

Ⅲ. 電波伝搬に関する実験

1. 降雨減衰特性及び交差偏波識別度特性

福地 一*¹ 古津 年章*⁷ 高橋 靖宏*² 乙津 祐一*²
 小田 忠*³ 森 哲造*⁴ 西牟田 一三*⁵ 鈴木 晃*⁶
 (昭和59年11月20日受理)

RADIO WAVE PROPAGATION EXPERIMENTS AT THE MTRS

By

Hajime FUKUCHI, Toshiaki KOZU, Yasuhiro TAKAHASHI, Yuichi OTSU
 Tadashi ODA, Tetsuzo MORI, Kazumi NISHIMUTA, and Akira SUZUKI

The wave propagation characteristics above 10GHz are affected by rainfall or other meteorological phenomena. For the establishment of high quality satellite broadcasting service operated with a band above 10 GHz, it is indispensable to have detailed knowledge of the meteorological effects on the radio wave propagation characteristics along the satellite-to-earth path in these frequency bands.

Radio wave propagation experiments in the BSE program started at the Main Transmit and Receive Station (MTRS) at Kashima in May 1978, using beacon signal (11.7125 GHz, vertical polarization) from BSE. In this paper, various analysed results on the propagation data which were obtained for over 3 years since 1978 are presented.

The statistics of rainfall rate and rain-induced attenuation of the beacon signal have been obtained. Using these results, effective path length was derived to be about 5 km with elevation angle of 37 degrees.

The relations between up- and down-link attenuations due to rain were also obtained. It was found that the attenuation ratio(dB/dB) at 14 and 12 GHz varies from 1.3 to 1.9 with each rainfall event.

Rate of change of attenuation was also discussed and its cumulative distributions were obtained. It was found that large rates of change correspond to the large attenuations. The observed rate of change reached about 6 dB/sec at the maximum value during severe cumulus rainfall events.

Attenuation of the beacon signal and increase in outband noise temperature measured with the same 13 m receiving antenna show close correlation in many rainfall events. The fact shows that the attenuation measurements by a simple radiometer can be a useful method to predict the attenuation along the slant path.

Cross-polarization discrimination (XPD) measurements were carried out by using the beacon signal. It was observed that the degradation of XPD was worse than the predicted one based on the theoretical consideration using a deformed raindrop model. The analysis using rain radar echoes suggests that it is caused by the ice crystal or melting layer what is called bright band.

*1鹿島支所 第一宇宙通信研究室, *2衛星通信部 第一衛星研究室, *3稚内電波観測所, *4(元)秋田電波観測所, *5山川電波観測所, *6電波部 電波予報研究室, *7通信・放送衛星機構

Other experimental earth stations (Wakkanai, Akita, Kokubunji, Yamagawa and Okinawa), which are located all over Japan, made starts of their propagation experiments in 1978 or 1979. At these experimental earth stations, the TV signal at 12 GHz transmitted from BSE was received by a Simple Receive Equipment. The receiving level of the signal was recorded on digital cassette magnetic tape together with meteorological data, such as rainfall rate and ground temperature. The recorded data of each experimental earth station were sent to the MTRS for statistical analysis of propagation data.

In this paper, the statistics of rainfall rate and rain-induced attenuation of the TV signal at each experimental earth station are also shown. According to the results, local dependence of attenuation statistics over Japan at 12 GHz are clarified. Cumulative percentage relation between the annual and the worst month attenuation statistics are also derived. It is found that the percentage relation between the annual and the worst month statistics is almost independent of location.

1. 概要

放送衛星に使用されている上り回線 14 GHz 帯, 下り回線 12 GHz 帯の電波は, 降雨減衰の影響を受ける周波数帯に属するので, 衛星放送システムの確立のためには, 電波の高仰角伝搬特性を検討しておくことが必要である. そこで, 1978年4月に BS が打ち上げられて以来, 主固定局である電波研究所鹿島支所 (以下鹿島局と称する) をはじめとする各実験局において, 衛星からの 12 GHz 帯電波を用いた準ミリ波帯高仰角電波伝搬実験が実施された. 実験に参加した局は, 鹿島局のほか, 電波研究所地方観測所及び日本放送協会 (NHK) の実験局⁽¹⁾で, 日本全国十数か所に及んだ. 鹿島局以外の各実験局では, 主として, BS からの 12 GHz 帯テレビ信号の受信実験が実施され, 全国的規模での 12 GHz 帯降雨減衰に関する測定が実施された. 鹿島局では, BS ビーコン信号 (11.7 GHz, 垂直偏波) を用いた降雨減衰特性, 交差偏波特性等に関する詳細な測定が行われた.

BS 電波伝搬実験の成果は, すでに BS 実験総合報告書⁽²⁾, テレビジョン学会誌^(1,3)にまとめられているが, ここでは, 電波研究所における BS 電波伝搬実験の成果について, より詳細に報告する. また, 同様の報告は, 電波研季報に中間報告として一部発表されている⁽⁴⁾が, 本報告では中間報告で報告した内容も一部再掲し, 本テーマに関する BS 実験総合報告とすることとした.

以下, BS 電波伝搬実験の成果について 2. では, 鹿島局での成果, 3. では電波研究所の地方局 (稚内局, 秋田局, 山川局, 沖縄局) での成果について述べる.

2. 鹿島局での電波伝搬実験

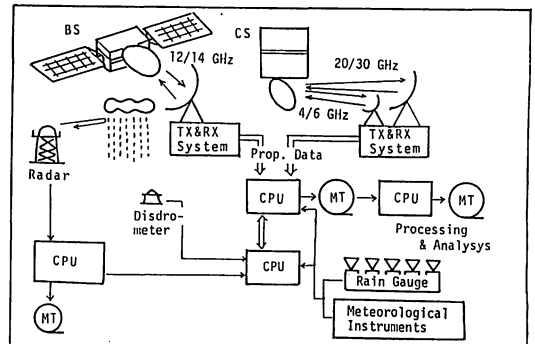
2.1 鹿島局電波伝搬実験システム

鹿島局は, BS 実験の中核局であると同時に, 準ミリ

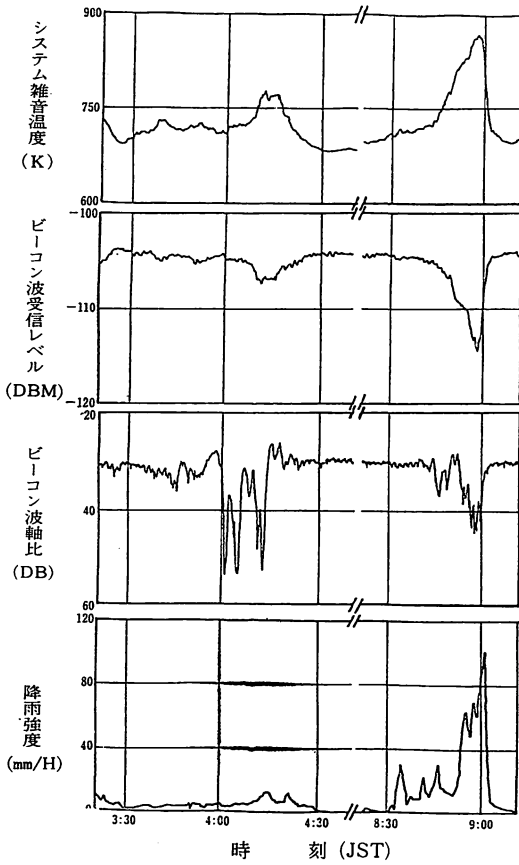
波衛星通信システムの確立を目指した実験用中容量通信衛星 (CS) 実験の中核局でもある. したがって, BS 電波伝搬実験は, CS 電波伝搬実験と並行して実施された. そこで, 電波伝搬実験システムは, CS・BS 実験共通となっている.

第1図に, CS・BS 電波伝搬実験システムのブロックダイアグラムを示す. 鹿島局での BS 伝搬実験に使用される電波は BS ビーコン波 (11.7 GHz, 垂直偏波) である. このビーコン波は自動追尾機能をもつ 13 m カセグレンアンテナで受信される. ビーコン波の仰角及び方位角は, それぞれ, 37°, 225°である. アンテナにより受信されたビーコン波は, 低雑音周波数変換器において直接周波数変換され, 追尾受信装置内の PLL 受信機に入力される. 鹿島局の送受信装置の詳細については文献⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾を参照されたい.

鹿島局には, 降雨等の気象現象と電波伝搬特性との関係を詳細に検討するために, Cバンド降雨レーダ⁽⁶⁾, 雨滴粒径分布測定装置 (ディストロメータ), 雨量計ネットワーク, その他気温, 湿度等の各種気象測器が整備されている.



第1図 鹿島局 CS・BS 電波伝搬実験システムのブロック図

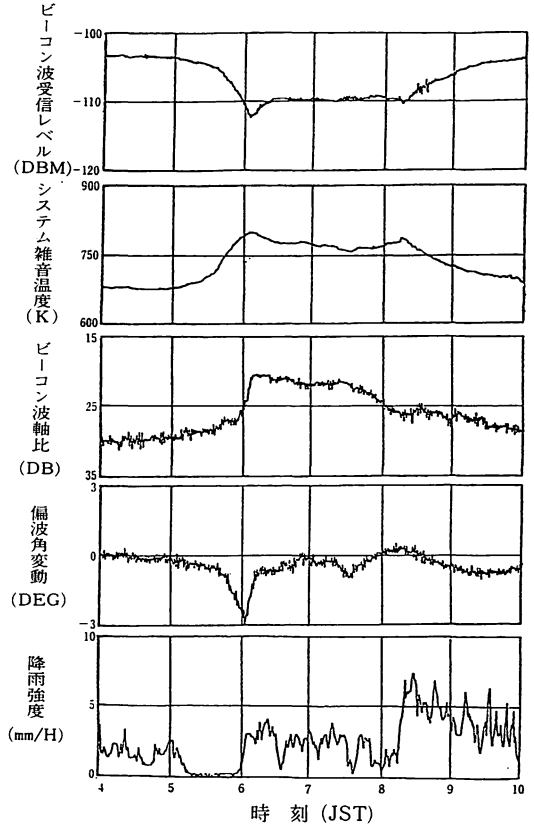


第2図 BS 伝搬実験取得データ例
—その1— (1978年9月30日, 降雨)

BS ビーコン波受信強度などの伝搬諸データは、データ収集用計算機により、1秒1サンプルで連続的に収集され、気象データとともにデジタル磁気テープに記録される。ただし降雨減衰などの統計処理にあたっては、平均化処理を施した1分値データを用いている。

BS ビーコン波受信強度の取得時間は、1978年8月から1981年12月までの3年5か月間で、22633時間となり、取得時間率は約76%である。データ取得のできなかった主な理由は、受信系及び収集計算機の保守のほか、BSの姿勢変動に伴うデータ欠測が挙げられる。すなわち、BSの三軸姿勢制御においては、1日のうち数時間は姿勢変動が大きくなる。その間はビーコン波受信レベルの変動もあるため、取得データは伝搬データとして不適切とした。

第2図に、鹿島局にて測定された1978年9月30日の降雨時におけるシステム雑音温度、ビーコン波受信強度、ビーコン波軸比、地上降雨強度を示す。図から、9時こ



第3図 BS 伝搬実験取得データ例
—その2— (1979年1月13日, 降雪)

ろにビーコン波の最大減衰量11 dB、最大降雨強度103 mm/hが観測されていたことがわかる。

第3図に、1979年1月13日の降雪時における測定例を示す。このときには偏波追尾を行っていなかったため、偏波追尾誤差信号から、ビーコン波の偏波角変動が測定されている。これらの結果は、降雨時と異ったふるまいをしており、降雪時の電波伝搬特性を検討するうえで興味深い。

以下、2.2では降雨減衰特性、2.3ではシステム雑音温度と降雨減衰の関係、2.4では交差偏波特性について述べる。

2.2 降雨減衰特性

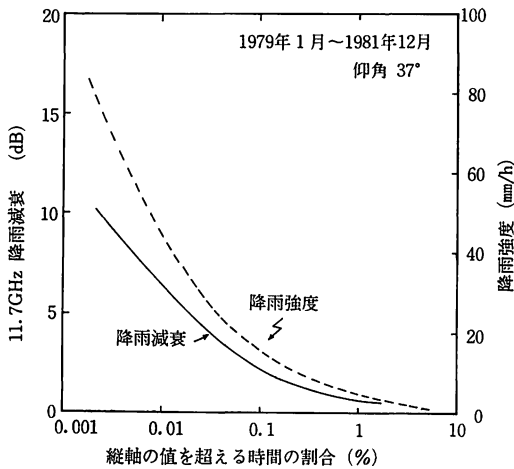
a. まえがき

ここでは、準ミリ波衛星回線の回線設計に重要な、降雨減衰特性について検討する。すなわち、ビーコン波の降雨減衰累積分布を同測定期間に地上雨量計で測定された降雨強度の累積分布とともに示すほか、降雨強度累積分布から降雨減衰累積分布を推定する手法について検討する。

