

研 究**高度差 3 km の 2 地点間における
35 GHz 高仰角降雨減衰の測定**乙津 祐一* 小林 常人* 篠塚 隆** 井原 俊夫*** 青山 伸一*
(昭和52年7月17日受理)**MEASUREMENT OF RAIN ATTENUATION AT 35 GHz ALONG
THE SLANT PATHS AT TWO SITES WITH A HEIGHT
DIFFERENCE OF 3 km**By Yuich OTSU, Tsuneto KOBAYASHI, Takashi SHINOZUKA,
Toshio IHARA and Shin-ich AOYAMA

In order to confirm the effectiveness of constructing an earth station at high altitude for making the rain attenuation of millimeter wave in the earth-space telecommunications reduce, a simultaneous measurement was carried out at both sites, the summit of Mt. Fuji (3776 m above sea level) and Gotemba (720 m above sea level) in its foot, from July to December 1975.

Between both cumulative distribution curves of rain attenuation at 35 GHz during six months, a remarkable reduction was revealed in the percentage of time that is exceeded with a certain attenuation level. For instance, being in the attenuation level of 10 dB, the percentage of time obtained at the summit station was 0.19%, while being in the same condition at the Gotemba station, it was 1.08% which showed the improving factor of 5.7.

Also the improvement in the percentage of the most available time duration can be expected by assuming that the summit station will not suffer the attenuation more than 10 dB in the winter.

1. 序 言

近年、衛星通信の発達はまことにめざましいものがある。マイクロ波帯を使用する衛星として、既に国際商業通信衛星インテルサット等が実用化されているが、通信需要の増大に応じ、大量の通信量を伝送できるリミ波帯を開拓するため、各国において活発な研究が進められている。

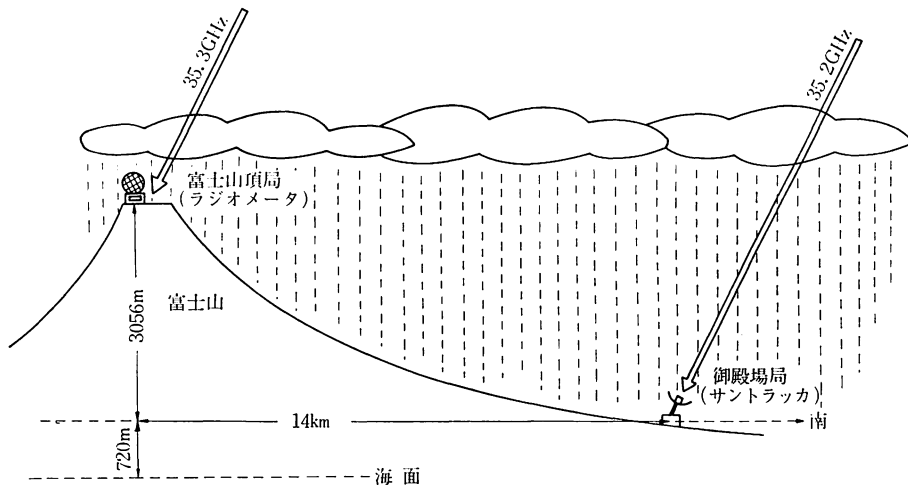
ミリ波は降雨によりかなりの減衰を受けるため、限られた降雨マージンのもとで、高い通信可能時間率を確保するためにはなんらかの対策を必要とする。従来より研究が進められてきたのはいわゆるサイトダイバシティ方式で、水平に配置された2局間の距離を適当に離し、両局の受信信号のうち一方の強い信号を取り出すことにより、実効的に降雨の影響を軽減するものである。^{(1)~(3)}

この方式は今後における実用化のための有効な方法ではあるが、広域的な降雨に対しては効果が少ない。衛星通信における通路長約 36,000 km のうち、電波が減衰を受けるのは、対流圏における、たかだか数 km であるこ

* 電波部 電波気象研究室

** 鹿島支所 第一宇宙通信研究室

*** 調査部 周波数利用研究室



第1図 実験方法の説明図

とに思いをはせるとき、受信局を高山に設置するならば降雨減衰をかなり大幅に軽減できるということが想像できる。

本実験は高地に地球局を設置すると仮定した場合、低地よりもどの程度、高仰角伝搬におけるミリ波降雨減衰を少なくすることが可能であるかという基礎的な資料を得る目的をもって、35 GHz 帯のラジオメータを富士山頂富士山測候所（高度 3,776 m）及び富士山麓の御殿場国立中央青年の家（高度 720 m）、両者の高度差 3 km に設置し、昭和 50 年 7 月から同年 12 月までの強雨期を含む 6 か月間降雨減衰の測定を行ったものである。

なお、本実験は昭和 48 年～50 年における科学技術庁の特別研究促進調整費に基づく研究計画「ミリ波の減衰と降雨構造との関連に関する総合研究」の一環として実施されたものである。

2. 実験概要

2.1 実験方法

第 1 図は実験方法の説明図で、富士山頂局と御殿場局は高さにして約 3 km、水平距離にして 14 km 離れている。富士山頂局はホーンアンテナをつけたラジオメータで構成され、アンテナは富士山測候所の建物のガラス窓越しに東方仰角 41° に固定した。

高山では落雷など気象の厳しさから、アンテナを屋外に露出することは許されない。ガラス窓による減衰約 3 dB は測定結果に補正できるが、それだけ測定感度を低下させることになる。また、衛星方向になぞらえるためには、アンテナは南方に向ける方が好ましいが、これも建物の構造上適当な窓がなかったため止むを得なかった。たとえアンテナが東方に向いていても高仰角伝搬路

の減衰の推定は可能である。ここで得られたデータは打点式記録計により記録し、適当な間隔で（約 3 週間ごとに）人手により回収した。

御殿場局はパラボラアンテナ二つを持つサントラッカで構成されている。この方式は広義的にラジオメータであり、昼間は太陽を疑似衛星として追尾し太陽雑音を測定することにより、より直接的にミリ波降雨減衰を測定できる。そして夜間は山頂局と同一のラジオメータ方式に切換えられる。ラジオメータ方式とサントラッカ方式の得失の比較については、後述する。

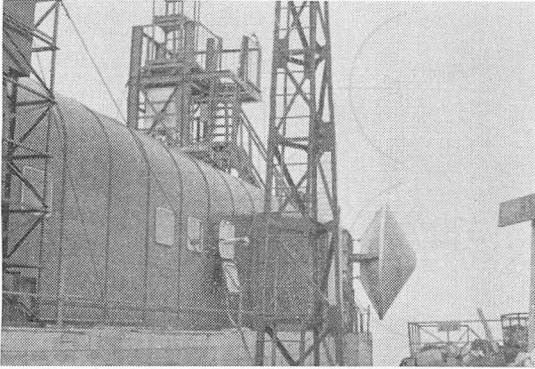
御殿場局で得られた各種のデータ（減衰量、アンテナ方位、アンテナ仰角、気象要素等）はアナログ→デジタル変換後、電々公社のデータ通信回線を利用して、電波研究所（国分寺局）に 1 分間隔で即時伝送したので、国分寺局で受信状況を監視しながら、直ちに計算機処理のできるデータを収集することができた。

