

東京—赤城山間 マイクロ波伝播試験

長 浜 良 三*

The Propagation Test on 2,600 Mc and 6,700 Mc Waves over 110km Land Path

By Ryōzō Nagahama
Totsuka Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

This is a report of the writer's experimental radio wave propagation he conducted over the distance of about 110 km between Mt. Akagi and Tokyo, using two frequency bands of 2,600 Mc and 6,700 Mc.

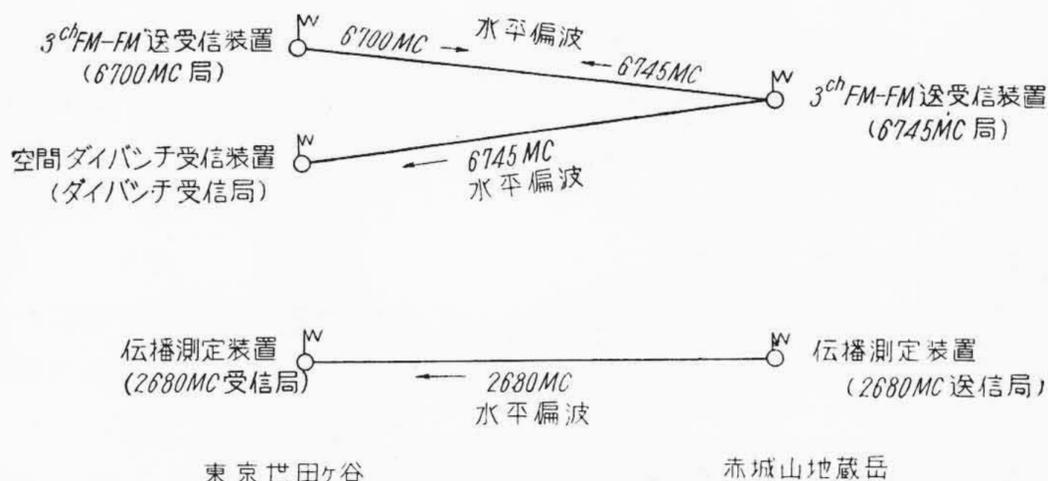
By this experiment it was found that; the depth of fading which could give 99.9% reliability to the transmission span in changing period from winter to spring is around -15 db, and 2,600 Mc band develops a smaller fading; when vertical space diversity receiving of 4 m interval is carried out the time equivalent to about 6% of the whole period in which the fading frequency distribution is below 5% remains effective; and when snow sticks to the plan reflector and parabolic antenna, the gain suffers decrease, particularly when the snow is rich in moisture.

[I] 緒 言

一般に無線通信を行う以上電波伝播の一般的特性およびその回線特有の伝播特性を知らねば回線の S/N, 歪, および強度を決定するための回線設計を行うことはできない。マイクロ波の伝播の対称となる対流圏伝播に関して今日まで数多い理論的, 実験的解析がなされて来た⁽¹⁾が, 対流圏伝播は複雑な地形や気象的条件に左右されるため, 新しく計画される具体的な回線設計を直接の目的とした電波伝播実験の意義は未だに失われぬのみならず, 過去の結果にさらに新しいものを加え一般的特性解明の発展に寄与するためにも有意義であると考えられる。以下先に発表⁽²⁾した UXF-011 型マイクロ波通信装置完成を機とし, 赤城山地蔵岳—東京世田谷 NHK 技術研究所間約 110km に第 1 図に示す実験回線を構成することができたのでその概要を報告する。

この伝播試験の実験項目ならびにその目的とするものは

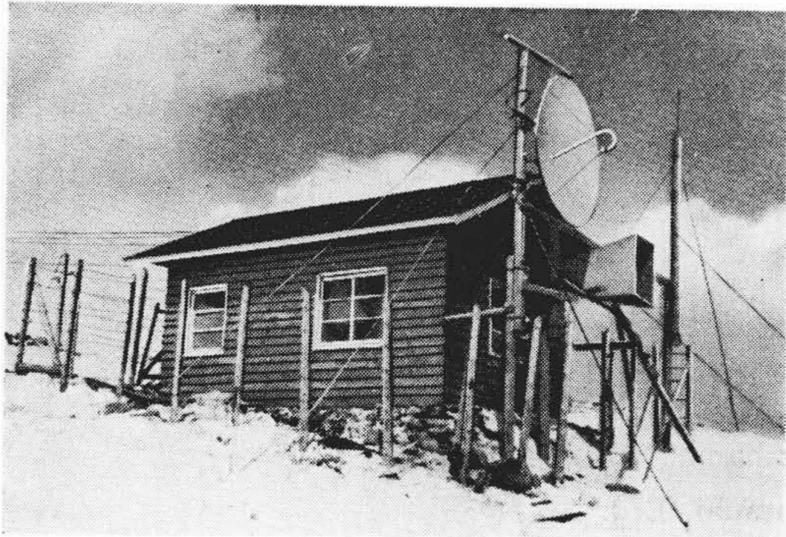
- (i) 冬期より春期への過渡期における 2,600 Mc 帯および 6,700 Mc 帯の陸上長距離回線に対する伝播特性の実測
 - (ii) 空中線および反射板に積雪があつた場合の諸特性の実測
 - (iii) 垂直空間ダイバシティ受信効果の実測
- などを行つて, 本回線ならびに長距離陸上伝播に対するマイクロ波回線設計および雪の影響が考えられる場合の回線構成に関する基礎的資料をうることである。



第 1 図 実 験 回 線

Fig. 1. Experimental Micro-Wave System

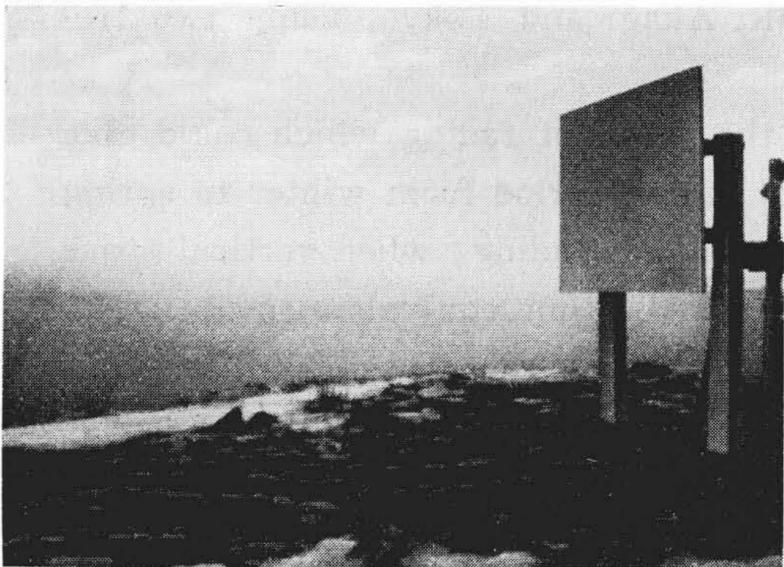
* 日立製作所戸塚工場



第2図 赤城実験局
Fig.2. Akagi Experimental Micro-
Wave Station



第4図 東京実験局
Fig.4. Tokyo Experimental Micro-
Wave Station



第3図 赤城局反射板
Fig.3. Plan Reflector at Akagi

〔II〕 測定に使用した機器

第1図の回線を構成した機器の概要はつぎの通りである。

(1) 赤城山実験局 (第2図)

