

今回の報告の内容に加えて、降雨のタイプを区別して伝搬データを解析しつつある。降雨タイプの判別にはレーダのデータを用いているが、これについての報告はできるだけ早い機会に行いたい。

参 照 文 献

- (1) Laws, J.O. and D.A. Parsons, "The relation of raindrop-size to intensity", Trans. Geophys. Union, 24(II), pp.452-460(1943)
- (2) Joss, J., J.C.Thams and A. Waldvogel, "The variation of raindrop size distributions at Locarno", Proc. Conf. Cloud Phys., Toronto, pp.369-337(1968)
- (3) 森田和夫, "高仰角伝搬路における準ミリ波帯の降雨減衰推定法の研究", URSI-F分科会, 226回会合資料, Nov. 19 (1976)
- (4) Fujita, M., T.Shinozuka, T.Ihara, Y.Furuhama, and H.Inuki, "ETS-II Propagation Experiments: Characteristics of millimeter and quasi-millimeter wave propagation" to be submitted to IEEE Trans. Aero. Electron. Sys.
- (5) Oguchi, T., and Y.Hosoya, "Scattering properties of oblate raindrops and cross polarization of radio waves due to rain(Part II):Calculation at microwave and millimeter wave regions", Jour. of Radio Res Labs., 21(105), pp.191-295(1974)
- (6) 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(1977)
- (7) Schutje, P.F., J.E.Allnutt, and E.G.Mackenzie, "Satellite-earth signal depolarization at 30 GHz in the absence of significant fading", Electron. Lett., 13(1), pp.1-2(1977)
- (8) Nowland, W.L, J.I.Strickland, J.Schlask, and R.L.Olsen, "Measurements of depolarization and attenuation at 11.7 GHz by using the Communication Technology Satellite", Electron. Lett., 13(24), pp750-751(1977)

9. 降雨レーダデータの利用

1. はじめに

ミリ波電波伝播特性に大きな影響を与える降雨の状況を適確に把握するために、鹿島支所には降雨強度分布測定装置(降雨レーダ)が設置されている。従来の降雨レーダでは、受信エコーをAスコアやCRTでPPI(Plan Position Indicator)で表示するのみであったのに対し、本レーダは受信電力を、計算機を通してデータ処理とする事により、多モードのデータを得る事ができる点に大きな特徴がある。又、このデータをカラーグラフィックディスプレイに表示する事により、降雨状況を直感的に適確に把握する事ができる。

本装置の概要、データ処理ソフトウェア、校正等については本報告4.に既に述べられている。ここでは、実際に得られたデータの利用について述べる。

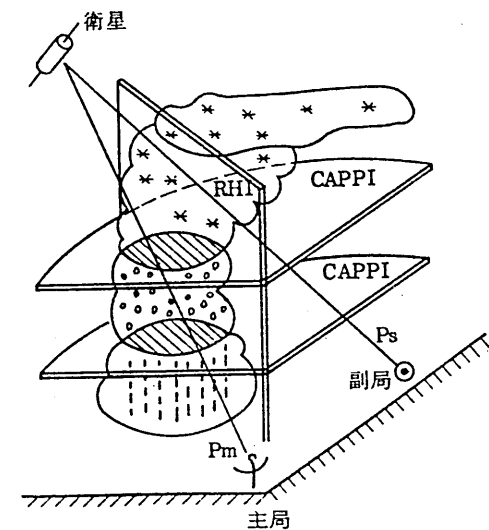
2. 収集データの種類

本装置の得る事ができるデータは、 P_m , P_s , CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator), RHI (Range Height Indicator) の4種で、それぞれ、衛星-主局間、副局-間の伝搬路上、水平面内、鉛

直面内、の降雨強度分布を表わす。第1図に各モードデータの概念図を示す。

P_m モードデータを収集する方向は、ETS-II衛星の方向(仰角約47度北よりの方位角約197度)にっており、1.7, 11.5, 34.5 GHzの衛星ビーコン波の減衰、交差偏波特性等の、伝搬特性と直接に対応させる事ができる。

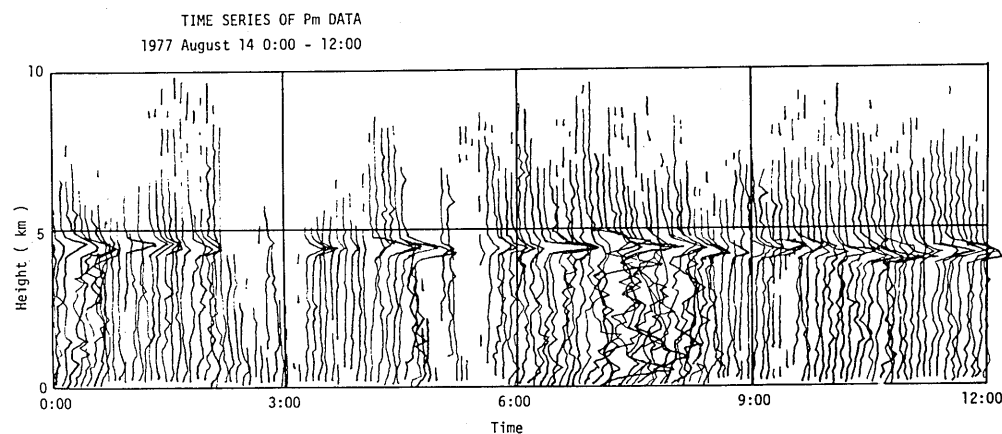
P_s データの収集は、ETS-II計画に続くECS計画で、副局となる予定



第1図 各モードの概念図

の電波研平磁支所とET3-II衛星との伝搬路上で行なっている。この P_s データと P_m データと、伝搬データより得られる降雨強度とミリ波電波の減衰特性とから、サイトダイバシティ効果の推定が可能となる。

RHI, CAPPモードのデータは、雲の活動状況を把握するために使われる。又、 P_s データでは、副局1ヶ所のサイトダイバシティ効果しか得られないが、CAPP, RHIモードデータを使うと、 P_s , P_m モードデータに較べて、ソフトウェアの関係上、量子化誤差が大きくなるため、精度は落ちるものの、多局の場合のサイトダイバシティ効果や、距離によるサイトダイバシティ効果の変化等を得る事ができる。



第2図 P_m データの時系列

3. ブライトバンドの推定

第2図に昨年の8月14日0時から12時までの P_m データの時系列を示す。この図で特徴的な事は、高さ4 kmから5 kmにかけて、エコーの強く現われるレベルのある事である。この層はいわゆるブライトバンドであり落下してきた雪片の融解によって、レーダ反射因子が変化する事によって、反射因子の変化する要因としては、以下のものが考えられている⁽¹⁾。

(1) レーダ反射因子 Z は、降水粒子の直径 D が、電波の波長 λ （本レーダでは約5.7 cm）に較べて十分に小さい時には、Rayleigh 近似を用いる事ができて、

$$Z = \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \sum D^6 \quad (1)$$

と表わされる。ここで ϵ は誘電率である。上式中の誘電率に関する項 $\left| (\epsilon - 1) / (\epsilon + 2) \right|^2$ が、雪片の表面が融けて固相から液相に変わる事により、0.176から0.93となって、 Z が約5倍(7 dB)に増大する。

(2) 表面が融解すると、雪片どうしが付着しやすくなり、大雪片が形成される。そうすると、例えば、同じ大きさの粒子 n 個が付着して、ひとつのより大きな粒子が形成されたとすると、 D は $\sqrt[n]{n}$ 倍になり、(1)式中の D^6 は n^3 倍となる一方、 n は $1/n$ となるので結局、 Z 因子は n^2 倍になるように全体として、 Z は増大する。

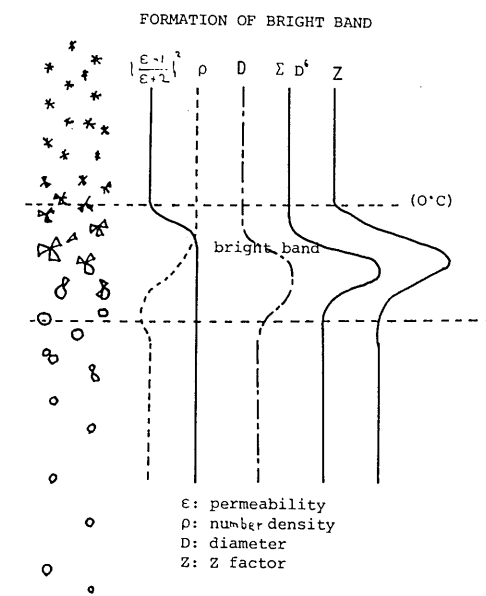
(3) 融解が進むと、水の凝集力によって、降水粒子は次第に球に近づく。こうして、形及び密度が変化する事により、イフエクティブな D が小さくなり Z が減少する。この効果は1から3 dB程度と言われている。

(4) 雨粒となるにつれて、落下速度が大きくなり、その分だけ降水粒子の空間密度が減って Z 因子が減少する。これによる効果は、6 dB程度の大きさになる。

(5) 降雨粒子の分裂がおこり、(2)とは逆の理由で、 Z 因子が減少する。

結局、ブライトバンドの上面では、上記(1)、(2)の原因で、エコー強度が増大し、下面では、(3)、(4)、(5)の原因で、エコー強度が減少していると考えられる。以上の過程の概念図を第3図に示す。

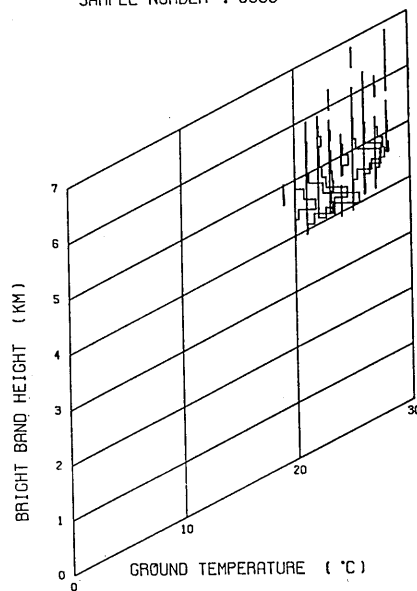
ミリ波電波の減衰は、主に雨粒により起こり、雪では起こりにくいので、降雨強度分布とミリ波伝搬特性と対応づけるためには、ブライトバンドの存在は重要な情報を与える。しかし、ブライトバンドは常に存在するわけではないので、その時には、雪から雨に変わるレベルを知るために別の方法が必要



第3図 ブライトバンドの概念図

要となる。そのひとつとして、地上気温から融解層を推定する方法が考えられる。氷の融解点は、圧力に対しては余り変わらず、高度5 Km程度(約0.5度左)でも0度である事から、気温減率と地上気温から、0度層を推定できる。太陽光線等による放射平衡では、外流圏では対流不安定となるので、実際の気温減率は、乾燥断熱減率(約10度/Km)と湿潤断熱減率(約4度/Km)との間になる。標準大気では、約6度/Kmとなる。第4図に昨年8月の地上気温と、レーダエコーにブライトバンドが認められた時の

GROUND TEMPERATURE VS. BRIGHT BAND HEIGHT
1977 8/1 0:0 - 9/30 23:58
SAMPLE NUMBER : 0993



第4図 地上気温とブライトバンドの高度との相関図

ブライトバンドの高度との相関を示す。レーダのPmモードデータは、量子化されたポイントで収集されているので図はヒストグラムの形で表示してある。図から、気温減率はだいたい4.7度/Kmとなり、標準大気の6度/Kmよりも小さくなるが、これは、ブライトバンドは主に雨の降っている時に現われるので、より湿潤な場合を取り出している事になるため、湿潤断熱減率に近くなったものと考えられる。