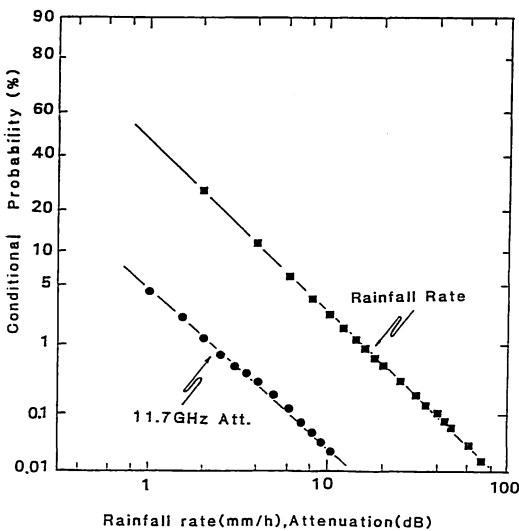
更に、BS からのテレメトリ情報を利用すると、14 GHz 上り回線の降雨減衰を測定することができる。そこで、上下回線での降雨減衰測定結果を用いて、降雨減衰の周波数依存性についても検討する。

将来の衛星通信・放送技術として、地球局送信電力制御により、上り回線降雨減衰を補償する方法が検討されている⁽⁷⁾。このような技術の確立にあたっては、降雨減衰の変化率（単位時間あたりの変化量）特性を知ることが重要である。そこで、ビーコン波の降雨減衰変化率の統計処理結果についても報告する。

b. 降雨強度及び降雨減衰の統計処理結果



第4図 降雨強度及び BS ビーコン波降雨減衰累積分布 (1979年1月~1981年12月)



第5図 対数正規確率紙上にプロットした降雨強度、及びBS ビーコン波降雨減衰累積分布

降雨強度及び降雨減衰の累積分布を、1979年1月から1981年12月までの3年間について第4図に示す。この図から、測定期間の0.1%の時間帯において、15 mm/h 以上の降雨強度が、2 dB 以上の 11.7 GHz 降雨減衰が観測されたことがわかる。

晴天時の測定結果を除いた降雨強度、降雨減衰の累積分布（条件付累積分布）は対数正規分布で近似できることが報告されている⁽⁸⁾。そこで、本伝搬実験の統計処理結果を対数正規確率紙を用いて示すと第5図のようになる。本図は、文献⁽⁸⁾と同様に、全期間のうち、降雨のない90%の時間を除いた残りの10%の時間（すなわち、全降雨と無降雨の時間の和が全期間の10%）の分布（条件付分布）を示している。図からわかるように、本実験から得られた降雨強度、降雨減衰の条件付分布も、以下の確率密度関数をもつ対数正規分布で近似できることがわかる。

$$f(a) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}sa} \exp\left\{-\frac{(\log a - m)^2}{2s^2}\right\} \dots\dots(1)$$

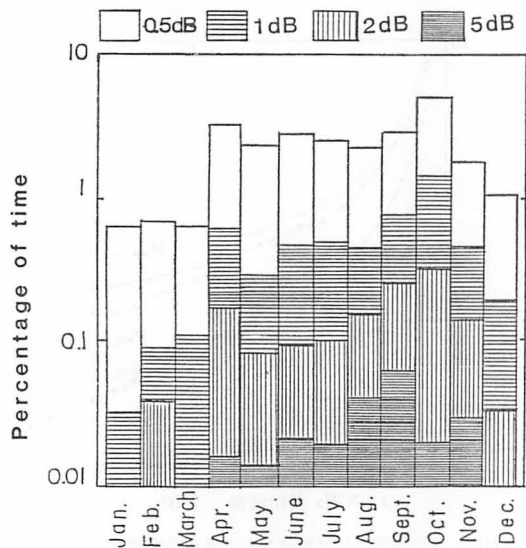
ここで、 m, s は、それぞれ確率変数 a の対数の平均値、及び標準偏差であり、 K は定数 ($\log e \approx 0.4343$) である。(1)式中のパラメータ m, s を最小自乗法を用いて算出すると第1表のようになる。これらのパラメータは後に述べる降雨減衰累積分布の推定において有用となる。

第6図は、11.7 GHz 降雨減衰累積分布の月別変化を3年間の測定結果を基にヒストグラムで示したものである。この図から、大きな降雨減衰は、台風時期（9、10月）に観測されていることがわかる。

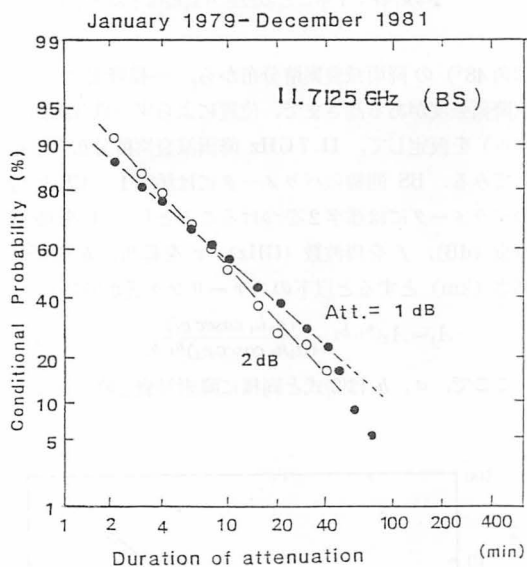
11.7 GHz 降雨減衰継続時間の累積分布を第7図に示す。本図は3年間の測定結果を基に、各降雨減衰値を超える総時間を100%とする条件付累積時間率を対数正規確率紙に示したものである。図から、降雨減衰継続時間の条件付分布は、ほぼ、対数正規分布で近似されることがわかる。ただし、継続時間が長くなると、分布が対数正規分布からずれてくるが、これは、BSの姿勢変動のためにビーコン波の欠測時間帯が1日の中で数回あり、長時間継続する降雨減衰が観測されにくくなるためと思われる。同様に、降雨強度継続時間の条件付

第1表 降雨強度、降雨減衰の累積分布パラメータ

項目	累積分布パラメータ		測定期間
	m	s	
降雨強度	-0.0214	0.532	1979年1月 ~ 1981年12月
降雨減衰	-0.963	0.568	



第6図 BS ビーコン波降雨減衰累積分布の月別変化



第7図 BS ビーコン波降雨減衰継続時間の条件付累積分布 (対数正規確率紙上にプロットしたもの)

分布も対数正規分布で近似できることが認められた⁽²⁾。

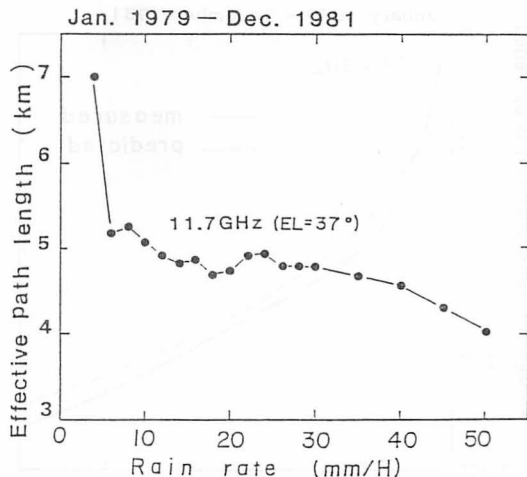
第4図に示す降雨強度、降雨減衰の累積分布から、それぞれの等確率値を求めることにより、以下の式で定義される等価通路長 l が求められる。

$$l = \frac{A_p}{aR_p^b} \quad (\text{km}) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 A_p : 累積確率 p %での降雨減衰 (dB)

R_p : 累積確率 p %での降雨強度 (mm/h)

a, b : 降雨強度から1 kmあたりの降雨減衰衰



第8図 等価通路長の降雨強度依存性

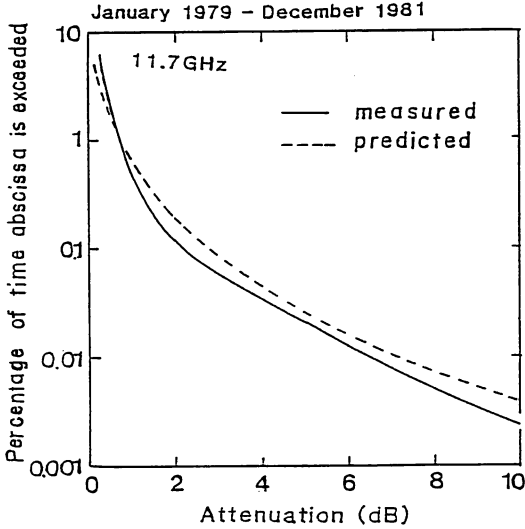
を求める場合のパラメータである。

パラメータ a, b としては、雨滴粒径分布を Marshall and Palmer, 雨温度として 0°C を仮定した Olsen⁽⁹⁾ らの報告結果を 11.7 GHz に補間した値 ($a=0.020, b=1.14$) を用いた。このようにして求めた等価通路長の降雨強度依存性を第8図に示す。図から、等価通路長は、降雨強度が、10~40mm/h の範囲では、仰角 37° で約 5 km であり、降雨強度が増すと短くなる傾向のことがわかる。

c. 降雨減衰累積分布の推定

準ミリ波帯電波を用いた衛星通信・放送回線の設計にあたっては、降雨減衰累積分布を推定する必要がある。降雨減衰累積分布の推定手法は幾つか報告されているが、ここでは、森田により報告された降雨強度累積分布から推定する方法⁽⁸⁾ (森田法)、違う周波数、仰角での降雨減衰累積分布を必要な周波数、仰角での降雨減衰累積分布に換算する方法 (周波数及び仰角スケール法) の有効性を、BS 伝搬実験で得られた結果を用いて検討する。更に、最悪月の降雨減衰累積分布の推定法についても検討する。

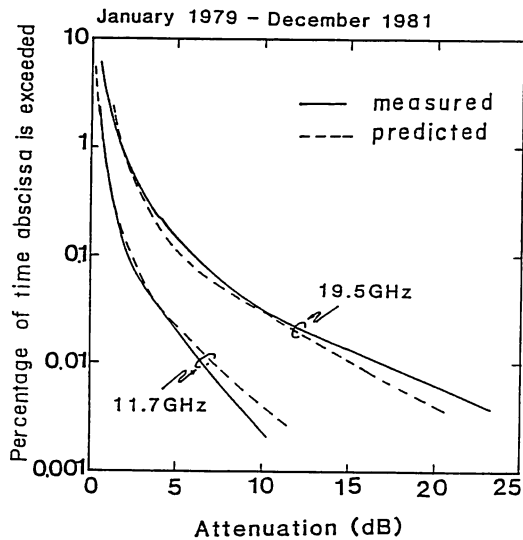
森田法は、降雨強度分布を対数正規分布で近似し、そのパラメータ m_r, s_r (式(1)参照) と平均雨域高さ h 、衛星仰角 e 、降雨強度空間相関係数 ρ などの諸パラメータから、対数正規分布で近似した降雨減衰分布のパラメータ m_a, s_a を求めるものである。第9図に1979年1月から1981年12月の3年間の降雨強度累積分布から推定した降雨減衰累積分布を破線で、同期間に測定された降雨減衰累積分布を実線で示す。推定にあたっては、それぞれ m_r, s_r を表1に示す値、 h を降雨レダによる測定から 4km、 e を BS 方向仰角 37° 、 ρ を森田による式 $e^{-\alpha\sqrt{d}}$ ($\alpha=0.35, d$ は雨域長 (km))



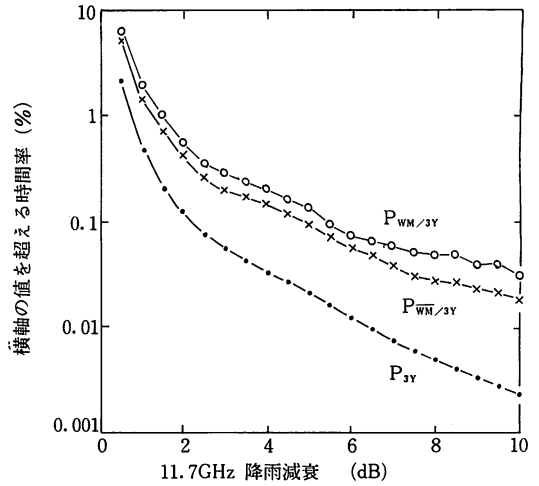
第9図 降雨強度累積分布から推定した11.7GHz降雨減衰累積分布(破線)と実測累積分布(実線)

とした。また降雨減衰パラメータ a , b は(2)式と同様に $a=0.020$, $b=1.14$ とした。図からわかるように、推定結果と実測結果との一致はよく、森田法の有効性が確認された。