(A) 6,745Mc 局

- (a) 空中線: 直径 2m パラボラ空中線(第2図)
- (b) 反射板: 1.8×1.6m 矩形平板 (第3図)
- (c) 送受信機: UXF-011 型 3 通話路 FM-FM マイクロ波送受信機⁽²⁾に受信機入力自記々録装置を附加, 出力 60~100 mW, S.G. により入力較正, 確度 ±1.5 db

(B) 2,680 Mc 送信局

- (a) 空中線: 電磁ホーン, 利得約 25 db(第2図)
- (b) 送信機: 出力約 700 mW C.W. 出力監視装置付

(2) 東京実験局 (第4図)

- (A) 6,700 Mc 局 送受信周波数が赤城 6,745 Mc 局に対して逆転している他はほぼ同様

(B) 空間ダイバシチ受信局 受信周波数 6,745 Mc, 中間周波前置増幅器までは空中線に直結されたマイクロ波ヘッドにあつて, 主中間周波増幅器以下の部分に 75Ω 同軸ケーブルにて接続されている以外は 6,745 Mc 局受信部とほぼ同様

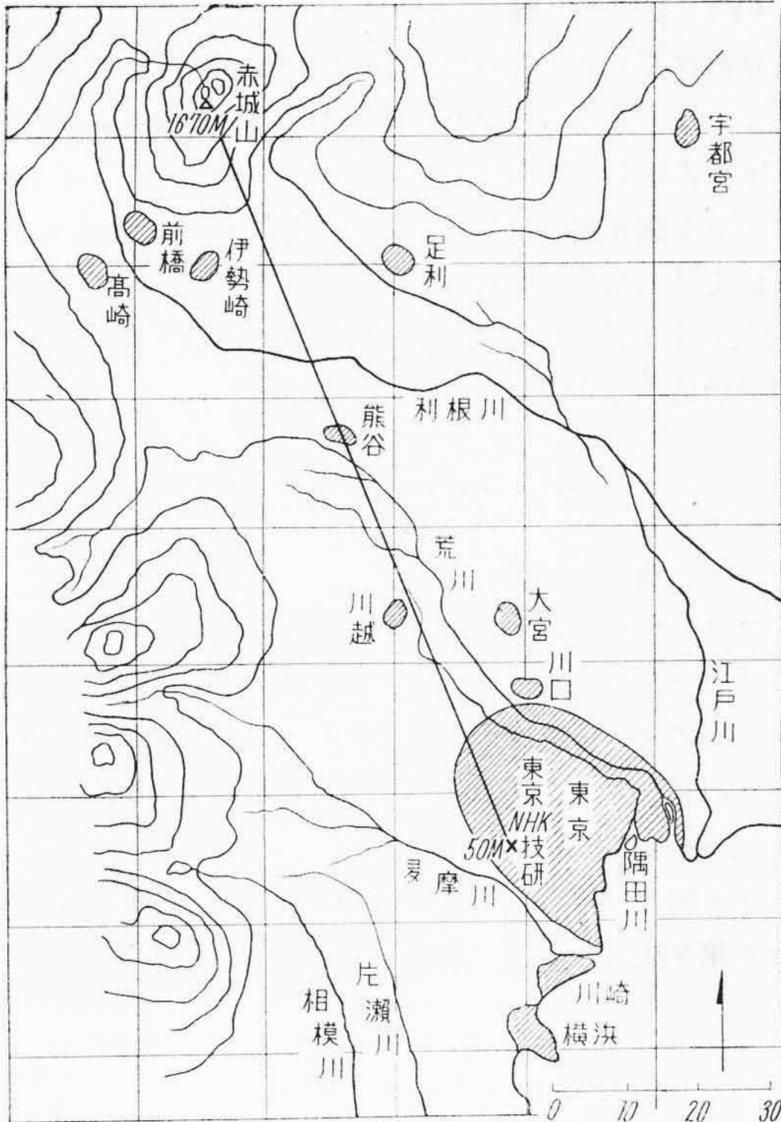
(C) 2,680 Mc 受信局

- (a) 空中線: 赤城 2,680 Mc 局と同様
- (b) 受信機: 雑音電力 -100 dbm, 比較発振器として雑音放電管を使用, 入力自記々録装置付, 測定確度 ±1.5 db

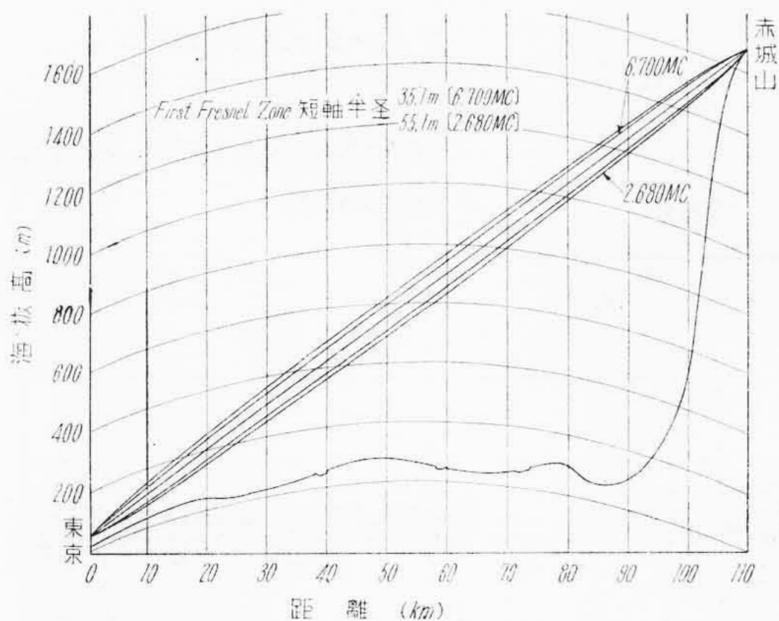
〔III〕 伝播路の状態

(1) 地 形

実験地の地図を第5図, プロファイルを第6図に示した。地形上の特長として, 110 km の全区間はすべて完全な陸上伝播であること, 海拔 50 m と 1,670 m の2点を結んだ線が電波通路と考えられるから, かなり広範囲に通路高が変化していること, 東京側の空中線高は距離に比して小さく反射波の反射点は東京側空中線にきわめて近接している。また東京側空中線の近傍は小さい丘や林が散在していて詳細に検討すれば, 6,700 Mc の場合は第1フレネル帯に対して若干のクリアランスがあるが, 2,680 Mc ではクリアランスがほとんどないことがわかる。第7図に示すプロファイル略図において赤城, 東京の空中線高 AA' , TT' をそれぞれ 1,670 m, 50 m, $A'T'$ を 110 km, 大気の高さに対する誘電率の変化による電波の大地への屈折を均一大気として考えるための地球の等価半径 kr の k を $4/3$, r を 6,370 km とすれば, 反射点 R より両地までの距離 d_1, d_2 は 108.9 km, 1.1 km, 赤城における俯角 ϕ_A , 東京における仰角 ϕ_T は $1^\circ 4'$, $0^\circ 5'$, 直距離 AT は 109.98 km, 直接波と反射波の通路差は 0.1675 m である。



