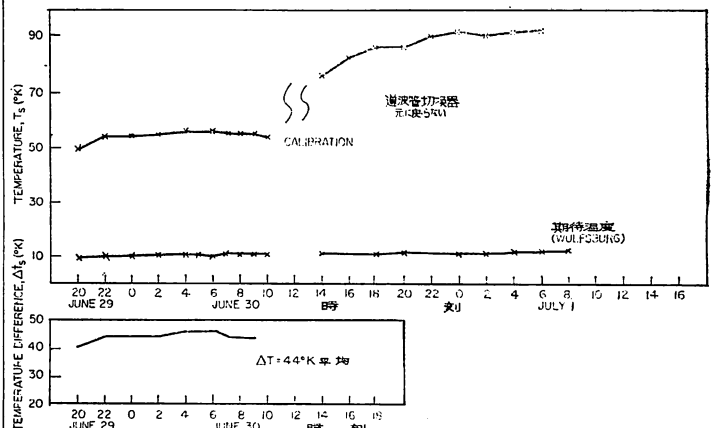
導波管切替器により高温負荷 (318°K) と低温負荷 (7°K) とを切換えて行なった。レコーダの直線性を調べるため、別に二つの低温負荷を加えてテストした結果、付1図に示すように、レコーダの直線性はかなりよいことがわかった。

較正のとき問題となったのは、低温負荷から導波管切替器に至る導波管内に、水滴が生ずることがあり、これにより較正レベルはかなり変動し不安定になることがあった。そのため較正のときにはいつも真空ポンプで前記の水滴を生ずる導波管の部分を実空にするか、または高圧ガス（ヘリウム）で圧力をかけながら較正した。

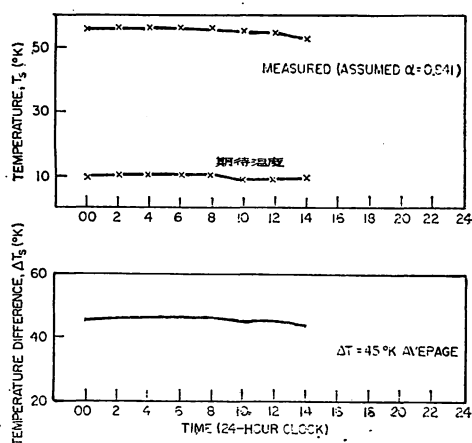
付録 2. 測定の温度ドリフトの問題

天空温度の長時間変化をみると、温度ドリフトが問題になる。まず付2～4図に二つのラジオメータの天空温度の時間変化を示す。それによれば較正時を除いて特に典型的なドリフトはみられないが、実験を通じてそのドリフトを起したのは主として次のような事項によると考えられる。

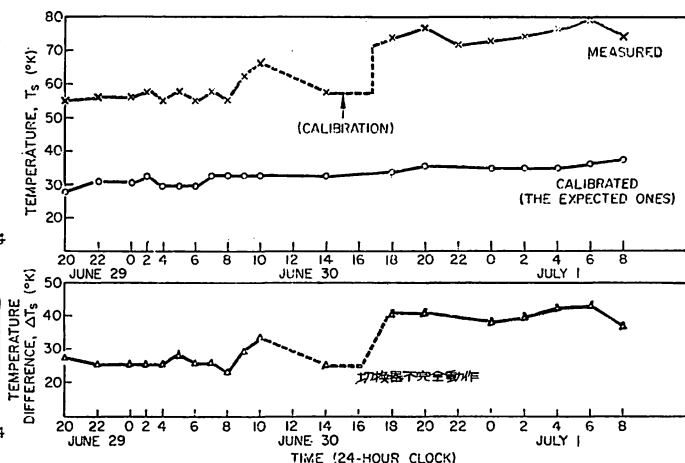
- (1) 主としてレコーダアンプの零点およびスケールを変更した後。
 - (2) 高周波部分を入れてある箱のふたをはずしたりしたとき。これは少し時間を待てば内部の熱により解決する。
 - (3) クライストロンの電圧、電流の動作状態を変えたとき。これによる変化は、大きくかつ長く続き、ミキサ電流が安定するまでにかなりの時間を要する。
 - (4) 導波管切替器を動かすとき。
- したがってこれらをさけるにはミキサ電流の変化、局