4. サイトダイバシティ効果の推定
ミリ波は降雨によって大きな減衰を示すので、実用回線にミリ波を利用するためには、極力降雨による回線断を小さくする方法が必要である。この方法のひとつとして、副局を作り、主局が強雨で回線断となった時には、副局を用いるサイトダイバシティの方法がある。これは、衛星通信にミリ波を用いる際には是非必要な方式である。降雨による減衰は、伝搬路上の降雨強度分布がわかれば推定できるので、レーダデータを用いて、サイトダイバシティ効果の推定ができる。ここではPm, Psモードデータを用いた推定を述べる。

降雨強度R(mm/H)から34.5 GHz電波の減衰A(dB/Km)は、次式によって求まる。

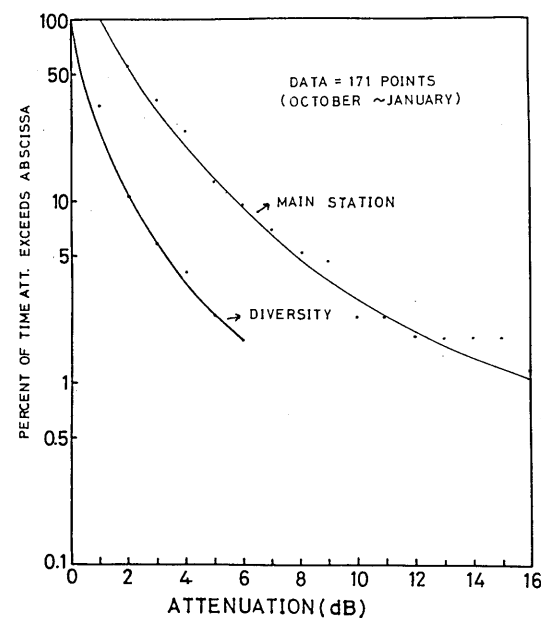
$$A = 0.2369 R^{1.022} \quad (2)$$

これより、ミリ波の総減衰量 A_t は

$$A_t = \int_{\text{path}} A \, dx \\ \approx \sum_i 0.2369 R_i^{1.022} \times \frac{1}{4} \quad (3)$$

となる。1/4は、データが250mおきにとられている事による。積分範囲としては、地上よりブライトバンドまでをとった。ブライトバンドとしては、データポイント18から32(高さ約3.3 Kmから5.8 Km)の間にエコーの最大値があれば、そこをブライトバンドとし、無い時にはポイント24(高さ約4.4 Km)とした。比較したPs, Pmモードデータは、データ収集の関係上7分の時間差があるが、降雨の変化は比較的ゆるやかであると考え、この差は無視した。

データは、レーダが定常運用状態に入った昨年10月から今年1月末までのものを用いたが、この間は雨も少く、レーダデータは12分おきにしが取得されていないので、ここでは全局鹿島で総減衰量が1 dB以上あった時の累積をとってみた。第5図に10月から1月の全期間の累積を示す。データ総数; X dB以上の減衰の総数, 1 dB



第5図 減衰の累積分布

以上の減衰の総数をそれぞれ n , x , y とすれば,

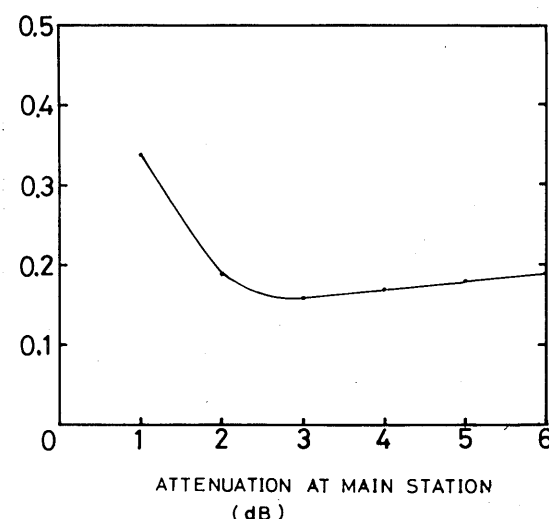
$$\frac{x}{n} = \frac{x}{y} \frac{y}{n} \quad (4)$$

であるので、 x/y は第5図から求めたとすれば、主局での統計量、 y/n が求まれば、ダイバシティ効果を推定する事ができる。第5図から求めた各減衰量の累積の割合の改善値を第6図に示す。データ数の多かった昨年8月の累積分布に、第6図を使って求めたダイバシティ効果の推定を7図に示す。第6図はデータの関係を

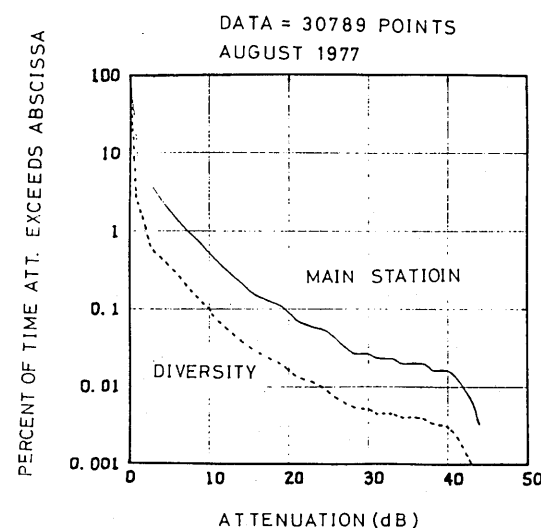
で6dB減衰までしか無いので6dB 以上は改善値を0.19に固定した。これは、第6図でも見られるが、ATS-6の実験例でも示されるように⁽²⁾減衰量が多くなると、改善値は一定の値に近づく事による。第7図によれば、ダイバシティゲインは確率0.1%値で約10dBとなっている。

5. 降雨の気象学的様相

第8図に、第2図に対応した8年8月14日午前3時の地上天気図を示す。関東地方の岸海上に前線があり低気圧が発生しており、8月14日の雨が局地的な雷雨などではなく、大規模な収束場に伴う雨域の一部である事がわかる。第9図には、同日9時14分の、高度4KmのCAPPIデータと、RHIデータとを示す。CAPPIは鹿島支所を中心として半径50Kmの円形の領域で、RHIデータは、ETS-II衛星の方向、地上より高度15Km水平に50Kmまでの鉛直断面内の降雨強度分布を示している。数字は1から7まで、それぞれ0~1, 1~2, 2~4, 4~8, 8~16, 16~32,



第6図 ダイバシティによる改善値

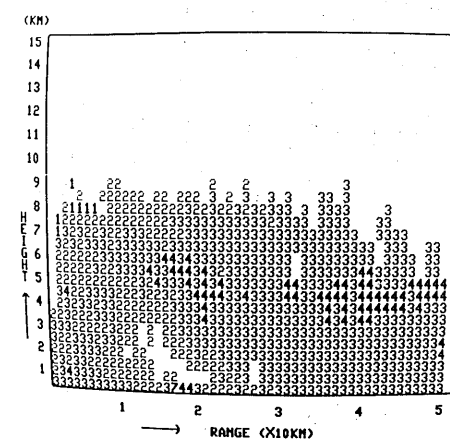


第7図 8月の累積分布によるダイバシティ効果の推定

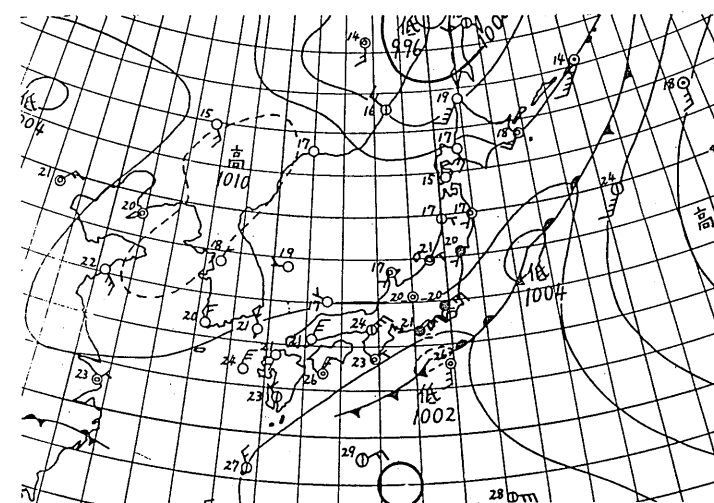
32~64 mm/Hの降雨強度を表わしている。この前後のCAPPIエー

ドデータを見る事により、エコーライン方向は速度は、まろしなび、エコーラインと直角方向へは時速約20Kmで北西へ進んでいる事がわかる。CAPPIデータの北西の領域に現われている強雨域は、第2図のPmデータの時系列に現われている8時頃の強雨に対応している。

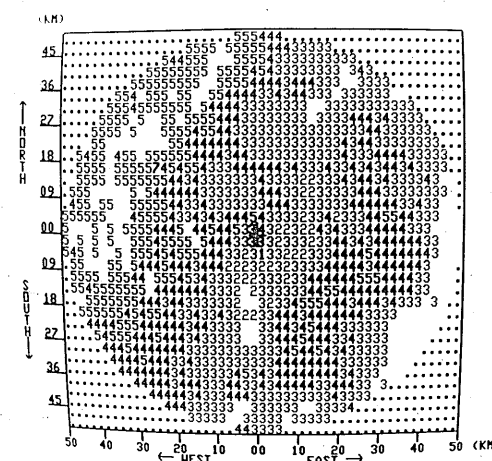
RHIデータには4~5Km付近に、不明瞭ではあるがブライトバンドが認められる。エコーは高度8~9Kmまで伸びており、非常に雲が発達している事を示している。



RHI



第8図 8月14日の地上天気図

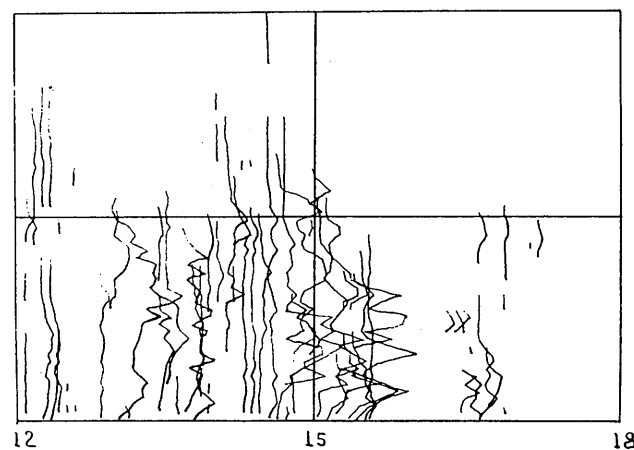


CAPPI (2km)

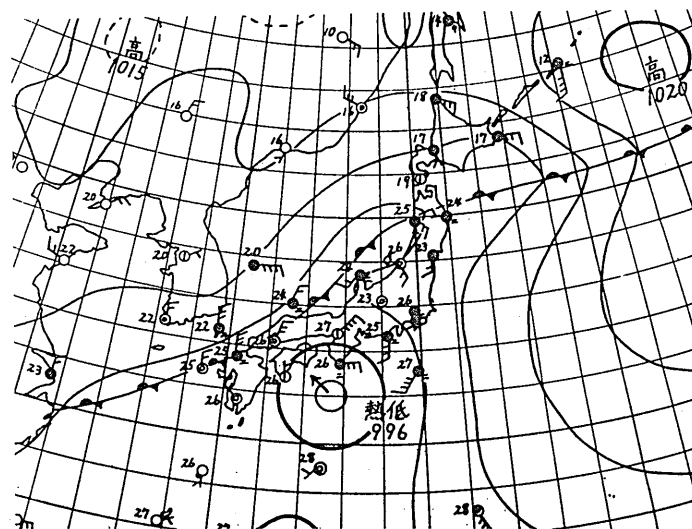
第9図 8月14日のRHI, CAPPIデータ

グライットバンドは、その成因からみれば、上下の混合が激しい場合には不明瞭となる。この事を利用して雲の分類が可能となる。第10図にエコーの不明瞭な例を示す。これは、同じく8月の17日12時から18時までのPmデータの時系列である。第11図には、同日3時の地上天気図を示す。近畿地方の南に熱帯性低気圧がある。このため、低気圧は反時計回りの風を伴うので、関東地方に暖かい湿った空気が吹き込み、大きな対流活動が生じたものと思われる。この時のPmの強度を第12図に示す。ピークが鋭く局所的な対流活動が盛んである事を思わせる。この時は風も強かったため、エコーの強雨域が速く過ぎて、ためとも考えられる。