周波数及び仰角スケール法による推定法は、ある周波数、仰角での降雨減衰測定結果を、降雨減衰の周波数依存性、仰角依存性を利用して、求めたい周波数、仰角での降雨減衰に換算する方法である。ここでは、鹿島局で同時期(1979年1月~1981年12月)に降雨減衰測定が実施されたCSビーコン波(19.5GHz, 円偏波、



第10図 スケール法による11.7GHz, 19.5GHz降雨減衰累積分布の推定
(実線: 実測累積分布 破線: 推定累積分布)

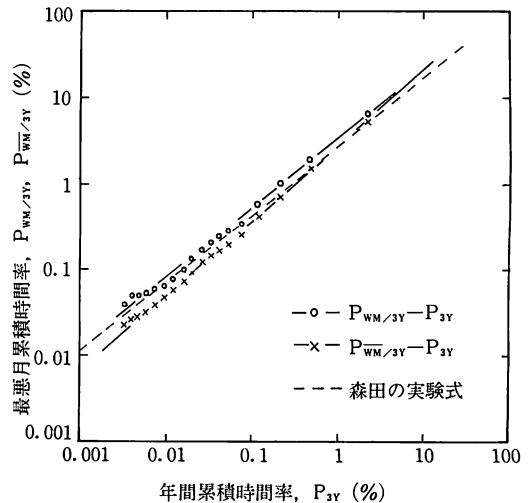


第11図 降雨減衰の年間累積分布と最悪月累積分布
 P_{3Y} : 3年間(1979年1月~1981年12月)の累積確率
 $P_{WM/3Y}$: 3年間の最悪月の累積確率
 $P_{WN/3Y}$: 1年ごとの最悪月累積確率の3年平均

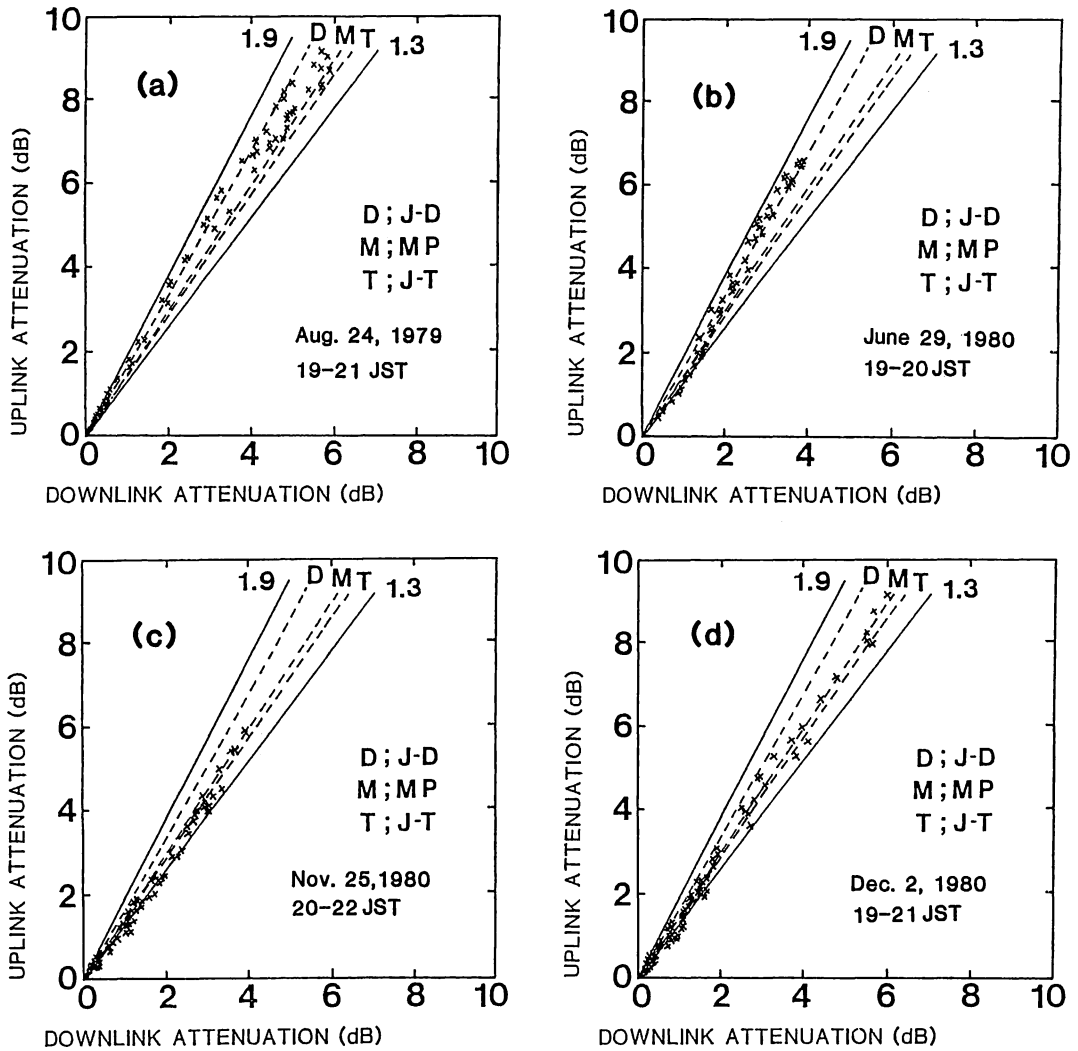
仰角 48°) の降雨減衰累積分布から、一様降雨モデル(降雨強度がある高さまで、位置によらず一様な降雨モデル)を仮定して、11.7GHz降雨減衰累積分布を推定してみる。BS回線のパラメータには添字1、CS回線のパラメータには添字2をつけることとし、 A を降雨減衰 (dB), f を周波数 (GHz), e を仰角, h を雨域高さ (km) とすると以下のスケール式が成り立つ。

$$A_1 = A_2 (b_1/b_2) \frac{(a_1 h_1 \operatorname{cosec} e_1)}{(a_2 h_2 \operatorname{cosec} e_2) b_1/b_2} \dots\dots(3)$$

ここで、 a , b は(2)式と同様に降雨減衰と降雨強度を



第12図 降雨減衰累積分布の最悪月時間率と年間時間率の関係



第13図 降雨イベントごとの上り (14.4 GHz), 下り (11.7 GHz) 回線減衰の相関例

結びつけるパラメータで、CS ビーコン波の場合、Olsen⁽⁹⁾ らの報告を用いて、 $a_2=0.067$, $b_2=1.10$ とした。雨域高さは、等価通路長が仰角 37° で約 5 km であることから、3 km としたが、 $h_1=h_2$ でしかも、 $b_1 \approx b_2$ であるため、推定結果にはほとんど影響しない。

第 10 図に、スケーリング法による降雨減衰累積分布の推定結果を破線で、実測結果を実線で示す。この図から、推定結果と測定結果とが良く合うことがわかり、降雨減衰累積分布推定法におけるスケーリング法の有効性が確かめられた。

第 11 図には、1979 年 1 月から 1981 年 12 月までの 3 年間の測定に基づく、11.7 GHz 年間降雨減衰累積分布、年間での最悪月累積分布、1 年ごとの最悪月累積分布の 3 年平均の分布を示す。ここで最悪月分布とは、1 月から 12 月の各月の累積分布につき、各降雨減衰に対し

最大の累積時間率を持つ月の結果を、その降雨減衰での累積時間率とするような累積分布 (包絡線分布) を意味する。図から、2 dB 以上の降雨減衰は年間分布で時間率 0.1% であるのに対し、3 年間最悪月では 0.6%、1 年間最悪月の 3 年平均では 0.4% に時間率が増えることがわかる。第 12 図には、最悪月累積時間率と年間累積時間率の関係を示す。本図には、森田⁽¹⁰⁾ により報告された降雨強度累積分布の最悪月累積時間率と年間累積時間率の関係を示す実験式 ((4) 式) が破線で示されている。

$$P(R) \overline{WM}/10Y = 2.83 [P(R)_{10Y}]^{0.8} \quad \dots (4)$$

ここで、 $P(R)_{10Y}$ は 10 年間の降雨強度累積確率 (%), $P(R) \overline{WM}/10Y$ は最悪月降雨強度累積確率の 10 年平均 (%) である。第 12 図から、11.7 GHz 降雨減衰累積分布の年間時間率と最悪月時間率の関係も、(4) 式のようなべき乗の関係で近似できることがわかる。また、

図から森田の実験式は、年間累積時間率が0.1%以上では、1年間最悪月の3年平均の結果と一致するが、年間累積時間率が0.1%以下では、実測結果より最悪月累積時間率が大きくなることわかれる。実測結果から、年間時間率と3年平均最悪月時間率との関係を最小自乗法を用いて求めると(5)式ようになる。

$$P(A) \overline{WM}/3Y = 2.79(P(A)_{3Y})^{0.88} \quad \dots\dots(5)$$

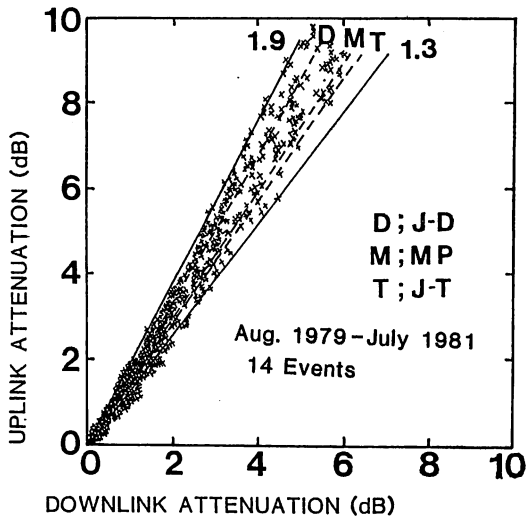
また、鹿島局、稚内局、山川局でのCS・BS伝搬実験結果の検討から、上記の関係は、ほぼ地域、周波数によらず、同様であることが確かめられた⁽¹¹⁾ (3. 参照)。

d. 上り回線, 下り回線降雨減衰比

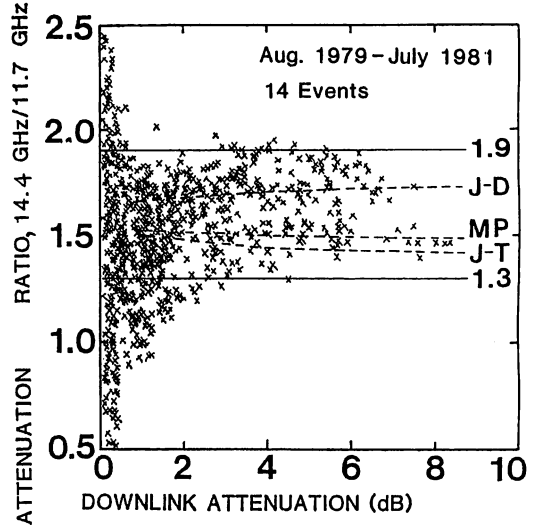
衛星放送回線の設計にあたっては、下り回線だけでなく、上り回線の降雨減衰特性も把握する必要がある。また、上下回線の降雨減衰を調べることは降雨減衰の周波数スケールリング手法(c. 参照)を確立するうえでも重要である。

BS 実験では全国各地における下り回線伝搬実験及び鹿島局における14 GHz帯降雨散乱実験のため、テレビ電波がほぼ連続的に送信された。したがって、鹿島局では、衛星での上り回線信号受信レベルをテレメトリ情報から得ることができるため、下り回線と同時に上り回線降雨減衰測定を行うことができた。ここでは、1979年8月から1981年7月までの2年間における強度14イベントについて上下回線降雨減衰比(14.4/11.7 GHz)について述べる。