第5図 実験地平面図
Fig.5. Map of Akagi-Tokyo Route



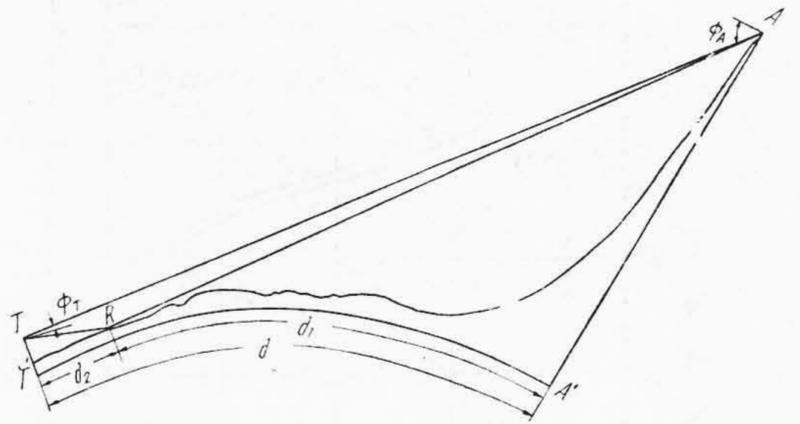
第6図 回線プロフィール
Fig.6. Profile of the Route

(2) 算定受信電力

伝播路空間に自由空間損失のみが存在すると考えた場合の回線のレベル関係はつぎの通りとなる。

(A) 6,745 Mc (赤城送信, 東京受信)

送信機出力: 18.45 dbm, 自由空間損失: 149.8 db,
送受信空中線利得: 39 db, 赤城饋電線および不整合損失: 2 db, 東京饋電線および不整合損失: 3.2 db,
東京受信電力: -58.5 dbm



第7図 プロフィール略図
Fig.7. Simplified Profile of the Route

(B) 6,700 Mc (東京送信, 赤城受信)

送信機出力: 17.8 dbm, 自由空間損失: 149.8 db,
送受信空中線利得: 39 db, 饋電線および不整合損失合計: 5.2 db, 赤城受信電力: -59.2 dbm

(C) 2,680 Mc (赤城送信, 東京受信)

送信機出力: 28.45 dbm, 自由空間損失: 141.84 db,
送受信空中線利得: 25.2 db, 饋電線損失および不整合損失: 0.9 db, 東京受信電力: -63.9 dbm

[IV] アンテナハイトパターン

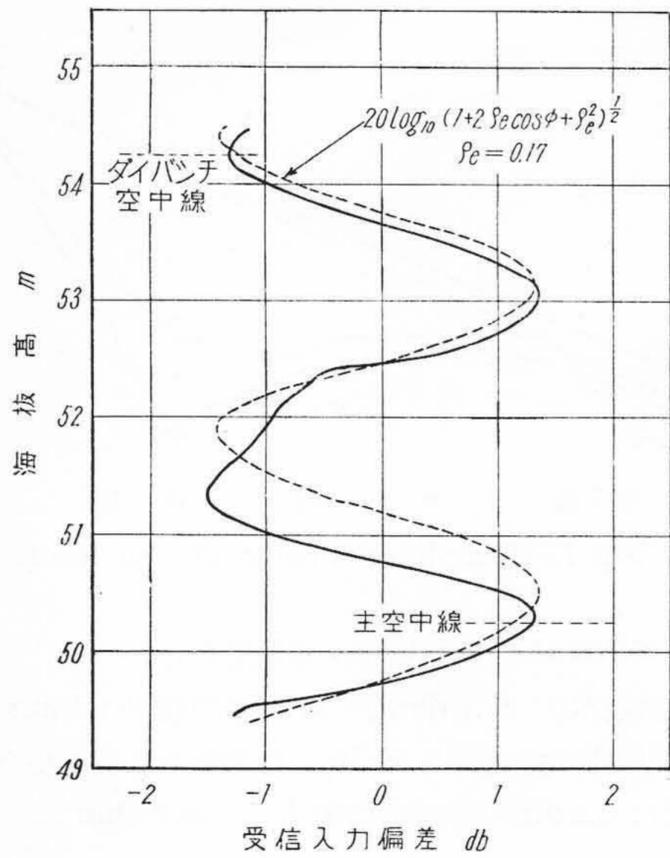
(1) 一般的特性

マイクロ波伝播において一方のアンテナ位置を固定し、相手方のアンテナの高さを地上高より漸次高くした場合、最初は一般に廻折領域であるから、廻折効果に変化して到着電界がきわめて小さい値から次第に上昇し、廻折領域をはずれて干渉領域の範囲に達すれば直接波と反射波の位相差が変化し到着電界強度が変化する。このようなアンテナの高さに対する電界強度の変化を曲線としたものがアンテナハイトパターンである。ある定まつたマイクロ波回線においてハイトパターンをうることは電波通路が廻折領域でもなく、またフレネルゾーンに対して適当なクリアランスを持っているかどうかの確認や、空間ダイバシティ受信を行う場合の空中線位置の決定に使用され、また干渉領域のパターンの振幅より反射点における等価反射係数を知ることにもできる。

λ を使用波長とすれば通路差が $\lambda/2$ の奇数倍となる空中線高の場合は直接波と反射波は同相となり、偶数倍のときは逆相となる。干渉領域において、反射点の等価反射係数を ρ_e 、直接波と反射波の位相差を ϕ とすれば、自由空間値に対しての偏差 E は直接、反射両波のベクトル合成により