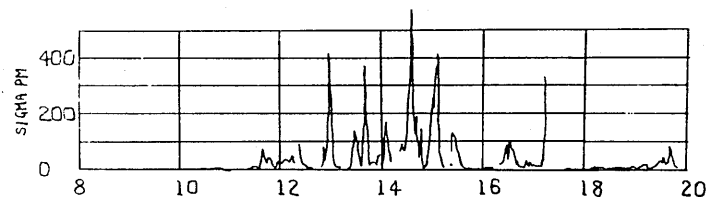
第12図
後Pmデータの
時系列



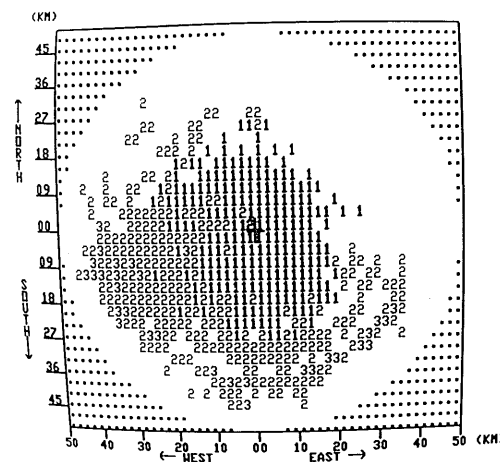
第10図 グライットバンドの不明瞭な例



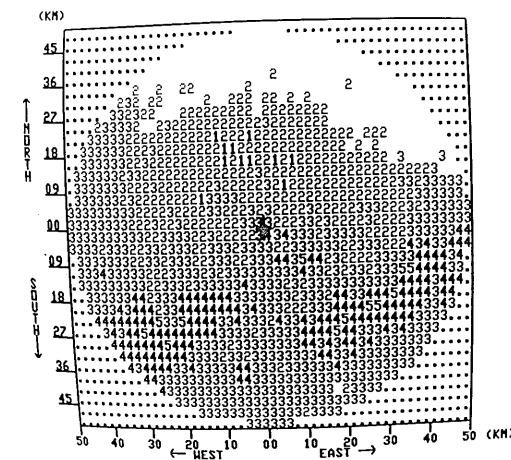
第11図 8月17日の地上天気図



第13図は、昨年9月19日の台風の時の高度2 KmのCAPPIデータである。台風の中心は既に過ぎ去った後である。台風の強雨域のバンド構造が明瞭に認められる。又、エコーは全体として陸東へ移動しており、台風の中心が北東の方向にある事を示している。

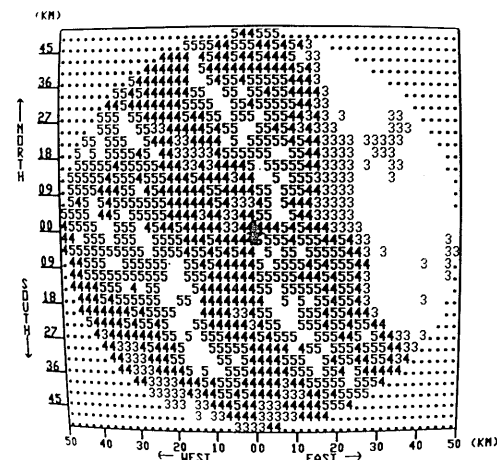


CAPPI (2 km)



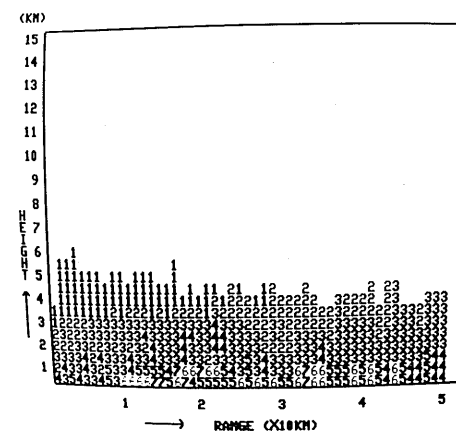
CAPPI (4 km)

第14図 1月のCAPPI, RHIデータ



第13図 台風の時のCAPPIデータ

第14図は、今年1月3日の0時頃の降雨パターンである。気温は数度であり、東京では雪が降った。RHIデータから見てとれるように、8月と異なり、エコーの伸びている高度が低い。この事は、CAPPIデータにも現わ



RHI

れており、8月では、2 kmと4 km
とでパターンは余り変化がなかったが
1月のパターンでは、4 kmでのエコ
ーは2 kmに較べ非常に弱くなっている。

6. おわりに

ミリ波伝搬に大きな影響を及ぼす降
雨の状況を把握するために鹿児島支所に
設置されている、多モードのデータ収
集機能を持つ降雨レーダのデータの利
用について述べた。

伝搬路上の降雨強度分布を測定する
Pmモードデータは、ETS-II衛星
のミリ波ビーコン波の伝播特性と直接
に対応づけられるため、伝搬データと
かわかって、相当に解析が進んでいる。

Psモードデータは、サイトガイバン
シティー効果の推定に用いられる。

CAPP I, RHIモードのデータ
は、雲の活動状況を適確に表わすか、
これらの解析はまだ十分には行なわれ
ていない。今後、RHI, CAPP I
データによるサイトガイバンシティー効
果の推定や、雲中の対流活動の様相を
解明するためにも使われる予定である。

ETS-II計画に続くELS計画で
は、このレーダにドップラー機能が付
加される。これにより、降水粒径分布
や、雲中の細かい運動についての情報
が得られ、より多面的な研究ができる
ものと期待される。

参考文献

- (1) 小平信彦, 立 良三 1972
気象研究ノート 気象レーダ特集
号
(2) Louis J. Ippolito 1975
Millimeter Wave Propagation
and Communications
Experiments at 20 and 30
GHz IEEE Vol. AES-11

10. 電離圏伝搬特性

1. はじめに

衛星より送信される電波は、電離圏・
対流圏内を伝搬して地上に到達する。
低い周波数の電波は、電離層プラズマに
より影響を受けて減衰、反射、偏波面の
回転等の現象を示す。一方、高い周
波数の電波に対しては、電離層はほとん
ど透明と見なせるが対流圏内現象、特に
降雨による影響(電波の減衰、交差偏波
識別度の劣化等)が顕著となる。

そこで現在は、上記2つの領域の影響
が比較的小さいと考えられる2~6 GHz程
度の周波数帯の電波が主として、衛星通
信に用いられている。その結果、こ
れらの周波数帯においては透明と見え
ていた電離層が、その伝搬特性に影響
を及ぼし、不規則なレベル変動(シンケ
レーション)を発生させることが明らか
にされた。^{(1),(2)}

この現象は、磁気赤
道附近および極域で多く観測されてお
り、電離層内の電子密度のirregularitiesによる
電波の散乱によるといわれている。⁽³⁾
低緯度での観測結果によれば、GHz帯で
の電離層シンケレーションは主として夜
間の現象であり、地方時で20~24時頃に
比較的多く発生する。^{(1),(4)}

この発生
パターンは赤道スプレッドFのそれとよ
く似ており、両者の密接な関係を示唆し
ている。⁽⁴⁾ しかし、用いている周波数
がかなり異なるため、必ずしも1対1の

対応はつかない。⁽⁴⁾

電離層シンケレーションが発生すると
衛星よりのPSK信号のビット誤り率が変
動するという報告⁽⁵⁾もあり、衛星通信を考
える上で無視し得ない問題であろう。
一方、シンケレーション波形のスペクト
ラム解析により電子密度のirregularitiesの
大ききの推定が出来ることより、電離層
プラズマの診断の方法としても重要であ
る。

技術試験衛星II型(ETS-II, ミク
メ号)を用いた電波伝搬実験は、互いに
コヒーレントな1.7, 11.5, 34.5 GHzの3
波を用い、主としてミリ波、準ミリ波に
及ぼす対流圏内現象、特に降雨の影響を
測定することを目的としているが、これ
と同時に電離圏伝搬特性の測定も行われ
た。その結果、中緯度(地磁気緯度
25°37')においても1.7 GHzの電波に電離
層シンケレーションの存在することが明
らかとなった。⁽⁷⁾ 又、磁気嵐が発生し
た際には伝搬特性に大きく影響すること
も確認された。これらの測定は、コ
ヒーレントな異周波信号間の位相差を用
いた、電波通路に沿った全電子数の測定⁽⁸⁾
とともに行われているため、電離層の状
態との関係のはっきりと容易である。

本報告では、SHF波を用いた電離層の
全電子数の測定法、電離層シンケレーシ
ョンの特性、電離層シンケレーションと

電離層全電子数との関係、および磁気嵐にともなう電離層擾乱時に発生した電離層シンチレーションについて述べる。

2. 全電子数測定⁽⁸⁾

地球の上層大気は、太陽紫外線の照射を受けて電離しており、いわゆる電離層を形成している。電離層はプラズマ状態であり、短波通信に重要な役割をはたす外、様々な電磁気学的現象の舞台となっている。ところで、よく知られているように電離気体中での屈折率は、電子密度の関数であると同時に周波数の関数でもあり、いわゆる分散性を示す。電離気体中での屈折率は、次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$n^2 = 1 - \frac{L}{1 - \frac{M_T^2}{2(1-L)} \pm \sqrt{\frac{M_T^4}{4(1-L)^2} + M_L^2}} \quad (1)$$

ここに、

$$L = \frac{Ne^2}{m\omega\epsilon_0(\omega - j\nu)}$$

$$M_L = \frac{|\omega_{HL}|}{\omega - j\nu}, \quad M_T = \frac{|\omega_{HT}|}{\omega - j\nu}$$

$$(\omega_H = \frac{e\mu_0}{m} H), \quad \omega_H = \sqrt{\omega_L^2 + \omega_T^2}$$

ここで、 n は屈折率、 e は電子の電荷、 m は電子の質量、 N は電子密度、 ϵ_0 は真空の誘電率、 μ_0 は透磁率、 ω は電波の角周波数、 ν は衝突角周波数、 ω_H は電子のジャイロ角周波数、添字 L と T は各々電波の進行方向とその垂直面内の成分を表わす。

電離層内では、電子のジャイロ周波数($f_H = \omega_H/2\pi$)は1~2 MHz、衝突角周波数は10⁵以下であるから、GHz帯の電波を考えた場合、地球磁場の影響および衝突の影響は無視でき、(1)式は次のように近似される。

$$n = 1 - 40.5 \frac{N}{f^2} \quad (2)$$

ただし、 N (electrons/m³)、 f (Hz)である。以下、分散関係式として(2)式を用いる。E T S-IIより送信されている電波の受信機における位相は、送信端における位相を基準として、次のように表わされる。

$$\theta_1 = \omega_1 t - \int_{Path} k_1 ds = \omega_1 t - \phi_1 - \psi_1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \omega_2 t - \int_{Path} k_2 ds = \omega_2 t - \phi_2 - \psi_2 \\ &= \alpha(\omega_1 t - \phi_1 - \psi_1) + \alpha\psi_1 - \psi_2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\phi_2}{\phi_1} \quad (5)$$

ここで、 $\phi_{1,2}$ は送受信機間の距離による移相項、 $\psi_{1,2}$ は媒質に起因する移相項である。位相同期ループ(PLL)を用いた受信機により、衛星側の送信数に合わせた復調を行っているため、周波数に比例する移相項(自由空間を伝達した場合の、距離の変化に依存する位相項)は受信系において相殺され、最終的に測定される量は次のように書ける。

$$\Delta\psi = \psi_2 - \alpha\psi_1 \quad (6)$$

これを積分形に書き換えて次式を得る。

$$\Delta\psi = \int_{Path} (k_2 - \alpha k_1) ds \quad (7)$$

伝搬定数は、対流圏、電離圏内での振舞が異なるため、上式を2つの領域に分けて記述する。

$$\Delta\psi = \int_0^L (k_2^A - \alpha k_1^A) ds + \int_L^r (k_2^I - \alpha k_1^I) ds \quad (8)$$