第13図に幾つかの降雨例における上下回線降雨減衰の相関を示す。図中実線で示したのは一定の減衰比(1.9及び1.3)を仮定した結果である。また、破線は、

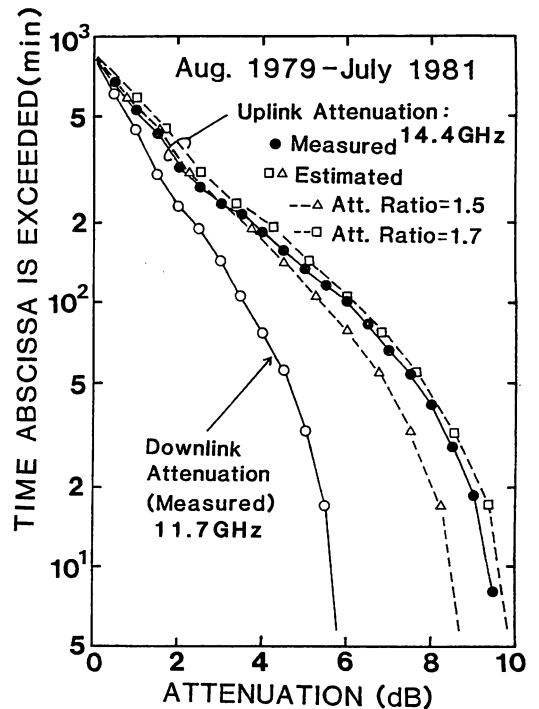


第14図 全測定期間における上り(14.4 GHz), 下り(11.7 GHz)回線減衰の相関

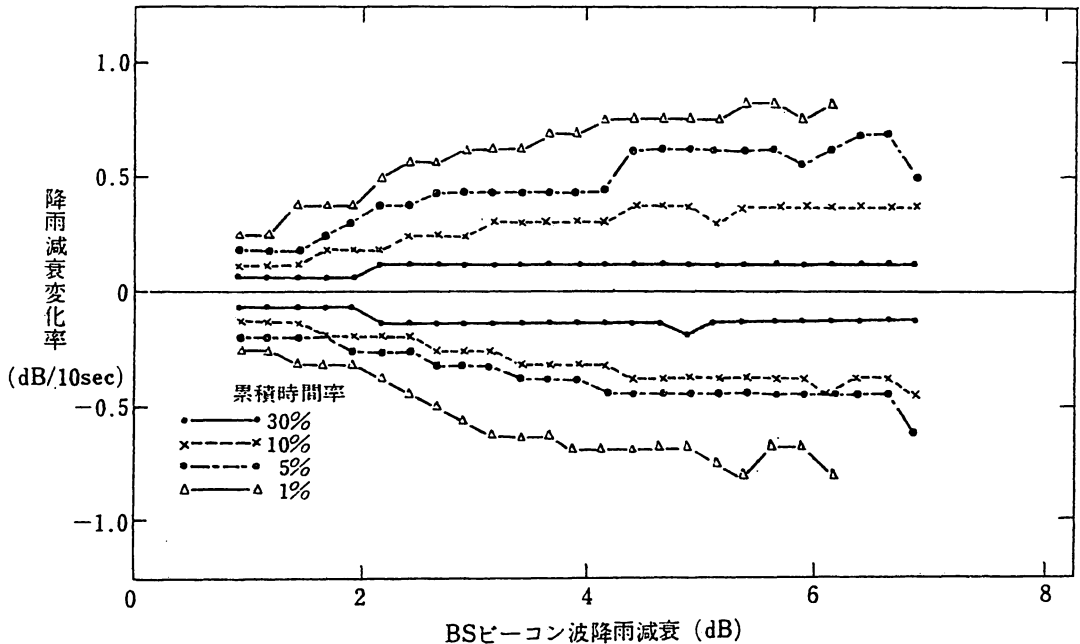


第15図 下り回線(11.7 GHz)減衰と減衰比(dB/dB)の関係

雨域長5kmの一樣降雨において Joss-drizzle (J-D)⁽¹²⁾, Joss-thunderstorm (J-T)⁽¹²⁾, Marshall and Palmer (MP)⁽¹³⁾の雨滴粒径分布を仮定した Olsen⁽⁹⁾らの降雨減衰定数計算結果(球形雨滴で雨滴温度0°C)から内挿により求めた計算値である。同じ降雨内では減衰比は比較的安定であったが、降雨ごとにはかなりばらつき、1.3~1.9倍の範囲に分布した。



第16図 実測の降雨減衰累積分布と一定の減衰比を用いて推定した上り回線減衰累積分布の比較



第17図 11.7 GHz 降雨減衰量とその変化率

全測定期間についての上下回線降雨減衰の相関、並びに減衰比の下り回線減衰依存性を第14, 15図に示す。図中の実線、破線の意味は第13図と同様である。これらの図から、降雨減衰が増加するにつれて、減衰比も1.5~1.7程度へと増加することがわかる。このことは、第16図に示す降雨減衰累積分布をみると明らかである。この図には、上下回線減衰累積分布の実測結果、並びに一定の減衰比を用いて下り回線の分布から上り回線の分布を推定した結果が示されている。減衰が小さい範囲では減衰比を1.5とした方が実測値と推定値がよく一致しているが、減衰が大きくなると減衰比として1.7を用いた方が良い一致を示している。標準的な雨滴粒径分布としてよく用いられるMP分布を仮定すると減衰比は1.5程度となるので、大きな減衰の範囲にMP分布を仮定して減衰の周波数依存性を検討することは適切でないことになる。むしろ、J-D分布を仮定した方が適切である。このように、減衰比が変化する原因としては、雨滴粒径分布の変化が考えられる。そこで、鹿島局においては、雨滴粒径分布測定装置(ディストロメータ)のデータを利用した検討を行っている。

e. 降雨減衰変化率⁽⁴⁾

準ミリ波、ミリ波帯電波を用いた衛星通信・放送システムにおいて、降雨等の気象現象に伴う伝送品質の劣化を回避するために、サイドダイバシティ切替え、送信電力制御等の対策が検討されている。これらの技術を確立するためには、降雨減衰の単位時間あたりの変化量を統

計的に把握する必要がある。

ここでは、降雨時の10秒あたり11.7 GHzの降雨減衰変化量について処理を行った。統計処理の対象とした降雨は、1979年1月から6月における16例である。第17図に降雨減衰とその変化率との関係を示す。本図では、変化率の累積時間率をパラメータとしている。この結果、変化率は0~7 dBの降雨減衰範囲において、降雨減衰が大きいほど大きいことがわかる。

降雨減衰の1秒ごとの測定結果から降雨減衰変化率の最大値を調べてみると、1979年9月4日には2 dB/sec、1979年7月27日には6 dB/secの変化率が観測されている。このような大きい変化率は、降雨減衰量が5 dB以上の大きな降雨減衰を伴う対流性降雨の場合に多く観測された。

f. まとめ

以上の降雨減衰特性の鹿島局での測定結果を要約すると以下のとおりである。

- (i) 3年間のBSビーコン波降雨減衰測定結果から、12 GHz帯電波の降雨減衰は時間率0.1%で2 dB以上0.01%で6 dB以上となることがわかった。
- (ii) 降雨強度、降雨減衰の条件付累積分布は対数正規分布で近似できる。また、それぞれの継続時間の条件付累積分布も対数正規分布で近似できる。
- (iii) 等価通路長は、降雨強度が10~40 mm/h程度では、仰角37°で約5 kmとなり、降雨強度が増加するほど減少する傾向がある。

- (iv) 降雨減衰累積分布の推定について、森田法、スケールリング法の有効性が確められた。
- (v) 3年間の測定結果を用いて、降雨減衰の年間累積時間率と最悪月累積時間率の関係を求めた。その結果、それぞれの関係はべき乗関係で近似できることが確められ、その近似式パラメータが求められた。
- (vi) BS 上下回線の降雨減衰特性を検討した結果、上下回線降雨減衰比 (14.4/11.7 GHz) は、降雨ごとに異なり、1.3~1.9の範囲に分布する。また、降雨減衰が小さい範囲では減衰比は1.5程度であるが、降雨減衰が大きくなると、減衰比は1.7程度に増加する傾向がある。
- (vii) 降雨減衰の単位時間あたりの変化量は降雨減衰が大きいほど大きくなる傾向があり、最大 6dB/sec の変化率が観測された。

2.3 アンテナ雑音温度増加と降雨減衰の関係

a. まえがき

鹿島局における伝搬実験では、11.7 GHz ビーコン波の降雨減衰を測定すると同時に、BS 方向のアンテナ雑音温度の測定を 11.96 GHz にて行ってきた。両者の関係を幾つかの降雨について調査した結果、良い相関があることがわかった。しかし、準ミリ波帯では、降雨減衰が、アンテナ雑音増加と相関の良い媒質の吸収減衰だけでなく、降雨の散乱減衰も含まれてくるため、同じアンテナ雑音温度増加量が観測されても、降雨によって散乱減衰の寄与が異なると降雨減衰量も変化する可能性がある。以下では、11.7 GHz 降雨減衰と 11.96 GHz におけるアンテナ雑音温度増加量とを統計処理することにより、相互の関係を定量的に検討する。

一般的に晴天時からのアンテナ雑音増加量 $T_e(K)$ は降雨減衰 $A(dB)$ を用いて以下の式で表現される。

$$T_e = \beta_1(1 - \beta_r) T_m, \quad \beta_r = 10^{-A/10} \quad \dots\dots(6)$$

ここで β_1 は、アンテナフィード部の透過率、 β_r は降雨の透過率、 T_m は実効媒質温度である。 T_m に関し、降雨が地上と気温 $0^\circ C$ の高度との間に存在することから、地上温度と 273 K との平均値を T_m とする方法も提案されているが、実際には、前述の散乱による減衰、大地やアンテナビーム周囲からの熱放射、降雨の不均一性の影響があり、必ずしも最適とはいえない。準ミリ、ミリ波帯においては、測定結果と合う T_m を定量的に検討する必要がある。金原⁽¹⁴⁾ は上記の散乱等の影響を考慮して 11.8 GHz における T_e と A との関係を計算し、サントラッカ及びラジオメータにより測定した T_e 、 A と比較を行っているが、実測値と計算値は比較的良く一致している。また Mawira⁽¹⁵⁾ は金原と同様の降雨モデルを用い、やはり 11.8 GHz での T_m の計算

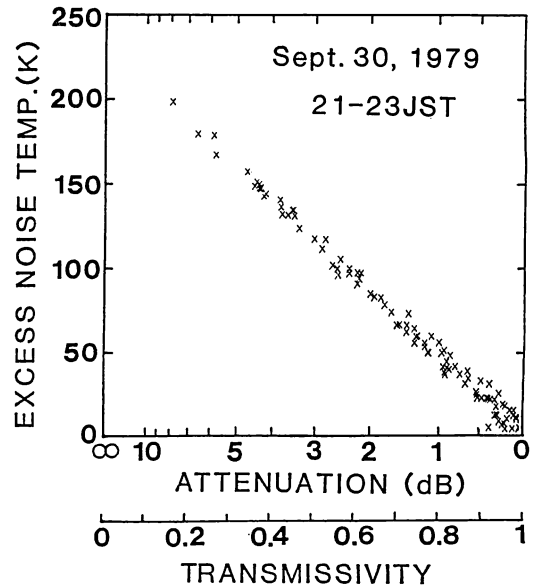
を行っている。これらの計算結果をみると、 T_m の値は条件により異なるが、おおむね地上気温と $0^\circ C$ (273 K) との平均値より 10 K 程度低くなっている。ここでは、これらの報告をふまえて、BS 伝搬実験での測定結果を基に、 T_m に関する検討を行う。

b. 測定システムとデータ処理

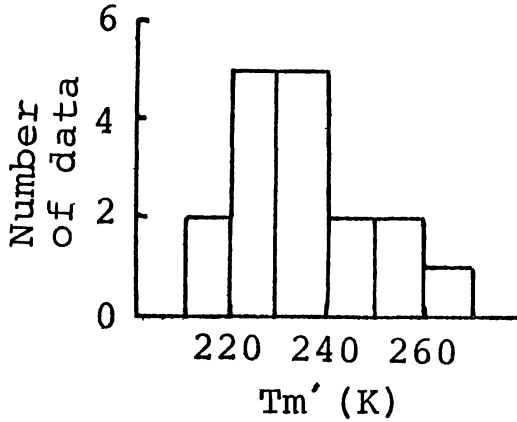
アンテナ雑音温度は、受信系雑音温度も含めたシステム雑音温度として、鹿島局テレビ受信系に付設された雑音付加型ラジオメータにより測定される。本ラジオメータの測定原理及び較正については文献(4)を参照されたい。

取得データの処理は 1979 年 8 月から 1981 年 7 月までの 2 年間に於ける 17 降雨である。降雨の選択基準は、(i)降雨減衰が大きいこと、(ii) BS 姿勢変動によるビーコン波受信レベル変動が小さいこと、(iii)ビーコン波受信強度の晴天時レベルを受信強度から推定しやすいような降雨減衰継続時間が比較的短い降雨とした。雑音温度、ビーコン波受信強度とも、1 秒値を平均処理した 1 分ごとのデータをデータ処理に用いた。