第 2 図は山頂局の写真であって、(a)は測候所の建物に矢印で観測に利用した窓を示す。また、(b)は内側から窓に面して取付けられたホーンアンテナを示す。

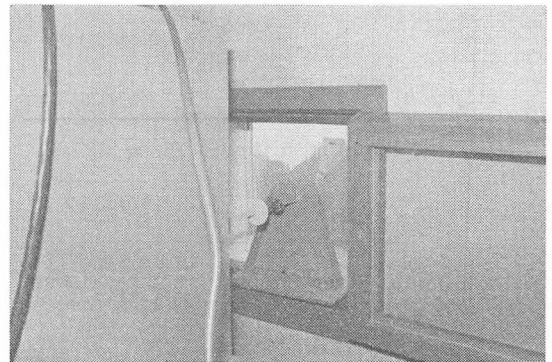
第 3 図は御殿場局の写真で、(a)はサントラッカと制御機器を収納した観測小屋を示す。また、(b)は小屋の内部の測定器を示す。

2.2 測定原理及び観測機器の特徴

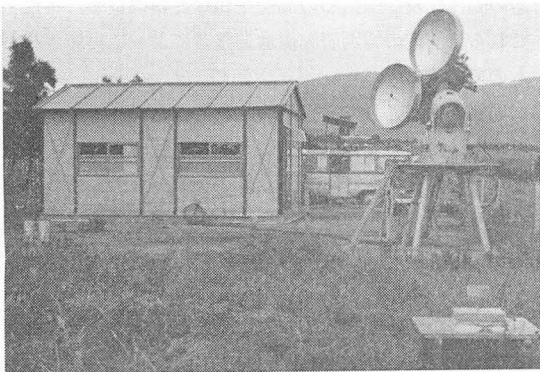
第 4 図(a)はラジオメータ方式の測定原理を示すもので、いわゆる Dicke 方式により、天空ふく射雑音温度と標準雑音源との温度差を測定し、空中の雨滴の増加に伴って被測定温度の上昇を考慮して、これを降雨減衰量に換算する。また、同図(b)はサントラッカ方式の測定原理を示すもので、パラボラアンテナの一つは太陽に正対させ、他方は太陽から 3° 方向をずらして太陽雑音を入



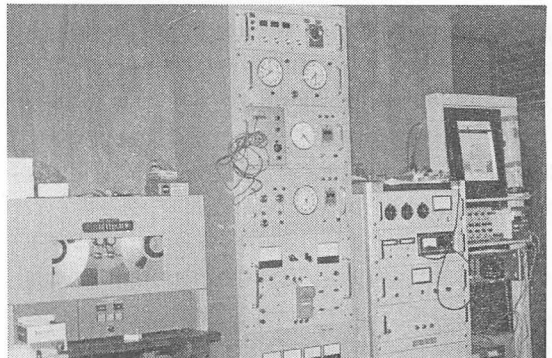
↑
第2図(a) 富士山頂局
(気象庁富士山測候所内に設置)



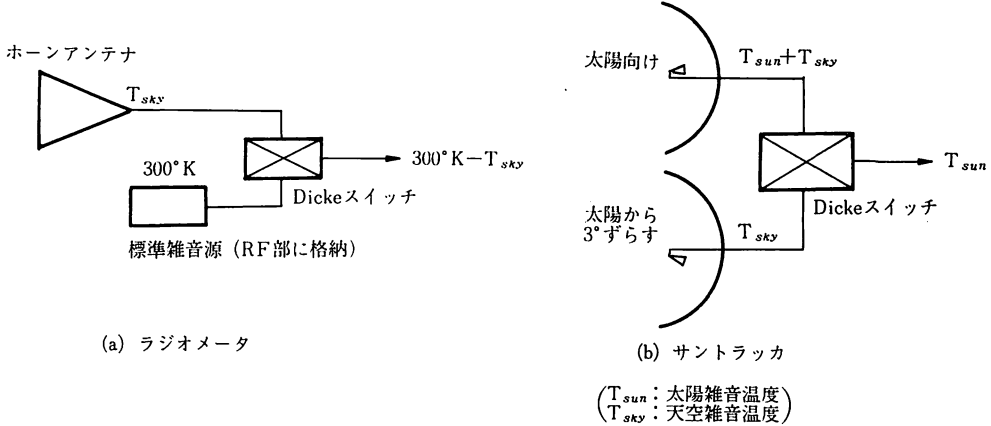
第2図(b) 測候所内窓面に取り付けられたホーンアンテナ



第3図(a) 御殿場局 (国立中央青年の家構内に設置)



第3図(b) 観測小屋内部の測定機器



第4図 ラジオメータ及びサントラッカの測定原理

第1表 山頂局, 御殿場局のラジオメータの諸元

項目	富士山頂局	御殿場局
受信方式	ディッケ方式 (フェライト切替)	ディッケ方式 (フェライト切替)
アンテナ	ホーン (51mm×62mm)	パラボラ 2面 (1.1mφ)
ビーム幅	9°	0.8°
局部発振器	クライストロン 35.3 GHz	ガン発振器 35.2 GHz
中間周波増幅器	帯域幅 100 MHz 安定度 高安定化 ⁽³⁾	帯域幅 100 MHz 安定度 従前通り ⁽¹⁾
同期検波器	安定化 ⁽³⁾	従前通り ⁽¹⁾
時定数	3 秒	3 秒
測定仰角	41° (7月7日~10月15日) 20° (10月15日~12月27日)*	昼間 太陽追尾 (5°~77°) 夜間 測定日の太陽 (77°~) 南中時の仰角 30°
方向	東方	昼間 太陽追尾 (東→南→西) 夜間 南方固定

* (二重窓にしたため、データは41°に換算して使用)

感しないように取り付け、両者共に太陽の日周運動に合わせて駆動する。そして Dicke 方式を用いて両アンテナからの入力の差を取り出すことにより、天空ふく射雑音温度を相殺し、太陽電波の雑音温度のみを測定する。降雨のある場合、太陽電波の雑音温度は低下し、これは直ちに降雨減衰量と結びつけられる。

御殿場局において、日没直前サントラッカのアンテナを南の方向に固定すると、仰角もその日の南中時の仰角となる。ここで一方のアンテナを標準雑音源に切換えると、ラジオメータ方式で測定が行われる。夜間はこの測定を継続し、日出後定時に、またサントラッカ方式に切

換える。これらの操作はプリセットにより自動的に行われる。

実際の測定では測定系の中に導波管の損失等が含まれるのでこれを補正する必要がある。この点については後述する。

第1表は山頂局及び御殿場局の受信装置の諸元を示す。これらの機器は基本的には電波研究所で、数年来 35 GHz 帯降雨減衰の測定を行うため開発製作したもので構成されているが、本実験の開始に先立って、局部発振器の固体化及び受信部の高安定化などの改良を行った。これらは前述の特別研究促進調整費によって実施されたものである。

局部発振器として従来用いられてきたクライストロンは、その寿命と安定度、更に大きな電源を必要とすることなどで、その保守にかなり難点があった。最近のマイクロ波素子の進歩を取り入れ、Gunn 発振器を用いて局部発振器の固体化、高安定化を行った。