$$E = 20 \log_{10} (1 + 2\rho_e \cos \phi + \rho_e^2)^{\frac{1}{2}} \dots (1)$$

なる変化をする。



第 8 図 アンテナハイトパターン
Fig. 8. Antenna Height Pattern

(2) 実 験

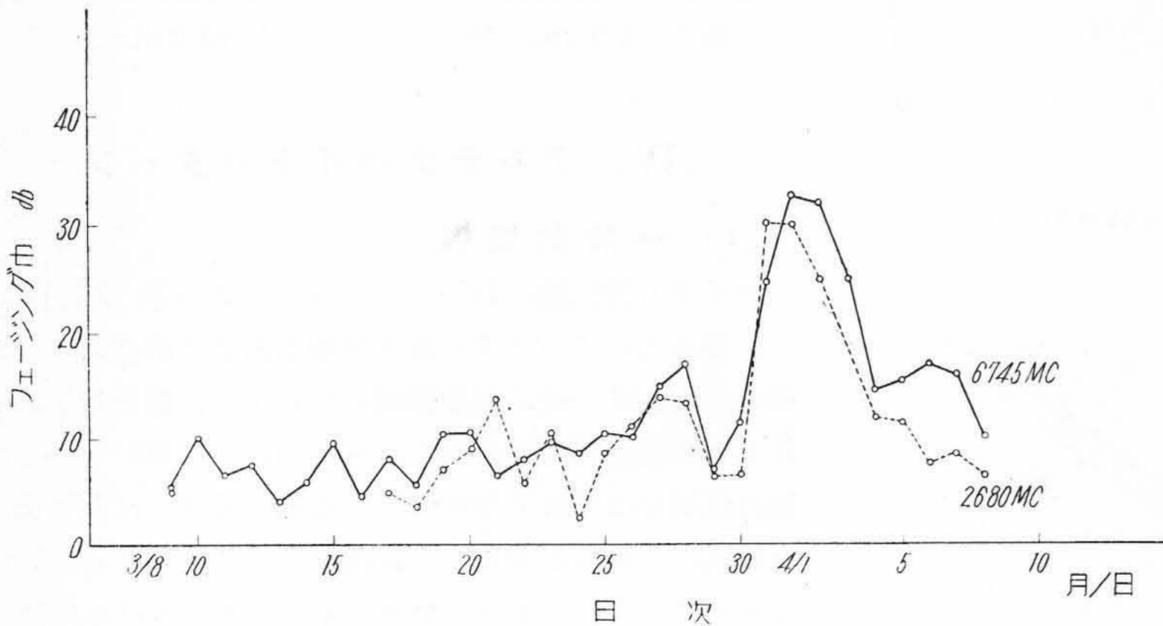
垂直空間ダイバシチ受信空中線の位置決定を主目的として、小型電磁ホーンを [II] (2) (B) のマイクロ波ヘッドに直結し、鉄塔に沿つて上下して測定したハイトパターンを第 8 図に示した。図の点線は $\rho_e = 0.17$ とし (1) 式によりえたものである。図中に示すそれぞれの位置に主空中線とダイバシチ空中線を設置し後述する空間ダイバシチ受信効果がえられた。

[V] フェージング

(1) 概 況

フェージングの分類や、その特性に関してはすでに数多くの論文が発表されていて未だ決定的なものはないが、一応フェージングをシンチレーションタイプ、Kタイプ、ダクトタイプの 3 つの型を想定する態度に準拠して以下述べることにする。

まず概況を知るために 1 日間フェージング幅月変化特性を第 9 図に示した。全般的な傾向として 3 月末近くま

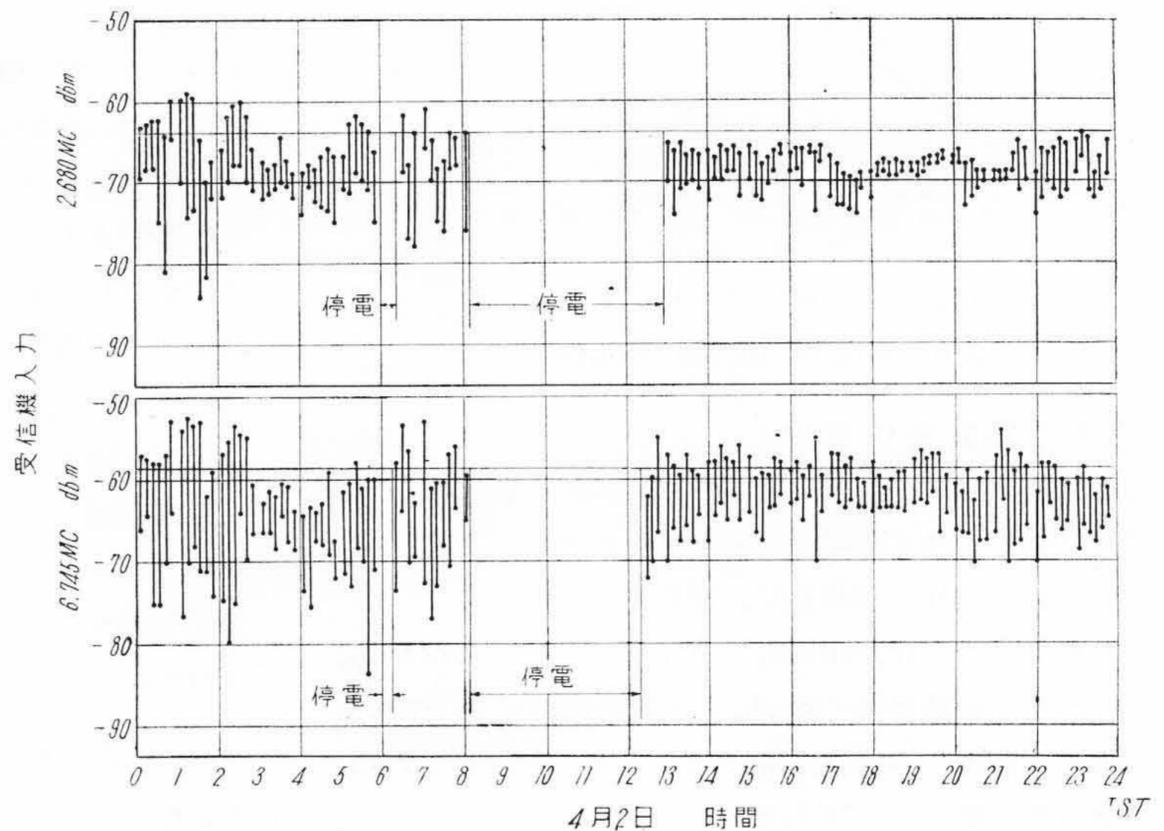


第 9 図
フェージング幅月変化

Fig. 9.
Monthly Variation of Fading Range

第 10 図
10 分間フェージング最大、最小日
変化 (4 月 2 日)

Fig. 10.
Daily Variation of Receiver
Input Level (2nd April)