伝搬定数 k の肩の A および I は、各々対流圏、電離圏内での値を示し、次式で与えられる。

$$k_i^A = k_{i0} \left(1 + \frac{72.6}{T} P \times 10^{-6} + \frac{0.373}{T^2} \nu \right), \quad i=1,2 \quad (9)$$

(晴天時)

$$k_i^I = k_{i0} \left(1 - 40.5 \frac{N}{f_i^2} \right), \quad i=1,2 \quad (10)$$

ここに、 P は大気圧(mb)、 ν は水蒸気圧(mb)、 T は温度(K)、 N は電子密度(m⁻³)、 f_i は信号の周波数(Hz)である。又、 k_{i0} は真空中での伝搬定数である。

(9)式より明らかのように、晴天時には対流圏内での屈折率は、周波数の関数ではない。しかし、電離層内での屈折率は周波数の関数となる。

以上より、晴天時には対流圏内で differential phase shift の発生はなく、電波通路にわたる全電子数の変化のみによって differential phase shift の発生することが分る。

降雨によって発生する differential phase shift の量を予め調べておくため計算を行った。雨滴の粒度分布は Laws and Parsons⁽¹⁰⁾ によるものを用い、ミー散乱を仮定した。結果を表1に示す。表より明らかのように、降雨量が150 mm/hr でも differential

phase shift は雨域の貫通距離1 kmあたり、0.02 π ラジアン以下である。

次に、全電子数の変化による differential phase shift を求める。(7)式に(10)式を代入して整理すると次式を得る。

$$\Delta\psi = 40.5 \left(\frac{\alpha k_{10}}{f_1^2} - \frac{k_{20}}{f_2^2} \right) \int_L^r N ds \quad (11)$$

(11)式より明らかのように、電離層内で発生する differential phase shift は電波通路に沿った全電子数に比例する。

(11)式に E T S-IIより送信されている電波の周波数 $f_1 = 1.7$ GHz、 $f_2 = 11.5$ GHz、 $\alpha = 11.5/1.7$ を代入し、 $k_{i0} = 2\pi f_i/c$ ($i=1,2$)を用いれば、全電子数 $N_T (= \int_L^r N ds)$ は次式で与えられる。

$$N_T = \frac{\Delta\psi}{1.05 \times 10^{-15} \pi} \text{ (electrons/m}^2\text{)} \quad (12)$$

今までの観測によれば、全電子数は1日周期でその変動幅が $10^{17} \sim 3 \times 10^{17}$ electrons/m²といわれており⁽¹¹⁾、これから differential phase shift は $100\pi \sim 300\pi$ 程度の変動を示すはずである。一方、降雨により発生する differential phase shift は、150 mm/hr の降雨量

PRECIPITATION RATE (mm/hr)	DIFFERENTIAL PHASE SHIFT (radians/km)
1.25	$5.01 \times 10^{-4} \pi$
2.5	$1.11 \times 10^{-3} \pi$
12.5	$5.54 \times 10^{-3} \pi$
25	$9.14 \times 10^{-3} \pi$
50	$1.20 \times 10^{-2} \pi$
100	$5.09 \times 10^{-3} \pi$
150	$-1.06 \times 10^{-2} \pi$

表1. 降雨による differential phase shift (1.7 GHz/11.5 GHz)

のときでも 0.02π ラジアン/km と非常に
 少く、全電子数の変化によるものには比
 べてこれを無視してもさしつかえないであ
 る。

位相差の測定には 2π の不確定性があり、かつ送信機における位相関係が不明であるため絶対位相差を求めることは現在のところ不可能である。とゆえ、本測定では、全電子数の相対的変化のみ検出できる。

本測定法の利点は、高感度で全電子数

が測定できること、および地球磁場の影響を受けず、磁気圏をも含めた全電子数が求められることにある。

ETD-II の伝搬実験用送信機 (PET) は、1977年4月18日から連続運用に入り、1.7, 11.5, 34.5 GHz の3波の伝搬実験が開始された。レベル測定と同時に differential phase shift の測定も始められ、チャートレコーダに記録されている。観測結果の一例を図1に示す。位相計は 2π 以上の測定が出来ないため、図のような鋸歯状の記録となる。この測定は分解能が高いため、個々のイベントの把握には都合が良いが、変動幅が大きいため、全体の様子は分りにくい。そこで、1時間毎に位相が何ラジアン進んだか、又は進んだかをレコーダ記録より読みとり、日変化をプロットした。これを図2に示す。同図中に国分寺で得られた $(f_oF_2)^2$ の値も示してある。Kane⁽¹²⁾ によれば全電子数と $(f_oF_2)^2$ は高い相関があるとされている。鹿児島と国分寺は約100km離れているが、図より両者はよく対応していることが明らかであろう。

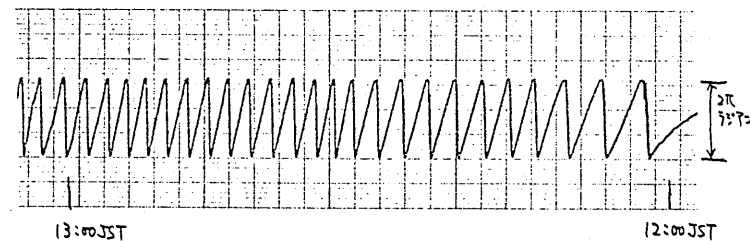


図1. 1.7/11.5 GHz の differential phase shift の観測例
 (1977年6月2日)

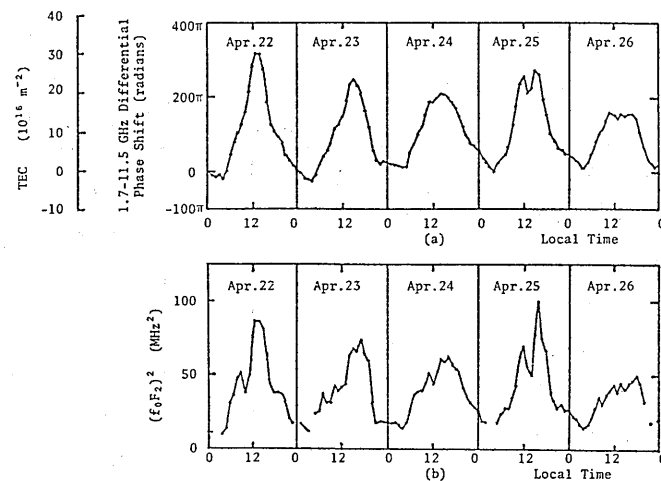


図2. 位相差法で求めた全電子数 (a) (鹿児島) とアイオソニテで求めた $(f_oF_2)^2$ (b) (国分寺)

3. 1.7 GHz シンチレーション⁽⁷⁾

GHz 波に対する電離層の影響を調べるために、1.7 GHz の受信レベルの高感度測定を1977年5月より開始した。その結果、主として夜間、受信レベルに P-P 値で 2dB 程度のシンチレーションの存在が確認された。シンチレーションが発生しているとき、1.7/11.5 GHz の differential phase shift は激しく増減しており、電子密度の不均一な部分 (irregularities) の通過を暗示している。観測結果の一例を図3に示す。シンチレーションが発生していない時は、全電子数の変化

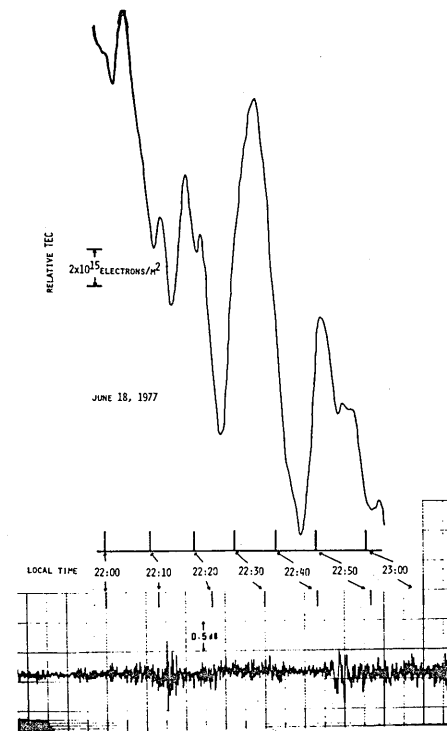


図3. 夜間のシンチレーションの例。
 上部は全電子、下は 1.7 GHz のレベル。(1977年6月18日)

は非常に緩かである。

国分寺で受信している ETD-II の 136 MHz ビーコン波にも電離層シンチレーションが現れており、同時にファラデー回転に変動が表れている⁽¹³⁾。シンチレーション指数とファラデー回転角の対応を図4に示す。

ETD-II を見る仰角は約46度であり方位角は南であるから、観測地における地磁気の方位に近い。とゆえ、電子密度の irregularities を磁力線に沿った方向に観測していることになる。電離層シンチレーションをひき起こす irregularities は field aligned であると言われている⁽¹⁴⁾。今回の測定結果はこのことの妥当性を示唆していると思われる。

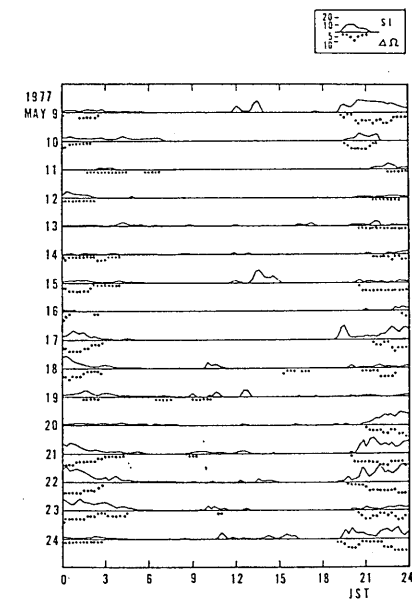


図4. 136 MHz シンチレーション指数 (上部) とファラデー回転角 (下部) (新野・菅⁽¹³⁾ による)

次に、他の観測結果との比較を行うため、5月～8月のデータについて、P-P値で0.5dBを超えるシンチレーションの発生確率を10分毎に求めた。これを図5に示す。本測定結果によれば、電離層シンチレーションの発生ピークは22時30分ごろにあり、基本的にはスプレッド下の発生時間帯に一致している。

ただし、シンチレーションのP-P値が先の報告^{(1),(4)}結果に比べて小さく、かつ発生確率のピークの時刻が若干遅い。これは、観測点の地磁気緯度が比較的高いためであろう。

図6は、各月毎のシンチレーションの発生確率の時間分布を示す。これらを比較すれば明らかなように、電離層シンチレーションの発生確率は6月が最大であり、22時30分における値は41.2%で