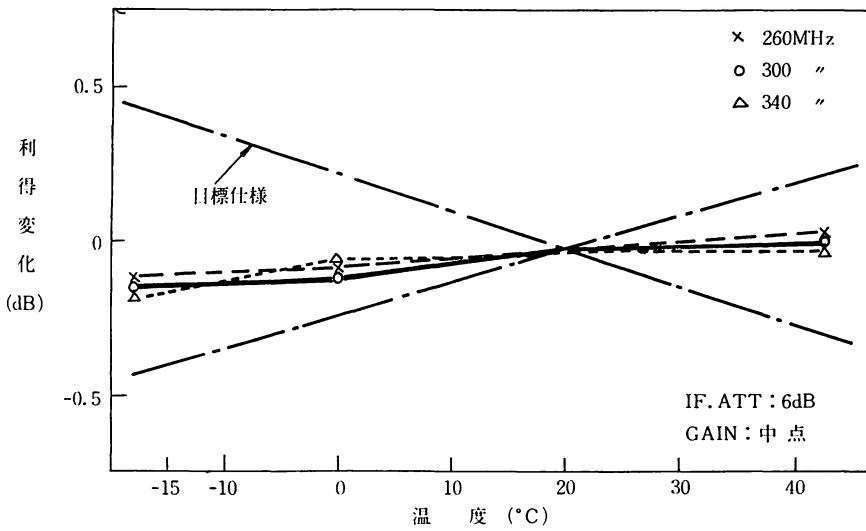
ただし、山頂局では雷対策が必要であり、クライストロンの方が衝撃的入力に強いと思われるので、残念ながら Gunn 発振器の使用を差し控えた。

山頂局に使用した受信部の中間周波数増幅器、同期検波器等は温度補償回路に種々の工夫⁽⁴⁾を加えた結果、従来のもの⁽¹⁾より数倍も温度安定度の改善されたものが開発できた。

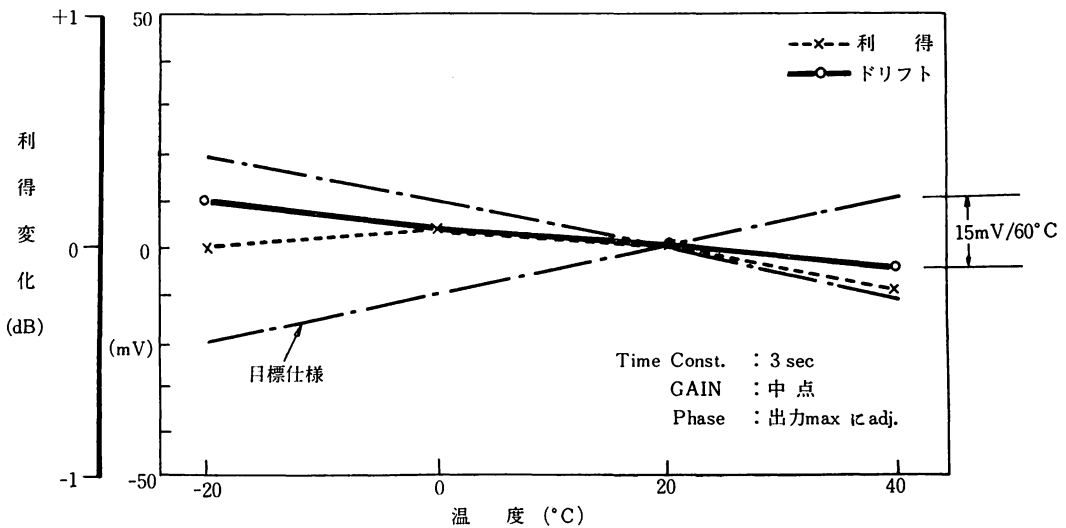
このような研究は、今後宇宙空間のような温度変化の大きな環境における測定機器の開発に示唆を与えるものといえる。

第5図(a), (b)は新しい中間周波増幅器及び同期検波器の温度特性を示すもので、目標仕様から見て、この特性は十分満足できるものである。

なお、サントラッカ方式はアンテナが太陽を追尾するため、測定時の仰角は第1表に示すように時々刻々かな



第5図(a) 中間周波増幅器温度特性



第5図(b) 同期検波器温度特性

り変動する。このためラジオメータのデータとの比較を行う場合、正規化などの処理を必要とする。

2.3 観測の状況

富士山頂への観測装置の荷上げは、雪どけ後ブルドーザが頂上まで登れるようになった時期（昭和50年の場合には7月5日）に行われた。

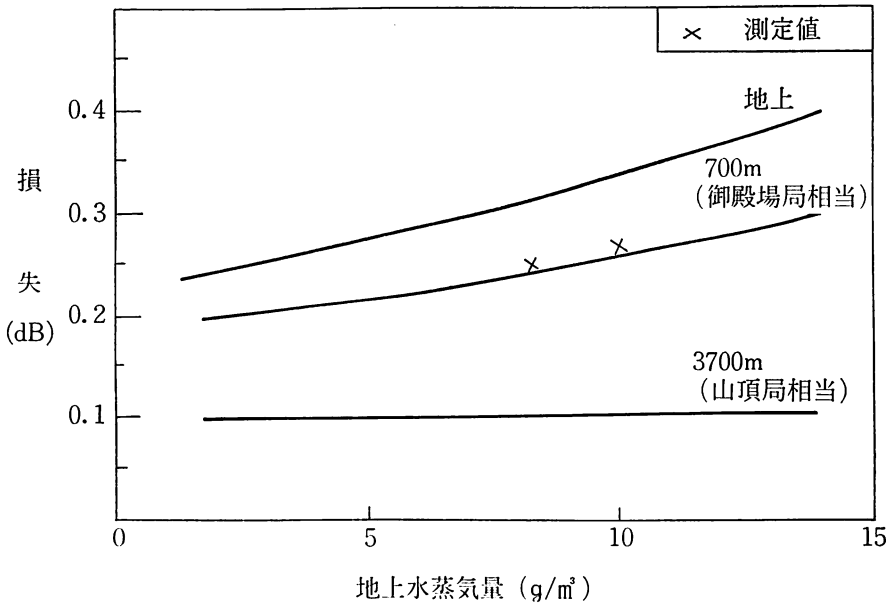
測定装置整備後直ちに測定を開始し、強雨期を含む6か月間測定を継続し、12月末をもって打ち切った。冬季に測定を行わなかった理由は、較正のための登山が困難になったからである。

冬季には0°C層の高度低下とともに山頂は降雪があるのみで降雨はない。空中の雪片が電波に与える減衰は非

常に小さく、むしろ窓に付着して水膜をつくる方が問題となる。このため、山頂局で冬季には10dB以上に及ぶ大きな減衰は生じないものと考えられる。

昭和50年は比較的降雪の多い年であって、11月初め観測窓まで雪が積り、これが窓に水膜を作り固定的に2~3dBの減衰を生じていることが測定された。この値はあらかじめ窓に水をかけて測定しておいた値とほぼ一致し、空中の雪片による減衰は無視できると判断された。

よく知られるように、富士山頂の気象条件は苛酷であり、そのため荷上げ、機器の整備、保守等に関しては他の実験に見られない困難さがあつた。また、建物の構造



第6図 山頂局と御殿場局の晴天の日の大気損失

によりアンテナを必ずしも望ましい方向に向けられないという制約もあった。更に落雷による機器の故障防止について、現地の人々の助言にしたがって、観測装置の電源入力にサージアブソーバを付加するとともに、絶縁トランスを用いた。