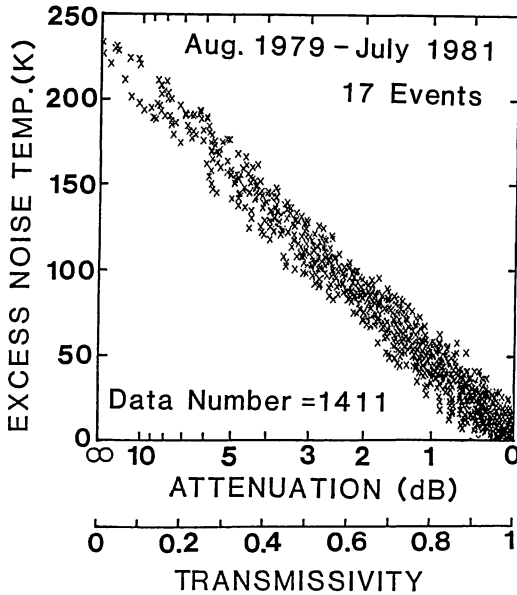
ここでは、(6) 式の $\beta_1 T_m$ を改めて T_m' とし、 T_m' を測定から求めた。すなわち T_m' はアンテナフィード部損失の影響を受けた T_m である。また雑音温度増加量 T_e は地上気温 T_g に依存すると考えられるため、 $T_g = 288 K$ の値に規格化することにより、測定時の地上温度の違いによる T_m' のばらつきを軽減させることとした。規格化にあたっては T_e が地上温度と 273 K との平均値とほぼ比例すると仮定した。



第18図 ビーコン波降雨減衰 (11.7 GHz) とアンテナ雑音温度増加 (12.0 GHz) の相関図



第19図 降雨イベントごとに決定した T_m' の度数分布

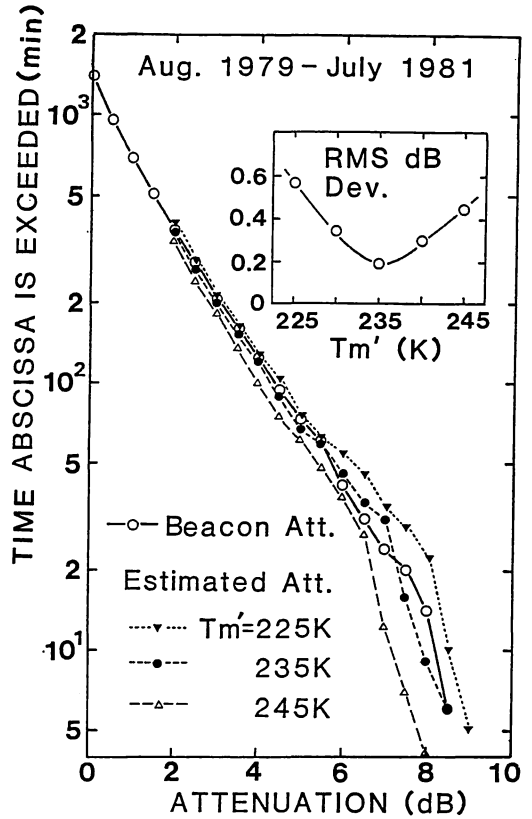


第20図 全降雨イベントについてのビーコン波降雨減衰 (11.7 GHz) とアンテナ雑音温度増加 (12.0 GHz) の相関

c. 処理結果

1979年9月30日の降雨における T_e と A との相関を第18図に示す。このイベントでは衛星姿勢変動によるビーコン波のレベル変動が小さく、相関は非常に良好である。横軸は透過率 (β_r) リニアであるため直線的な相関関係が得られている。この関係を最小自乗法で近似し、その傾きから T_m' を求めた結果、 $T_m'=234\text{ K}$ と決定された。他のイベントについてもビーコン波受信レベル変動の影響に多少の差はあるが、ほぼこのイベントと同様良い相関が得られた。こうしてイベントごとに決定された T_m' の度数分布を第19図に示す。その平均は 234 K 、標準偏差は 14 K であった。

第20図に全降雨イベントについての T_e と A との



第21図 実測及びアンテナ雑音温度増加から推定したビーコン波降雨減衰累積分布 (11.7 GHz) の比較

相関を示す。第18図に比べて、ばらつきは大きいがいきれいな直線関係が得られている。この相関から T_m' を決定すると 232 K となった。

次に T_e から推定した降雨減衰累積分布が実測値と最もよく一致するよう T_m' を決定した。第21図は種々の T_m' を用いた推定累積分布を実測累積分布と比較したものである。実測分布と推定分布の一致性の判断基準としては、両分布の RMSdB 偏差を用いた。 T_m' に対する RMSdB 偏差の変化を第21図の中に示すが、 $T_m'=235\text{ K}$ で最小となっていることがわかる。

上述のように決定された T_m' ($232\sim 235\text{ K}$) は、本測定システムにより 11.7 GHz 降雨減衰を推定する場合の最適値であるが、一般に議論される T_m を求めるには、本システムのフィード部損失 0.65 dB ($\beta_1=0.86$) と、ビーコン波周波数と雑音を測定している周波数との差による影響を補正する必要がある。(周波数差の影響は約 3 K 、 T_m' を過大評価させている。)これらの補正を行うと T_m は $266\sim 270\text{ K}$ となるが、この値は金原、Mawira による計算、実測結果とおおむね一致している。

d. まとめ

11.7 GHz 降雨減衰とアンテナ雑音温度増加量との関係を調べた結果以下のことがわかった。

- (i) 11.7 GHz 降雨減衰とアンテナ雑音増加量との相関は非常に良好であった。
- (ii) 統計処理により求められた 12 GHz 帯の実効媒質温度 T_m は 266~270 K となり、この結果はこれまで報告されている実測、計算結果とはほぼ一致している。

2.4 交差偏波特性

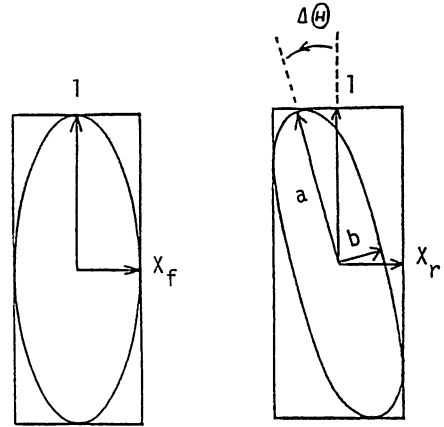
a. まえがき

通信需要の増加に対処するため、直交偏波を用いた周波数再利用技術の重要性が高まっている。その場合、降雨等による交差偏波識別度 (XPD) の劣化特性を把握することが必要である。降雨時の XPD 劣化は、変形雨滴モデルを用いて詳しい理論計算が行われ⁽¹⁶⁾、地上回線の場合には実測値とも比較的良好に一致することが確認されているが⁽¹⁷⁾、衛星回線においては雨滴による劣化では説明できない XPD 劣化がしばしば観測され、上空の雨滴以外の気象粒子 (氷晶等) に起因するものと考えられている⁽¹⁸⁾。この劣化は降雨減衰とあまり相関がなく、かつ急激に変動するものもあり、衛星回線における XPD 劣化の予測に際し大きな問題となっている。

BS 主局では 11.7 GHz BS ビーコン波を用い、衛星回線における交差偏波特性の測定を行ってきた⁽¹⁹⁾。BS ビーコン波は主局においてはほぼ垂直偏波となっており (設計値では鹿島にて垂直方向から時計回りに、5~6° 傾く直線偏波)、これまで鹿島で測定されてきた ETS-II, CS ビーコン波による円偏波の交差偏波特性との比較も興味の対象であったが、統計処理を行った結果、同じ周波数帯である ETS-II 11.5GHz ビーコン波の場合⁽²⁰⁾と比べて、交差偏波成分の発生がかなり小さいことがわかった。測定データの処理に当たっては、伝搬路に沿ったレーダデータや降雨減衰と比較することにより、雨滴あるいはそれ以外の降水粒子の影響について検討したが、雨滴以外の降水粒子によると考えられる交差偏波成分の発生がかなり観測されることがわかった。

b. 測定システム

鹿島局では、交差偏波成分の振幅、位相 (いずれも主偏波成分に対する相対値) を、受信電界の楕円偏波成分 (楕円偏波短軸方向成分、 p) 及び偏波角度の変化 ($\Delta\theta$) を測定し、以下に述べる演算を行って求めている。受信された交差偏波成分 X は、その主偏波に対する振幅を r 、主偏波との位相差を φ とし、晴天時及び降雨時での値を、それぞれ添字 f 、 r で区別すると (第 22 図参照)、次式で表される。



$$\begin{aligned}
 X_f &= r_f \exp(\pm j \frac{\pi}{2}) & X_r &= r_r \exp(j \varphi_r) \\
 &= \pm j r_f & & \\
 p_f &= \pm r_f & p_r &= b/a \\
 \text{Pol. angle} &= \theta_f & \text{Pol. angle} &= \theta_r \\
 \Delta \theta &= \theta_r - \theta_f
 \end{aligned}$$

第22図 晴天時 (f) 及び降雨時 (r) の交差偏波成分

$$\begin{aligned}
 X_f &= r_f \exp(\pm j \pi / 2) \\
 X_r &= r_r \exp(j \varphi_r)
 \end{aligned} \quad \dots\dots(7)$$

r, φ と $p, \Delta\theta$ の関係は、晴天時では以下のようなる。

$$\begin{aligned}
 r_f &= |p_f| \\
 \varphi_f &= \pm \pi / 2 \\
 \Delta\theta_f &= 0
 \end{aligned} \quad \dots\dots(8)$$

ここで、主偏波成分の電界方向は晴天時の楕円偏波長軸方向と定義する。また、降雨時には、 $r \ll 1, |\Delta\theta| \ll 1$ とすると (通常この条件は十分満たされている)、

$$\begin{aligned}
 p_r &= r_r \sin \varphi_r \\
 \Delta\theta_r &= -r_r \cos \varphi_r \\
 r_r &= \sqrt{p_r^2 + \Delta\theta_r^2}
 \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

という関係が成り立つので、 $p, \Delta\theta$ を測定することにより、交差偏波成分 X_r が求められる。

しかし、BS 実験システムでは、衛星の姿勢変動等により、 $\Delta\theta_r$ が晴天時においても、 $\pm 0.5^\circ$ 程度の範囲で変動している。通常の降雨による $\Delta\theta$ の変化量は理論的に 1° 以下と予想されることから (後述、図 25 参照)、(9)式の $\Delta\theta_r$ を正確に測定することは難しい。実際、幾つかの強雨時測定結果より、 $\Delta\theta_r$ が晴天時の $\Delta\theta$ の変動にほぼマスクされることが確認されている。そこで、本実験では、厳密な意味での交差偏波成分の測定を断念し、楕円偏波の短軸方向成分を測定し、楕円偏波率 ($-20 \log |p|$) について検討することにする。この短軸方向成分 p には、BS 及び鹿島局アンテナ固有の交差偏波特性により発生した成分も含まれており、結果的に受

信電波の楕円偏波率が晴天時でも 30~35 dB となっている。そこで、降雨による短軸方向成分の発生を求めるために、降雨時に測定された短軸方向成分から、晴天時の短軸方向を差し引く処理を行う。このようにして求められた降雨による楕円偏波率を XPD_q と書き、以下の式で定義する。

$$XPD_q = -20 \log |p_r \pm p_f| \quad \dots\dots(10)$$

XPD_q は、降雨により発生する交差偏波成分のうち、主偏波成分と位相が直交する成分に対応し、 XPD との差は、 XPD_q が 40, 35, 30 dB のときに、それぞれ、2.5, 1, 0.3 dB 程度となる ($\Delta\theta_r$ を 0.5° と仮定)。したがって、 XPD_q が小さいところでは、 XPD と XPD_q はほぼ等しく、 XPD_q を交差偏波識別度とみなしても、実用上は問題ない。

このようにして、 XPD 測定における地球局アンテナの影響は除去できるが、直線偏波の場合、衛星アンテナで発生する交差偏波成分があると誤差を生ずる⁽⁴⁾。しかし、BS ビーコン波の場合、この誤差は十分小さいと考えられ⁽⁴⁾、以下ではその影響を無視している。

c. 降雨タイプの分類

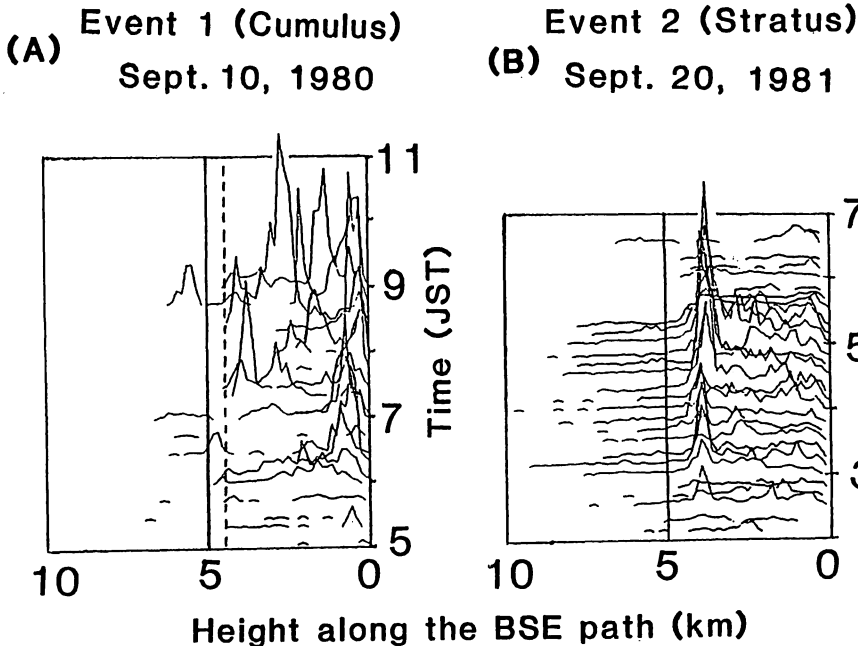
電波研究所では ETS-II 伝搬実験以来、降雨レーダにより測定された伝搬路上降雨強度分布から、降雨を対流性、層状性、その他の降雨タイプに分類し、降雨減衰や交差偏波特性の解析を進めてきた⁽²⁰⁾。その分類法は、 0°C 高度より下の降雨域からの反射と 0°C 高度付近の