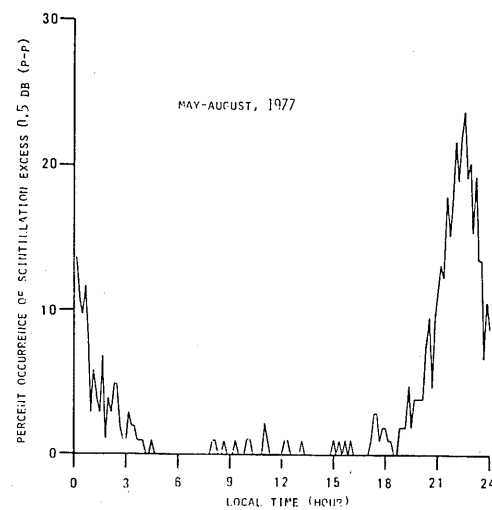


図5、1.7GHzシンチレーションの発生時刻分布

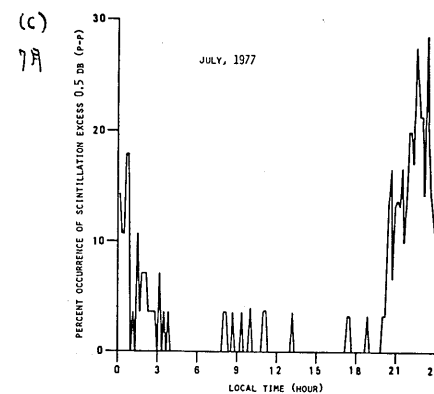
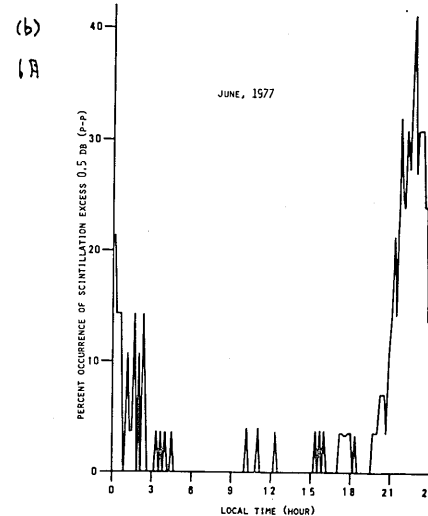
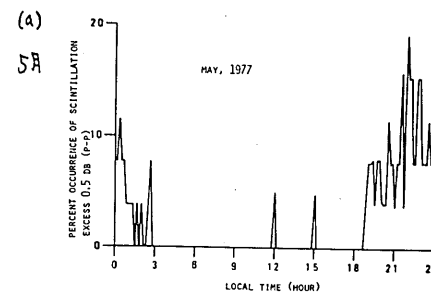


図6、各月毎の1.7GHzシンチレーションの発生時刻分布

(d)
8月

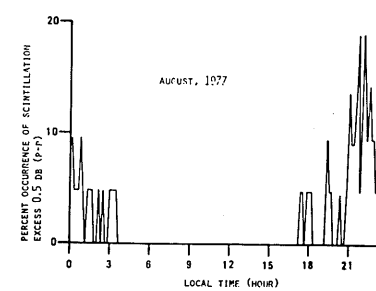


図6、各月毎の1.7GHzシンチレーションの発生時刻分布

あった。この結果はBasu et al.⁽¹⁵⁾, Aarons⁽¹⁶⁾にもあるように、東アジア地域特有の現象かも知れない。

電離層シンチレーションは、図5、6からも明らかなように、昼間にも発生している。この現象は6、7月に集中しており、はっきりとした季節依存性を示している。昼間のシンチレーションのときも、通常全電子数の変動を伴っている。1977年7月14日に取得された昼間のシンチレーションを図7に示す。シンチレーションとともに、全電子数は通常の日変化を超える増加を示している。ここで興味深いことは、全電子数が増加するとき、および減少するときにはシンチレーションが発生しているらしいことである。

同様の全電子数変動のパターンは、約35分遅れて国分寺のファラデー回転の記録にも表われており、このときアイオリグラムにはスボラディックEが観測されている。これらのことより、昼間の

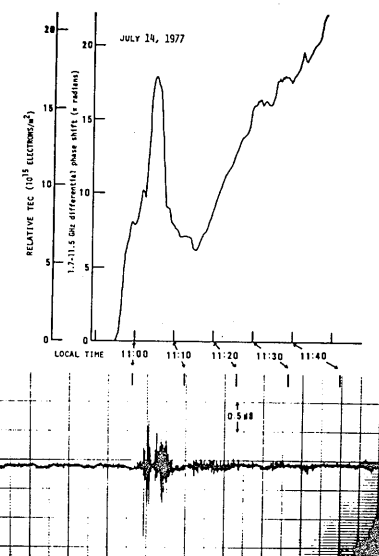


図7、昼間のシンチレーションの例(上:全電子数, 下:1.7GHz受信レベル)

シンチレーションは、E層内の電子密度のirregularitiesが移動し、伝搬路を横切る際に発生するものと考えられる。

4. 磁気嵐時に発生した電離層シンチレーション

1978年2月13日10時30分に、太陽面で重要度Ⅱのフレアが発生した。この結果、2月15日に磁気嵐が発生した。この磁気嵐は、2月15日6時42分のSCに始まり、同日20時30分に地磁気の水平成分の極小を記録して翌16日に終了した。このとき地磁気の水平成分の振幅は215%に達するもので、今太陽黒点周期に入、て最大のものではあった。

このときETδ-IIをはじめCS, GMS

等の我國の静止衛星からの電波に、広い周波数領域にわたり20時から23時にかけて、磁気嵐の回復期に入ったとて、大きなシンチレーションが観測された。

それと同時に電波通路に沿った全電子数に大きな変動が現われ、アイオノグラムにはスプレッドFに対応して観測された。図8は、全電子数の変化および $(f_oF_2)^2$ と2月14日より2月16日12時について示す。

また、図9にはETS-IIの1.7および11.5 GHzのシンチレーションを全電子数の変化とともに示す。

1.7 GHzのレベルは、20時16分より20時30分、および21時15分より21時35分の間はP-P値で10 dBを超えるような大きなシンチレーションを示した。それと同時に、11.5 GHzの信号にも電離層の影響

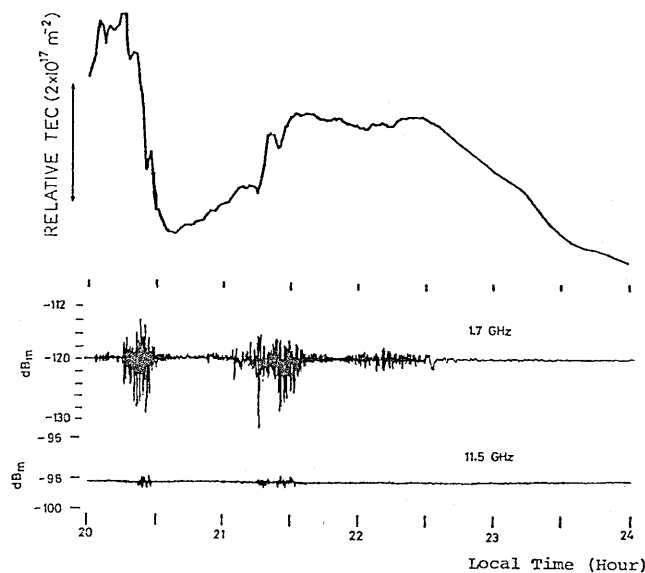


図9. 1978年2月15日の磁気嵐にともなう全電子数の変化と1.7および11.5 GHz (ETS-II)のシンチレーション

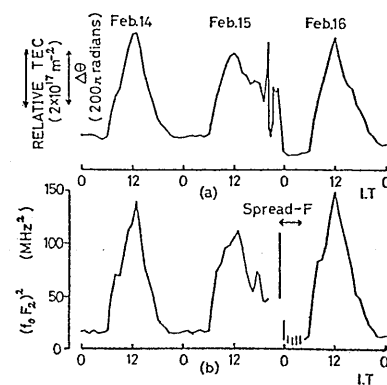


図8. 全電子数(鹿島)と $(f_oF_2)^2$ (国分寺)の日変化
磁気嵐による電離層擾乱の様子が2月15日12時以降に現われている。

が現われ、P-P値で0.7 dB程度のシンチレーションが観測された。このような高い周波数(波長2.6 cm)に電離層の影響が及んでいることの確認はおそらく今回が初めてであろうと思われる。

図9より明らかかなように、シンチレーションは全電子数が時間的に急変しているところから発生している。これは背景の電子密度の勾配と、GHzシンチレーションをひき起すほどの細かきスケールの電子密度 irregularities の関係と暗示するものである。

電離層シンチレーションの周波数特性を調べるために、いくつかのイベントについて周波数とシンチレーションの

P-P値をプロットした。それを図10に示す。電離層シンチレーションは、4 GHz以下で周波数に反比例し、4 GHz以上では周波数の2乗に反比例すると言われているが⁽¹⁷⁾、今回の磁気嵐時のそれは大略、周波数に反比例するような形となっている。これは、電子密度の irregularities が小さいスケールを持っていてためと推測される。他の周波数のシンチレーションの大きさに比べて、136 MHzでのシンチレーションがそれほど大きくなっていないのは saturation の効果が現われたためと思われる。⁽¹⁴⁾

他のイベントについては、大略周波数の2乗に反比例するような形となっている。このことは、強い磁気嵐時に発生する irregularities の生成メカニズムが、静穏時のそれとは異なっていることを示していると思われる。

図8に見られるような電子密度の急増は、電離源を想定出来ない夜間では異例のことであり、磁気嵐にともなう効果であろう。シンチレーションの開始時間の推移はETS-IIの136 MHz(国分寺)が20:01, ETS-IIの1.7 GHz(鹿島)が20:16, GMSの1.7 GHz(岡山:気象庁)が20:19, CSの4 GHz(鹿島)が20:21であるから、図11に示した仮想パノの幾何学的配置より、地上高600 kmで西から東へと移動したものと推定される。

現在、シンチレーション波形のスペク

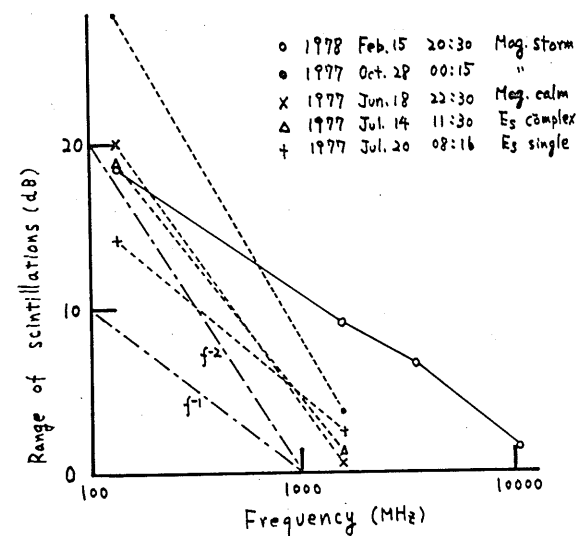


図10. 電離層シンチレーションの周波数特性

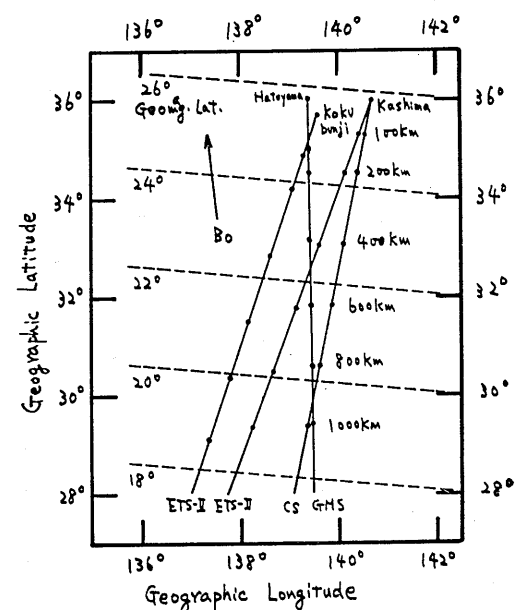


図11. 観測点の位置と仮想パノの幾何学的配置

トラム解析を計画しており、それによつて電子密度の irregularities のスタイルの推定が可能となるであろう。

5. おわりに

ETD-II 伝搬実験結果のうち、電離圏伝搬特性について述べた。ETD-II より送信されている 1.7, 11.5, 34.5 GHz の3波は互いにコヒーレントでありその位相差を測定することにより、伝搬パスに沿った電離層の全電子数の測定が出来ることを示し、 $(f_oF_2)^2$ との比較を通じてその妥当性を明らかにした。本測定法はその分解能が高く、電離層の状態の詳しい解析が可能である。また地球磁場とは無関係であるから、磁気圏にまで至る全ての全電子数が測定出来るから、フーラデー回転法によって得られる全電子数と比較することにより、磁気圏内の電子数の推定も可能であろう。

1.7 GHz の電離層シンチレーションの測定も、上記全電子数の測定と同時に行われた。1977年5月より8月の測定結果によれば、シンチレーションの発生確率は22時30分に最大となり、その値は23%であった。シンチレーションが発生しているとき、伝搬パスに沿った全電子数は激しく増減しており、電子密度の irregularities の通過を暗示している。

それら4ヶ月の内では、6月にシンチレーションの発生確率は最大となり、22時30分のピークで41%であった。

電離層シンチレーションは、昼間にも

発生しており、6, 7月には集中している。昼間のシンチレーションの場合も同様は、全電子数の変化をもとなっており、スボラディックE層が同時に観測されることも多い。136 MHzでの観測でも、シンチレーションとスボラディックE層との関係が認められており、昼間のシンチレーションの源は、E層内での電子密度の irregularities であろうと思われる。

磁気嵐にともなう電離層擾乱時に、136 MHzは言うに及ばず、11.5 GHzにも電離層シンチレーションが発生した。このように高い周波数にまで電離層の影響が及んでいることの確認は、おそらく今回が初めてであろう。このときのシンチレーションの周波数特性は、大略、周波数に反比例するような形となっている。このことは、電子密度の irregularities のスタイルからみえたことを示している。また136 MHzで saturation の効果が表われているようである。

スペクトラム解析等を行うことにより、その間の様子はもう少しはっきりするであろう。

なお、GMSに関するデータは気象庁気象衛星通信所の方々、CSに関するデータは当所CS管制グループより提供された。

参考文献

- (1) Skinner et al., Nature Physical Science, 232, July 5, 1971.
- (2) Craft and Westerlund, AIAA paper No. 72-129,

Jan. 1972.