観測期間中2, 3回の落雷はあったが、その影響は観測装置まで至らず、測候所の電源部分で阻止され、短期間の停電を除いて測定期間中機器は順調に作動した。

3. 晴天の日における山頂と御殿場における大気減衰

晴天の日における受信レベルは、降雨減衰を評価する際の基準となるので、この場合の大気減衰について理論的並びに実験的に若干の検討を行った。

大気減衰は主として電波が酸素分子と水蒸気分子によって受ける吸収により生ずるものであり、BeanとDuttonの方法⁽⁵⁾を用い、地上(海拔高0m)の気温と湿度を与えて⁽⁶⁾、上空から飛来する電波がある高さまで到達する際の減衰を理論的に評価できる。

この計算は平地上で大気成層状態にあると仮定したものであり、富士山のような独立峰の場合、上昇気流の影響のため、一般的にはこの条件を満たしているとはいえないが、無風晴天の日には一応参考になるものと考えられる。⁽⁷⁾

第6図の実線は35.2GHzの場合の地上及び高度700m(御殿場に相当)並びに高度3,700m(富士山頂に相当)における仰角40°方向の高仰角伝搬路の大気減衰と

地上水蒸気量との関係を示すものである。また、大気減衰はサントラッカ測定の場合、晴天で湿度の変化の少ない日を選んで、太陽仰角の変化を利用することにより、かなり正確に実験的に求めることができる。第6図の二つの×印は御殿場局における測定値で、理論値とかなり良く一致している。

第6図の理論計算から注目されることは、3,000m以上の高度では高仰角伝搬に対して、水蒸気分子による減衰がほとんど無視できるということである。また、山頂局と御殿場局を比較した場合、晴天の日の地上水蒸気量を10g/m³として、高仰角伝搬(仰角40°)の大気減衰は、それぞれ0.1dB及び0.23dBと推定できる。

これらの計算値は後述のように受信系透過係数を求める際に利用した。

4. データ解析の手法

4.1 ラジオメータ方式による場合

ラジオメータ方式による観測データから降雨減衰を求める手法⁽⁸⁾について手順を追って説明する。

(1) 晴天の日における基本式は次のように表わされる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$T_{sky} = (1 - \alpha) T_m \quad \dots\dots(1)$$

ここで T_{sky} : 天空雑音温度 (35 GHz における)

T_m : 電波通路上の大気平均温度

通常 $T_m = 1.12 \times T_g - 50$ (K)

ただし T_g : 地上温度

α : 大気の透過係数

この関係は次のように書き換えられる。

$$L_{air} = 10 \log \frac{1}{\alpha} = 10 \log \frac{T_m}{(T_m - T_{sky})} \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots(2)$$

ただし L_{air} : 大気減衰 (dB)

(2) 同様に降雨時における降雨減衰も次のように表わされる。

$$L_{rain} = 10 \log \frac{T_{m'}}{(T_{m'} - T_{sky})} \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots(3)$$

ここで L_{rain} : 降雨減衰 (dB)

T_{m}' : 雨滴の平均温度

T_{m}' は 273 K (0°C) から地上温度の間に存在する値であるが、正確に決定することは困難である。しかしながら、Zavody による⁽¹¹⁾ 降雨中の多重散乱を考慮した場合の天空雑音温度の計算結果を参考にして、筆者等が検討を行ったところ、 T_{m}' は晴天の日の T_m にかなり近いことが分った。

よって、ラジオメータによる降雨減衰の測定では、次式のように T_{m}' の代わりに晴天の日の T_m を用いることとした。

$$L_{rain} = 10 \log \frac{1}{\alpha} = 10 \log \frac{T_m}{(T_m - T_{sky})} \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots(4)$$

T_m の変化による減衰値の評価に関する検討は筆者等の他の報告⁽¹²⁾ に詳しく述べられているので、ここでは省略する。

(3) 実際のラジオメータ受信系では導波管等の損失を伴うので、それらを総合した透過係数を β とすると、第4図(a)の Dicke スイッチ (フェライトスイッチ) の入力における等価雑音 T_d は、次のように表わされる。

$$T_d = \beta T_{sky} + (1 - \beta) T_{amb} \quad \dots\dots(5)$$

ここで T_d : デイク温度 (Dicke スイッチにおける入力雑音温度)

β : ラジオメータ受信系透過係数

T_{amb} : 標準雑音源の周囲温度

T_{sky} : 天空雑音温度 (K) (35 GHz にて測定)

(4) レコーダ出力は、このラジオメータ受信方式では標準雑音源の温度とデイク温度の差として求められるので

$$\begin{aligned} T_r &= T_{amb} - T_d \\ &= \beta(T_{amb} - T_{sky}) \quad \dots\dots(6) \end{aligned}$$

となる。

ここで T_r : レコーダ出力における温度

よって β が与えられれば、 T_r と T_{amb} より T_{sky} が求められ、更に(4)式に戻って地上温度 T_g から T_m を与えて、降雨減衰 L_{rain} が求められる。

なお、 β は晴天の日における地上の温度及び湿度から計算される T_{sky} を用いて(6)式よりあらかじめ定めておくものである。

4.2 サントラッカ方式の場合

御殿場局では、昼間においてサントラッカ方式を用いているので、降雨減衰の求め方が幾分異なり、次のような手順になる。

(1) 降雨時の Dicke スイッチ入力における太陽向けアンテナの等価雑音温度 T_{d1} は

$$T_{d1} = \alpha' \beta T_{sun} + \beta T_{sky} + (1 - \beta) T_{amb} \quad \dots\dots(7)$$

また、太陽から 3° 方向をずらしたアンテナ側の等価雑音温度 T_{d2} は

$$T_{d2} = \beta T_{sky} + (1 - \beta) T_{amb} \quad \dots\dots(8)$$

ここで α' : 降雨減衰による透過係数

(降雨減衰は $L_{rain} = 10 \log 1/\alpha'$ [dB] と表わされるけれどもラジオメータの場合と求め方が異なるので記号を変えてある。)

β : ラジオメータ受信系透過係数

(2) Dicke スイッチ出力は T_{d1} と T_{d2} の差に相当する。晴天時の太陽雑音温度は 35 GHz で約 7,300(K) と相当高温であるため、この出力を対数増幅器により圧縮してレコーダ出力とする。

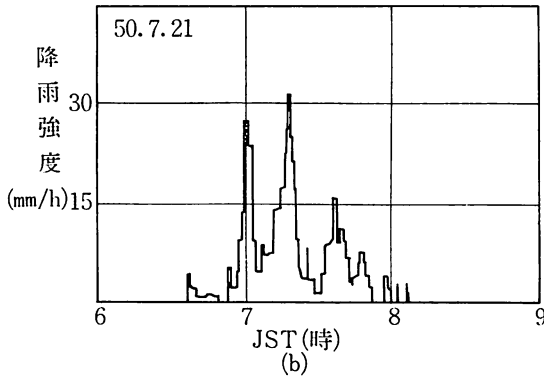
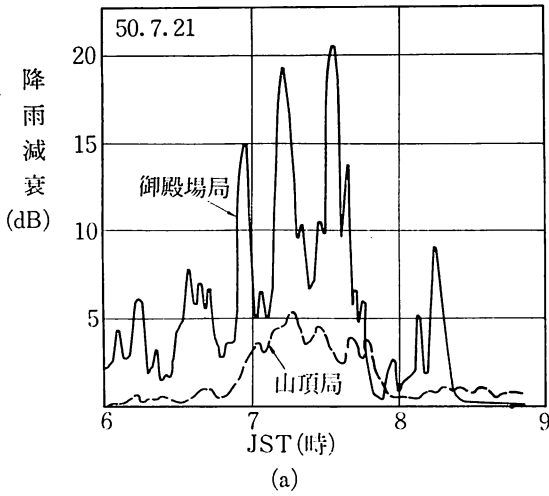
$$T_r = \alpha' \beta T_{sun} \quad \dots\dots(9)$$