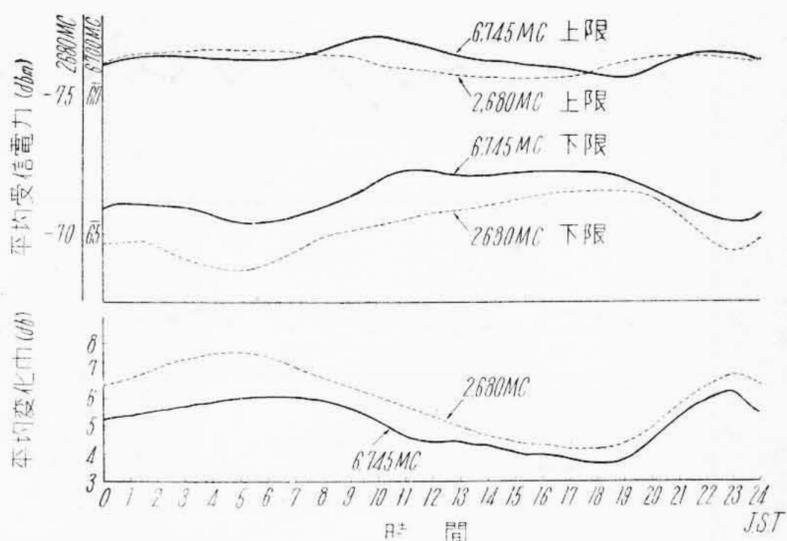


では両周波数とも電界変動が小で3月末より4月上旬実験終了までの期間は電界変動が大きい。変動の大きかった期間の10分間フェージング最大最小日変化の一例を第10図に示した。つぎに特異な記録として6,745 Mcにおける長時間の電界平均レベルの低下のが4/6~4/7の20時間あまりにわたって生じた。第11図に示す平均日変化分布特性によれば両周波数とも昼間に変動幅の最小点があり最高レベルも高く、夜半より早朝にかけて変動幅の最大点があり最低レベルも低く、ダクトタイプフェージングの存在を示している。つぎに全期間の累積分布をレーレ分布が直線となる目盛を持つ図上に画くと第12図となる。図中破線は4/6~4/7に生じた異常な減衰を除外した6,745 Mcの累積分布であり、参考のために電波監理局および東京電力が昭和28年秋期に行つた赤城一日吉回線⁽⁴⁾(本実験回線とはほぼ同様の伝播路を持つ)の分布を併記した。これらの曲線を分布0.1%以上について比較すると、秋季に比して冬期と春期の中間期ともいふべき本実験では、若干フェージングが少く、6,745 Mcの方が2,680 Mcより数dbフェージングが深い傾向にあることがわかる。最もフェージングのはげしかった3/31~4/2毎日の累積分布について検討すると、3/31から4/2に移るにしたがつて分布曲線が直線に近づく傾向を持っていて、フェージングの大部分の時間がKタイプである状態より、ダクトタイプに移行していることが推定される。

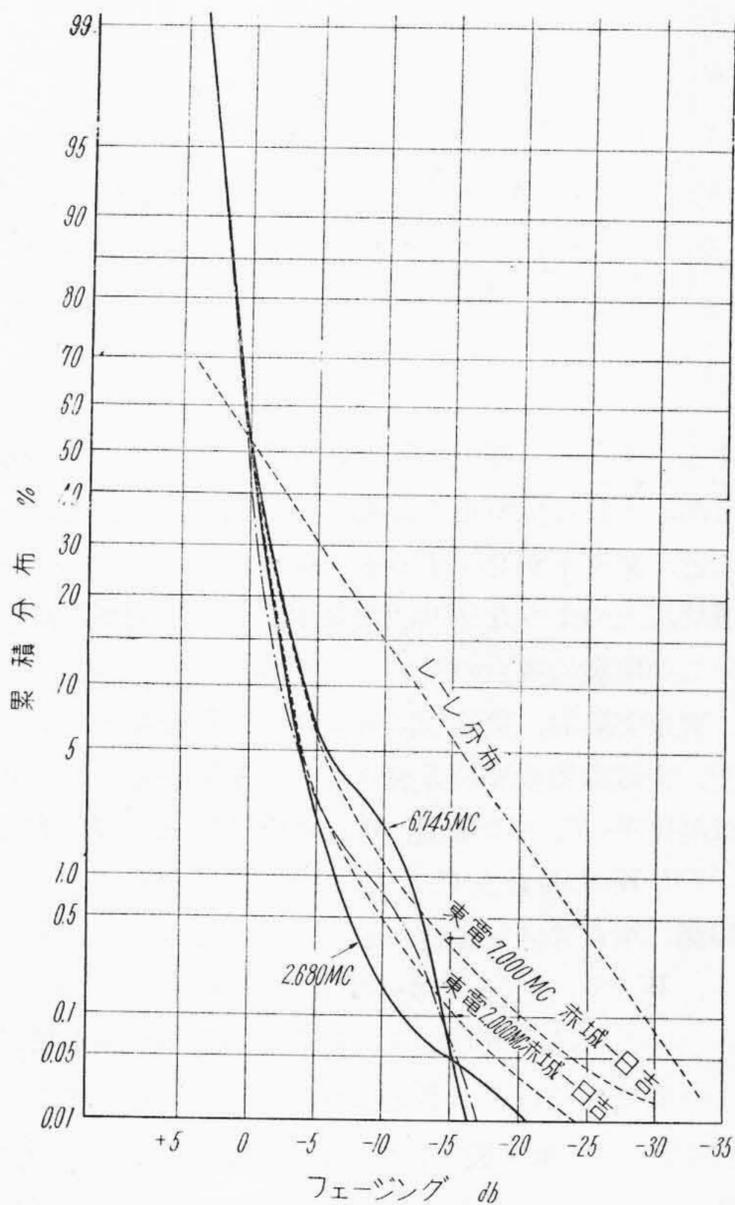
(2) 気象との相関

ある定つた伝播路と空中線が与えられた場合、フェージングの様子は季節、昼夜のべつ、時々刻々の気象状態の変化によつて左右されると考えられるので以下その相関について若干述べる。実際のフェージングはいわゆる前述の3つの型のものが合成されたものが大部分であり、これらのものがそれぞれ単独に存在するチャンスは非常に少ないが、一応大幅なフェージングを与える可能性のあるKタイプとダクトタイプを対象をおき気象との関連を考える。

[III]の(1)に述べたkが変化するために生じるフェージングをKタイプと呼ぶとすれば、この型のフェージングは高さに対する誘電率の変化の傾度が時間的に変動することにより生じると考えてよい。一般に誘電率は蒸気圧力や温度、空気の圧力に比例し、蒸気圧力の変動により最も大きく変化する。そこで高さに対する蒸気圧力の変化の傾度が時間的にはげしく変動するときはKタイプフェージングを生じることになり、その傾度が逆転する場合、すなわちダクトの発生に到ればダクトタイプのフェージングとなる。ダクトタイプフェージングと一般的な気象条件との関係は比較的あきらかにされている