- (3) Rufenach, J. Geophys. Res., 79, 1562, 1974.
- (4) Taur, COMSAT Tech. Rev., 3, 145, 1973.
- (5) McSherry, Microwave J., 20, 99, 1977.
- (6) Rufenach, J. Geophys. Res., 77, 4761, 1972.
- (7) Fujita, Ogawa and Koike, to be published in J. Atmos. Terr. Phys.
- (8) Awaka and Fujita, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1441, 1977.
- (9) 前田 憲一 電波工学, 共立出版(昭和34年).
- (10) Laws and Parsons, Trans. Am. Geophys. Union, 24, part II, 452, 1943.
- (11) 中田美明, 電波研究報, 18, 100, 1972.
- (12) Kane, J. Geophys. Res., 80, 3091, 1975.
- (13) Sinno and Kan, to be published in J. Atmos. Terr. Phys.
- (14) Crane, Proc. IEEE, 65, 180, 1977.
- (15) Basu et al., Rad. Sci., 11, 821, 1976.
- (16) Aarons, IEEE AP-25, 729, 1977.
- (17) Taur, COMSAT Tech. Rev., 4, 461, 1974.

11. 実験結果のまとめと今後の計画

11.1 はしがき

近年の通信需要の増大や通信形態の多様化から、衛星地上間通信においても、次々と高い周波数を用いられる趨勢にある。国際的な衛星通信を行っているインテルサット衛星においても、次期衛星システムであるV号系は6/4 GHz帯と共に14/12 GHz帯の使用を考えている。また、各種通信衛星、地球観測衛星等においても、マイクロ波帯の使い易い周波数帯における混雑回避、或は大容量伝送を実現するため、高い周波数帯の使用を検討している。我が国においても、実用衛星の試験のため実験用中容量静止通信衛星(CS)では、6/4 GHz帯と共に30/20 GHz帯が使用され、実験用中型放送衛星(BS)では、14/11 GHz帯が使用されている。更に、実験用静止通信衛星(ECS)では、34/32 GHz帯の使用が計画されている。総じて、国内通信衛星システムには、今後10年程の間に、30 GHz帯まで実用化されると予測されている⁽¹⁾。

およそ10 GHz以上の周波数の電波を通信などに用いるとき、降雨による減衰が無視できなくなる。地上の通信系においては、中継区間を短かくすることによって、降雨減衰による影響の克服を図っている。衛星地上間通信回路においては、仰角の場合を除いて、降雨現象のある対流圏を通過する距離が短かく、数kmから10数kmであるため、地上の通信系よりも有利であると考えられている。しかしながら、周波数が高くなるにつれて、降雨減衰は大きくなり、強い雨による大きな減衰が生ずることとなる。このような強い雨は、集中豪雨などの場合であり、広い範囲にわたって分布することなく、高々数kmのセル状になっているので、こうした降雨の特性を解明し、対策を講ずることが、ミリ波帯を衛星地上間通信に使用するうえで、非常に重要な課題となっている。

ミリ波帯ミリ波帯を使う衛星が打上げられる以前は、地上水平方向伝搬特性の知識を基礎に、主として、雨量計による地上降雨強度測定、ラジオメータによる降雨からの輻射測定、或はサントラッカーによる減衰測定、レーザによる降雨域測定の結果から、ミリ波帯ミリ波斜伝搬路の減衰量を推定することが行われてきた。これらの方法には、いずれも一長一短があり、実際の斜伝搬による減衰測定の予備的役割りを担ってきたと考えられる。ETS-II ミリ波伝搬実験計画では、これらの両者の機能を備えており、伝搬データを実測すると共に、従来の方法と一対一の定量的

的に対応ができ、これまでの知識の集大成が可能となっている。また、表11.1は、現在実行中或は計画中のミリ波帯ミリ波帯電波を用いた衛星の周波数一覧である。ETS-II、CS、BS、ECS伝搬実験計画は、用いている周波数、実験期間、規模からして、世界的にも有数の実験となっている。ETS-II ミリ波伝搬実験は、ECS計画の予備実験にとどまらず、今後約3年間にわたって続けられるCS、BS伝搬実験の骨格をなすものであり、極めて豊富な内容を持つものである。特に、伝搬データと各種モードによる降雨レーザデータとの対応は、ミリ波斜伝搬に及ぼす気象現象の解明の問題として、今後の研究に大きな手掛りを与えたいと言えよう。

以下、ETS-II ミリ波伝搬実験の主な結果、ミリ波衛星通信の展望とデータの運用等について述べることにする。

11.2 主な結果

1. ETS-II ミリ波伝搬実験システムの特徴は次の通りである。

- (1) 準ミリ波からミリ波にわたるコヒーレントな周波数(1.7, 11.5, 34.5 GHz)を、同一アンテナで受信し、降雨による減衰(CPA)、支差偏波減別度(XPD)などと共に、伝搬媒質によって生じる周波数間の位相差変動も取得できるシステムを用いていること。
- (2) ミリ波伝搬に重要な係り合いを持つ、対流圏気象現象を取得するための各種観測装置を備えていること。これらのデータは、伝搬データと共に、ミニコンを介して磁気テープに収録されており、伝搬特性と気象現象との対応が付け易いように配慮されていること。即ち、
 - (a) 4台の即応型雨量計と1台の転倒マス型雨量計による観測網ができていこと、
 - (b) 降雨レーザによって、衛星地上間伝搬路上(Pmモード)の反射率乃至降雨強度を求めることができるのみならず、水平断面(CAPPIモード)、

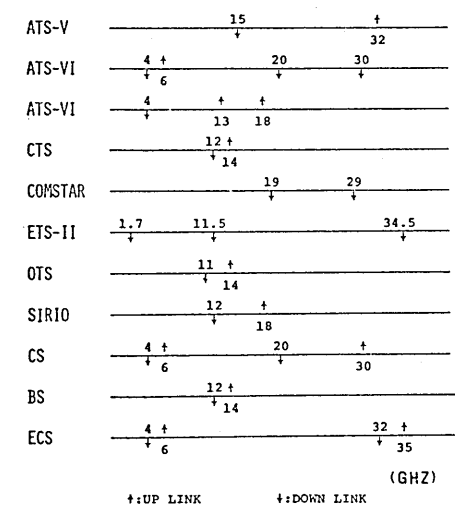


表11.1 ミリ波帯ミリ波を用いた実験衛星の使用周波数一覧

垂直断面 (RHI モード) などにおける降雨強度を求めることができること、
(c) 35.2 GHz 帯ラジオメータによって、34.5 GHz 帯の減衰を推定
することができること、

(d) 気象観測装置によって、地上付近の風向、風速、温度、湿度、気圧
を測ることができること、などである。

- (3) 鹿島支所には、ETD-II の地上局のみならず、C 局、B 局計画において主
局が置かれ、ETD-II とは異なる周波数 (中 11.1 表参照)、偏波の
実験がほぼ同一方位角及び仰角で行えること。また、ETD-II ミリ波伝搬
実験計画は、1 年間で終了し、EC 局実験計画 1 と地上施設が改造される
が、前項 (2) の各種観測装置はそのまま運用され、C 局、B 局、EC 局伝搬
実験計画を通じて同質のデータを取得できるよう配慮されていること。

2. データ解析の特徴

これらの伝搬実験システムによって取得されたデータは、データの概要を知るこ
とを目的とした一次利用と、後日更に詳しい利用など二次利用と
に分けられている。後者の利用は今後の課題である。

一次利用は、各測定値の時間変化を示す日報等と、1ヶ月間の測定値を統計処
理した結果を示す月報等により構成されている。日報、或は月報の詳しい内容につ
いては、各論に報告されているので省略し、ミリ波斜伝搬実験におけるデータ解析
の特徴について言及するにとどめる。

レーダデータ (P_m モード) を利用して、降雨の型と層状性降雨、対流性降雨な
どに分類し、無分類のものと合せて、3種類のデータ母集団を作り、各母集団につ
いて、各測定項目の統計処理を行っている。これによって、ミリ波伝搬データと各
種観測装置によるデータのばらつきが少なくなっており、今後の詳しい解析がなされる。
また、統計処理は、1分間平均値を月毎或は全測定期間を単位にとっている。
これらの結果、各測定項目の累積確率分布を比較することによって、各種測定装置
による降雨減衰推定の有効性、限界などを判断できると共に、測定装置自体の校正
も可能となっている。

3. データの特徴

通信回線の設計等には重要な意味をもつ、減衰の累積確率、継続時間率等が、35
GHz 帯において、世界で始めて取得された。主な結果は以下の通りである。

(1) 累積確率

降雨減衰の最も顕著であった最悪月 昭和 52 年 8 月における、34.5 GHz (B
局 11.5 GHz) の時間率 1.0、0.1% に対応する降雨減衰は、それぞれ
9 dB (2 dB)、24 dB (5 dB) であり、交差偏波識別度 (XPD) は、そ
れぞれ 26 dB (30 dB)、21 dB (27 dB) である。

昭和 52 年 5 月から 11 月までの 7 ヶ月間における 34.5 GHz の時間率
10.0、1.0、0.1% に対応する降雨減衰は、それぞれ 3 dB、6 dB、18
dB である。

降雨減衰の累積確率の値から通信回線の信頼性を引き出すとすれば、35
GHz 帯の降雨マージンを約 25 dB に取っておくと、最悪月 (8 月) におけ
る回線断は 0.1% (約 50 分) 以下と行うことができる。

(2) 継続時間

最悪月 (8 月) における 34.5 GHz の降雨減衰の継続時間は次の通りである。
10 dB の減衰が 2 時間以上続く時間率は 0.4% 程度であるが、20 dB の
減衰が 20 分以上続く時間率はほぼ 0.1% である。25 dB の減衰は、
20 分以上続いている。これは、大きな減衰をもたらす強い雨は、比較
的小さなセル状になっていることを裏付けている。

また、5 月から 11 月の 7 ヶ月間における 34.5 GHz の降雨減衰継続時間
は次のようである。10 dB の減衰が 2 時間以上続く時間率は、ほぼ 0.07
% 程度であるが、20 dB の減衰が 20 分以上続く時間率は、ほぼ 0.016
% である。

(3) 相関

(a) 雨量計：雨量計による地上降雨強度と伝搬諸量との間には、時間遅れ
があり、層状性降雨の場合には、これを補正して良好な対応を付けること
ができる。等累積確率の値における両者の対応はかなり良好である。