(3) 晴天時の測定結果よりあらかじめ βT_{sun} を定めておくことにより降雨減衰 L_{rain} が求められる。

(4) サントラッカ方式は太陽を追尾して測定を行うため、太陽からの電波通路の仰角が時々刻々変化するから、降雨減衰の値をある一定仰角の値に正規化する必要がある。これは降雨の広域一様性を仮定すれば、理論的に降雨減衰は仰角の正割 (secant) に比例するという考えを適用できる。

以上のごとく、ラジオメータ方式とサントラッカ方式では降雨減衰の算出方法が異なるが、両者の測定値がほぼ一致することは実験的に確かめられている。⁽¹²⁾

ラジオメータは一定仰角で測定できるという利点があるが、測定可能減衰量はただだた 10 dB~13 dB に過ぎない。また、雨滴の平均温度 T_{m}' を推定しなければならぬことも欠点である。



第7図 山頂局と御殿場局における降雨減衰記録と御殿場の降雨強度記録

サントラッカ方式による測定可能減衰量は約 30 dB であり、測定値は T_m' のような仮定なしに直接求められるという利点がある反面、測定仰角の変動が激しいという欠点がある。

5. 山頂局と御殿場局において測定された降雨減衰の比較

第7図(a)に昭和50年7月21日朝の山頂局と御殿場局における降雨減衰の時間変化を、また、同図(b)は御殿場局における1分平均の降雨強度の時間変化を示す。

なお、この時山頂における7時から8時までの1時間降雨量は7mmに過ぎなかった。山頂では転倒ます型の雨量計で雨量強度の測定を行ったので、10分間以内の短時間の変化は測定できない。

この図によると、御殿場局の降雨減衰は降雨強度とかなり良い対応を示している。そしてまた、御殿場局の最大減衰量は約 20 dB、一方、山頂局のそれは約 5 dB であって、山頂局の減衰は御殿場局の約 1/4 であった。こ

の測定例は夏季における典型的なしゅう雨の場合のものといえる。

このほか、台風のように雨域の高さが山頂より 1,000 m ~ 2,000 m も高い時には、山頂の方が御殿場より降雨量が多く、降雨減衰もかなり増加する。そして降雨強度の変化の激しいために打点レコーダの記録は、その変化に十分追従できない状態であった。しかし、この場合でも御殿場局の降雨減衰の方が更に大きかった。

次に、ある減衰レベルを設定した場合の両局の通信不能時間の関係を調べる。

第8図は9月23日夜間における測定例を示すもので、四つの異なる減衰レベル(縦軸)を超える時間を横軸にとってある。また、同図の下段にこの時の山頂及び御殿場における時間雨量が示されている。

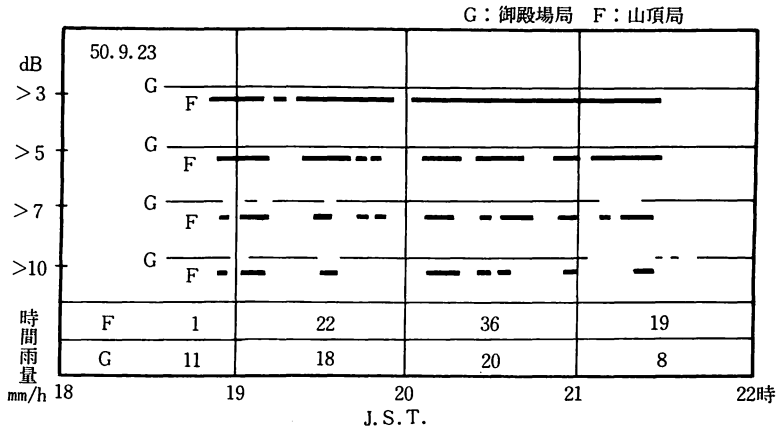
この図で、例えば 20 時 ~ 21 時に注目すると、山頂の雨量は御殿場に比べて約 2 倍もあるが、それにもかかわらず山頂局で 10 dB 以上の降雨減衰を生ずる時間は、御殿場局の方の約 1/2.4 である。

第2表は幾つかのかなり強い降雨のイベントの場合、両局において、降雨減衰が4段階に設定したレベルを超

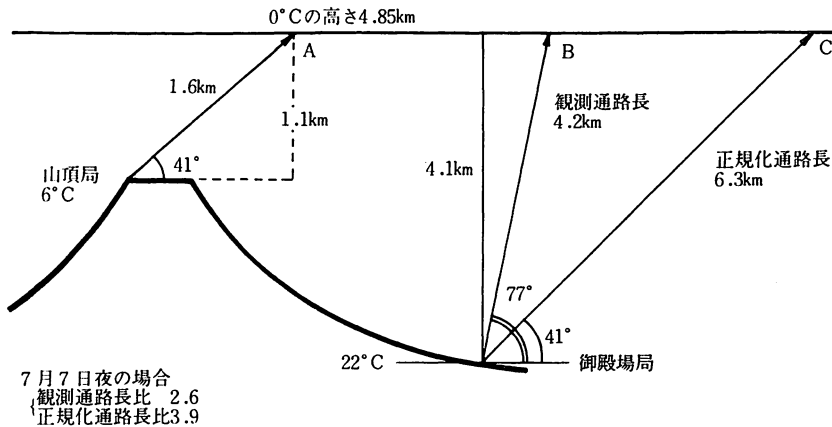
第2表 山頂局と御殿場局における減衰時間の比較(夜間)

日付	レベル	dB 比	> 3	> 5	> 7	> 10	0°C の高さ	気 象
July 7.	G/F		3.0	2.5	1.7	2.4	4.85 km	強い寒冷前線
	Gn/F		3.9	4.4	4.8	4.5		
Aug. 22.	G/F		1.3	2.3	3.4	2.9	5.0 km	台風の前の雨
	Gn/F		1.4	2.9	4.1	7.5		
Sept. 23.	G/F		1.4	1.8	2.4	2.3	4.4 km	停滞前線
	Gn/F		1.4	1.9	2.7	3.0		
Oct. 3.	G/F		.47	1.0	2.1		4.7 km	弱い低気圧 (山陰沖)
	Gn/F		.75	1.3	2.9			
Oct. 7.	G/F		1.6	3.9	6.7		4.6 km	二つ玉 低気圧
	Gn/F		1.7	3.6	7.5			
Oct. 13.	G/F		.49				3.9 km	本州南岸 低気圧群
	Gn/F		.75					
平均	G/F		1.4	2.3	3.2	2.5		
	Gn/F		1.7	2.8	4.4	5.0		

G: 御殿場局の与えた減衰レベル以下に低下した時間(非正規化)
 Gn: 同上 " " (仰角 41° に正規化)
 F: 山頂局 " "