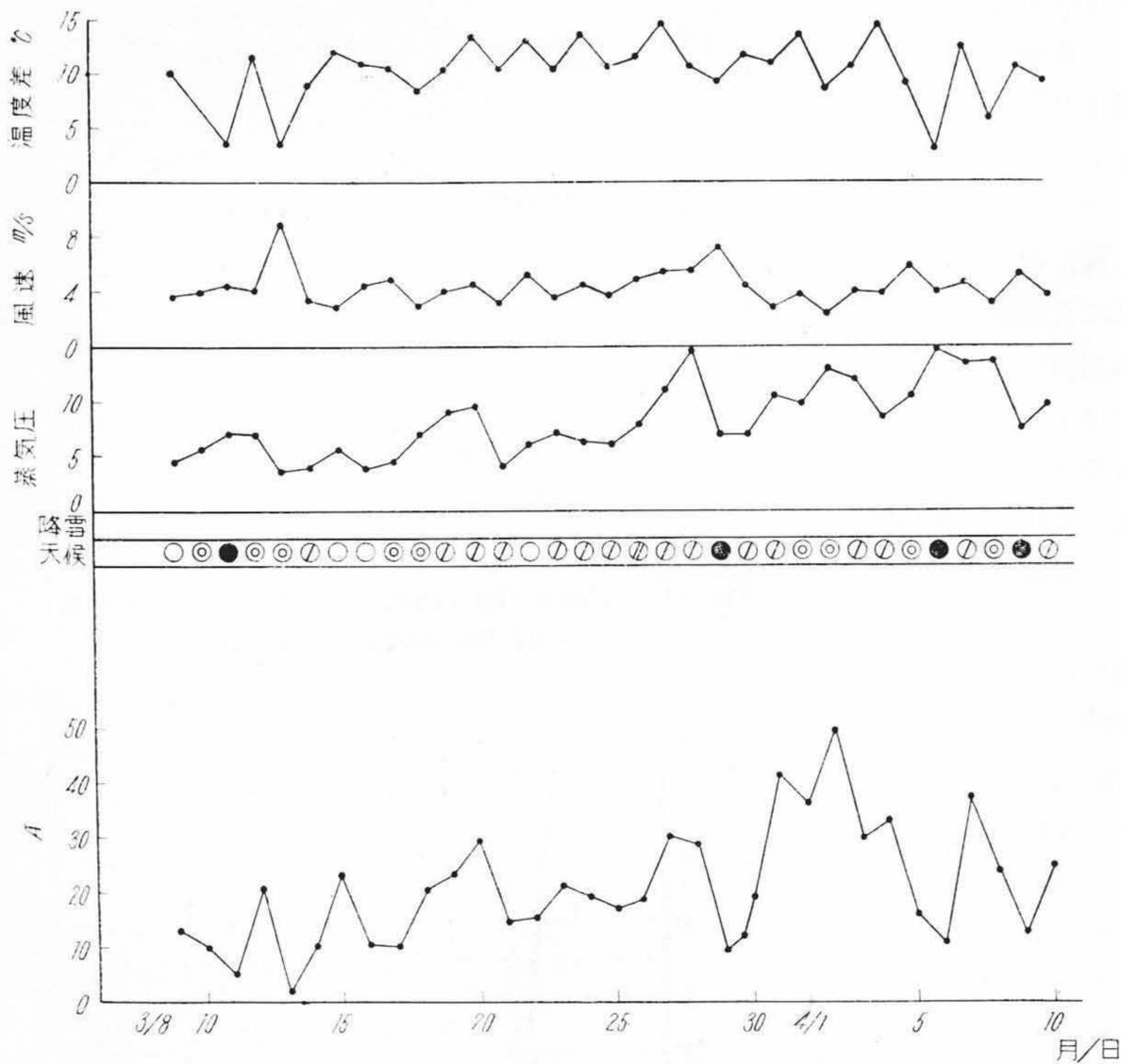


第11図 平均日変化分布特性
Fig. 11. Mean Distribution for Daily Variation of Receiver Input Level



第12図 全期間の累積分布
Fig. 12. Frequency Distribution of Receiver Input Level Over Whole Period

が、Kタイプに対しては単なる風速との関連性が若干わかっているに過ぎない。ダクトが発生する機構として最も頻度の大きいものは大地の夜間冷却により大気が下方から冷却され温度の逆転が生じ、大地が平野でしかも風が弱いとこの逆転層は高空まで発達する。このとき大気の湿度が高いと蒸気圧力の逆転層が生じ強いダクトを発



第 13 図

東京管区气象台地上気象月変化

Fig. 13.

Monthly Variation of Ground Surface Meteorological Data at Tokyo Meteorological Observatory

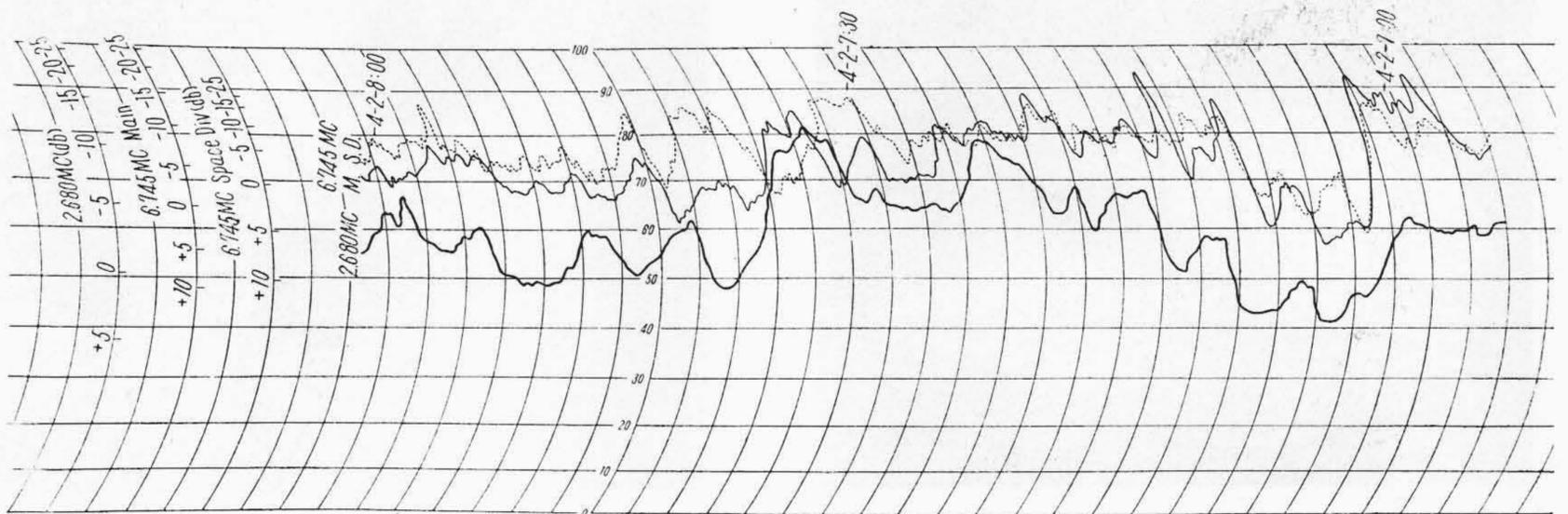
生ずる。すなわち夏期の無風の夜間に多くダクトが発生するが、1日の温度差と湿度の比較的大きい春先にも地表に近くダクトが発生するチャンスが多い。

概略以上のような定性的な見地から以下実測記録により、この実験の場合の気象との相関について考えてみる。東京実験局、東京管区气象台、熊谷測候所、前橋測候所、赤城山実験局の5箇所における地上毎日の最高、最低温度差 T 、平均風速 W 、平均蒸気圧力 P および $A = TP/W$ の変化をグラフにまとめ、その一例として第13図に東京管区气象台のものについて示した。 T が大きく、 W が小さく、しかも P が高い場合、すなわち A が大きいときは大気の高さに対する誘電率傾度が標準状態より偏移していると考えられるから、上述のグラフの A に着目して、第9図との関係について検討を加えれば、総体的に実験後期になるにしたがつて A が上昇しているが、電界の変動幅も同様な傾向を持つていることがわかる。特に東京においては毎日の変化がかなりよく相関している。これは比較的深いフェージングが東京附近の地上に近接した誘電率傾度の急傾斜ならびにその変動によつて左右されていることを意味する。3/31~4/2 のフェージングは A が他に較べて相当大きい値であることと、この期間の日変化特性(第10図参照)が示すように大幅の電界変動に対して平均レベルより高い範囲まで変動がおよんでいることなどから推定すれば、東京附近の地上に