(b) 降雨レーダ：レーダによるブライツバンド以下の伝搬路上の推定降雨
強度 (P_m モード) と降雨減衰との対応は良好である。等累積確率の値に
おける両者の対応は非常に良好である。

RHI モードのみならず、P_m モードと P_s モードとの比較からダイバ
シティゲインが求められる。後者の場合、EC 局計画でいう主局、副局の
間のダイバシティゲインは、最悪月 8 月において、0.1% の時間率に対応
する値は約 10 dB である (EC 局計画において、鹿島支所を主局とし、
平磯支所を副局とする予定であり、両者は約 50 km 離れている)。

台風通過時に、強い雨をもたらす雨域の移動と伝搬諸量の時間的変化と

の良好な対応が示されている。

(c) ラジオメータ：35.2 GHz帯ラジオメータデータと降雨減衰との対応は非常に良好であるが、測定範囲が約10 dB程度であり、ミリ波帯降雨減衰の推定には本質的な制約となっている。

(d) その他伝搬特性：降雨減衰を伴わない交差偏波減衰度の分布が生じており、降雨以外の粒子（例えば、ブライトバレットの上のところにある氷晶核）による影響を示している。

1.7 GHz帯は、降雨減衰をほとんど被らないが、電離層のイレギュラリティによるシンチレーション、或は全電子数(TEC)の日周変化による位相の大振幅変動が観測されている。

4. 今後の問題

1年間のETS-IIミリ波伝搬実験の結果、引き続き実験或は解明されなければならぬ諸点は、次の通りである。即ち、

- (1) 強い雨の構造、雨滴粒径分布、地域性、日周変化、時間率など降雨の空間的、時間的、統計的性質に関する点、
- (2) 地上降雨強度及びレーダによる伝搬路上の推定降雨減衰と、斜伝搬路における降雨減衰との長期間データによる統計的な対応付け、
- (3) モデル実験などによる雨量計及びレーダの各種パラメータ(F値、B、ρなど)のより正確な決定と共に、上記統計データの比較に基づいた(統計的)より正確なパラメータの補正或は決定、などである。

11.3 ミリ波衛星地上間通信の展望とデータの利用

ETS-IIミリ波伝搬実験の成果をふまえて、実験用静止通信衛星(ETS)計画では、衛星地上間通信の降雨減衰による回線断を避けるため、スペースダイバシティ方式による実際の切換え実験を行うこととしている。これは、衛星地上間通信において、回線断を与えるような雨域が高々数km以下であることに着目して、互に数km以上離れた2つの局が同時に回線断となる確率が小さくなることを利用するものであり、2つの地上局の内、降雨減衰の少ない方の回線を使い、実効上完全な1つの通信回線を形成するものである。レーダデータの解析から、主局(鹿島)、副局(平磯)間でスペースダイバシティ方式を採用することによる利得は決り通りである。降雨マージン25 dBのとき、最悪月(8月)における回線断の時間率は0.1% (約50分)であったが、副局を採用することによって回線断の時間率を0.01%

(約5分)に下げることが可能である。ETS計画において、これらの事がシステムと共に検討され明確にされるであろう。

また、大電力送信管の開発及びアレイ素子等と共に、スペースダイバシティ方式が実現すれば、20~40 GHz帯における降雨減衰の問題は克服されることとなり、より高い周波数の大電力の窓領域における地上衛星間通信の可能性が大幅に開けてくる。その意味においても、35 GHz帯の斜伝搬路における降雨減衰特性の徹底的な解明が、この周波数帯利用の鍵となっている。ミリ波帯を用いて、広帯域で高信頼性のある通信系を製作することと、現在の技術レベルとの落差には、尚且つ大きいものがあるものの、ETS-II伝搬実験において、実際にデータを取得してデータの感度には馴染んだことは、今後の利用に向けて大きなステップを歩んだこととなっている。また、CS、BS、ECS伝搬実験計画においても、衛星或は地上局の各種技術の向上と共に、鹿島地上局における気象観測データと対応をもつ各周波数における伝搬データの蓄積は、今後の利用の大きな基礎を築くことになっている。

1971年宇宙通信に関する世界無線通信主管庁会議(WARC-ST)では、周波数分配の上限が40 GHzから275 GHzに引き上げられ、この周波数帯において、主として衛星通信、衛星放送、電波天文、宇宙研究などへの割当が行われている。ミリ波帯における静止衛星と地上との間の通信に割当てられている最低周波数は、上り50 GHz帯、下り40 GHz帯となっている。これらは、現在の技術水準を考慮して配分されたとは考え難いが、この周波数帯における電波利用の一つの到達目標を与えているものとして、その意義には大きいものがある。ETS-II/ETS計画が、そうした電波利用のカーブとなっていることは言うまでもない。50/40 GHz帯を用いた本格的な実験用静止通信衛星構想については、当所より、ACTS-G衛星として提案されているところである。当然のことながら、この衛星構想は、ETS-II/ETSの成果をふまえて、また周囲の条件を十分勘案したうえで具体化されるはずである。

1979年には、WARC-Generalが予定されており、40 GHz以上の周波数帯が地上通信へ配分されると予想されている。ミリ波帯では、降雨減衰が著しいので、地上大気中での大容量通信回線の実用性は大きくないと考えられ、早くから電波管伝送方式の開発が各国で行われている。我が国においても、電電公社によってW-40G ミリメートル波通信方式が完成している。これを契機として、ミリ波固体素子、回路技術が向上し、100 GHz以下の周波数帯では、基本回路装置、測定器類の問題は解決されている。問題は装置の価格が高いことである。100 GHz以下の周波数帯の利用において、重要な点は、既存システムと競合しても使われるよ

うな低価格装置の開発、或は他周波数帯では実現できないこの周波数帯の特徴を生かしたシステムの開発であり、また降雨減衰の克服である。後者のミリ波大気伝搬特性の解明を目的として、当所において実験計画が進行中であるが、この詳細については別の機会に報告することとする*。

地上通信系には、導波管、オプティカルファイバという強力な代替手段があるが、衛星地上間通信は本質的に無線通信であり、対流圏や電離圏を通過する電磁波（短波、超短波、極超短波、マイクロ波、光波）を使わざるを得ない。通信容量、雲などの影響を考えると、マイクロ波以外の利用には限界があり、マイクロ波の上限に位置するミリ波帯が、使用可能性をもつ最後の周波数帯であると考えられており、ミリ波帯降雨減衰特性解明が重要となっている所以である。

人間活動の増大と共に、電波空間における電磁波の利用は、今後増大する一方である。将来、衛星地上間通信においても、降雨減衰の大きい周波数帯の利用を現実のこととして考えざるを得なくなることは、述べた通りであるが、その時までには、可能なシステムのひな形を作っておくことが、我々の任務であると言えよう。

ETS-II ミリ波伝搬実験において取得した 34.5, 11.5 及び 1.7 GHz の各種データは、CS (30, 20 GHz), BS (12 GHz), ES (34, 32 GHz) 伝搬実験データと共に、気象データと対応を付け、統一的な解釈を与えて（つまり日本のみならず、世界的な電波気象図と対応を付け）、CGER を通じて世界的に運用されるはずである。これは、ATS-6⁽²⁾, COMSTAR⁽³⁾ など、他周波数、他地域の結果と比較し、人類共通の知識となつていく性質のものである。

また、降雨減衰測定からは外れるが、TEC やシンチレーションの観測は、通信の利用のみならず、電波のリモートセンシングの利用の有効性を示しており、この方面の研究の発展に寄与すると考えられる。

取得したデータの有効利用にとどまらず、ETS-II 伝搬実験システム及び各種観測機器は、降雨構造などの観測を通じて、多方面の応用が考えられている。例えば、現在計画されている、我が国や米国の地球観測衛星、気象衛星などの ground truth** を与えるとか、或はドップラー機能レーザに付加して COPLAN モード*** によって風速の3次元構造を観測するとか、種々の発展性のある応用が可能となっている。

* 電波研究所 第54回研究発表会（昭和53年5月24日）。

** 衛星や航空機から取得するリモートセンシングデータを校正するための地上測定のこと。

*** Coordinated coplanar レーザモードのこと。これは2台のドップラーレーザを数10 km 離れて配置し、共平面上で同期して走査し、雨滴などをトレーサとして、風速の3次元構造解明の強力な手段である。

11.4 あとがき

1年間にわたる ETS-II ミリ波伝搬実験の終了に際して、総合報告を行うことができたことは、関係者一同大きな喜びとするところである。日本最初の静止衛星の誕生から今日まで、当初予想できなかった数々のトラブル、困難な問題が生じ、その都度、鹿島支所一研、ETS-II グループ、その他関係者の献心的な努力のお蔭で1年間の貴重なデータを取ることができ、また、興味ある現象も把握することができた。

実験期間が6ヶ月間という ETS-II ミリ波伝搬実験計画におめされた制約を克服するため、伝搬データと気象現象との一対一対応をできるだけ追求し、データに客観性を持たせ、他のデータと比較できるようなデータの取得、収集、処理に努めた。加えて、観測期間が1年間に延長でき、1年間のデータを蓄積できたことは予想外の成果とも言えよう。これらの観測結果は、一次利用結果としてまとめられ、報告書の形で、近く出版される運びとなっている。各方面での利用を期待すると同時に、今後とも二次利用を中心として、データの有効利用を図る所存である。

伝搬実験を成功させるための、ミリ波大口径アンテナシステム、地上観測システム、衛星システムなど数々の成果の枚挙にいとまがないが、これら新しい技術の基盤も、衛星実験の大きな副産物と言えよう。

最後に、ETS-II ミリ波伝搬実験遂行のために、数々の御協力、御援助を戴いた電波監理局、宇宙開発事業団をはじめとする関係機関、関係会社の方々、及び研究所内の方々に心から感謝の意を表するものである。

参考文献

- (1) "Earth stations to triple by 1985, as systems move up to 30 GHz", Microwaves, pp. 48-49(1975).
- (2) J. L. Ippolito, "ATS-6 Millimeter wave propagation and communications experiments at 20 and 30 GHz", IEEE Trans. Aero. Electron. Syst., AES-11(6), pp. 1067-1083 (1975).
- (3) C. W. Bostian, S. B. Holt, S. R. Kauffman, E. A. Manus, R. E. Marshall, W. L. Stutzman, and P. H. Wiley, "Rain depolarization and attenuation measurements at 11.7, 19.4 and 28.56 GHz: a description of the experiment and some preliminary results", URSI Commission F, Symposium Proc., La Baule, France, pp. 403-408(1977).