第8図 山頂局と御殿場局の与えた減衰レベルを超える時間



第9図 雨域中の電波通路長の比較

える場合の累積時間の比を求めたものである。御殿場の測定値については、測定した仰角そのままのものをG、また仰角41°に正規化したものをG_nで示してある。また、第2表には測候所の観測から得られた0°Cの高さ及び気象状況が附記されている。

第9図は7月7日夜の0°Cの高さをもとに、山頂局と御殿場局について雨域の中を通過する電波通路長を比較したものである。ここで得られた、正規化した場合の通路長比3.9は、0°C以下の雨域の降雨強度が一樣であるならば、第2表のG_n/Fとほぼ一致しなくてはならないはずである。しかし実際には降雨強度の高度分布があるので多少の変動を生ずる。

詳しい検討は次節で述べるが、例えば7月7日には、山頂より下方で降雨強度が強かったので時間比が3.9より大きくなっている。また、9月23日には逆に下方よりも山頂付近でかなりの降雨があったために、時間比が3.9より小さくなっている。

なお、減衰が3 dB程度の場合、両局の時間比が1前

後であるが、これは山頂局のガラス窓及び御殿場局のアンテナ鏡面が、雨でぬれる影響が入るため、別に考えるべきである。

6. 降雨強度の高度特性

降雨強度の高度による変化の様相及びその統計的性質は、高地と低地における高仰角伝搬に対する降雨減衰量を考察するうえで、重要な事柄である。以下に述べる高度特性は気象庁の観測データ⁽¹³⁾に基づくものである。

第3表は幾つかの降雨の場合について、高度別の1時間降雨強度の変化の模様を示す。平均的にみると、降雨強度は高度とともに増加していることが多い。

8月23日の降雨のように、高度が増加するにつれて降雨強度の大きくなっている場合には、雨域の高さはかなり高く0°Cレベルは5.4 kmにも達する。このときの東京管区気象台のレーダ観測によると、東京上空の雨雲(雪、氷を含む)の反射高度は10 km以上にも及んでいた。これは台風時の特徴であり、このような雨雲が大雨

第3表 雨量の高さによる分布 単位: mm/h

	7月7日							7月27日				8月16日				
	17	18	19	20	21	22	23	22	23	24	1	21	22	23	0	
山頂	4	9	18	20	15	6		0	8	24	0	5	16	3	3	
5.5 合								1	3	30	0	1	10	2	1	
2.8 合	10	14	20	21	23	9	0	1	17	15	0	2	10	6	1	
太郎坊	3	4	9	4	26	7	0	2	3	14	0	1	7	4	1	
御殿場	0	2	7	4	11	13	1	1	0	1	1	2	0	6	5	
	8月17日								9月23日							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	7	8	9	10	11	12	13
山頂	21	38	4	5	10	12	11	2	9	23	24	26	24	38	24	15
5.5 合	24	23	3	9	6	13	9	3	6	22	23	22	25	31	18	14
2.8 合	19	30	7	11	8	14	13	3	4	17	17	22	19	21	20	30
太郎坊	9	15	16	6	5	10	10	3								
御殿場	11	3	8	2	3	18	3	2	1	15	6	2	2	1	7	23
	8月23日			9月5日			9月23日									
	14	15	16	14	15	16	19	20	21	22	23					
山頂	14	6		1	4	3	22	36	19	11	3					
5.5 合	6	2	4	9	9	0	17	30	12	11	5					
2.8 合	29	28	8	21	10	0	24	37	16	21	3					
太郎坊				27	6	0	17	22	5	14	4					
御殿場	0	7	2	1	3	0	18	20	8	17	8					

をもたらしものである。

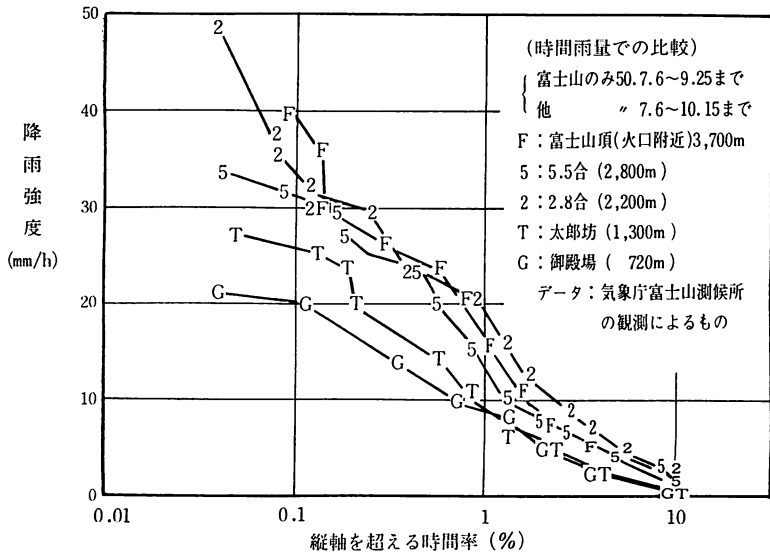
また、9月5日の降雨では山頂以下、特に中腹で降雨強度が大きかった。このような場合には、山頂局と御殿場局による降雨減衰の差は、通常の降雨に比べて更なる大きくなる。この時、山頂局で 3 dB 以上の減衰を生ずる時間は皆無であり、一方、御殿場局では 3 dB 以上が 102 分、10 dB 以上が 43 分も継続していた。

第 10 図は 7 月 6 日から 10 月 15 日まで 期間及び高度

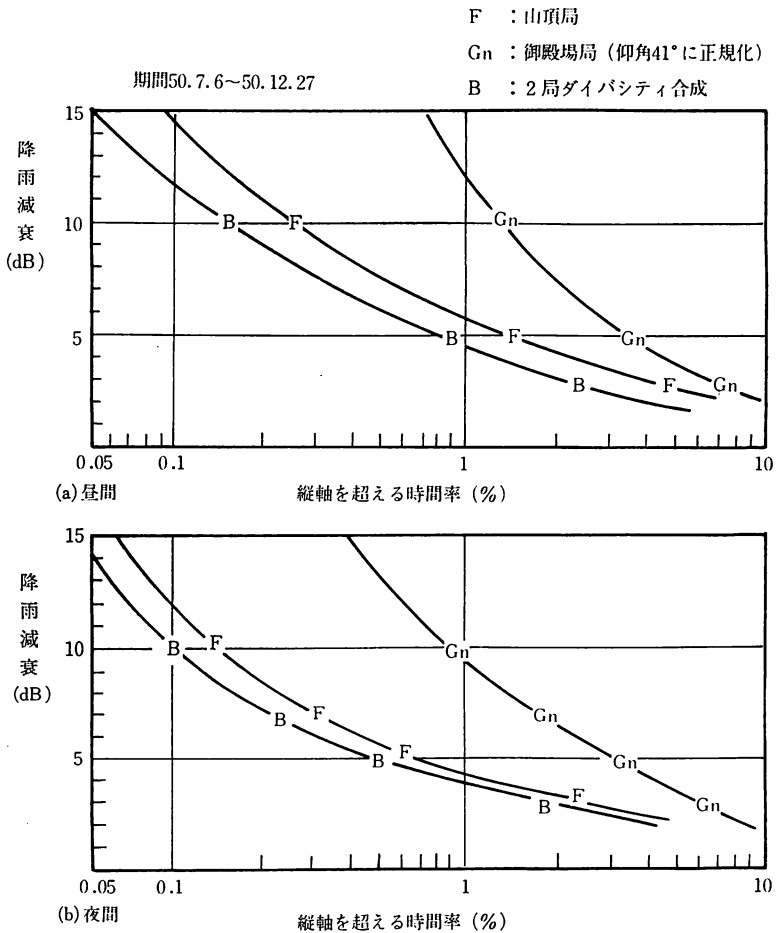
の異なる 5 地点について降雨強度の累積分布を求めたものである。図から山頂及び 2.8 合目 (2,800 m) の降雨が、低地より際立って多いことが分かる。