近いダクトの成長によるものであろう。4/6~4/7 の 6,700 Mc 帯に対して特に著しく(空間ダイバシチ受信、および 6,700 Mc 赤城受信も同様) 生じた長時間の減衰に関しては上述の A との相関は特にない。この減衰は測定器材の不良でないことが確認されていて、しかも気象的な特異現象として4/6昼間暴風雨が通過しているが、低気圧の中心が通過の際の特異な主ビームの屈折現象ではないかと思われる。館野高層气象台が測定した高層気象を基にして単位高度変化に対する気圧、温度変化の月変化および前橋と東京の高層および地上の風速変化の月変化についてフェージングとの関係を求めたが、直接には相関性がなかつた。全期間を通じて平均レベルの僅かの低下がしばしばあつたがこれも気象との相関ははつきりしない。これは電波通路のクリアランスが若干不足していたことを意味しているのではないかと考えられる。すなわち廻折性のKタイプフェージングの頻度が高く減衰を与えたと思像される。

[VI] 空間ダイバシチ受信

空間ダイバシチ受信は一般に k の変化やダクトの発生による多数路の伝播の相互干渉によるフェージングに対して効果がある。アンテナハイトパターンの最大および最小の位置は k の変化によつて移動し、その振幅は ρ_e の変化で変動するから、ハイトパターンの山と谷に主空中



第14図 受信記録の1例

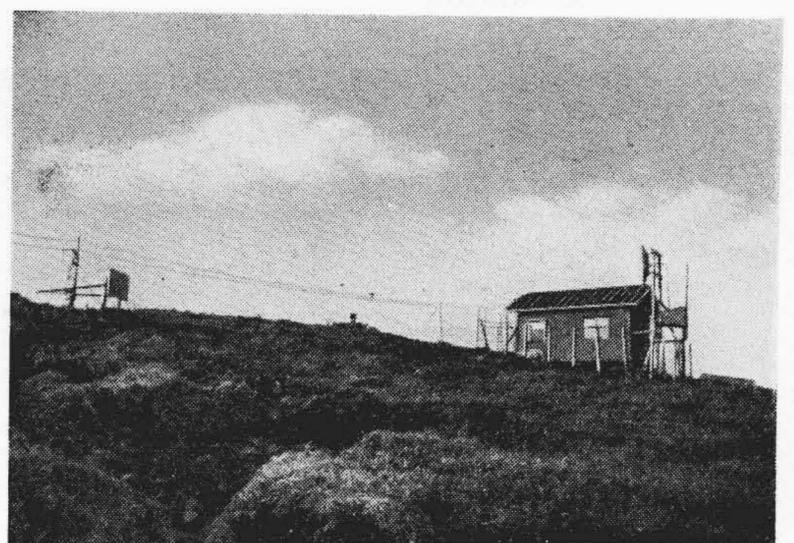
Fig.14. Records of Receiver Input Level

線およびダイバシチ空中線を設置し同時に受信すれば2つの受信機の入力は純粋な干渉性のKタイプフェージングに対しては完全に逆の変化をする筈である。この場合それぞれの空中線の開口直径がハイトパターンのピッチに達する程大きい場合は1箇の空中線ですでに反射干渉波に対してダイバシチ効果があることは勿論である。また他の多数路の伝播、たとえばダクトによつて生じた第2、第3の入射角を持つ干渉波に対してはその角度が比較的大幅に変化する⁽³⁾から上述のような方法ではダイバシチ効果をうるチャンスが少いことが想像される。特にダクトにより直接波が曲げられるような場合についてはあまり意味がない。この実験の記録より空間ダイバシチ効果ありと認められるものを含む記録の一例を示せば、**第14図**のごとくである。この外に効果の認められた記録は二、三あるがそれ以外の時間はほとんど効果は認められなかつた。全期間のフェージング頻度分布1%以下のものに対してダイバシチ効果があつたのはその約1.4%に相当する時間であり、頻度分布5%以下に対してはその約6%となる。この回線は ρ_e が小さく、しかもハイトパターンピッチにほぼ等しい直径を持つパラボラ空中線を使用しているため干渉性Kタイプフェージングに対するダイバシチ効果は実測されないのが当然であり、上述のダイバシチ効果の率はダクトタイプフェージングを対照としたものと考えてよいことになる。

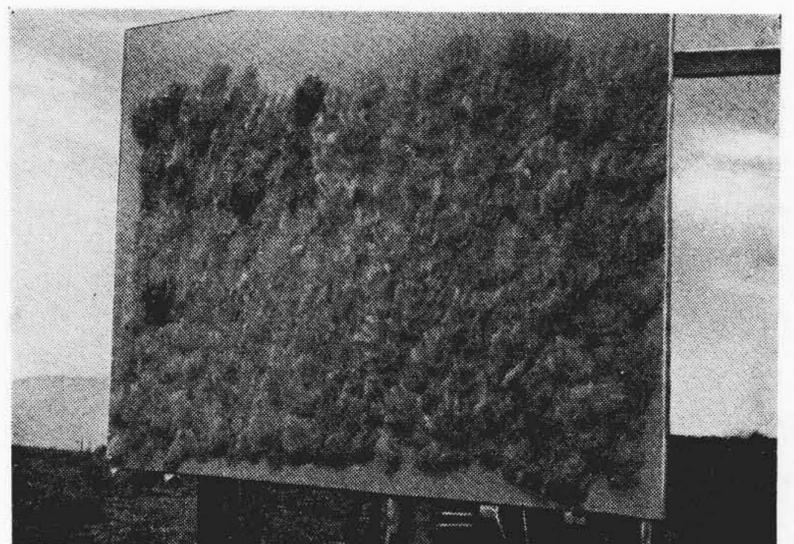
〔VII〕 反射板および空中線に附着した雪の影響

(1) 反射板

反射板の実験は**第15図**の通り赤城地蔵山頂における南向きアンテナを逆に北に向け、一度反射板で反射したビームを送信して行われた。アンテナとの距離は約29mで、反射板における垂直面内の入射角度は約 1° 、水平面内の入射角度は 15° であり、直接送受状態の平均レベルと反射板使用のレベル差は1.6dbである。この結果よ