氷晶が雨滴に融解する層（融解層、ブライツバンド）からの反射の強さを比較するもので、雨域あるいは融解層からの反射が相対的に強い降雨を、それぞれ対流性 (Cumulus)、層状性 (Stratus) と定めている。したがって対流性降雨では雨滴が、層状降雨では氷晶や雪片等の降水粒子が伝搬特性に強い影響を及ぼすものと推察される。今回もその分類法によって降雨を分類し、降雨の性質と交差偏波特性の関係を検討した。

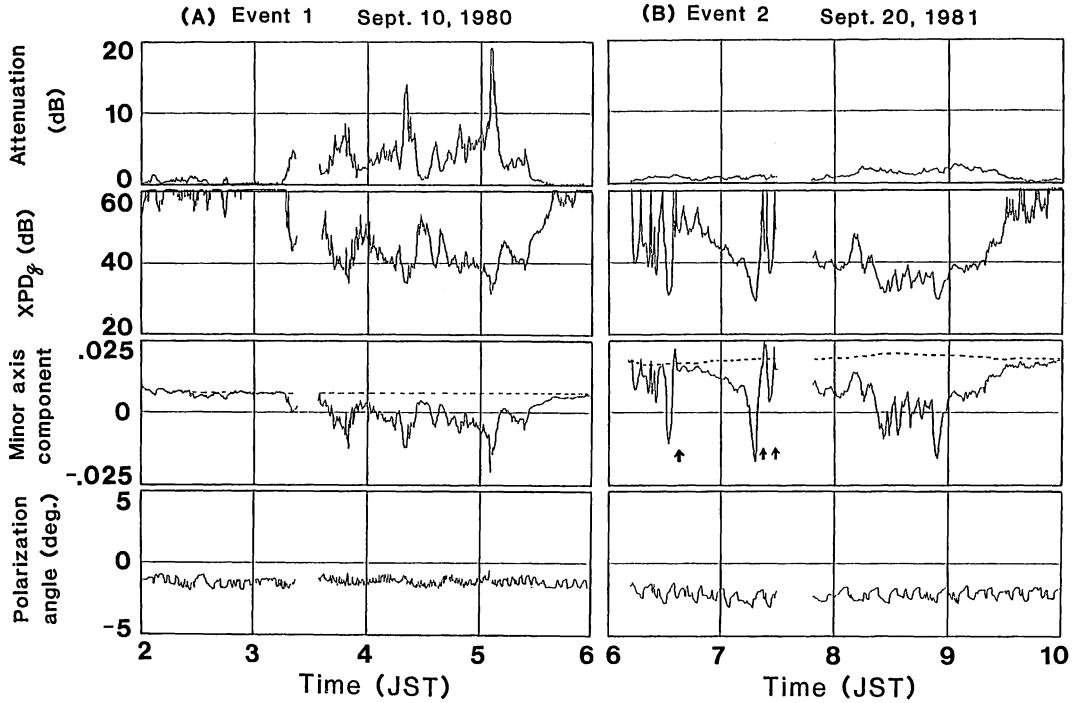
d. 特徴的な測定例

1980年9月10日、鹿島において集中豪雨が観測された。5.3 GHz 降雨レーダにより測定された BS 回線伝搬路上の降雨強度分布を第23図(A)に示す。この降雨例 (Event. 1) は融解層がほとんど認められない典型的な対流性降雨である。そのときの伝搬特性を第24図(A)に示す。この図で楕円偏波短軸方向成分、偏波角度の変化が前述のようにそれぞれ主偏波成分に対して直交位相、同位相の交差偏波成分の発生に対応することに注意されたい。楕円偏波短軸方向成分は変化が大きく、かつ降雨減衰量と良い相関があるのに対し、偏波角度の変化は降雨時以外にも存在する $\pm 0.2 \sim \pm 0.5^\circ$ の変動にマスクされる程度である。同図には、降雨による楕円偏波短軸方向成分から求められた楕円偏波率 XPD_q も示されており、降雨減衰との相関も良いことがわかる。

降雨による交差偏波成分の発生は、雨滴傾斜角の平均値（伝搬方向に垂直な平面内での電界方向と気象粒子主



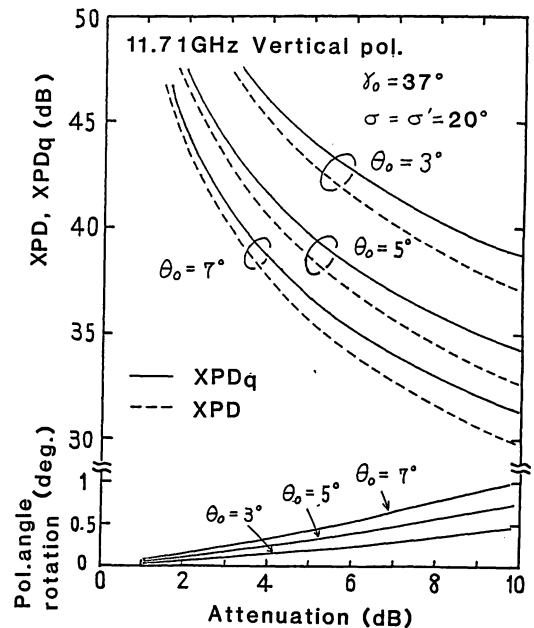
第23図 対流性 (A) 及び層状性 (B) 降雨時の BS 伝搬路上降雨強度分布測定例 (図 (A) 中の破線は地上気温から推定した 0°C 高度)



第24図 対流性(A)及び層状性(B)降雨時の伝搬特性測定例
(楕円偏波成分中の破線は晴天時レベル。データのとぎれている部分はBS姿勢変動があった時間帯。)

軸方向のなす角、以下 θ_0 と表す。)及びその標準偏差 σ に依存し、 θ_0 が大きいほど (45° で最大の劣化)、 σ が小さいほど劣化が大きい。 $\theta_0=3\sim7^\circ$ 、 $\sigma=20^\circ$ とし、変形雨滴により生じるBSビーコン波のXPD楕円偏波率 (XPD_q)、偏波回転角を文献(16)に示された伝搬定数を用いて計算した。その結果を第25図に示す。 θ_0 を $3\sim7^\circ$ としたのは、雨滴が平均的には垂直に落下すると考えられることを考慮すると θ_0 はほぼ偏波角(鹿島における設計値は -5.4°)程度になると予想されるからである。 $\sigma=20^\circ$ としたのは、 θ_0 の予想値程度 ($4\sim7^\circ$) で対流性降雨時全体(後述)の測定値と一致するよう σ を決めた結果、 $\sigma=20\sim30^\circ$ となったためである。 $\sigma=30^\circ$ の場合、 $\theta_0=5\sim11^\circ$ で、 $\sigma=20^\circ$ の場合、 $\theta_0=3\sim7^\circ$ での特性とおおむね一致する。また第25図に示すように偏波回転角は計算値でも最大 1° 程度であり、測定でほとんど検出できないことも説明できる。

一方降雨減衰と楕円偏波率劣化の相関があまり良くない降雨もしばしば観測された。そのような例として1981年9月20日(Event.2)の測定データを第24図(B)に示す。またそのときの伝搬路上降雨強度分布を第23図(B)に示す。約4kmの高度に定常的に認められる強いピークが融解層であり、この降雨例は典型的な層状性降雨である。降雨減衰量は最大2.5dB程度であり、理論計算では45dB程度までしか XPD_q は劣化しないはずであ



第25図 変形雨滴モデルによるXPD、楕円偏波率、偏波回転角と降雨減衰の関係

(θ_0 、 σ は伝搬路上に垂直な平面内での雨滴傾斜角の平均及び標準偏差。伝搬方向の雨滴傾斜角の平均は 37° (BSの仰角)、その標準偏差は 20° としている。)

るが、実際は30 dB程度まで劣化している。また降雨減衰との相関も良くない。このイベントでも偏波角変動は検出限界以下であり、楕円偏波成分発生量に比較して小さいことから、交差偏波成分の位相が直交に近く、また時々晴天時の位相に対して同相、逆相と急激に変化している(第24図(B)に変化時刻を矢印で示す)ことがわかる。このような現象はこれまでの衛星伝搬実験でも報告されており、降水粒子の配向方向が急激に変化するためと考えられている⁽¹⁸⁾。

e. 降雨減衰と XPD_q の相関

降雨減衰と XPD_q の相関については d. でも特定のイベントについて述べたが、1980年4月から1981年3月までの1年間の測定結果について、降雨減衰との相関(瞬時対応)を調べた。

第26図に、対流性及び層状性降雨時の降雨減衰と XPD_q の相関を示す。図中の実線は $\theta_0=3\sim 7^\circ$, $\sigma=20^\circ$ とした計算値(第25図に示した楕円偏波率劣化と同じ)である。 XPD_q はおおむね計算値程度あるいはそれより劣化が大きな範囲に分布しており、計算値より劣化が小さな例は少ない。降雨タイプに分類した場合、対流性では降雨減衰が比較的大きく、 XPD_q はほぼ計算値に近い劣化を示すのに対して層状性では降雨減衰が小さい

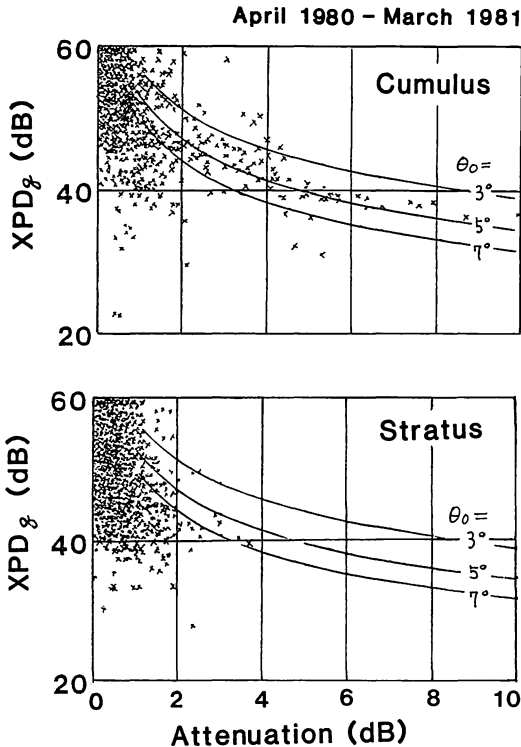
わりには大きく XPD_q が劣化するという傾向が明らかに認められる。この結果は対流性の場合には雨滴が、層状性の場合には氷晶等の雨滴以外の降水粒子の影響が大きいという推定が妥当であることを示している。しかし対流性の場合でも計算値に比べ、相当大きな XPD_q 劣化を生じることがある。この原因としては、使用している降雨タイプ分類法が、いずれかの降水粒子が支配的影響を持つイベントを必ずしも完全に抽出、分類するとはかぎらないこと、あるいは計算に用いたパラメータや降雨のモデル化が場合によっては不適當な可能性があることなどが考えられる。

このようなばらつきはあるが、降雨減衰と XPD_q が良い相関を示す場合は d. でも述べたように $\theta_0=4\sim 7^\circ$, $\sigma=20\sim 30^\circ$ とすると計算値と実測値がほぼ一致する。この σ の値は CS, Kバンドビーコン波 XPD の測定結果からの推定値⁽²¹⁾とも一致しており、妥当な結果と思われる。また1979年10月の対流性降雨時(5イベント)における BS ビーコン波の降雨減衰対 XPD_q の相関でもほぼ同様の結果が得られており⁽¹⁹⁾、雨滴の影響が支配的と考えられる場合は、降雨減衰と XPD_q の相関が良いことがわかった。