付2図 16 GHz ラジオメータの時間変化



付3図 16 GHz ラジオメータの時間変化



付4図 35 GHz ラジオメータの時間変化

発電力の変化, 零点変動などを別々に記録して除去方法を講ずる必要があろう。

付録 3. ATS-V ミリ波伝搬実験参加 基地局の水蒸気量変化による天 空温度の季節的変化範囲

主要参加基地局は付1表にあるように5局であるが、

付1表 水蒸気量による天空温度変化
(ATS-V ミリ波伝搬実験参加基地局)

(a) 16 GHz ラジオメータ

Month	Feb.	Aug.
水蒸気量の累積 時間率	1%-50%-99%	1%-50%-99%
場 所		
1. Rosman (N. C.) (Brevard)	9-7-9°K	9-11-14°K
2. NELC (Calif.)	6-7-8°K	8- 9-11°K
3. U of T (Texas)	5-6-7°K	7- 9-10°K
4. OSU (Ohio)	6-7-9°K	8-11-13°K
5. Wash. D.C.	7-8-11°K	11-13-16°K

(b) 35 GHz ラジオメータ

Month	Feb.	Aug.
水蒸気量の累積 時間率	1%-99%	1%-99%
場 所		
1. Rosman (N. C.) (Brevard)	18-28°K	27-41°K
2. NELC (Calif.)	17-25°K	22-33°K
3. U of T (Texas)	16-24°K	31-33°K
4. OSU (Ohio)	18-28°K	26-40°K
5. Wash. D.C.	20-30°K	31-47°K

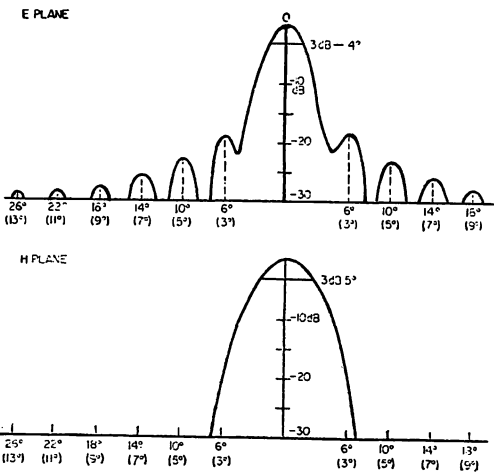
それらの基地局は衛星 (ATS-V, 1969年8月に打上げ) からの電波受信のほかに NASA, GSFC の持っている二つのラジオメータと同じく衛星に使われる周波数帯のラジオメータで天空温度を測定しようとしている。そのとき各場所で季節的に天空温度がどのくらい変化するかを計算したのが付1表の値である。表中の1%, 99%は時間率である。なお水蒸気量の変化は Bean & Dutton の Radio Meteorology⁽²⁾ からの値を採用した。

計算方法は参考資料(3)に出ている水蒸気量と損失(dB)との関係から, dB 損失を α (透過係数) に直し仰角は各場所での衛星に対する仰角を用いた。

付録 4. 二つのラジオメータアンテナ のパターン

16 GHz のラジオメータのアンテナパターンを付5図に示す。35 GHz に関しては図の横軸のスケールを半分にしたものと考えてよい。

付5図で, H 面においてサイドローブは 30dB 以下であり, そのサイドローブによる温度上昇は一応無視できる。ゆえに E 面のみについてまわりの木などの影響を考えればよい。付5図から読み取った概略のエネルギー分布は付2表のようになる。16 GHz で約99%が60°以内に入ることがわかる(35 GHz では $\pm 30^\circ$ 以内)。これにより測定したところの周囲環境による影響を概略計算すると, 天頂方向を向いたとき 16 GHz で 2.5°K, 35 GHz で 7.5°K の温度上昇になる。



付5図 16 GHz 1ft アンテナのパターン
〔°〕は35GHz に対する角度〕

付2表 エネルギー分布

Main beam 0- ± 5°	66%	注: 35 GHz に関しては, 角度 はこの表の約半分であると してよい
Side lobes 5°- ± 20°	30	
" 20° ± 60°	3	
" 60° ± 180°	1	

|||||