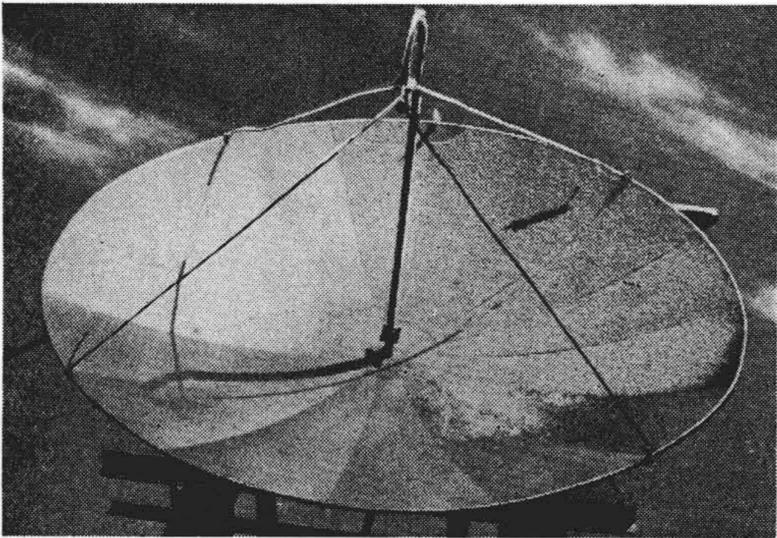


第15図 反射板使用中の赤城局
Fig.15. Parabolic Antenna and Plan Reflector at Akagi

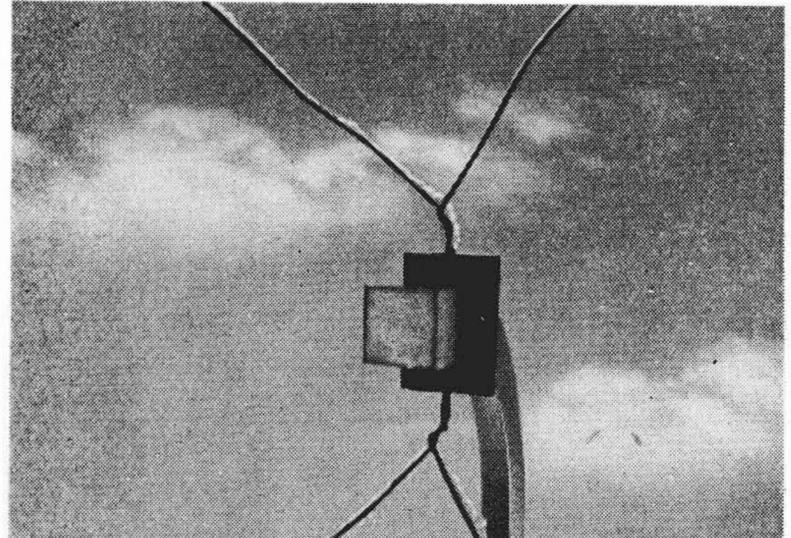


第16図 反射板の雪の人工附着状況
Fig.16. Snow on the Reflector

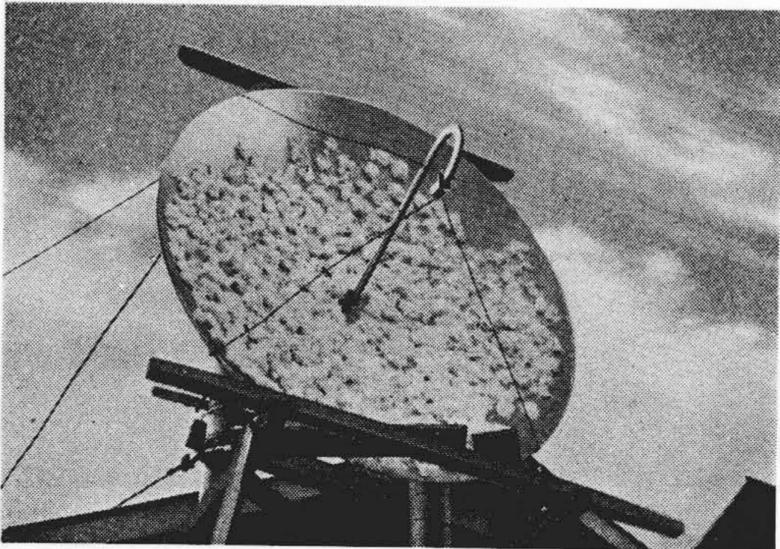
り計算により反射板の能率を求めると80%となる。もともと反射板には雪が附着しにくい、実験期間中降雪が少なかつたので人工的に表面に雪を圧着させてその影響をたしかめた。**第16図**に示すように厚さの平均2~3cmに相当水分の多い雪を圧着させた場合受信レベルは17.5db低下し、雪が溶けるにしたがつてレベルが回復した。こゝに圧着された雪は一般的な自然降雪のふわりとした感じの雪に較べ、水分の多いざらざらした雪で融



第17図 空中線に附着した自然雪
Fig.17. Snow on the Antenna (Natural Condition)



第19図 パラボラ空中線吹付ホーン中の雪
Fig.19. Snow in the Horn of Parabolic Antenna



第18図 空中線の人工附着雪
Fig.18. Snow on the Antenna

けかゝつた氷粒群に近い。低温の冬期に降る自然積雪では反射板、パラボラ反射板ともに大した損失を与えないことが知られているが、このような比重の大きい特殊な雪質では相当のレベル低下を生じ、雪の影響はその雪質によつて大きく左右することがわかる。

(2) パラボラ空中線

パラボラ反射鏡に附着した雪の影響も反射板の場合と同様に考えられる。また反射鏡の中心部は電界が強く縁辺部になるにしたがつて弱くなるから、当然中心部に附着した雪の影響は、縁辺部のものより大きい筈でつぎに示す実験結果もこれを実証している。すなわち第17図のようにこまかい自然雪が吹きつけた場合は受信レベルにはほとんど影響を与えないが、反射板の場合と同様な要領で反射鏡面に雪を第18図のごとく圧着したときは12.6 db レベル低下を来した。

パラボラ空中線の一次輻射器のホーン部(長さ約1波長)に第19図に示すように軽く雪を充填した場合、受信レベルはほとんど変化しないが饋電線の定在波が増加した。受信レベルがほとんど変化しないことは、饋電線導

波管内の反射が左程大きいものではなく、また雪による減衰も僅かであることを意味しているが、定在波の増加は多重通信の場合の変調波の伝送を考えた場合は問題となるのでホーン内の積雪は実際の設備には好ましくないことが推定される。

[VIII] 結 言

以上は冬期より春期への過渡期における僅か1箇月間の結果でありこの結果より年間の確実なフェージングレングスを推定することは困難であるが、マイクロ波としてはかなり長距離スパンと考えられる110 kmにわたる陸上传播の2,600 Mc帯、および7,000 Mc帯による通信は相当高い確率で可能であることがわかり、またKタイプフェージングを目標にして構成された垂直空間ダイバシチ受信のダクトタイプフェージングに対する効果と雪に関する影響の一端を掴みえたが、この結果を一般的な回線設計にも利用するとともに、今後行わんとしているフェージングに関する対策や、雪の影響の定量的な解析に大いに役立つものと信じるものである。

終りに本伝播試験を行う機会を与えられ、御指導を賜つた関東電波管理局、東京電力株式会社、日本放送協会の関係各位、貴重な気象データを提供され御指導をいただいた中央气象台の関係各位ならびに御鞭撻、御協力をえた日立製作所社内の各位および直接実験に協力された諸氏に厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 松尾：マイクロ波伝播 4~7 (昭 28-8 コロナ社)
- (2) 長浜：日立評論別冊 第6号 65 (昭 29-5)
- (3) O. E. De Lange：B.S.T.J. 31 91 (1952)
- (4) 電波監理局，東大生研，東京電力：マイクロ波伝播試験報告 (昭 29-3)