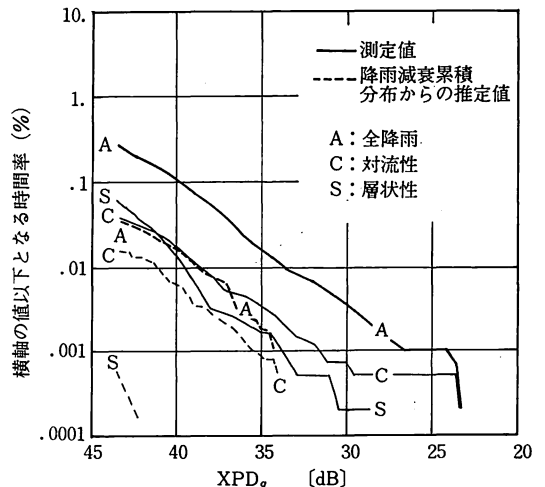
f. XPD_q 累積分布

1980年4月から1年間の降雨による XPD_q の累積分布を第27図に示す。測定時間は約6946時間(データ取得率約80%)である。同じ測定期間の降雨減衰累積分布から第25図に示す計算値($\theta_0=5^\circ$, $\sigma=20^\circ$)を用いて推定した XPD_q の累積分布を第27図に併せて示す。

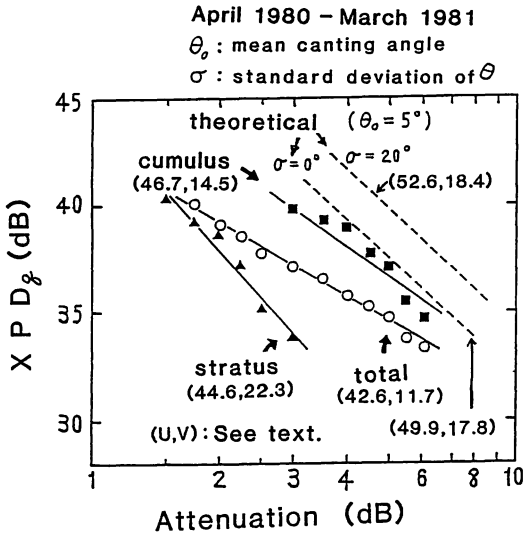
測定結果と推定結果の差は、対流性降雨の場合比較的小さいが、層状性では非常に大きい。全降雨はそれらの中間的な特性を示し、等確率値で5~7 dB程度の差とな



第26図 ビーコン波の降雨減衰と XPD の相関
(実線は理論計算値、付記した角度は θ_0 である。
第25図参照)



第27図 ビーコン波 XPD の累積分布



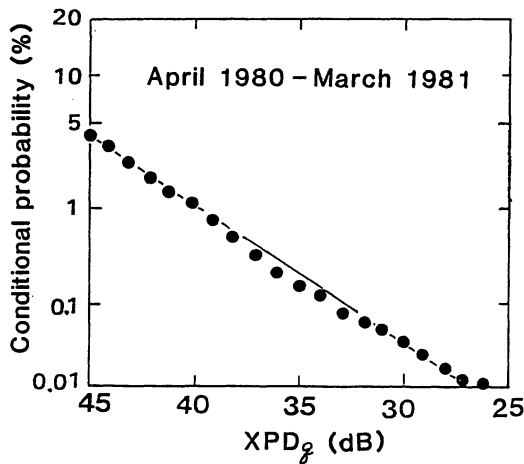
第28図 ビーム波の降雨減衰と XPD の各累積分布における等確率値の関係

っている。

第28図には降雨減衰と XPD_q の等確率値の関係を示す。図中の破線は第25図に示す計算値、実線は測定値を次式で最小自乗近似したものである。

$$XPD_q = U - V \log A \text{ [dB]} \quad \dots\dots(11)$$

ここで、 A (dB) は降雨減衰、 U 、 V は定数である。第28図には、求められた、 U 、 V が各直線に付記されている。本図から全降雨の場合の等確率値の関係は降雨減衰の小さな範囲では層状性降雨の関係に近いが、降雨減衰が増加するにつれて対流性降雨の関係に近づくことがわかる。同様な傾向はこれまで鹿島で行われてきた他の衛星回線伝搬実験でも認められている⁽²⁰⁾、⁽²²⁾。



第29図 正規確率紙にプロットしたビーム波 XPD の条件付累積分布

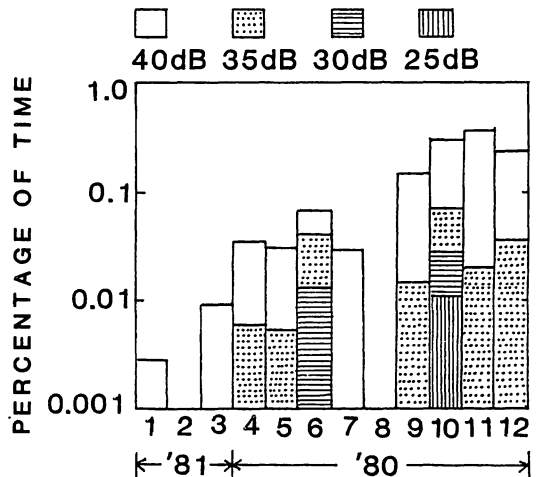
年間の時間率 0.1、0.01% で生じる XPD_q はそれぞれ約 40 dB、33 dB と、地球局アンテナ系で発生する量(約 35 dB)と同程度であった。また同じ周波数帯である ETS-II の 11.5 GHz ビーム波 XPD の累積分布⁽²⁰⁾と比較した場合、BS ビーム波の方が等確率値で 10 dB 程度劣化が小さい。このような差が生じたのは測定時期の違いもあるだろうが、前にも述べたように垂直偏波の場合、降雨の雨滴傾斜角はかなり小さいと考えられるのに対し、円偏波では常に直線偏波の最悪値(雨滴傾斜角 45°)に等しい XPD 劣化を生じるためと考えられる。

第29図は、 XPD_q 累積分布を正規確率紙に描いたものである。ただし、この図には、全期間のうち、降雨のない 90% の時間を除いた残りの 10% の時間(すなわち、全降雨と無降雨の時間の和が全期間の 10%)の分布(条件付分布)を示している。この図から、 XPD_q 条件付分布は、正規分布で近似できることがわかる。

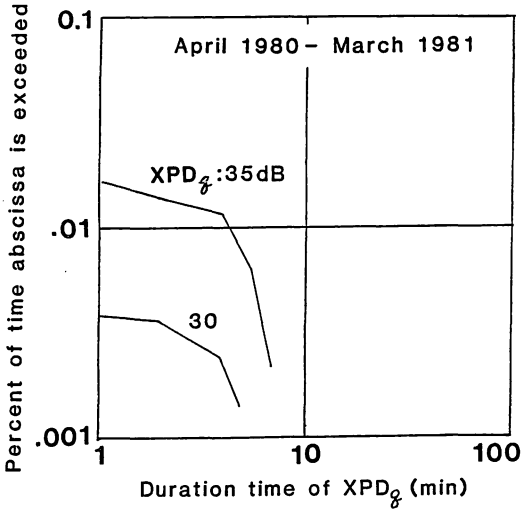
第30図は、 XPD_q 累積分布の月別特性をヒストグラムで示したものである。縦軸は、 XPD が、40、35、30、25 dB を下回る時間率を表している。この図から、梅雨期(6月)、及び台風時期(9~11月)に XPD_q 劣化が大きくなることがわかる。

第31図は、 XPD_q 継続時間の累積分布を示す。この図から1年間の測定期間中、 XPD_q が 30 dB を下回るイベントの最大継続時間は、5分間、35 dB を下回るイベントの最大継続時間は、7分間であることがわかる。

通信回線の設計には年間時間率のほか、最悪月の時間率も重要である。 XPD_q の月別累積分布の最悪値包絡線から最悪月累積分布を求めた結果、0.1、0.01%値はそれぞれ約 36、24 dB となった⁽¹¹⁾。年間時間率 P_T (%)



第30図 ビーム波の XPD 累積分布の月別変化



第31図 ビーコン波の XPD 継続時間の累積分布

と最悪月時間率 P_{WM} [%] の関係は降雨減衰の場合

$$P_{WM} = aP_r^b \quad \dots\dots(12)$$

で近似できる⁽¹⁰⁾ことが知られているが、BS ビーコン波 XPD_q の場合も (12) 式で近似でき、 $a = 2.71$ 、 $b = 0.89$ という値が得られた⁽¹¹⁾。

g. まとめ

測定結果を交差偏波特性について要約すると以下のとおりである。

- (i) 降雨により発生する交差偏波成分を主偏波に対して同相、直交位相成分に分けた場合、直交成分である楕円偏波短軸成分が支配的で、同相成分はほとんどの場合検出限界以下であった（このため降雨による楕円偏波率 (XPD_q) がほぼ XPD に等しいとみなしてデータ処理を行った)。
- (ii) 降雨タイプを分類して降雨減衰と XPD_q の関係を調べた結果、対流性降雨では変形雨滴モデルによる理論値に近い関係が得られたが、層状性降雨では理論値に比べ、 XPD_q 劣化が大きくなった。降雨減衰と XPD_q の各累積分布における等確率値の関係は、降雨減衰の小さな範囲では層状性の性質に近いが、降雨減衰が大きくなるに伴い、対流性の性質に近づく。
- (iii) 降雨減衰と XPD_q がよい相関を示す場合、その関係は降雨によってあまり変化せず、平均雨滴傾斜角 $4 \sim 7^\circ$ 、その標準偏差 $20 \sim 30^\circ$ とした理論値とよく一致した。ここで求められた雨滴傾斜角は、BS ビーコン波の鹿島における偏波角度から妥当な結果である。また、標準偏差についても、鹿島での CS ビーコン波を用いた測定から求められた結果とほぼ同様となった。

(iv) XPD_q の年間及び最悪月累積分布における時間率 0.1% 値は、それぞれ約 40、約 36 dB となった。更に、 XPD_q 値を等しいとしたときの年間累積時間率 (P_r) と最悪月累積時間率 (P_{WM}) の関係は以下の式で近似できることがわかった。

$$P_{WM} = 2.71 P_r^{0.89} \quad (\%)$$

3. 地方局における 12 GHz 帯降雨減衰特性測定結果

3.1 地方局伝搬実験システム

電波研究所の稚内、秋田、山川、沖縄の各電離層観測所には、12 GHz 帯降雨減衰の地域依存性を調査するために、BS テレビ信号（主として B1 チャンネル、12.1 GHz）を受信するシステムが整備された。稚内局には特に、放送衛星用受信専門局 B 及び簡易受信装置⁽²⁾が設置された。その他の実験局には簡易受信装置が設置された。これらの受信設備により各局で受信された BS テレビ信号の受信レベルは、それぞれデジタルカセットデータレコーダに入力され、カセットテープに記録される。更に、カセットテープには、それぞれの実験局に設置されている即応型雨量計により測定された地上降雨強度等のデータも記録されている。取得されるデータの時間間隔は 1 分間である。このようにして、各局で測定された伝搬データはデジタルカセットテープに記録され、約 10 日ごとに鹿島局へ送付される。鹿島局では、このカセットテープを用いて、各実験局の降雨強度及び BS テレビ信号の降雨減衰の累積分布を求めるなど、統計処理を行った。

第 2 表には、各実験局の位置（緯度、経度）、BS 方向（方位角、仰角）、受信システムが示されている。

3.2 降雨減衰特性測定結果

a. 降雨強度、降雨減衰累積分布

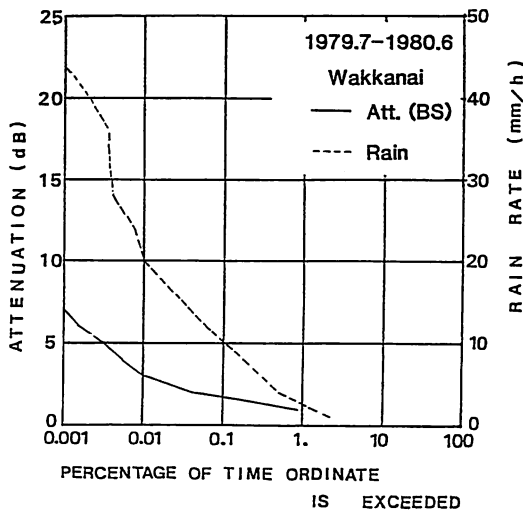
第 2 表に、各実験局の測定期間と、データ収集率（測定を行った時間と期間全体の時間との比）を示す。この表から、地方局の BS テレビ信号受信強度に関するデータ収集率は 40~60% であることがわかる。データ欠測の主な理由は、BS からのテレビ信号が夜間、日曜には送信されていなかったためである。

稚内、山川両局は、BS 電波受信設備が早くから用意されたため、BS テレビ信号の受信強度が一年以上にわたって測定されたが、秋田、沖縄両局は、BS トランスポンダの不具合により、残念ながら、BS テレビ信号の受信強度測定が約半年間しか実施されなかった。