ETS-II 関係成果発表リスト

昭和53年6月7日

- (口頭)
- 52.5.18 小室英雄 寺代木 扶 藤田正晴 小林 哲 鈴木良昭 尾嶋武之
佐藤郁郎 玉川 晋 (NEC)
「ETS-II 電波受信用シ波大口径アンテナの特性」 第191回研究談話会
藤田正晴 寺代木 扶 小室英雄 篠塚 隆 早坂 薫 小園 晋一
佐藤郁郎 玉川 晋 坂井広三郎 (NEC)
「ミリ波大口径アンテナの測定法」
早坂 薫 藤田正晴 小林 哲 井原俊夫
「ETS-II 電波受信用アンテナの追従特性」
小園 晋一 木村 繁 篠塚 隆 林理三雄
「ETS-II 高感度受信系の特性」
篠塚 隆 藤田正晴 津祐一 小室英雄 井原俊夫 早坂 薫 小園 晋一
阿波加 純 林理三雄 「ETS-II 電波受信実験速報-①-」
小池 正 篠塚 隆 藤田正晴 田中 浩 青山伸一 阿波加 純 林理三雄
「降雨強度分布測定装置による実験速報-①-」
- 52.5.17 N. Fugono, T. Teshirogi, H. Tanaka, R. Hayashi and T. Ihara
~ 5.17 "Millimeter Wave Propagation Experiment with Engineering Test
Satellite Type II (ETS-II)" 第12回宇宙技術及科学の国際シンポジウム
- 52.7.20 阿波加 純 藤田正晴
「ETS-II のコヒーレントな信号間の位相差を用いた全電子数測定」 第192回研究談話会
新野賢爾 菅 宮夫 蛭川ハチ代
「ETS-II VHF帯電波のフラーデ回転およびシミュレーション測定」
- 52.8.17 藤田正晴 小川忠孝
「ETS-II 伝搬実験における観測された176MHzシミュレーション」 第193回研究談話会
- 52.9.28 電波科学研究連絡委員会F小委員会
「技術試験衛星II型(ETS-II)「ミク2号」によるミリ波伝搬実験計画」
1. 計画の概要 各野信義
2. 降雨レーダー 田中 浩
3. 実験結果の速報 井原俊夫
- 52.9.25 T. Ishida and N. Fugono
J. Tabata, M. Ohara and Y. Ishizawa (NASDA)
"Propagation Experiment with Japanese Satellite, Engineering
Test Satellite Type II (ETS-II) - [Kiku - 2]" 第28回IAF会議(カ)
- " J. Tabata, M. Ohara and Y. Ishizawa (NASDA)
T. Ishida and N. Fugono
"Experimental System of Japanese Satellite, Engineering Test
Satellite Type II (ETS-II) - [Kiku - 2]"
- 52.10.26 第53回研究発表会
「技術試験衛星II型(ミク2号)による電波伝搬実験」
1. 概 要 生島広三郎
2. シ波帯降雨減衰 杯 理三雄
3. マイクロ波帯位相比較 藤田正晴
4. VHF帯フラーデ回転 新野賢爾
各野信義 田中 浩 國分幹郎 中野 悟(東京)
52.10.28 「対衛星電波伝搬路の降雨量分布導出の一式」 電通信学会宇宙航行工外ロミソ研究

52.11.8 ~ 11.11	新野賢爾, 菅 宮 夫 「静止衛星2号 VHF帯電波によるマラデ回転及びシンクレーション測定」 小川 忠彦, 倉野信義 「ETS-IIを用いた6GHz帯電波伝搬実験 1. 実験概要」 阿波加 純, 藤田正晴 「ETS-IIを用いた6GHz帯電波伝搬実験 2. 全電子数測定」 藤田正晴, 小川 忠彦 「ETS-IIを用いた6GHz帯電波伝搬実験 3. 1.7GHzシンクレーション」 52.12.16 篠 塚 隆, 井原俊夫 「技術試験衛星II型 (ETS-II: 2号) による電波伝搬実験結果の速報」 電子通信学会アンテナ研究会 1. 降雨の影響 藤田正晴, 阿波加 純 「技術試験衛星II型 (ETS-II: 2号) による電波伝搬実験結果の速報」 2. 電離層の影響 53.2.15 藤田正晴, 小室英雄 「ETS-IIの静止軌道上のアンテナパターン」 第198回研究談話会 53.3.22 大木 久夫, 高橋寛子 「ETS-IIの電波伝搬実験の月報処理プログラムの開発」 第199回研究談話会 ~ 3.24 篠 塚 隆, 中村健治, 阿波加 純, 黒岩 博司 「ETS-II伝搬実験, 1977年3月の統計処理結果について」 藤田正晴, 林 理三雄, 川崎 捨義 「ETS-IIの34.5GHzヒコンの降雨減衰」 黒岩 博司, 小池 国正, 林 理三雄 「降雨レーザ利用によるスペースタイパシテ効果の推定」 藤田正晴, 小川 忠彦 「1978年2月15日の磁気嵐時に発生した6GHz帯電波のシンクレーション」 53.3.29 倉野信義, 林 理三雄 「ETS-II 2号」ミリ波・準ミリ波伝搬実験 1. 概要および実験経過, 電子通信学会昭和53年度 ~ 3.31 藤田正晴, 手代木 扶, 小室英雄, 早坂 亨 総合全国大会シンポジウム 尾 嶋 武之, 鈴木良昭 「ETS-II 2号」ミリ波・準ミリ波伝搬実験 2. 受信アンテナ系 篠 塚 隆, 木村 繁, 小園 亨一, 吉村和幸, 林 理三雄 「ETS-II 2号」ミリ波・準ミリ波伝搬実験 3. 高感度受信系 中村健治, 田中 浩, 阿波加 純, 小池 国正, 手代木 扶 「ETS-II 2号」ミリ波・準ミリ波伝搬実験 4. 降雨レーザの校正 井原俊夫, 藤田正晴, 青山 伸一, 中村健治, 川崎 捨義, 乙津 祐一 「ETS-II 2号」ミリ波・準ミリ波伝搬実験 5. 実験速報 #01 阿波加 純, 篠 塚 隆, 古英 洋治, 黒岩 博司, 小池 国正 「ETS-II 2号」ミリ波・準ミリ波伝搬実験 6. 実験速報 #02 53.3.23 中村健治, 今井 信男, 林 理三雄 「降雨強度分布測定装置とカラーグラフィックディスプレイ装置」 テレビジョン学会画像表示学会 53.4.23 N. Fugono and R. Hayashi ~ 4.27 "Propagation Experiment in 1.7, 11.5 and 34.5GHz with Engineering Test Satellite Type II (ETS-II), [kiku-2]" 第7回 AIAA 通信衛星 システム会議 サンディエゴ 53.6.27 R. Hayashi and N. Fugono ~ 6.27 "Millimeter Wave Propagation Experiment with Geostationary Satellite ETS-II of Japan" 1978年 IEEE-MTT-S 国際マイクロ波シンポジウム 1978
--------------------	---

53.5.29
~6.10

K. Shinno, M. Kan, T. Ogawa,
M. Fugita and J. Awaka
"Observations of Ionospheric
Total Election Content By the
ETS-II Satellite at
Kashima and Kokubunji"

IMS 7-キングシンポジウム
インストラック

53.7.31
~8.9

J. Awaka, M. Fugita and T. Ogawa
"TEC and Scintillation Measurements
Using Coherent GHz Waves from
the Japanese Geostationary
Satellite ETS-II"

URSI シンポジウム
ヘルシンキ

"

T. Ogawa, M. Fugita, J. Awaka
and K. Shinno
"Severe Disturbances of VHF
and GHz Waves from Geostationary
Satellites During a Magnetic
Storm."

"

"

K. Shinno and M. Kan
"Simultaneous Measurements of
Ionospheric Scintillations and
Faraday Rotation by 136 MHz
Radio Signal of ETS-II"

"

"

N. Fugono
"Propagation Experiment in 1.7, 11.5 and 34.5GHz with
A Geostationary Satellite, Kiku-2"

URSI
ヘルシンキ

53.8.29
~8.31

M. Fugita N. Fugono, R. Hayashi and
T. Teshirogi
"ETS-II Microwave Propagation
Experiments"

アンテナ・伝搬国際シンポジウム (ISAP)
仙台

"

T. Ihara, Y. Furuhamu and
T. Shinozuka
"Tropospheric Effects on
ETS-II millimeter Wave
Propagation"

"

"

J. Awaka, M. Fujita and T. Ogawa
"Ionospheric Effects on the
Propagation of GHz Beacons
from ETS-II"

"

(誌上)

畚野信義, 福島 圓, 田中 浩

「ミリ波伝搬とレーダ雨量計」

J. Awaka and M. Fugita

電波研究所季報 第22巻 第121号

1976年12号

FR2207-424

"Measurement of Total Electron Content by Means of Differential Phase Shift Method Using Coherent SHF Signal from a Geostationary Satellite" JATP vol. 39 1977

阿波加 純, 小池 圓正, 藤田 正晴, 小園 晋一, 早坂 薫, 青山 伸一, 田中 浩

「降雨強度分布測定装置の校正」 電波研究所季報 第23巻 第25号 1977年12月号

R. Hayashi and N. Fugono

"Experiments of Precipitation Effect upon Millimeter Wave Propagation with ETS-II [Kiku 2]"

Technocrat vol. 10, No. 9, Sept. 1977

電波研究所季報 第24巻 第126号 1978年1月号

「技術試験衛星II型(ETS-II)」第2号 電波伝搬実験用地上施設特集

1. 序言

石田 亨

2. 計画の概要

畚野信義

3. 衛星の回線設計の概略

杯 理三雄, 畚野信義, 石沢 禎弘

4. 地上施設の概略

小室 英雄, 杯 理三雄, 畚野信義

5. 受信アンテナと特性

寺代 木扶, 藤田 正晴, 早坂 薫

小室 英雄, 鈴木 良昭, 尾嶋 武之

6. 受信測定系と特性

I. 装置の構成と電気特性

杯 理三雄, 木村 繁, 藤田 正晴

篠塚 隆, 小園 晋一, 吉村 和幸

II. 測定系総合特性

小園 晋一, 杯 理三雄, 篠塚 隆

7. 降雨強度分布測定装置と特性

田中 浩, 寺代 木扶, 阿波加 純

篠塚 隆, 小池 圓正

8. 天線音温度測定装置と特性

乙 津 祐一, 篠塚 隆, 井原 俊夫, 青山 伸一

9. 気象測定装置

中村 健治, 青山 伸一, 篠塚 隆, 小杯 常人

10. データ処理系

篠塚 隆, 木村 繁, 川 塚 捨義

11. 結言

生 島 三郎

K. Shinno and M. Kan

Mid Latitude Ionospheric Scintillations of VHF Radio Signals Associated with Peculiar TEC Fluctuations of Faraday Rotation.

J.A.T.P. April 1978

1. ETS-II Propagation Experiment^s: Outline (of Project)
by N. FUGONO, R. HAYASHI, and Y. ISHIZAWA
2. ETS-II Propagation Experiments: Earth Station Facility
by R. HAYASHI, T. TESHIROGI, S. KIMURA, H. KOMURO,
K. YOSHIMURA, Y. SUZUKI, and S. AOYAMA
3. ETS-II Propagation Experiments: Rain Radar for Millimeter
Wave Propagation Experiments
by H. TANAKA, T. SHINOZUKA, K. NAKAMURA, K. KOIKE,
and H. KUROIWA
4. ETS-II Propagation Experiments: Characteristics of
Millimeter and Quasi-Millimeter wave propagation
by M. FUJITA, T. SHINOZUKA, T. IHARA, Y. FURUHAMA,
and H. INUKI
5. ETS-II Propagation Experiments: Effects of the Ionosphere
by J. AWAKA, T. OGAWA, M. FUJITA, K. SHINNO, and M. KAN

郵政省電波研究所

昭和53年5月23日(火)

技術試験衛星II型 (ETS-II) 「きく2号」 ミリ波伝搬実験 総合報告会

プログラム

司会 生島広三郎

開会の辞

10:00~10:05

糟谷 績

1. 実験の概要

10:05~10:30

谷野信義

2. アンテナ装置とその特性

10:30~11:00

○手代木扶 小室英雄
藤田正晴 鈴木良昭

3. 受信装置とその特性

11:00~11:30

○木村 繁 林理三雄
黒岩博司 吉村和幸

4. 降雨強度分布測定装置とその特性

(昼食60分) 11:30~12:00

○阿波加純 手代木扶
田中 浩* 小室英雄

5. 実験経過

13:00~13:25

○林理三雄 石沢禎弘**

6. データ収集処理と特徴的な現象

13:25~14:00

○篠塚 隆 中村健治
川崎捨義 井原俊一

5. データ統計処理

14:00~14:20

○犬木久夫 高橋寛子

8. 対流圏伝搬特性

(休憩10分) 14:20~15:00

○井原俊夫 古浜洋治
篠塚 隆 青山伸一

9. 降雨レーダデータの利用

15:10~15:40

○中村健治 田中 浩*
小池国正 黒岩博司

10. 電離圏伝搬特性

15:40~16:10

○藤田正晴 小川忠彦
阿波加純 新野賢爾

11. 実験結果のまとめと今後の計画

16:10~16:40

古浜洋治

閉会の辞

16:40~16:45

石田 亨

* 名大へ出向 (53.3.1付)

** 宇宙開発事業団

○ 発表者