降雨強度 20 mm/h を越す時間率は山頂で 0.8 %、御殿場で 0.1 % であって、その比は 8 倍にもなる。

7. 山頂局と御殿場局における降雨減衰の累積曲線及びダイバシティ効果



第10図 富士山頂一山麓間の降雨強度分布の高度特性



第11図 山頂局, 御殿場局及び2局合成の降雨減衰累積曲線

第4表 与えた減衰レベルを越す通信不能時間率と改善率

	昼 間			夜 間			昼 夜		
	山 頂 局	御 殿 場 局	改善率	山 頂 局	御 殿 場 局	改善率	山 頂 局	御 殿 場 局	改善率
> 10 dB	0.25%	1.35%	5.4	0.13%	0.80%	6.2	0.19%	1.08%	5.7
> 7 dB	0.57%	2.35%	4.1	0.30%	1.80%	6.0	0.44%	2.08%	4.7
> 5 dB	1.35%	3.5%	2.6	0.58%	3.0%	5.2	0.97%	3.25%	3.4
> 3 dB	4.5%	7.0%	1.6	2.3%	6.0%	2.6	3.40%	6.50%	1.9

期間 50.7.6~50.12.27

第11図は昼間及び夜間に分けて、強雨期を含む6か月間における山頂局(F)と御殿場局(Gn)の降雨減衰累積曲線並びに両局によるダイバシティ曲線(B)を示す。

この統計を行うに当たり、御殿場局のデータについてはアンテナ仰角15°以上の観測値について正規化を行った。この図を見ると、既に述べてきたごとく、山頂局の受ける降雨減衰が御殿場局のそれより圧倒的に少ないことは明らである。

第4表は幾つかの減衰レベルを与えた場合、山頂局と御殿場局の通信不能時間率及び両局の通信不能時間率の比、すなわち改善率を示す。これによると昼夜を通じて降雨マージン10dBの場合、山頂局の通信不能時間率0.19%、御殿場局で1.08%、その改善率は5.7となっている。

山頂局のラジオメータの性能上13dB以上の測定値は求められていないが、降雨マージンをより大きくとることが可能であれば更に効果が上るものと推定される。

なお、第1表で簡単に触れておいたが、10月15日以降山頂は冬の訪れを迎え、これまでの一重窓を二重窓にせざるを得なかった。そのため測定仰角を41°から20°に変更した。10月15日から12月末までの山頂局のデータは仰角41°に正規化を行っている。

次に第11図のBにおいて示したダイバシティ曲線について説明する。ダイバシティ曲線とは、2局のうち減衰の少ない方を取り出して、累積曲線を作成したものをいう。そしてダイバシティ効果による改善度としては、ある減衰レベルで、そのレベルを超えて受信不能になる時間率を2局合成の場合と個々の1局の場合と比較して求める。

今回の場合のように山頂局における減衰が明らかに少ないという場合には、特筆すべきものでもないが、山頂局を補助的に使用する場合を考慮して参考に示したもの

である。

山頂局の減衰よりも、御殿場局の減衰の方が少なく、2局合成の場合の減衰を救済するという機会割合に少ないために、ダイバシティ効果そのものは著しくない。この問題については第8図も参照されたい。

以上のような強雨期を含む6か月の測定結果を基に、山頂局において1年間に10dB以上の減衰を与える累積時間率を推定してみる。山頂では10月末から翌年5月末まで、降雪はあっても降雨はない。例えば10月中旬から12月末までのデータでも減衰が10dBを超える時間は全くなく、7dB以上が0.004%に過ぎなかった。

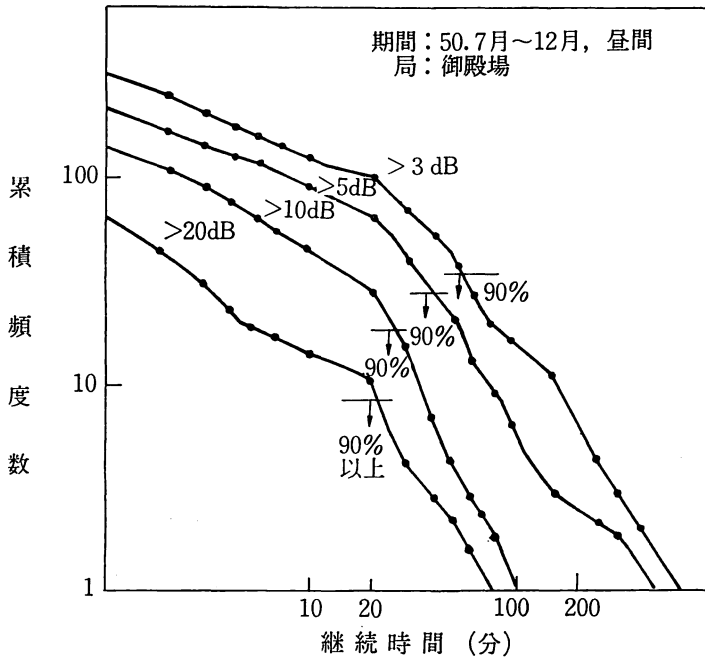
山頂における平均気温から推測して、翌年の6月には多少の雨があろう。一般に6月の雨は梅雨型であって降雨量が少ないので、1月から6月までの半年間において減衰レベルが10dBを超える時間率は、約0.05%と推定しても大きな誤りはなからう。よって1年間における10dBを超える時間率は0.12%となる。

なお、富士山麓にある御殿場は関東平野一帯と比べると降雨量がかなり多い。したがって山頂局と平地にある局とを比較すると、改善率は上記の値より幾分低下する。

測定期間が異なるので正確なことは言いえないが、東京付近における年間の降雨強度が10mm/hを越す時間率は、0.35%程度である⁽⁴⁾。これが後述のように、35GHz高仰角伝搬において10dB程度の降雨減衰を生ずるものと概算できるので、平地局に対する山頂局の年間を通じての改善率は約3と推定される。ただし、減衰レベルをより増加できるならば一層大きな改善率を期待できる。

8. 降雨減衰の継続時間

第12図は御殿場局昼間において、降雨減衰が3, 5,



第12図 減衰継続時間の累積

10, 20 dB を超えるときの継続時間を累積ひん度数で示したものである。

同図によれば 20 dB 以上の減衰が発生した場合、90% は継続時間が 20 分であり、10 dB 以上の場合はその継続時間が 30 分以内である。また、20 dB もの減衰が 90 分も継続したという場合が 1 回ある。一般に深い減衰が長時間継続することは、台風に伴う降雨の場合に起きる。