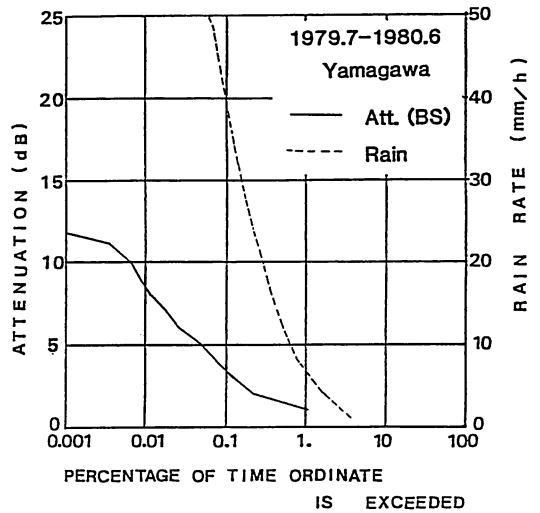
各局での降雨強度及び BS テレビ信号の降雨減衰測定結果は、累積分布として第 2 表に示されている。すなわち、表にはそれぞれ累積時間率 1%、0.1% に対応する

第2表 地方局における降雨強度及びBSテレビ電波の降雨減衰測定結果

実験局	局の位置	BS 方向		受信システム	伝搬実験結果				実験期間	収集率
		方位角	仰角		降雨強度(mm/h)		降雨減衰(dB)			
					1%	0.1%	1%	0.1%		
稚内	45°24'N 141°41'E	221°	29°	受信専門局B	2.5	9.9	<1	1.7	'79年7月~'80年6月	37%
秋田	39°44'N 140°8'E	222°	35°	簡易受信機	3.5	9.4	0.6	2.5	'80年2月~'80年6月	55%(減衰) 71%(降雨)
山川	31°12'N 130°37'E	215°	47°	簡易受信機	6.5	39.	1.0	3.4	'79年7月~'80年6月	43%
沖縄	26°17'N 127°48'E	215°	54°	簡易受信機	5.5	36.	1.8	5.0	'80年1月~'80年6月	53%(減衰) 76%(降雨)
鹿島	35°57'N 140°40'E	225°	38°	主送受信局	5.0	18.	0.8	2.2	'79年1月~'81年12月	76%



第32図 稚内局のBSテレビ電波降雨減衰累積分布及び降雨強度累積分布



第33図 山川局のBSテレビ電波降雨減衰累積分布及び降雨強度累積分布

降雨強度、降雨減衰が示されている。この結果から、これらの実験局では12GHz帯降雨減衰は、累積時間率1%で0.6~2dB、0.1%で2~5dBとなり、南の地域ほど降雨減衰が大きいがわかる。このうち稚内、山川両局の1年間の測定結果から求めた降雨強度、降雨減衰の累積分布を、それぞれ第32図、第33図に示す。

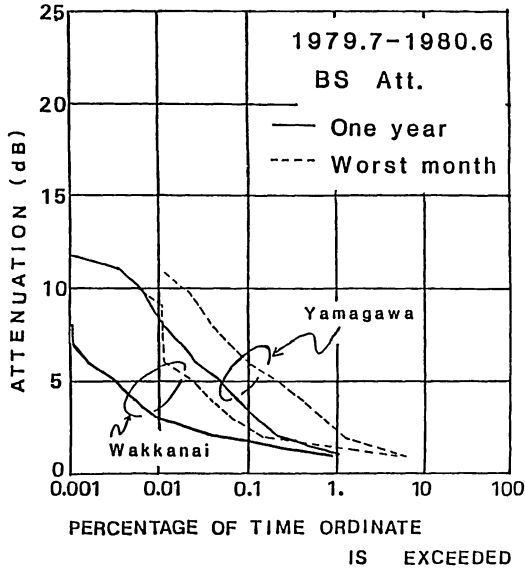
b. 最悪月累積分布の地域依存性

第34図には、それぞれ稚内局、山川局における12GHz帯降雨減衰累積分布の、年間分布と最悪月分布を示す。本図から、稚内は、累積時間率0.1%の場合、年間分布では1.7dBの降雨減衰であるのに対し、最悪月分布では、2.5dBに増え、同様に山川は、年間分布では3.4dBの降雨減衰が最悪月分布では6dBに増えることがわかる。

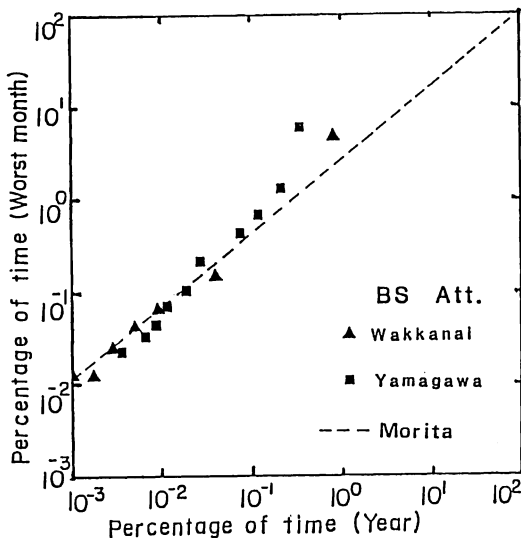
第35図は第34図の累積分布において降雨減衰値を同一としたときの年間累積時間率と最悪月累積時間率との関係を稚内、山川各局について示したものである。図の点線は、日本各地の降雨強度データを基にした森田の実験式⁽¹⁰⁾(4)式参照)である。この図から、降雨減衰の累積分布は、稚内、山川局で大きく異なるが、年間時間率と最悪月時間率の関係は、両局ではほぼ同様となることがわかる。また、測定結果は、森田の実験式とはほぼ同様であることがわかる。

3.3 まとめ

電波研究所地方電波観測所での、BS電波受信実験から、12GHz帯降雨減衰特性の地域依存性が求められた。これらの測定結果は、NHK各局での測定結果⁽¹¹⁾とともに、日本全国における12GHz帯降雨減衰特性を検



第34図 稚内、山川局におけるBSテレビ電波降雨減衰累積分布の年間分布(実線)と最悪月分布(破線)



第35図 稚内、山川局におけるBSテレビ電波降雨減衰累積分布の年間時間率と最悪月時間率の関係(破線は森田の実験式⁽¹⁰⁾)

討するうえで貴重な資料となると思われる。また、降雨減衰累積分布の年間時間率と最悪月時間率の関係が稚内、山川局での測定結果について求められ、これらの関係はそれぞれの局ではほぼ同様であることがわかった。

4. むすび

BSを用いた準ミリ波電波伝搬実験は、BS 打上げ以来約3年半にわたって実施された。特に、BS トランスポンダの不具合により、衛星放送実験が中止のやむなき

に至った後(1980年6月以降)も、電波伝搬実験は、鹿島局において、BS ビーコン波を用いて、BSの姿勢制御用燃料が切れるまで続けられた。この伝搬実験を通じて、12、14 GHz帯電波の電波伝搬特性に関する貴重なデータが取得された。特に、衛星放送下りリンクに使用される12 GHz帯電波の降雨減衰特性を日本全国各地において、同一期間に測定できたことは、我が国の衛星放送回線の設計に非常に有益である。その成果の一部は、現在の実用放送衛星システム(BS-2)へ反映されている。

ここでは、電波研究所が中心に進めてきたBS電波伝搬実験について報告した。その内容は、鹿島局及び稚内、秋田、山川、沖縄局で測定された12 GHz帯降雨減衰特性、鹿島局で測定された12 GHz帯交差偏波識別度特性、14 GHz帯降雨減衰特性などである。特に鹿島局での測定結果の検討にあたっては、同期間に鹿島局にて測定された、地上降雨強度、12 GHz帯システム雑音温度(天空雑音温度)、CS ビーコン波(19.5 GHz)の降雨減衰との比較検討が行われ、12 GHz帯降雨減衰累積分布の推定手法について検討することができた。更に、12 GHz帯電波の交差偏波識別度特性の検討にあたっては、鹿島局に整備されている5.3 GHz降雨レーダデータを用いることにより、降雨構造と交差偏波特性との関係を詳細に調べることができた。更に、鹿島局及び地方局のデータを用いて、衛星放送回線の設計に不可欠な12 GHz帯電波の最悪月降雨減衰累積分布についても、その推定手法、地域依存性に関する貴重な成果が得られた。

本伝搬実験で得られた諸データは、今後の衛星放送回線設計に役立つばかりでなく、これまでに実施されてきた、ETS-II、CS電波伝搬実験結果と併せて、広く、準ミリ波、ミリ波帯電波の高仰角伝搬特性の解明に有効に利用されることと思う。

参 考 文 献

- (1) 伊藤士郎; "12 GHz 衛星放送電波の全国降雨減衰分布特性", テレビ誌, 35, 2, pp. 91-97, 1981年2月.
- (2) 宇宙通信連絡会議開発実験部会編, 1.4 電波伝搬特性, BS 総合報告書, pp. 139-175, 1982年3月.
- (3) 福地, 古津, 伊藤, 村上; "種々の環境下における放送衛星の受信特性一降雨減衰と電波伝搬一", テレビ誌, 36, 4, pp. 294-300, 1982年4月.
- (4) 福地, 古津, 石塚, 高橋, 梶川, 乙津, 林, 古濱; "実験用中型放送衛星(BS) 実験報告 No. 1一電波伝搬実験一", 電波季, 27, 143, pp. 142-143, 1981年

- 5月.
- (5) 塚本, 梶川, 横山, 内門; “BS実験主送受信局運用管制局施設の概要”, 電波季, **24**, 131, pp. 855—864, 1978年12月.
- (6) 田中, 手代木, 阿波加, 篠塚, 小池; “鹿島降雨レーダ—降雨強度分布測定装置とその特性—”, 電波季, **24**, 126, pp. 61—86, 1978年1月.
- (7) 山本, 福地, 石塚, 竹内; “特集衛星放送実験—上り回線の送信電力制御実験—”, テレビ誌, **36**, 4, pp. 326—329, 1982年4月.
- (8) 森田和夫, “衛星通信回線における降雨減衰およびサイトダイバーシチ効果の統計的研究”, 通研実報, **27**, 4, pp. 789—804, 1978年.
- (9) Olsen, R.L., Rogers, D.V., Hodge, D. B.; “The aR^b Relation in the Calculation of Rain Attenuation”, IEEE Trans. Antennas Propagat., **AP-26**, 2, pp. 318—329, March 1978.
- (10) 森田和夫, “衛星通信回線における最悪月および最悪年の降雨減衰分布の推定”, 通研実報, **28**, 2, pp. 267—274, 1979年.
- (11) 福地, 土屋, 猪股, 古津, 石塚; “降雨減衰・XPDの最悪月累積分布”, 信学技報, AP 83—26, 1983年6月.
- (12) Joss, J., Thams, J.C., Waldvogel, A.; “The variation of raindrop size distributions at Locarno”, Proc. Int. Conf. Cloud Physics, pp. 369—373, Toronto, 1968.
- (13) Marshall, J. S. and Palmer, W. M.; “The distribution of raindrops with size”, J. Meteorol., **5**, pp. 165—166, Aug., 1948.
- (14) 金原晃; “天空雑音温度から高仰角伝搬時の減衰量を換算する方法”, 信学論, J 59—B, 11, pp. 529—534, 1976年.
- (15) Mawira, A.; “Microwave Thermal Emission of Rain”, Elect. Lett., **17**, 4, pp. 162—163, 1981.
- (16) Oguchi, T.; “Scattering Properties of Pruppacher-and-Pitter form Raindrops and Cross-polarization due to Rain; Calculations at 11, 13, 19.3 and 34.8 GHz”, Radio Sci., **12**, 1, pp. 41—51, Jan/Feb, 1977.
- (17) Kobayashi, T.; “Degradation of Cross-polarization Isolation Due to Rain”, J. Radio Res. Lab., **24**, 114, pp. 101—107, July, 1977.
- (18) Bostian, C. W. and Allnutt, J.E.; “Ice-crystal depolarization on Satellite-earth microwave radio paths”, Proc. IEE, **126**, 10, pp. 951—960, Oct., 1979.
- (19) 古津, 中村, 乙津, 井原; “BS準ミリ波伝搬実験—ビーコン波の交差偏波特性—”, 信学技報, AP 79—92, 1979年12月.
- (20) 井原, 古濱, 藤田, 阿波加; “ETS-II伝搬実験報告—降雨タイプにより分類したミリ波—準ミリ波帯のXPD劣化特性—”, 信学技報, AP 78—73, 1978年.
- (21) 福地, 古津, 阿波加; “降雨減衰と交差偏波諸別度(XPD)の関係式およびXPDスケーリング”, 信学技報, AP 81—97, 1981年11月.
- (22) Fukuchi, H., Kozu, T., Nakamura, K., Awaka, J., Inomata, H. and Otsu, Y.; “Centimeter Wave Propagation Experiments Using the Beacon Signals of CS and BSE Satellites”, IEEE Trans. Antennas Propagat., **AP-31**, 4, pp. 603—613, July, 1983.