なお、第 12 図の見方を変えると、この図でパラメータとする降雨減衰を降雨マージンに仮定した場合における瞬断の回数を知ることができる。

ここで降雨のデータから、等価通路長 (d_{eff}) を用いて近似的に同様な評価ができることを説明しておきたい。等価通路長とは、高仰角伝搬路で電波が一様な降雨によって減衰を受けると仮定した場合の実効的な距離をいう。

35 GHz の電波が一様な降雨中を通過する場合の減衰は、理論計算の結果を参照して次のようなような実験式で表し得る。

$$L = 0.22Rd_{eff} \quad \dots\dots(10)$$

ここで L : 35 GHz の場合の高仰角伝搬における降雨減衰 (dB)

R : 降雨強度 (mm/h)

d_{eff} : 等価通路長 (km)

御殿場局で仰角 41° の場合、等価通路長を我々のデータ

から求めると約 5 km となる。したがって

$$L \doteq R \quad \dots\dots(11)$$

すなわち、降雨強度 (R) から直ちに 35 GHz 高仰角伝搬の場合の降雨減衰の目安がつけられる。

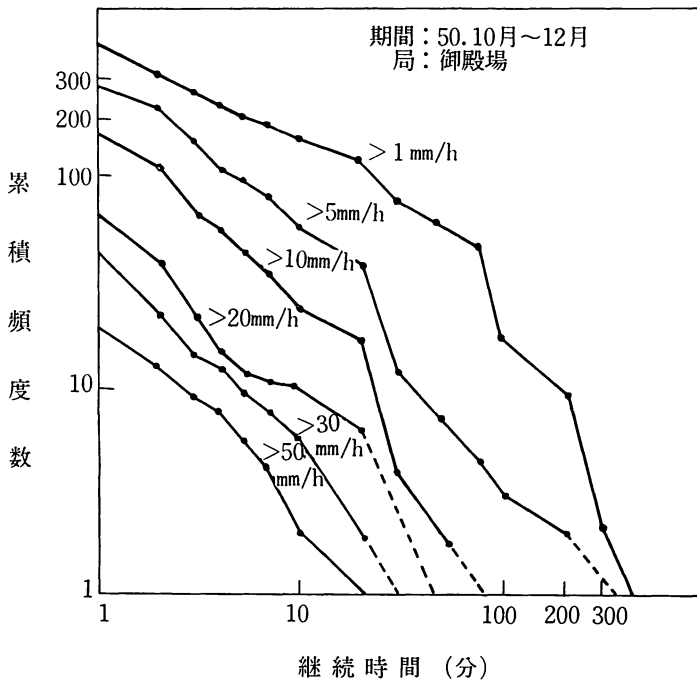
第 13 図は御殿場において、雨滴計数型雨量計により測定された降雨強度のデータを整理して、降雨強度が 1, 5, 10, 20, 30, 50 mm/h を超えるときの継続時間 (分) を累積ひん度数で示したものである。

上述のような方法で第 13 図を利用すれば、統計期間の相違はあるが、第 12 図とその傾向がかなり良く一致していることが分かる。このような方法で、雨量データから衛星回線の伝搬状況を推定することは実用上の効果大きい。

9. 結 言

昭和 50 年 7 月から同年 12 月までの強雨期を含む 6 か月間、35 GHz 帯のラジオメータを、高度差の 3 km ある富士山頂 (高度 3,776 m) 及び山麓の御殿場 (高度 720 m) に設置し、高仰角伝搬 (目標仰角 41°) に相当する降雨減衰の同時測定を行った。

その結果、降雨構造から推定されるごとく、山頂局における降雨減衰は、御殿場局のそれよりも圧倒的に少なく、夏季において減衰レベル 10 dB を超える累積時間は、前者で 0.19% 後者で 1.08% であって、この比を改善率とすれば 5.7 に達する。



第13図 降雨継続時間の累積

冬季において山頂局では、10 dB 以上の減衰を生ずることがほとんどないと推定されるので一層の改善が期待できる。また、減衰レベルをより多く設定できるならば、山頂局の有利さは更に増加するものと思われる。

以上のごとく地球局を山頂に設置することは、ミリ波降雨減衰対策上かなり効果があることが分かった。しかしながら山頂における建設及び運用はかなり困難であるので、平地に主局を置き山頂には小規模の無人局的なものを設置し、主局が回線断の予測されるときのみ副局を利用する方法を取れば、かなり実用的なミリ波衛星回線が設定できるものと考えられる。

謝 辞

この実験は昭和 48~50 年度の科学技術庁 特別研究促進調整費による「ミリ波の減衰と降雨構造との関連に関する総合研究」の一環として行われたものであり、実験の遂行に当たっては、科学技術庁研究調整局をはじめ気象庁東京管区气象台、御殿場の富士山測候所基地事務所及び同じく御殿場の国立中央青年の家などの関係各位に大変お世話になった。

本報告の取りまとめに当たり、若井部長から懇切な御指導をいただいた。また北村勝巳技官には図面作成などの御協力をいただいた。これらの方々深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 乙津祐一；“35 GHz 高仰角伝ぱんにおける降雨減衰”，電子通信学会技術報告，A・P 71—71，1972 年 3 月。
- (2) 乙津祐一；“35 GHz 高仰角伝ぱんにおける降雨減衰(II)”，電子通信学会技術報告，A・P 73—74，1973 年 12 月。
- (3) 乙津祐一；“35 GHz 高仰角伝ぱんにおける降雨減衰(III)”，電子通信学会技術報告，A・P 74—54，1974 年 11 月。
- (4) 日立電子 K. K.；“ミリ波大気雑音測定装置のシステム設計および試作報告書”，1975 年 3 月。
- (5) Bean, B. R. and Dutton, E. J. “Radio Meteorology”, NBS Monograph 92, Mar. 1966.
- (6) Altshuler, E. E. Falcone, Jr. V. J. and Wulfsberg, K. N. “Atmospheric effects on propagation at millimeter wavelengths”, IEEE Spectrum vol. 5, No. 7, pp. 83—90, July 1968.
- (7) 気象研究ノート，第 118 号，“富士山の気象”，1974 年 2 月。
- (8) Yuichi OTSU “Experimental Report on 16 GHz and 35 GHz Radiometers Associated with the ATS—V Millimeter Wave Experiment” NASA GSFC X—133—69—554, Nov. 1969.

- (9) Kraus, J.D. "Radio Astronomy" pp. 248
McGraw Hill Publishing Co. New York, 1966.
- (10) Wulfsberg, K.N. "Apparent Sky Temperature
Measurement at Millimeter Wave Frequencies"
Physical Science Research Papers, No. 38, A.F.
C.R.L., July 1964.
- (11) Zavody, A.M. "Effect of Scattering by rain
on radiometer measurements at millimetr wave
length" Proc. IEE, vol. 121, No. 4, pp. 257-263,
April 1974.
- (12) 「ミリ波の減衰と降雨構造との関連に関する総合研
究」成果報告書, 科学技術庁研究調整局, 1977年6月.
- (13) 富士山測候所観測資料, 毎時降水量月表(富士山
頂, 5.5合, 2.8合, 太郎坊, 青年の家), 1975年7~
10月.
- (14) Kinase, A., and Kinpara, A., NHK Labs.
Note, No. 191, pp. 3-19, Oct., 1973.

